

Universidad de Salamanca

Departamento de Historia del Arte - Bellas Artes

TESIS DOCTORAL



**Selección de las formas
matemáticas en la naturaleza y
su emergencia en la
arquitectura**

Autora:

Mercedes Torrens Bermejo

Codirectores: Eduardo Azofra Agustín y Manuel González de Ávila

2021

TESIS DOCTORAL
Departamento de Historia del Arte - Bellas Artes
2021



**Selección de las formas
matemáticas en la naturaleza y su
emergencia en la
arquitectura**

Firma Autora:
Mercedes Torrens Bermejo

Firma Codirectores:
Eduardo Azofra Agustín y Manuel González de Ávila

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento por su contribución en este proyecto, al codirector Eduardo Azofra Agustín, por brindarme la oportunidad de dirigir mi tesis, así como por su orientación y apoyo personal e institucional a lo largo de estos años de investigación. También al codirector Manuel González de Ávila por su confianza y supervisión, así como por las valiosas palabras que me sirvieron de gran ayuda y aliento. Finalmente quisiera hacer una mención especial a mi familia y amigos por su paciencia y apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PREFACIO

1. RESUMEN	1
2. OBJETIVOS	1
3. METODOLOGÍA	3
4. ESTRUCTURA DEL TEXTO	4

PRIMERA PARTE

Capítulo I

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DEL MUNDO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ORIGEN DE LA FORMA NATURAL	6
2.1. Objetos y fenómenos de la realidad	6
2.2. Identidad de los objetos	6
2.3. La forma de los objetos	8
2.4. Ley Natural	9
2.5. Noción de Individuo	11
2.6. Tipos de Selección	17
2.6.1. La selección natural de las Ideas	22
2.6.2. Los estímulos	23
2.6.3. Revisión a través del “conatus” spinoziano	24
2.6.4. Ley de cambio de la complejidad	28
2.7. Ventaja de seguir siendo: la Función	35
3. PERCEPCIÓN DE LA FORMA	41
3.1. La percepción como primer contacto con la realidad	41

3.2. La percepción selecciona.....	46
3.3. Percibir la forma.....	47
3.4. Percibir la forma matemática.....	49
3.5. Percepción de lo inteligible y de lo bello.....	55
3.6. La mente como instrumento para el conocimiento.....	61
3.7. Evolución del lenguaje simbólico.....	65
3.8. La memoria creadora.....	73
3.9. La evolución del error y del progreso a través del gusto.....	74
3.10. Percibir la arquitectura.....	79

Capítulo II

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN.....	84
---	-----------

4. ESTUDIO EVOLUTIVO DE LA MATERIA.....	84
---	----

4.1. BREVE REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS LEYES EVOLUTIVAS BIOLÓGICAS.....	85
---	----

4.1.1. TEORÍA BIOLÓGICA EVOLUTIVA.....	85
4.1.1.1. Pensamiento preevolucionista.....	86
4.1.1.2. Breve introducción a la teoría de la Selección Natural.....	94
4.1.1.3. Teoría Neodarwinista.....	95
4.1.1.4. Vías de creatividad.....	97
4.1.1.5. Forma y fuerzas mecánicas en las Ciencias Naturales.....	100
4.1.2. TEORÍA TERMODINÁMICA.....	102
4.1.2.1. Mecánica estadística.....	107
4.1.2.2. Hacia la nueva termodinámica.....	112
4.1.2.3. Procesos irreversibles.....	118
4.1.2.4. Sistemas de no equilibrio. La naturaleza aborrece los gradientes.....	121
4.1.2.5. Primera componente de la esencia del cambio: la adaptación.....	124
4.1.2.6. Nueva esencia del cambio: estructuras disipativas.....	125
4.1.2.7. Sistemas alterorganizados.....	128
4.1.2.8. Ciclos.....	131

4.1.2.9. Relojes químicos.....	133
4.1.2.10. Hiperciclos.....	134
4.1.2.11. Autocatálisis ecológica.....	135
4.1.2.12. La segunda ley impulsa la vida según Wicken.....	137
4.1.2.13. El universo de Erich Jantsch.....	139
4.1.2.14. La fluidez de la individualidad.....	140
4.1.2.15. Los hexágonos de Bénard.....	141
4.1.2.16. Función a partir del flujo.....	143
4.1.2.17. Vórtices de Taylor.....	144
4.1.2.18. Ciclones, huracanes y tornados.....	145
4.2. SÍNTESIS DE LA TERMODINÁMICA Y SELECCIÓN NATURAL EN LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA.....	147
4.2.1. Por qué. Termodinámica y entropía.....	147
4.2.2. Cómo y Para qué. La Selección Natural.....	149
4.2.3. Dónde, Cuándo y Con qué material y otras circunstancias. El Oportunismo.....	153
4.2.4. Biodiversidad.....	155
4.2.5. Optimización.....	156
4.2.6. Isoenzimas.....	157
4.2.7. Simplicidad y complejidad.....	157
4.2.8. Evolución independiente del entorno.....	158
4.2.9. Evolución imparcial.....	159
4.2.10. ¿Qué es la vida?.....	159
4.2.11. ¿Cómo empezó la vida?.....	161

Capítulo III

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA COMPLEJIDAD EMERGENTE	164
5. EVOLUCIÓN DEL ESTUDIO DE LA FORMA COMPLEJA... ..	164
5. 1. EMERGENCIA DE LOS PROCESOS ENTENCIONALES	168
5. 2. CONTEXTO CULTURAL... ..	169
5.2.1. Gestándose el cambio. Parte y Todo	169
5.2.2. Substancia versus forma... ..	170

5.2.3. El objetivo de la ciencia: el descubrimiento de las formas	171
5.2.4. El mecanicismo cartesiano	173
5.2.5. Primeras tentativas de la emergencia.	176
5.2.6. El movimiento romántico.....	177
5.2.7. Kant	179
5.2.8. Discontinuidad de John Stuart Mill.....	179
5.2.9. Mecanicismo del siglo XIX.....	181
5.2.10. El Vitalismo.....	181
5.2.11. Aparición del concepto de “emergencia”	182
5.2.12. La Biología Organicista.....	183
5.2.13. La psicología Gestalt.....	185
5.2.14. Física Cuántica.....	186
5.2.15. Ecología.....	188
6. TEORÍA DE SISTEMAS.....	189
6.1. Pensamiento Sistémico Contextual	189
6.2. Pensamiento Sistémico como Proceso.....	191
6.3. Tektología.....	192
6.4. Teoría General de Sistemas	193
7. LA LÓGICA DE LA MENTE.....	194
7.1. Cibernética.....	194
7.2. Teoría de la información.....	197
7.3. Cibernética del cerebro.....	197
8. REVITALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE SISTEMAS.	198
8.1. Pensamiento sistémico aplicado	198
8.2. La aparición de la biología molecular	199
8.3. Retroceso del pensamiento sistémico.....	200
8.4. La importancia del patrón.....	200
8.5. Redes: los patrones de la vida.....	201
8.6. Aparición del concepto de autoorganización.....	202
9. LAS MATEMÁTICAS DE LA COMPLEJIDAD	203

9.1. Ecuaciones diferenciales	205
9.2. Enfrentándose a la complejidad	205
9.3. No-Linealidad	206
9.4. Retroalimentación e iteraciones	207
9.5. Poincaré y las huellas del caos	207
9.6. Geometría fractal	213
9.7. Números complejos	215
10. PRIMERA SÍNTESIS DE IDEAS PARA EL CONOCIMIENTO DE LA EMERGENTE TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD	216
10.1. Autopoiesis: La organización de lo vivo	216
10.2. Nuevos estudios sobre la consciencia	219
10.3. Complejidad y caos	222
10.4. Procesos y partes	223
10.5. Ligadura	224
10.5.1. Hábitos	225
10.5.2. Redundancia	227
10.5.3. Abstracción concreta	229
11. FENÓMENOS EMERGENTES	234
11.1. Criticalidad autoorganizada	234
11.2. Autómatas y vida	235
11.3. Redes sin escala	236
11.4. Leyes Universales	238
11.5. Lenguaje, redes y evolución	239
12. SEGUNDA SÍNTESIS DE IDEAS PARA EL CONOCIMIENTO DE LA EMERGENTE TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD	240
12.1. La racionalidad compleja	241
12.2. Autoorganización, evolución y naturaleza	244

SEGUNDA PARTE

Capítulo IV

13. FORMAS NATURALES MATEMÁTICAS FRECUENTES POR SU FUNCIÓN Y FENÓMENOS EMERGENTES QUE LAS DESARROLLAN.....	247
13.1. LA ESFERA PROTEGE.....	248
13.2. EL HEXÁGONO CUBRE.....	257
13.3. LA ESPIRAL EMPAQUETA.....	268
13.4. LA HÉLICE AGARRA.....	283
13.5. LA ONDA COMUNICA.....	291
13.6. LA PARÁBOLA RECIBE Y EMITE.....	295
13.7. LA CATENARIA RESISTE.....	298
13.8. LOS FRACTALES COLONIZAN.....	299

Capítulo V

14. FORMAS NATURALES MATEMÁTICAS FRECUENTES POR SU FUNCIÓN APLICADAS EN LA ARQUITECTURA.....	305
14.1. LA ESFERA EN:	
14.1.1. LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI.....	306
14.1.2. LA OBRA DE LOS ARQUITECTOS ÉTIENNE-LOUIS BOULLÉE Y JOHN SOANE.....	322
14.1.3. EL PALACIO DE LOS DEPORTES DE ROMA DEL INGENIERO PIER LUIGI NERVI.....	329
14.1.4. EL MUSEO DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA.....	333
14.2. EL HEXÁGONO EN:	
14.2.1. LA OBRA DE FRANK LLOYD WRIGHT.....	337
14.2.2. LA OBRA DE RICHARD BUCKMINSTER FULLER.....	341
14.2.3. LA OBRA “EDENPROYECT” DE NICHOLAS GRIMSHAW.....	347
14.2.4. LA OBRA APARTAMENTOS IZOLA DE OFIS ARCHITECTS.....	349
14.2.5. EL CENTRO NACIONAL DE NATACIÓN DE PEKÍN DE PTW.....	

ARCHITECTS	350
14.3. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN:	
14.3.1. LA LINTERNA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI.....	355
14.3.2. EL MUSEO GUGGENHEIM DE FRANK LLOYD WRIGHT	358
14.3.3. LA OBRA DE ZVI HECKER.....	361
14.3.4. LA TORRE MIRADOR DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA.....	365
14.3.5. “PT BAMBOOPURE BALI” Y PETER KARLE	367
14.3.6. EL MIRADOR VOGELNEST DEL ARQUITECTO PETER KARLE.....	368
14.4. LA ONDA EN:	
14.4.1. LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI.....	370
14.4.2. LA CASA BATLLÓ Y LA CASA MILÁ DE GAUDÍ	373
14.4.3. LAS ESCUELAS PROVISIONALES DE LA SAGRADA FAMILIA DE GAUDÍ.....	383
14.4.4. OBRAS DE LE CORBUSIER.....	388
14.4.5. OBRAS DE ELADIO DIESTE.....	392
14.4.6. EL AUDITORIO Y LA MARQUESINA DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA.....	399
14.5. LA PARÁBOLA Y LA CATENARIA EN:	
14.5.1. LA OBRA DE ANTONIO GAUDÍ	403
14.5.2. LA OBRA DE FÉLIX CANDELA.....	420
14.5.3. LA OBRA DE FREI OTTO.....	429
14.6. LOS FRACTALES EN:	
14.6.1. LA IGLESIA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI.....	442
14.6.2. LOS FRACTALES EN LA CASA BATLLÓ, LA CASA MILÁ Y LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ	457
14.6.3. LAS ESTRUCTURAS DE ROBERT LE RICOLAIS.	461
CONCLUSIONES.....	474
BIBLIOGRAFÍA.....	485

PREFACIO

1. RESUMEN

Alentados por el estímulo de tratar de comprender la realidad y las formas organizadas que proliferan en ella emergiendo bellamente en la arquitectura, emprenderemos, con la elaboración de esta tesis, la búsqueda de una teoría de la forma que justifique su origen y progreso.

Partiremos de la lógica ontológica de que “lo que existe, existe porque ha superado alguna clase de selección. Superar una selección equivale a superar una prueba de compatibilidad con el resto de la realidad”¹. [...]. “Sólo se puede permanecer si primero se emerge [...]. En otras palabras, de lo que accede a la realidad se (re)selecciona continuamente aquello que puede permanecer”². Con el fin de proyectar este esquema conceptual, comenzaremos eligiendo la definición de conceptos idóneos como el de función que, en el sentido amplio de ganancia, nos ayuden a justificar la emergencia y perseverancia de las formas ordenadas en la naturaleza, para así poder afirmar que, como seres cultos que formamos parte de la cadena evolutiva, emergemos en la realidad en tanto individuos complejos dotados de pensamiento abstracto. Nos autoorganizamos anticipando la incertidumbre del entorno del que formamos parte, seleccionando perceptivamente formas frecuentes, que adoptan configuraciones ordenadas geoméricamente por su idoneidad funcional; y, aplicándolas en evocadoras construcciones arquitectónicas, disipamos eficazmente entropía. De tal forma que, siguiendo este patrón hologramático que ordena el mundo, logramos permanecer y perseverar.

2. OBJETIVOS

Los principales objetivos a alcanzar a lo largo de esta tesis pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

¹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas. O cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Barcelona: Tusquets, 2007, p. 25.
² *Ibidem*, p. 60.

- Presentar nuestra propuesta de teoría de la forma (desde una concepción tanto cuantitativa como cualitativa), que justifique la frecuencia de la presencia de ciertas formas ordenadas matemáticamente en la realidad, habiendo superado la selección fundamental, natural y/o culta por su idoneidad funcional.
- Establecer, mediante la ampliación del estudio historiográfico de las principales leyes intervinientes, una base teórico-científica para nuestro discurso.
- Desarrollar una metodología reflejo de la dinámica compleja emergente que pretendemos explicar, ligando lo estructural u organizacional con lo histórico y evolutivo, de modo similar a como toda organización viviente muestra una irreversibilidad de flujo energético, posibilidad de organización y, sobre todo, de recursión, es decir, de autoproducción de sí.
- Establecer que, en el origen, se encuentra el principio de la emergencia, también en el caso local de las formas matemáticas frecuentes, cuya propiedad funcional nace de la organización del conjunto, del Todo, dando lugar a la inteligibilidad, al conocimiento. Análogamente, el conocimiento no sufre interrupciones, ya que, conociendo las partes, conocemos mejor el Todo; pero el conocimiento del Todo vuelve a permitir conocer mejor las partes. Se trata, aquí, de una visión “fractal”: al igual que sucede en la organización biológica de los seres multicelulares, en que cada célula contiene la información del todo, pretendemos hacer ver que, en la realidad culta, las formas que se desarrollan en muchas obras arquitectónicas siguen este mismo patrón iterativo entre las partes y el conjunto.
- Defender la idea de unidad del ser culto como observador de la realidad y como creador de la misma, como ser que percibe y que concibe. Como individuo perseverando en su ser, creándose a sí mismo y a su entorno, autoorganizándose para sortear la incertidumbre del medio, al lograr cambiar para permanecer.
- Pretendemos, tras este periplo, haber captado la esencia de la realidad compleja en que vivimos, mediante la que poder finalmente dar una explicación evolutiva última de su dinámica emergente, en la mente humana revelada, que proyecta cambiantes formas arquitectónicas de profusa creatividad. Conforme a lo apuntado, modestamente aspiramos a entendernos como entes sometidos al flujo del conocimiento transdisciplinario en la búsqueda de una teoría global de la organización, a sabiendas indefinible, pero confiando en que, como resultado de dicho proceso, gestaremos una investigación doctoral.

3. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que en nuestra investigación se relacionan Arte y Ciencia, la metodología a seguir no se apartará de esa idea. Adoptando un método de tipo inductivo-deductivo pretendemos, mediante la observación de formas naturales frecuentes, deducir las funciones que cumplen, para mostrar cómo el hombre, al percibir las y comprenderlas o no, abstrae las leyes que las rigen, empleando la matemática con el fin de reproducirlas geoméricamente en sus manifestaciones arquitectónicas. Así, guiados por la dinámica actual de la ciencia, que poco a poco se va desmarcando de su tendencia mecanicista, eminentemente estática, y analíticamente simple, hacia una más cercana a la realidad, basada en lo dinámico, mutable, indeterminado y complejo, completaremos esta afirmación, intentando dotarla de un principio y de un fin evolutivos.

Sabiéndonos sistemas abiertos, inmersos en la realidad compleja que nos envuelve, y sometidos a las fluctuaciones del medio, para desarrollar dichas ideas, haciéndolas inteligibles, clasificaremos nuestro discurso en tres grandes grupos, adoptando una metodología ordenada en espiral fluyente, con un punto de partida histórico, pero sin término, pues cada espira del mismo continuamente regresa a reafirmar la esencia originaria del principio. De suerte que, conforme a lo expuesto, y atendiendo a la sentencia de Pascal, “tengo por imposible concebir las partes al margen del todo, tanto como conocer el todo sin conocer particularmente las partes”³, partiremos de la exposición como “Todo” de nuestro sistema de ideas (hipótesis de teoría de la forma). A continuación estudiaremos los elementos intervinientes, los cuales, interaccionando junto a su contexto, logran perseverar en progresivo y complejizante ascenso, adoptando creativos patrones tridimensionales visibles de organización, emergiendo en diferentes sustratos inertes, vivos y cultos, los cuales, por su funcionalidad, percibimos inteligibles, generando un bucle disipativo y creador entre la sorpresa, la intuición y el deseo de su conocimiento:

- ❖ El Todo: Síntesis de Ideas como propuesta de teoría de la forma.
- ❖ Las partes:
 - Leyes intervinientes y su historia evolutiva.

³ MORIN, E. “La epistemología de la complejidad”. *Gazeta de antropología*, N.º 20, 2004, p. 2.

- Estudio de la forma compleja y su historia evolutiva:
 - como substancia (materia, estructura y cantidad);
 - como forma (patrón, orden, cualidad) de organización.
- ❖ Interrelación del Todo y las partes.
 - Formas matemáticas frecuentes por su función.
 - Obras arquitectónicas en las que dichas formas emergen en creativa complejidad organizacional.

4. ESTRUCTURA DEL TEXTO

El esquema general del texto se distribuye en dos partes principales, la primera teórica y la segunda aplicada.

La Primera parte se estructura a su vez en tres capítulos que abordan el conocimiento y la complejidad del mundo.

- El Capítulo I consiste en una exposición que, mediante la relación de fuentes de tipo psicológico, filosófico, científico e historiográfico, nos ayude a fundamentar la teoría que pretendemos justifique la emergencia de formas ordenadas en la naturaleza, que por ser ideales para su función, son susceptibles de superar la selección cultural y matemática.

- En el Capítulo II se hace una revisión histórica de las teorías evolutivas de la Termodinámica y de la Selección Natural, que restringen la emergencia de las formas ordenadas de la naturaleza, la cual debe ayudarnos, en última instancia, a fundamentar las ideas y términos empleados en la exposición del capítulo anterior.

- En el Capítulo III se realiza una revisión historiográfica del estudio de la forma hasta llegar al concepto actual de patrón de organización, bajo el paradigma sistémico en forma de red, dentro de las ciencias de la complejidad, por el que se piensa, a día de hoy, que se rigen multitud de objetos y fenómenos de la realidad observada.

La Segunda parte supone una descripción de las formas geométricas más frecuentes en la naturaleza. De modo comparativo, se pretende demostrar la emergencia de las mismas en algunas obras arquitectónicas humanas, relevantes a lo largo del tiempo y de la Historia del Arte, como manifestaciones tecnológico-artísticas, ejemplo de la evolución de la materia, y fruto del gozo que, por su comprensión, y por la captación de su belleza, experimenta el hombre al crearlas y percibir las.

PRIMERA PARTE

Capítulo I.

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DEL MUNDO

1. INTRODUCCIÓN

En esta primera parte de nuestro proyecto trazaremos un esquema conceptual que fundamente como surgen las formas en la realidad, para, posteriormente, en la segunda parte del mismo, defender su emergencia en la arquitectura.

Siguiendo el *patrón* evolutivo de los seres, entendidos como concentración de materia, energía e información, estableceremos la selección como filtro determinante en la configuración de la realidad, de modo que, de todo lo que accede a ésta, sólo logra permanecer aquello que supera un tipo de selección. La selección favorece lo que permite seguir perseverando. En los seres inertes se selecciona lo que permite seguir estando, resistiendo a la incertidumbre, buscando la estabilidad. En el mundo vivo la selección prima lo que permite seguir viviendo, modificando la incertidumbre, la movilidad, haciendo posible la adaptabilidad y la capacidad de evolucionar. En el mundo culto, cuyo sujeto seleccionador es la mente, mediante la inteligencia abstracta se anticipa la incertidumbre, y se es capaz de intuir y comprender. Superar estas selecciones supone aumentar su independencia frente al devenir.

Al final de este trayecto, una mente humana se pregunta cómo evoluciona la materia ordenada, origen de este proyecto de investigación. Y es que los humanos, como individuos vivos, dotados de mente abstracta, nos anticipamos al devenir, intentando comprender la realidad circundante. Dotados de filtros sensores seleccionamos la información que la percepción de la realidad nos proporciona. Así, discernimos que la propia forma de los objetos varía su frecuencia en pos de una función que propicie la permanencia de los mismos en la realidad.

Una vez planteado este esquema conceptual, pretendemos cualificar a la percepción visual como mecanismo de selección cultural. La mente, a través de la percepción, dirigida por estímulos como la *inteligibilidad* y la *belleza*, busca formas ordenadas frecuentes y sus funciones en la realidad, con las que posteriormente elaborar proyectos (arquitectónicos) en las que éstas emerjan y, con ello, *perseverar*.

2. ORIGEN DE LA FORMA NATURAL

2.1. Objetos y fenómenos de la realidad

La realidad se constituye en objetos y fenómenos. Los objetos que ocupan el espacio se componen de materia, energía e información, mientras que las variaciones temporales de los objetos son los fenómenos. Según la cosmología, nada más crearse la realidad se originó el tiempo. Enseguida comenzó la transformación de la realidad y la propagación del espacio y del tiempo. Poco después de nacer el tiempo, la cantidad de materia se estabilizó. Desde ese instante, la materia, la energía y la información no han cesado de ir de un objeto a otro, cambiando su identidad. Los objetos cambian de materia, de energía y de información. “Todo fluye”⁴. Todo lo que empieza, termina o se transforma.

En un principio la realidad era una especie de mezcla más o menos homogénea de quarks. Pero si observamos a nuestro alrededor, percibiremos que las cosas son más complicadas. Existen objetos constituidos fundamentalmente de materia (un grano de arena), otros de energía (un relámpago), y otros de información (un segmento de ADN). Lo que más poseemos es tiempo, el cual también acaba pasando. Con el transcurrir de éste, los objetos que emergen se transforman y desaparecen, “engrosando el gran catálogo de objetos del mundo, de objetos que en algún momento accedieron a la realidad”⁵.

2.2. Identidad de los Objetos

“En rigor y en límite un objeto sólo es idéntico a sí mismo”⁶. El conjunto de propiedades que diferencian un objeto de otro constituyen su identidad. Cualquier objeto supone una diferencia entre él y el resto del mundo. Podemos decir que todo objeto posee tres conceptos que lo definen: “su interior, su exterior y la frontera que separa lo uno de lo otro. No importa cuán compacta, continua, conexas o nítida sea esa frontera. Propiedades típicamente interiores son, por ejemplo, la *estructura* o la *composición*;

⁴ CAPRA, F. *La trama de la vida*. Barcelona: Anagrama, 1999, p. 62.

⁵ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 19.

⁶ *Ibidem*, p. 22.

propiedades exteriores son la *inteligibilidad*, la *frecuencia* de su presencia, la *diversidad* o *la función*; y propiedades de la frontera son la *forma* o *el tamaño*⁷.

Las propiedades de los objetos pueden ser más o menos objetivas dependiendo de cómo se definan o midan. Así, variarán según sea la calidad del estímulo, del receptor y de su capacidad cognitiva para interpretar la información que se desprende del objeto. A continuación, hablaremos de algunas propiedades que nos pueden ayudar a diferenciar un objeto de otro, y de la realidad que los circunda.

Por ejemplo, la *estructura* tiene relación con una fragmentación (significativa) en partes (también significativas) del objeto. Cada fragmentación define un Todo que surge de la interacción de las partes. Dicha interacción determina que el Todo no sea simplemente la suma de las partes. Conocer la estructura de un objeto ayuda a conocer su historia. Por ejemplo, un corte en el terreno permite a un geólogo obtener muchos datos sobre la constitución y sedimentación de materiales en sus distintos estratos para poder reconstruir su pasado formativo. Digamos que un átomo, otro ejemplo, tiene menos estructura que un cerebro. Para existir, todo objeto debe tener una partición interna, una estructura que nos hace intuir que se puede medir.

La *composición* también nos aporta comprensión. Según sea la distribución de material, por ejemplo, en los átomos o las moléculas de que se componen las partes de un objeto, y en sus interacciones, se determinarán transportes físicos y transformaciones químicas relevantes.

El *tamaño* se identifica con el espacio que encierra la frontera con el exterior de un objeto. Todo objeto sólo es viable dentro de un rango de tamaños determinado por la realidad en que se encuentra inmerso. Por ejemplo, no existe una hormiga mayor que una galaxia. Siempre hay un límite por arriba y por abajo.

“La *forma* de un objeto es una propiedad de la superficie frontera que separa su interior de su exterior. La forma es una profunda propiedad superficial de un objeto”⁸. Hay objetos que, aunque no pertenecen a una misma categoría, convergen en una misma forma.

Como ya introdujimos en este apartado, todas estas propiedades, junto a las que diferencian a un objeto de su contexto (su frecuencia, diversidad o función entre otras), nos aportan inteligibilidad sobre el mismo. Si la identidad de dos objetos coincide fielmente, se trata entonces del mismo objeto. Lo que comparten objetos de una especie

⁷ *Ibidem*, p. 20.

⁸ *Ibidem*, p. 22.

análoga determina lo que llamaremos *clase*. Clasificar es un modo de reunir, de catalogar. Por ejemplo, un ñu es un objeto inteligible dentro de su manada, como miembro de una especie de mamífero artiodáctilo, de la familia de los bóvidos, en la clasificación de Linneo. Luego clasificar es un modo de comprender. Al clasificar, deducimos otras dos propiedades que relacionan al objeto con su entorno, la *frecuencia* y la *diversidad*. La frecuencia es la cantidad de individuos de una clase. En un paisaje, un tipo de planta puede ser rara, y en otro frecuente. La diversidad es una propiedad que ordena las distintas clases y la frecuencia de su disposición por los objetos. La diversidad máxima corresponde al máximo de clases equitativamente distribuidas. Un coche o un libro son muy frecuentes en el mundo artificial de los objetos. Sin embargo, muy improbables de encontrar de forma espontánea en la naturaleza. De la misma manera, la diversidad mínima es muy poco frecuente que se dé espontáneamente en el mundo natural con relación a todos los individuos de una misma clase, como, por ejemplo, los pupitres de un aula o las flores de un campo de azafrán.

Todo proyecto viene precedido de la elección de sus términos y de la definición de sus conceptos. En principio, la propiedad que nos interesa definir en el desarrollo de nuestro esquema conceptual, para comprender el mundo, es la forma. Si existir en la realidad supone haber superado alguna clase de selección, y superar una selección supone salvar una prueba de afinidad con la realidad, denominaremos *función* a la capacidad de emerger y permanecer en la realidad de las formas. Pero no se trata del concepto función del lenguaje común, ni siquiera del lenguaje matemático, sino que lo emplearemos en un sentido más amplio, en el que aquel *fluye* de pensar la realidad.

2.3. La forma de los objetos

Como hemos dicho, la forma es, junto al tamaño, una propiedad frontera de los objetos. Por medio de ella obtenemos información del aspecto de lo que nos rodea. Nuestro entorno cotidiano está constituido por una multitud de elementos, de contextos naturales y artificiales que tienen distintas envolturas físicas, “distintos límites o contornos, es decir, distintas formas”⁹.

⁹ TARTARKIEWICZ, W. *Historia de seis ideas. Arte, belleza, forma, creatividad, mimesis, experiencia estética*. Traducción de Francisco Rodríguez Martín. Madrid: Editorial Tecnos, 2001, pp. 254-255.

La forma determina la identidad de cada cosa, es una conjunción de puntos, de líneas, de planos, de texturas y de colores que originan la apariencia de algo concreto, y que lo diferencian de otro objeto del gran catálogo.

Gracias a la forma podemos comprender mejor la realidad. Por ejemplo, no existen planetas cónicos; si observamos la forma de un animal, podremos discernir su manera de desplazarse. Del mismo modo, la diferencia de forma entre una tijera y un vaso indica cuál es más apropiado para contener un líquido, y cuál lo es para cortar. Además, cada uno de ellos nos dice algo de su individualidad, pero también del género de cosas al que pertenecen.

2.4. Ley Natural

El conjunto de leyes fundamentales que restringen las demás leyes de la naturaleza será la *Constitución* de la realidad. Al hablar de la Constitución de la realidad estamos haciendo alusión a su estructura. Toda ley como mínimo restringe. La diversidad, *creatividad* y mutabilidad que exhibe nuestro mundo se debe a que no todo vale. Alguna ley debe de estar restringiendo lo que puede o no acceder y permanecer en la realidad, ya que, si todo fuera ley, o si careciera totalmente de ella, no existiría la realidad. Un paso más allá ocasionaría que hubiera una única solución para existir. En realidad, esta idea es en la que se ha estado fundamentando la ciencia determinista hasta hace bien poco, basándose en obligaciones que no dejan margen para elegir, ni para el *azar*, donde cualquier evolución del mundo es predecible. Acreditadas disciplinas físicas como la mecánica de Newton, o la termodinámica clásica, entre otras muchas, adoptaban este principio. Sin embargo, hoy sabemos que “una ley en la naturaleza es más una prohibición que una obligación”¹⁰.

Las leyes deterministas describen fenómenos de inusitada simplicidad, donde el *tiempo* es una ilusión. Ahora bien, la realidad “es una trama de evoluciones posibles, [...] de procesos históricos, plagados de *bifurcaciones*, que caminan hacia el futuro”¹¹. En este sentido, “el determinismo está en las leyes, pero en los nudos de la inmensa red de leyes que es la ciencia, laten eternamente fluctuaciones dispuestas a crecer y participar de la

¹⁰ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 28.

¹¹ *Ibidem*, p. 31.

aventura de la evolución”¹². Por consiguiente, la noción de realidad que nos interesa es aquella que, según autores como Darwin, Borges o Boltzman, entre otros, aun con limitaciones y cierta dosis de azar, existe con el consentimiento de la ley. Una realidad donde el azar puede llegar a intervenir en la *evolución* de las cosas. Una realidad con cierto derecho a la *contingencia*, donde se puede y se debe elegir. En definitiva, una realidad donde los términos azar, complejidad y esencia de cambio son protagonistas. Como ejemplo de esta visión del mundo, haremos un recorrido por las leyes fundamentales de la física, donde la construcción de una población de objetos simples es la forma más sencilla de constituir una complejidad. Así, de un átomo pasamos a un gas, de la mecánica de una partícula pasamos a la teoría cinética de los gases, y de la mecánica estadística a la termodinámica (ciencia que más adelante desarrollaremos en profundidad) y sus principios. El primero de ellos habla de la conservación de la energía, de modo que un proceso puede transformar energía para evolucionar de múltiples formas, siempre que la energía global ni aumente ni decrezca. El segundo principio establece que, para un sistema aislado (que no intercambia materia ni energía con el exterior), en cualquier proceso de transformación de energía se genera *entropía* en el tiempo (a diferencia de la energía, la entropía es una magnitud que no tiene por qué conservarse; de hecho, el segundo principio anuncia que esta no para de generarse en el universo), incrementándose el desorden del sistema hasta llegar a un punto de equilibrio, de máximo desorden, donde ya nada más puede ocurrir. Por consiguiente, es necesario que cualquier proceso respete el primer principio, pero para llegar a ser real también ha de cumplir el segundo. Empecemos imaginando un suceso provocado artificialmente, el comportamiento de la energía en un recipiente sellado y comúnmente estudiado en la termodinámica clásica, denominado “caja adiabática”, y que explica la ley “cero” de la termodinámica. Se trata de un sistema que, llegado el punto en que ya no hay cambio, ha alcanzado el equilibrio térmico. En este caso, cumplir la ley no es opcional. Cualquier cambio irreversible (es decir, cualquier cambio real) hará aumentar la entropía.

En segundo lugar, ahora alejándonos del límite determinista, pensemos en un ratoncillo de campo que acaba de salir de su madriguera, y se percata de que un zorro anda merodeando en busca de una presa. La Constitución de su realidad restringe que pueda salir volando, o que él atrape al raposo. Sin embargo, sus posibilidades de sobrevivir aún son muchas: por ejemplo, puede volver a refugiarse en su madriguera, o

¹² WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets, 1994, p. 65.

salir corriendo en dirección contraria al viento, para dificultar que el depredador perciba su presencia, y finalmente lograr huir, etc. De las infinitas opciones posibles para sobrevivir, ocurrirá la que el ratón decida. Luego, en este caso, acceder y permanecer en la realidad requiere la posibilidad de elegir, de seleccionar.

Imaginémonos ahora el caso más *complejo* de los tres, todavía más alejado del límite determinista, donde un individuo supuestamente dotado de inteligencia abstracta se pregunta si su proyecto de tesis cumplirá los requisitos de creatividad e innovación. En este último caso, el individuo puede *anticipar la incertidumbre* y obrar en consecuencia. En definitiva, teniendo en cuenta estos tres ejemplos en complejidad creciente, podemos aseverar que no toda selección permite acceder ni permanecer en la realidad con igual probabilidad.

En resumen, la idea de “ley” es inherente a la naturaleza, pues permite que el mundo sea como es, y no de otra manera. Pero en la naturaleza hay cierto margen para la contingencia, ya que las prohibiciones son más una restricción que una obligación, y permiten que se dé la selección. En ella se basa la creatividad de la evolución biológica, el azar o la incertidumbre. Según la teoría de la evolución de Darwin¹³, “en la naturaleza la selección natural es la que selecciona”¹⁴. “En la selección artificial o cultural [...] selecciona el seleccionador”¹⁵. Del mismo modo, en palabras de Wagensberg, “la prohibición es un buen estímulo para la creatividad humana. Un mundo de obligaciones, por el contrario, deja a nuestro cerebro sin trabajo”¹⁶.

2.5. Noción de individuo

Al fijar la atención en un objeto situado frente a mí, por ejemplo, un árbol en un bosque, podré decir que se trata de un fragmento de realidad separado de otro. Las leyes fundamentales que regulan el funcionamiento de uno en principio son similares a las del otro. Sin embargo, si me acerco a ese árbol lo suficiente es posible que la realidad que observo ahora esté constituida de microorganismos adheridos al tronco del árbol. Si

¹³ Charles Robert Darwin (1809-1882). Naturalista inglés que postuló que las diferentes especies de seres vivos evolucionan con el tiempo, mediante el proceso de la selección natural a partir de un antepasado común. Demostraba en el año 1859, en su libro *El origen de las especies*, que la vida es una lucha permanente por la existencia, en la que al final subsisten tan sólo aquellas especies que consiguen adaptarse mejor al medio en que viven. La selección natural no permite que a la larga sobreviva lo ineficaz. Sólo permanecen las formas que mejor se adaptan a su contexto. En la actualidad supone la base de la síntesis evolutiva moderna.

¹⁴ DUTTON, D. *El instinto del arte. Belleza, placer y evolución humana*. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica, 2010, p. 125.

¹⁵ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 31.

¹⁶ *Ibidem*, p. 35.

continúo acercándome, esta vez con un instrumental adecuado, podría estar frente a una realidad cuyo objeto definitorio sean las moléculas, y si sigo aumentando el zoom pasaré a ver solo átomos o partículas. Ya lo declaró en su famoso poema científico *De rerum natura* el poeta y divulgador de la ciencia Lucrecio, proponiendo “que todas las cosas visibles eran manifestaciones de la interacción de partículas invisibles”¹⁷. En definitiva, tanto si me acerco como si me alejo, el árbol acabará saliéndose de la escena. Intuimos entonces que existe más de una realidad. Por esta razón, elegir el nivel de observación implica elegir también una realidad con su propia Constitución. La realidad puede expresarse desde varios niveles distintos de observación, con leyes diferentes. Por consiguiente, para empezar, deberemos de elegir desde qué nivel de observación queremos comprender la realidad.

Por otra parte, las leyes que regulan el movimiento de un tren no son las mismas que las que regulan el movimiento de un electrón. Sin embargo, sin electrón no hay tren. Se trata de dos fragmentos de materia uno dentro de otro que, a pesar de compartir cierta región del espacio y el tiempo, están regulados por leyes distintas. En principio, estas dos Constituciones de la realidad no son iguales. “La ciencia ha desarrollado diferentes disciplinas para estas clases de realidad. La ciencia no renuncia a conectar unas con otras. Se trata incluso de una de las grandes ambiciones: la búsqueda de la Constitución de la realidad más general de donde se deducirán todas las demás como casos particulares. [...] El reto intelectual de una teoría final que lo unifique todo (volveremos sobre esta idea más adelante), el sueño de Einstein¹⁸, sigue siendo una aspiración legítima de la física, y hay que reconocer avances en esta dirección”¹⁹. Por ejemplo, en física, los niveles de observación, según sea la complejidad de los objetos en escena, son básicamente dos: el microscópico y el macroscópico. Sin embargo, en ocasiones la dificultad de sintetizar ambos niveles no es sólo cuantitativa, sino también cualitativa y de concepto.

Fue el austríaco Ludwing Boltzmann quien nos ilustró por primera vez sobre esta situación al observar la paradoja del comportamiento de las partículas de un gas no demasiado denso. La comprensión de este sistema de partículas puede abordarse de dos maneras: microscópicamente, si a cada partícula del gas la observamos y pensamos aplicando trillones de veces las leyes de la mecánica de Newton, o macroscópicamente,

¹⁷ SCHNEIDER, E y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 66.

¹⁸ Albert Einstein (1879-1955). Nacido en Alemania y más tarde nacionalizado en los Estados Unidos, fue uno de los científicos más importantes del siglo XX. Conocido por su Teoría de la Relatividad Espacial, sentaría las bases de lo que sería la física estadística y la mecánica cuántica. En 1915 presentó su Teoría General de la Relatividad, en la que reformuló el concepto de gravedad. Consecuencia de ello fue el estudio científico del origen del universo por la rama de la física denominada cosmología.

¹⁹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 42.

si observamos y pensamos una sola vez el fluido, aplicando los principios de la termodinámica. Aunque la primera opción es humanamente inviable, cuantitativamente ambas opciones no deberían contradecirse; no obstante, cualitativa y conceptualmente no podemos decir lo mismo al comparar las evoluciones en el tiempo de cada caso. Según la física mecánica de Newton, el tiempo es *reversible, simétrico* (no hay pasado o futuro). Luego, microscópicamente, invirtiendo el signo de la velocidad de una partícula, ésta desandarà lo recorrido a la misma velocidad, pero en sentido contrario. Sin embargo, según el segundo principio de la termodinámica, macroscópicamente aplicado a muchas partículas, aparece la *flecha del tiempo*, (el tiempo es *irreversible*, no es simétrico desde el pasado hacia el futuro).

Por lo que, dependiendo de si miramos desde abajo, o desde arriba, obtendremos dos maneras diferentes de *comprender* una misma realidad (ampliaremos esta idea más adelante). Según *la Tabla de Esmeralda*²⁰, “lo que está más abajo es como lo que está arriba, y lo que está arriba es como lo que está abajo”²¹. “La estructura de la realidad está compuesta de realidades que se contienen las unas a las otras, como las famosas muñecas rusas”²².

“La reversibilidad depende de una observación fina (microscópica) y se pierde al perder la finura de la observación (macroscópica). Al saltar de nivel de (observación), perdemos una cantidad enorme de información. [...] Cada nivel de observación tiene su propia inteligibilidad. En ocasiones incluso interesa perder información”²³.

En definitiva, la paradoja surge al intentar vincular una realidad con otra. Puesto que la termodinámica no se puede deducir de la mecánica, tal vez debamos revisar la física fundamental y linealmente reversible de Newton, Einstein o Schrödinger, con el fin de incluir la irreversibilidad temporal en sus niveles más fundamentales (Prigogine), (volveremos sobre este asunto más adelante). “En otras palabras, puede existir irreversibilidad del tiempo en nuestro mundo, sin necesidad de que la haya en el mundo de las partículas de las que estamos hechos”²⁴.

²⁰ “En textos arábigos del año 650 se han encontrado transcripciones de la *Tabla Esmeralda*, un texto de procedencia helenística atribuido al mítico Hermes Trimegisto (del cual proviene el adjetivo “hermético”), cuyo propósito es revelar el secreto de la “sustancia primordial” y sus transmutaciones. En la *Tabla de Esmeralda* está condensado o resumido todo el arte de la Gran Obra, objetivo primordial de la alquimia; su segundo precepto reza así: “Lo que está abajo es como lo que está arriba, y lo que está arriba es como lo que está abajo. Cada uno actúa para cumplir los prodigios del Uno”. El gran objetivo de la alquimia es, precisamente, entender esa misteriosa relación entre el macrocosmos y el microcosmos y alcanzar así la sabiduría”. BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2012, p. 10.

²¹ *Ibidem*, p. 10.

²² WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 48.

²³ *Ibidem*, pp. 47-48.

²⁴ *Ibidem*, p. 48.

Como hemos dicho anteriormente, el mundo se puede comprender a modo de heterogéneas realidades funcionando cada una con su propia estructura, bajo varios niveles de observación, cada uno constituido de subrealidades con sus propias leyes y subconstitución. Ahora bien, no todas ellas nos son igual de relevantes para comprender el mundo.

En el caso de la materia inerte, la realidad se estructura en dos niveles relevantes muy alejados entre sí: el nivel macroscópico y el microscópico (y quizás un tercero, el de las fluctuaciones). En la materia viva son muchos y más próximos entre sí. Aunque ésta se compone de materia inerte, al ir subiendo en complejidad jerárquica, no cabe duda de que los objetos en que esta se organiza se hallan en otros niveles de observación, sobre todo a partir del nivel molecular. Es el caso, por ejemplo, de moléculas grandes como las células, los organismos, etc., unidades que, junto a sus *interacciones* mutuas, constituyen objetos relevantes de la realidad, tales que se bastan solos para nombrar todo un nivel de observación determinado, aportando conocimiento de la realidad a la que pertenecen: son individuos. Pero, ¿qué es una individualidad? Aquellos objetos con una estabilidad e independencia suficientes como para que su interacción resulte lo bastante relevante respecto del conocimiento de su realidad. En la materia inerte se entiende por individualidad a ciertos objetos transcendentales y estables como las partículas, los átomos o las moléculas; en la materia viva, una individualidad se considera un individuo: lo son objetos de propiedades especiales como los genes, las células o los organismos. Conviene recalcar aquí que todos los individuos pluricelulares, animales, plantas, hongos, etc., se constituyen de células eucariotas grandes y complejas, dotadas de orgánulos diferenciados: núcleo, mitocondrias, etc.; pero las células eucariotas pueden no interactuar y perseverar sólo como células. Durante miles de millones de años de vida en el planeta sólo existieron células procariotas y bacterias. ¿Cómo surgió entonces la vida? Volveremos sobre este asunto más adelante.

Un hormiguero es más individuo que una piara de cerdos, pero menos que una sola hormiga. De modo que *la suma simple de individuos no da uno nuevo superior*. Por lo que, aunque al superar la frontera de los seres vivos cambiemos el término individualidad por el de individuo, esta idea no evoluciona con continuidad, lo hace a saltos. Y puesto que no todo objeto hecho de materia viva, por ejemplo, un órgano como un riñón, tiene posibilidades de independizarse y de convertirse en un organismo, la idea de individuo digamos que tiene, pues, grados.

“Un individuo vivo es un objeto que tiende a mantener una identidad independiente de la incertidumbre del entorno” ²⁵ . Vamos a definir ahora qué propiedades según Wagensberg pueden definir la escala en grados de la individualidad:

1. Un individuo es un Todo compacto con una frontera abierta al paso de materia, energía e información. Dicha capacidad tiene grados, en un organismo es mayor que en una población.
2. El individuo es un Todo independiente de Partes interdependientes. Hay grados: los pólipos de una colonia de coral son más interdependientes que las bacterias de un simple agregado.
3. El individuo es un Todo con una viabilidad prioritaria de cualquiera de sus Partes. Hay grados: el termitero es más viable que una termita.
4. El individuo es un Todo al servicio del cual están las funciones de sus Partes. Hay grados: el sistema inmunitario es más exclusivo que un ejército regular.
5. El individuo es un Todo (genéticamente) uniforme. Hay grados: lo es más una colonia de insectos sociales que una de los que no lo son.
6. El individuo es el resultado de algún (tipo de) desarrollo. Hay grados: lo es más una colonia de coral, que procede de la división asexual de un único pólipo, que una colonia de pingüinos.
7. El individuo es una unidad selectiva y/o evolutiva. Lo primero significa que algún tipo de selección actúa directamente sobre la unidad, lo segundo significa que la unidad supera algún tipo de selección. Una cosa es quién se presenta al examen y otra quién lo supera. A veces se presenta un organismo (altruista), pero lo que sobrevive es un gen (egoísta). Hay grados: la selección natural puede presionar más sobre un organismo que sobre una familia o una manada de organismos.
8. Un individuo contiene una parte especial dedicada a coordinar el todo con el resto de cada una de las partes. Es el núcleo de un átomo, el de una célula, el cerebro de un animal o el ayuntamiento de una ciudad. Hay grados, un cerebro centraliza más en un organismo que un ayuntamiento en una ciudad.
9. El individuo es una unidad capaz de repetirse, de crear otro individuo similar a él mismo. Hay grados en la calidad y en la cantidad. El grado de similitud es máximo entre los individuos de una misma cepa bacteriana (clónicos), es algo menos en el grado de parentesco que existe entre una reina de una colonia y cualquiera de sus obreras, y menos aun entre un hormiguero y el creado por una nueva reina²⁶.

²⁵ *Ibidem*, p. 54.

²⁶ *Ibidem*, pp. 54-55.

Con estos criterios se pretende diferenciar la frontera entre individualidad e individuo. Una individualidad se convierte en individuo a partir de cierta numeración en el examen de nueve puntos. Ciertos objetos están más cerca de ser una individualidad que otros, estando tan cerca en algunos casos que desencadenan la división de la realidad en distintos niveles relevantes de observación, cada uno funcionando con su propia Constitución, sus propias leyes y contingencia. Cada Constitución, entonces, se puede visualizar con una estructura en *red* de las posibles alternativas de lo que puede ocurrir en la realidad. Se trata de la *nervura*²⁷ de lo real. Tanto el individuo como la nervura de lo real están sometidos a la selección. Veamos algunos ejemplos: un péndulo simple, sometido a la única fuerza exterior de la gravedad y a las leyes de la mecánica de Newton, siendo reversible (no distingue el pasado del futuro), sólo dispone de una posición de equilibrio que es estable. Se trata de un objeto en el que la nervura de su realidad sólo concibe obligaciones; se olvida de cualquier tipo de fluctuación, su camino es único. No hay lugar para la selección. Si damos un salto, veremos que no ocurre lo mismo con un péndulo caótico de cuatro imanes, ya que este está sometido a varias fuerzas exteriores: una la gravedad, y otras tres magnéticas que, sumadas en cada punto del espacio, crean un campo de fuerzas con varios puntos de equilibrio, no todos ellos estables. La nervura de la realidad, en este caso, se *complica*. Hay varias bifurcaciones donde las *fluctuaciones* pueden derivar, y tiene infinitas evoluciones posibles dentro de la nervura de su realidad (las restricciones que imponen la gravedad y los tres imanes). Por más que las condiciones iniciales se repitan, al ser tan sensible a ellas, en cada experimento la trayectoria será distinta e imprevisible. Será irreversible. Estará sometido a toda una serie de *selecciones sucesivas*. La nervura de esta realidad tiene múltiples ramificaciones. Demos otro salto, y pasemos a considerar ahora un individuo, un organismo vivo como un ave. Las restricciones de la Constitución de esta realidad anularán muchas posibilidades de existir, pero aún quedarán muchas posibles. La nervura de su realidad se ramifica muchísimo más, por lo que el concepto de selección crece. Y, por último, saltemos al organismo que somos nosotros mismos. Dotados de inteligencia, podemos anticipar mediante la creatividad la incertidumbre de la nervura de nuestra realidad. Aquí quien selecciona soy yo y, de este modo, anticipamos que, según Marina,

²⁷ Nervura. f. Estructura ramificada, real o abstracta, que recuerda los nervios en el sistema nervioso. *Ibidem*, p. 57.

[...] la realidad adquiere posibilidades nuevas al integrarse en un proyecto inteligente. Un proyecto es, ante todo, una idea, una irrealidad. [...] Manejamos la realidad mediante irrealidades. [...] Resulta que proporcionamos ideas a la realidad, la asimilamos mediante conceptos, signos, símbolos. Inventamos verdades. Damos a las cosas la posibilidad de confirmar una verdad científica. Antes de ser real, la catedral de Florencia fue una realidad pensada, una irrealidad, que guio la mano hábil que dibujó la línea sabia que luego dirigió el martillar de los canteros. Brunelleschi dibujó la cúpula, pero, para poder hacer real la posibilidad pensada, dibujó también las máquinas que hicieron posible la construcción de la cúpula, que son unas preciosas muestras de arte racionalista. Así, de irrealidad en irrealidad, llegamos a la realidad, tras recorrer un largo itinerario de ideas, esbozos, dibujos, tanteos, planos, proyectos, etc. [...] La inteligencia conoce la realidad e inventa posibilidades, y ambas cosas las hace gestando y gestionando la irrealidad. [...] El hombre puede suscitar, controlar y dirigir sus actividades mentales. [...] La inteligencia humana es la inteligencia animal transfigurada por la libertad. [...] Este es el modo humano de ser sujeto. [...] La inteligencia humana es una inteligencia computacional que se autodetermina. [...] La mirada se vuelve inteligente al ser dirigida por proyectos inventados²⁸.

En definitiva, los objetos que observamos en el mundo son los que han sido seleccionados para acceder a la realidad y, sobre todo, los que han sido seleccionados para permanecer un mínimo de tiempo en ella.

2.6. Tipos de selección

Dada la nervura de cualquier realidad, una vez superadas las restricciones impuestas por su Constitución, de las posibles rutas que aún quedan, alguna de ellas sucederá. Y si hay más de una posible, y una sucede, es que hay selección. De lo que emerge a la realidad se selecciona aquello que puede permanecer, que puede “perseverar”. Distintas leyes fundamentales actúan en cada nivel de realidad donde los objetos logran existir, y lo hacen porque emergen fácilmente, bien por combinación con lo que ya existe, bien porque su permanencia es afin con la realidad en la que emergen.

En el principio de los tiempos la nada se rebeló contra sí misma, y dio lugar a la materia inerte. A partir de este momento, se produjo la evolución de la realidad, hace ya

²⁸ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*. Barcelona: Anagrama, 1993, pp. 24-28.

13.500 millones de años. La materia viva surgió hace 3.800 millones de años con la emergencia del primer ser vivo, y la materia culta se gestó hace 100.000 años con el desarrollo de la inteligencia abstracta y la aparición del primer ser humano.

En los primeros niveles de la realidad de la materia inerte (las partículas elementales, los átomos y moléculas, los cristales, etc.), la probabilidad de reacción química dependerá no sólo de las propiedades de sus reactantes, sino de su probabilidad de encuentro (por su abundancia relativa, y sus estabilidades previas). Luego la estabilidad (capacidad de *emergencia* y permanencia) es la capacidad seleccionada que adquiere la materia inerte al resistir la incertidumbre de su entorno, y que permiten las leyes fundamentales (las interacciones fuertes, las electromagnéticas, las débiles y las gravitatorias).

La palabra azar se emplea en ocasiones como sujeto seleccionador, pero no selecciona de manera homogénea, sino la alternativa más probable de entre las disponibles. Precisamente para describir estas situaciones se crea la matemática de la probabilidad. La selección más probable bajo tratamiento matemático se equipara a maximizar una función con el concepto de *probabilidad* (como la entropía de Shannon en la teoría matemática de la información, o la entropía de Boltzman en mecánica estadística), o bajo restricciones (ligaduras) conocidas del sistema, logrando determinar mediante este procedimiento los estados más probables de un sistema termodinámico en equilibrio o no, y de sistemas mucho más estables y generales. Se trata de una aproximación al conocimiento de las complejidades más simples, pudiendo comprender propiedades similares en objetos muy diferentes. Por ejemplo, la distribución potencial por el tamaño tiene que ver con la inteligibilidad de lo común entre lo diverso. Hay más probabilidad de que estén presentes objetos pequeños y simples, como piedras pequeñas en la realidad inerte, insectos en la viva, o fonemas en la culta, por su presunta estabilidad. Los objetos inertes resisten la incertidumbre, no rebelándose a las fluctuaciones, siendo estables. La selección fundamental se afina entre las bifurcaciones inestables de los caminos posibles.

Aunque la materia viva (los genes, las células, los organismos, las poblaciones, etc.) se constituye de materia inerte, las leyes fundamentales de esta realidad se hallan tan profundas en su estructura que ya no invocamos la selección fundamental. Aquí la selección actúa entre la incertidumbre que liberan leyes (conocidas o no) operando en niveles de muchas más variables (competencia, relaciones sexuales, relaciones simbióticas) y más complejos. Hoy en día, muchos biólogos, físicos y matemáticos están

sumidos en la búsqueda de una *teoría de la complejidad* que descubra las leyes fundamentales que rigen los distintos niveles relevantes de la vida (células, genes, organismos, sociedades, etc.). Algunas propuestas son la termodinámica de no equilibrio o la teoría del caos. Desarrollaremos este punto más adelante.

El ser vivo, para seguir estándolo, no sólo resiste la incertidumbre, sino que la modifica *autoorganizándose* y adquiriendo esta capacidad por selección natural, lo que posibilita su adaptabilidad y capacidad para evolucionar. Esta es la segunda rebelión contra la incertidumbre. No obstante, autores como Brian Goodwin o Stuart Kauffman consideran que se ha dado demasiado protagonismo a la selección natural, y defienden la emergencia de formas físico-químico-matemáticas capaces de sortear la intervención de la selección natural. Aunque volveremos sobre esta idea más adelante, avanzamos que, en la actualidad científica, se están desgranando múltiples ejemplos estables de “complejidades simples” de materia inerte, o de aspectos inertes de la materia viva, desarrollando funciones como la relacionada con la maximización de la entropía, aplicables a redes de estructuras complejísimas del mundo vivo.

De lo que no cabe duda es de que también hay maneras más complicadas de seguir viviendo. Y es que algunos objetos vivos, dotados de inteligencia abstracta, seleccionan de forma más rápida y eficaz su incertidumbre. Se trata de la tercera rebelión, la de la materia culta, la mente humana. Estamos hablando de un tipo de complejidad muy diferente, una que “se puede medir por el número de estados accesibles a cada uno de estos pedacitos de materia o, si se quiere, por la cantidad de información que se necesita para construir un todo a partir de sus partes (medido por ejemplo en bits, el número de decisiones binarias necesario)”²⁹. Por ejemplo, un fragmento de materia inerte, como puede ser un cristal de sal, tiene pocos estados accesibles de combinación de sus átomos de cloro y sodio; sin embargo, hacer el mismo cálculo en un pedazo de materia viva supone tener en cuenta, además de sus estados accesibles, las alternativas acumuladas en su historial de información genética.

Estamos hablando de una de las formas más complejas de la realidad, donde la materia no sólo modifica su incertidumbre, sino que la anticipa, pudiéndola reducir. No se trata del tipo de anticipación previsible de regularidad periódica que por ejemplo se da cuando la selección natural actúa permitiendo que una ardilla esconda semillas para superar la hostilidad del invierno, sino de una anticipación en la que el sujeto

²⁹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 71.

seleccionador supera la selección natural, y, al enfrentarse a una situación inédita de su entorno, puede idear un objetivo o proyecto con el que perseverar. Se trata de la última clase de selección, la selección cultural. Y, en este sentido, ante la duda de cómo la materia culta surge a partir de las fuerzas fundamentales que actúan sobre la materia inerte, es el término “progreso” el que puede salir a nuestro rescate, de modo que “entre la emergencia de la primera bacteria y el nacimiento de Shakespeare algo ha progresado, algo, de abajo arriba, ha tenido que ocurrir...”³⁰. Y, en este sentido, es coherente decir que la selección natural es un logro de la selección fundamental, y, a su vez, la selección culta lo es de la selección natural.

La inteligencia no surgió antes que la vida, ni la vida antes que la materia inerte. La inteligencia accedió a la realidad de menos a más, y al igual que la evolución de la vida tiene grados que emergen de abajo arriba. La inteligencia, como logro de la selección natural, actúa a favor de perseverar, de ganar el estar vivo, luego tiene que ver con el intercambio de información. Una hormiga sabe regresar al hormiguero según el plan que está determinado en sus genes, pero si este plan falla, nunca buscará otro plan que no esté grabado en ellos; y si aun así cambia, será que ya se ha convertido en otra especie. La hormiga, al igual que las bacterias, las medusas o los calamares, podemos decir que posee inteligencia de nivel uno.

Un pulpo dotado de una inteligencia de nivel dos intentará apresar a un cangrejo para saciar su hambre. Pero si tras esconderse esta presa en un coral, el plan no surtiera efecto, azuzado por la presión de su instinto de supervivencia asirá el coral fuertemente hasta poder hacerse con él, un succulento manjar. Un gato puede, durante largos periodos de tiempo, controlar su instinto de orinar, hasta que su amo, al llegar a casa, le haga accesible su arenero. Su inteligencia es de nivel tres. Por último, un chimpancé que quiere comerse las hormigas de un hormiguero es capaz de descubrir lo común entre lo diverso, y de seleccionar un palo de entre un montón lo suficientemente largo como para fabricar un instrumento que le sirva para cazar hormigas. Su inteligencia de nivel cuatro le permite crear un *cambio* para ganar sobrevivir en un mundo fluctuante. Así, hemos llegado a los objetos dotados de inteligencia de nivel cinco o abstracta, que no sólo son capaces de resistir o modificar la incertidumbre para perseverar en la realidad, sino que además pueden anticiparla, y mediante ideas, proyectos, o representaciones simbólicas pueden

³⁰ *Ibidem*, p. 73.

generar cambios en el mundo seleccionando una opción entre muchas con un propósito, en una dirección.

El objeto dotado de inteligencia abstracta, además de resistir la incertidumbre de su entorno y modificarla es capaz de anticiparla. Esta capacidad, que se añade a la estabilidad, la adaptabilidad y la capacidad de evolucionar, es la capacidad para conocer; lo que se consigue por selección cultural. El conocimiento representa la tercera forma de rebelión contra la incertidumbre. Es la estrategia en el sentido genuino de la palabra, es la estrategia dotada de proyectos que mejoran nuestra independencia de los caprichos ambientales. El conocimiento se alimenta a sí mismo para seguir conociendo y es la base de una innovación universal: la creatividad humana³¹.

El animal repite monótonamente una técnica heredada, mientras que el hombre crea nuevas técnicas y somete su obra a planes elegidos por él mismo. A este modo de obrar, que resuelve problemas nuevos y que permite el ajustamiento flexible a la realidad, lo llamamos inteligencia [...]. El hombre posee una inteligencia creadora. [...] La inteligencia nos permite conocer la realidad. Gracias a ella sabemos a qué atenernos y podemos ajustar nuestro comportamiento al medio. Cumple una función adaptativa, nos permite vivir y pervivir. [...] Se adapta al medio adaptando el medio a sus necesidades. [...] No sólo conoce lo que las cosas son -lo cual da al hombre seguridad- sino que también descubre lo que pueden ser -lo cual le produce una enorme desazón- [...] Se somete al tiempo y se rebela contra él, puesto que conoce el presente y el pasado -reinos de lo real-, pero pretende determinar el futuro -reino de lo posible-, para lo cual pro-mete, pro-yecta, pre-viene, pro-duce. [...] La realidad queda expandida por las posibilidades que en ella inventa la inteligencia, al integrarla en proyectos humanos. La propia realidad del hombre se expande. [...] Vive por encima de sus realidades. [...] Crear es inventar posibilidades. [...] Las cosas tienen propiedades reales, en las que inventamos posibilidades libres. [...] El bloque de mármol contenía como posibilidad el *David* que Miguel Ángel inventó. [...] Apoyándome en las cosas dadas voy más allá. [...] En el estallido de lo real que la inteligencia provoca se desvanecen los límites entre lo natural y lo hecho por arte. Lo que contemplar una obra de arte nos produce, esa peculiar euforia, esencial a la experiencia estética, es comprobar lo que la inteligencia ha sido capaz de hacer con la realidad. Percibimos en su fecundidad el espejismo de una vida más amplia, una inconcreta promesa de felicidad. La aparente puesta en fuga de la limitación hace que nos sintamos ligeros³².

³¹ *Ibidem*, p. 76.

³² MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 19-22.

2.6.1. La selección natural de las Ideas

Según defiende la biología moderna, tal y como más adelante expondremos, las grandes ideas de la complejidad son simples. Según Darwin, la selección natural preserva las innovaciones que colaboran con que el individuo siga vivo, de modo que los organismos compiten por sobrevivir. Pero la ciencia ha ido evolucionando para dar explicación a casos que no encajan en esta visión, como son los descritos por Richard Dawkins en su trabajo sobre el “gen egoísta”³³. Por ejemplo, existen pájaros que, ante una amenaza chillan; y puesto que con este comportamiento pueden ser detectados fácilmente por un posible depredador, aparentemente no encajarían en la visión clásica de la biología. Sin embargo, según la teoría de Dawkins, aunque el pájaro muera, con su chillido favorecerá que sus semejantes sobrevivan al ser alertados. De modo que será sobre la idea de chillar (el gen como unidad de información), y no sobre el pájaro (el individuo), sobre lo que actuará la selección.

También en este punto introduciremos otro término que encaja con el de gen egoísta, pero desde un punto de vista menos radical. Se trata de la “simbiosis”, de la que hablaremos con más detenimiento a lo largo de nuestro proyecto. La simbiosis pone de manifiesto la importancia evolutiva de la unión de genes diferentes de distintos genomas. Destacando la transcendencia selectiva del gen, podemos dar explicación a las selecciones en niveles superiores de la jerarquía biológica, como el grupo o la especie. Como dice Wagensberg, “una cosa es la individualidad que pasa el examen y otra cosa la individualidad que persevera, acuda quien acuda al examen, el que lo supera es siempre el gen”³⁴.

Otro concepto que destacar relacionado con el gen egoísta es el que Dawkins ha popularizado como “meme”. Se trata del gen mental, un paquete cultural que se transmite por imitación, cuya ubicación se halla en el cerebro desde donde coloniza a otros cerebros. “La selección natural de los genes explica parte de la vida, la selección natural de las ideas explica parte de la cultura. Decir selección natural de las ideas es como decir selección natural de la selección cultural”³⁵. La teoría de los memes está siendo

³³ Gen egoísta. Idea propuesta en los años sesenta por William Hamilton y posteriormente generalizada por George Williams, pasando a adoptar el término definitivo de “gen egoísta”, cuando en 1976, el biólogo evolutivo y divulgador científico Richard Dawkins publica su libro *El gen egoísta: las bases biológicas de nuestra conducta*. Se trata de una obra divulgativa en la que Dawkins interpreta la evolución de las especies desde el punto de vista de los genes, como única unidad de selección verdadera, en lugar del individuo o los grupos simples que actúan sólo como “vehículos” en el proceso evolutivo. Mediante esta idea e introduciendo términos como el de meme y memética, pretende poner fin a algunas confusiones creadas para explicar determinadas características físicas o conductuales de los seres vivos.

³⁴ *Ibidem*, p. 77.

³⁵ *Ibidem*, p. 77.

desarrollada por diversos investigadores en la actualidad. Aunque su explicación de la evolución de la cultura todavía aparece como una pre-teoría, a falta de datos y un aparato matemático suficiente, se piensa que mientras los procesos evolutivos biológicos se rigen por el modelo darwiniano, la evolución de la cultura, con intervención humana directa, parece seguir a veces un modelo tipo lamarkiano de transmisión de caracteres adquiridos, lo que permitiría una evolución rapidísima (potenciada por los medios de comunicación) comparada con los procesos descritos por la teoría de la evolución clásica.

Según asevera el propio Dawkins: “consideremos la idea de Dios... Es probable que haya surgido varias veces por “mutaciones” independientes... ¿Cómo se replica? Por la palabra hablada y la palabra escrita, con la ayuda de la gran música y el gran arte... ¿Qué tiene el meme-Dios para ser tan estable y penetrante en el mundo de la cultura? Su supervivencia procede de su enorme atractivo psicológico. Provee una respuesta superficial y plausible a las cuestiones más profundas y turbadoras de la existencia. Sugiere que las injusticias en la vida pueden corregirse en la siguiente...”³⁶. El meme egoísta puede dar explicación a los dogmas e ideologías fanáticas. También puede respaldar el progreso del conocimiento. Cuando un científico, un artista o arquitecto tiene una buena idea, se la pasa a otros. Unas ideas se extinguen, otras se perpetúan. Los memes superan la selección en virtud de dos criterios: uno el fortalecimiento de la cohesión colectiva de mentes, y el otro como aumento de la capacidad de anticipación, mediante el conocimiento.

2.6.2. Los estímulos

En la realidad tanto inerte como en la viva y culta, ante la tesitura de hacer o no hacer mejor es no hacer, no gastar energía; o, de gastarla, que sea lo mínimo y necesario. Por ello es necesario que haya estímulos que motiven la acción y sostengan las funciones vitales. Pero, ¿cuál es el estímulo que favorece el conocimiento? Si la selección cultural es el resultado de la actividad mental y de la capacidad de abstracción, cuando se habla de ciencia el estímulo que la fomenta es la curiosidad; cuando se habla de arte, es la *emoción*. Y es que, si “el azar es un concepto complementario del conocimiento, la cantidad de azar presente en el universo, o la cantidad del que interviene en los procesos

³⁶ *Ibidem*, p. 78.

naturales, no tiene más límite que el avance del conocimiento”³⁷. “He aquí un buen ideal científico: el retroceso del poder del azar en función del progreso del conocimiento”³⁸. Y es que si “en definitiva, el azar es miedo”³⁹, entonces el miedo nos estimula, y puesto que, “el conocimiento combate sistemáticamente el miedo”⁴⁰, el azar nos ayuda a ganar conocimiento a través de la cultura, la ciencia y la tecnología, y el gozo por conseguirlo lo fomenta.

2.6.3. Revisión a través del “conatus” spinoziano

Según lo expuesto, lo que persevera ante la incertidumbre es la esencia de la cosa, del objeto. La selección natural no actúa sobre cualquier cosa, actúa sobre una individualidad capaz de perseverar. Esta misma aseveración podemos encontrarla de algún modo en la *Ética demostrada según el orden geométrico* de Baruch Spinoza⁴¹, siempre y cuando previamente sustituyamos la idea de Dios por la de Constitución de la realidad, naturaleza o Universo, y la de Dios infinito por la de naturaleza finita. Cabe matizar que ya “Calicles, en el *Gorgias* de Platón, y Hobbes, habían centrado su antropología en la tendencia del hombre a perseverar en la existencia”⁴². Aquí, no obstante, Spinoza sostiene que los modos o expresiones finitas de la substancia divina infinita tienen un deseo de perseverar en la existencia, un esfuerzo en la conservación del ser, que denomina bajo la antigua categoría de “conatus” (de conato: tentativa, propósito, empeño, esfuerzo). Así, dice en la parte tercera de su *Ética*:

Proposición VI: Cada cosa se esfuerza, cuanto está a su alcance, por perseverar en su ser.

Demostración: En efecto, todas las cosas singulares son modos, por los cuales los atributos de Dios se expresan de cierta manera y determinada manera [...] cosas que expresan de cierta y determinada manera la potencia de Dios, por la cual es obra, y

³⁷ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 22.

³⁸ *Ibidem*, p. 21.

³⁹ *Ibidem*, p. 68.

⁴⁰ *Ibidem*, p. 68.

⁴¹ Baruch Spinoza (1632-1677). Nace en Ámsterdam, en el seno de una familia judía, aunque más adelante será excomulgado. A pesar de considerarse panteísta, los ortodoxos lo acusarían de ateo. Se le considera uno de los grandes racionalistas de la filosofía del siglo XVII, junto a René Descartes, su gran maestro, y Gottfried Leibniz. Además, se definirá como monista y determinista. A lo largo de su vida se interesará por la ciencia, la religión y la filosofía, publicando varios tratados. En su *Ética demostrada según el orden geométrico* (1661-1675) logrará concentrar todo su pensamiento –metafísica, antropología y moral-, realizando además una fuerte crítica de las concepciones filosóficas más tradicionales: Dios, el hombre y el universo. Adoptando un criterio expositivo similar al de los Elementos de Euclides, estructurándolo matemáticamente mediante definiciones, axiomas, proposiciones, demostraciones, corolarios y escolios (o explicaciones). Se trata de un método deductivo-geométrico, que en parte ya había utilizado Descartes.

⁴² DUTTON, D. *El instinto del arte. Belleza, placer y evolución humana ...*, p. 137.

ninguna cosa tiene en sí algo en cuya virtud pueda ser destruida, o sea, nada que le prive de su existencia [...] sino que, por el contrario, se opone a todo aquello que pueda privarle de su existencia [...], y, de esta suerte, se esfuerza cuanto puede y está a su alcance por perseverar en su ser. Q.E.D.”.

“Proposición VII: El esfuerzo con que cada cosa intenta perseverar en su ser no es distinto de la esencia actual de la cosa misma. *Demostración*: Dada la esencia de una cosa cualquiera, se siguen de ella necesariamente ciertas cosas [...], y las cosas no pueden ser más que aquello que se sigue necesariamente a partir de su determinada naturaleza [...]; por ello, ya junto con otras, obra o intenta obrar algo, eso es [...], la potencia o esfuerzo por el que intenta perseverar en su ser- no es nada distinto de la esencia dada, o sea, actual, de la cosa misma. Q.E.D.⁴³.

En primer lugar, aunque para Spinoza toda idea de ley en la naturaleza es determinista y no deja espacio para la contingencia, salvo que se haga referencia a la idea de Dios infinito, nosotros optamos por evitar el infinito. Pretendemos construir un esquema conceptual de la realidad sin salirnos de ella.

En segundo lugar, podríamos decir que “la cosa” para Spinoza sería el alma de ésta. “De modo que la cosa con ser que no persevera en su ser no es una cosa real”⁴⁴. Para nosotros, se trata de la individualidad. La selección natural no actúa sobre cualquier cosa, sino sobre aquella individualidad capaz de perseverar. Ya decíamos que “se accede a la realidad por compatibilidad con la Constitución del mundo. La Constitución selecciona lo real en virtud de su propia combinación de leyes y azar. Toda fluctuación posterior del entorno del objeto es un reto para seguir estando en la realidad para volver a esperar en la cola de lo sólo realizable (en el dominio de lo lógicamente posible)”⁴⁵.

Dos árboles nunca son iguales: lo que tienen en común es su esencia de ser árbol, justamente aquello que hace posible que vivan en el bosque. A la hora de perseverar, lo hace con más garantías la especie de árboles que un árbol particular de la especie. El ser es la esencia de la cosa; no de cualquier cosa, sino de aquella que se identifica con una parte de sí misma. Aquí aparece el concepto de individuo; el que mejor persevera no es la hormiga, sino el hormiguero, el superorganismo. La esencia de cada cosa, su ser, sería su estado más probable que persevera en su estabilidad como garantía de permanecer en

⁴³ SPINOZA, B. *Ética demostrada según el orden geométrico*. Traducción, introducción y notas de Vidal Peña García. Notas y epílogo de Gabriel Albiac. Madrid: Editorial Tecnos, 2007, pp. 209-210.

⁴⁴ STEVEN, B. S. *Spinoza y el libro de la vida. Libertad y redención Ética*. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2007, p. 137.

⁴⁵ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 85.

la realidad. Pero su estabilidad no es ilimitada, ya que, si el objeto se sale de esta, las fluctuaciones pueden no regresar, arrastrando al objeto hasta que encuentre o no, otras estabilidades. Cualquier transición de estado en física equivale a un cambio de ser. En la materia inerte, las cosas siguen mansamente las fluctuaciones sin perder su ser. El ser spinoziano del objeto inerte es, en principio, el estado seleccionado por la selección fundamental. Es por ejemplo posible imaginar una silla que mantenga el equilibrio sobre una pata sostenida en el aire, aunque es bastante improbable que esto ocurra en la realidad. Un buen malabarista puede lograr que un elefante se suba a esa silla. Precisamente, su oficio se basa en lograr improbabilidades que emocionen al espectador. La emoción surge de esta improbabilidad. Pero muy probablemente, ni el mejor malabarista logrará que un elefante se sostenga subido a una silla sostenida por una sola pata sobre una cuerda en el aire. Es algo que sólo sucedería fuera de su ser.

Cada tipo de selección fundamental, natural y cultural contiene a la anterior. La selección cultural también está implícita en el “conatus”. “Para Spinoza las “acciones” son aquellos actos cuya única causa es el alma, y las “pasiones” son efecto de causas externas. El “conatus” es entonces concebido no sólo como simple conservación del ser, sino como la realización de sus potencialidades”⁴⁶:

Proposición IX: El alma, ya en cuanto tiene ideas claras y distintas, ya en cuanto las tiene confusas, se esfuerza por perseverar en su ser con una duración indefinida, y es consciente de ese esfuerzo suyo.

Demostración: La esencia del alma está constituida por las ideas adecuadas e inadecuadas [...], y así [...], se esfuerza por perseverar en su ser tanto en cuanto tiene las unas como en cuanto tiene las otras, y ello [...], con una duración indefinida. Y como el alma es necesariamente consciente de sí [...], por medio de las ideas de las afecciones del cuerpo, es, por tanto, consciente de su esfuerzo [...]. Q.E.D.

Escolio: Este esfuerzo, cuando se refiere al alma sola, se llama voluntad, pero cuando se refiere a la vez al alma y al cuerpo, se llama *apetito*; por ende, éste no es otra cosa que la esencia misma del hombre, de cuya naturaleza se siguen necesariamente aquellas cosas que sirven para su conservación, cosas que, por tanto, el hombre está determinado a realizar. Además, entre “apetito” y “deseo” no hay diferencia alguna, sino es la que el “deseo” se refiere generalmente a los hombres, en cuanto son conscientes de su apetito, y por ello puede definirse así: *el deseo es el apetito acompañado de la conciencia del mismo*. Así pues, queda claro, en virtud de todo esto, que nosotros no intentamos,

⁴⁶ STEVEN, B. S. *Spinoza y el libro de la vida. Libertad y redención Ética* ..., pp. 138-145.

queremos, apetecemos ni deseamos algo porque lo juzguemos bueno, sino que, al contrario, juzgamos que algo es bueno porque lo intentamos, queremos, apetecemos y deseamos⁴⁷.

Las tres selecciones –fundamental, natural y cultural- pueden encajar en el “conatus” de Spinoza. “La primera función de la selección cultural, y por tanto de la cultura y de cualquier clase de conocimiento, no está en sus presuntos logros, está en el propio conocimiento, en el proceso de construirlo, de elaborar representaciones, en el proceso de pensar, en el gozo mental de seguir pensando. Anticipar la incertidumbre es, sin duda, un regalo asociado a lo que en principio debió de ser sólo gozo mental”⁴⁸. Concretamente en la selección cultural, cualquier reflexión humana que genere conocimiento sería una “acción” en la tarea de permanecer en la realidad y perseverar, mientras que la “pasión” sería la curiosidad por conocer cuando se trata de ciencia y/o de la emoción cuando se habla de arte.

Para Spinoza el hombre como ser de deseo es concebido a partir de una perspectiva relacional, puesto que los modos finitos tienen asimismo un cuerpo y un espíritu a partir del que aparecen los afectos o pasiones. “Spinoza divide las pasiones en dos grupos: las pasiones tristes y las pasiones alegres, las que disminuyen la capacidad de acción y las que estimulan el “conatus” y llevan a la acción”⁴⁹.

Proposición XI: La idea de todo cuanto aumenta o disminuye, favorece o reprime la potencia de obrar de nuestro cuerpo, a su vez aumenta o disminuye, favorece o reprime, la potencia de pensar de nuestra alma.

Escolio: Vemos, pues, que el alma puede padecer grandes cambios, y pasar, ya a una mayor, ya a una menor perfección, y estas pasiones nos explican los afectos de la alegría y la tristeza. De aquí en adelante, entenderé por alegría: una pasión por la que el alma pasa a una mayor perfección. Por tristeza, en cambio, una pasión por la cual el alma pasa a una menor perfección. Además, llamo al afecto de la alegría, referido a la vez al alma y al cuerpo, placer o regocijo, y al de la tristeza, dolor o melancolía. Pero ha de notarse que el placer y el dolor se refieran al hombre cuando una parte de él resulta más afectada que las restantes, y el regocijo y la melancolía, al contrario, cuando todas resultan igualmente afectadas. Por lo que toca al deseo, he explicado lo que es en el Escolio de la Proposición IX de esta parte; y, fuera de estos tres, no reconozco ningún afecto primario: mostraré,

⁴⁷ SPINOZA, B. *Ética demostrada según el orden geométrico* ..., pp. 211-212.

⁴⁸ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas*..., p. 89.

⁴⁹ STEVEN, B. S. *Spinoza y el libro de la vida. Libertad y redención Ética* ..., pp. 145-146.

efectivamente, a continuación que los demás surgen de esos tres⁵⁰.

Los estímulos son necesarios para ganar unas funciones que de otro modo no se darían, hasta extinguirse el individuo. Los estímulos probablemente se basen en el binomio placer y dolor. En el caso de querer ganar conocimiento en la mente abstracta, las alternativas fluctúan entre el premio y el castigo, entre la curiosidad, el gozo mental y el miedo que nos empuja a anticipar la incertidumbre.

2.6.4. Ley de cambio de la complejidad

Si revisamos la historia del universo, e intentamos percatarnos de la enorme variedad de objetos y fenómenos en que la materia ha ido accediendo a la realidad, podremos hacernos una idea de cómo ésta ha ido cambiando y evolucionando a lo largo del tiempo. Como ya antes resumimos, en un principio, según la cosmología, el universo se asemejaba a una sopa homogénea de quarks. A partir de aquí, en un momento dado, se produjeron tres grandes acontecimientos. El primero supuso la creación de la materia. La nada se rebeló contra sí misma y dio lugar a la materia inerte, capaz de resistir de algún modo la incertidumbre fluctuante y de permanecer en la realidad. Pasados algunos miles de millones de años desde que se produjera este acontecimiento, un pedazo de materia inerte se rebeló de nuevo contra la incertidumbre, complicándose lo suficiente como para modificar algunas de las fluctuaciones de su entorno, logrando ganar independencia y originando la materia viva. Finalmente, hace unos pocos millones de años, una porción de materia viva se rebeló de nuevo y se complicó aún más, lo suficiente, como para anticipar algo de su incertidumbre, originándose la materia culta, con la capacidad de abstracción necesaria como para preguntarse de qué modo evolucionó la materia.

Considerando la posibilidad de que un objeto de la materia inerte experimente un cambio, este dependerá, como hemos venido explicando, de la nervura de su realidad, de las restricciones a las que las leyes y resto de objetos y sucesos de su entorno de espacio y tiempo le condicionen; en definitiva, dependerá de lo que hemos denominado selección fundamental, la cual se definirá entre las bifurcaciones inestables en que se deciden los caminos de lo posible. Así, por ejemplo, un objeto espacial, a partir de cierto tamaño, será

⁵⁰ SPINOZA, B. *Ética demostrada según el orden geométrico* ..., p. 213.

esférico, porque las leyes y el entorno isotrópico circundante seleccionan esta forma por ser la más estable frente a cualquier otra posible.

Sin embargo, si cambiamos de posición y ahora nos situamos sobre la superficie de la tierra, donde la ley de la gravedad predomina, y observamos una roca en lo alto de una montaña, ésta ya no conservará la forma esférica, sino la tendente a la vertical, la cual, poco a poco, sometida a sucesivos fenómenos fundamentales importantes, como los cambios térmicos, químicos, la erosión, etc., irá adoptando diferentes formas favorecidas por la selección. Por ejemplo, formas cíclicas, como las que surgen de las típicas hileras horizontales pseudo-hexaédricas que, una vez se desprenden de la roca, pueden ser arrastradas ladera abajo y, sometiéndose a nuevos fenómenos de abrasión y meteorización, logran alcanzar la desembocadura de algún río, donde de nuevo la selección fundamental las filtra favoreciendo una vez más la forma esférica de menor tamaño. Y, entonces, será necesario emplear nuevos términos, como el de canto rodado, arena o partícula de polvo, para designar esos objetos, objetos que cíclicamente pasarán a formar parte del fondo del mar, o que, al final de su ciclo, se volatilizarán intentando perseverar, ganando estabilidad frente a las nuevas incertidumbres por llegar.

Por consiguiente, los objetos inertes ganan estabilidad al ser sometidos por la selección fundamental. En el siguiente nivel de lo vivo opera la selección natural. Esta idea, que fue promovida por Darwin, llegó a ser posiblemente una de las más simples, creativas y potentes de toda la historia de la ciencia. Pero, ¿qué es un ser vivo? Considerando aquí que la selección natural probablemente opera sobre objetos que hemos denominado individualidades, relacionaremos la idea de ser vivo con la de individuo, diciendo que un ser vivo es “un objeto que tiende a mantener su identidad independiente de la incertidumbre de su entorno”⁵¹. Luego para perseverar no se adapta, sino que modifica su entorno. Por ejemplo, ante una eventual subida de la temperatura del medio circundante, el individuo vivo no se adapta, sino que se reorganiza para mantener su temperatura estable. Cambia para que nada cambie. Por último, un individuo vivo se defiende de las caprichosas fluctuaciones eligiendo la incertidumbre del entorno como una medida relevante de su realidad: “un individuo progresa en su entorno si gana independencia con respecto al mismo”⁵². Aquí se recupera de nuevo el término *progreso* como enfoque de la evolución de las formas vivas.

⁵¹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 108.

⁵² *Ibidem*, p. 109.

Expondremos a continuación los conceptos que relacionan un objeto vivo con su entorno, teniendo en cuenta la propuesta de Wagensberg denominada *ley general de cambio*, engarzando la ley termodinámica de no equilibrio con la teoría matemática de la información de Claude Sannon, que también se puede generalizar y aplicar a otros objetos no vivos. En el mundo constantemente se está transfiriendo información de un sitio a otro, y, como consecuencia, se producen cambios. Una madre mira a su bebé y éste la sonríe. Una luz se apaga y el gato dilata sus pupilas, etc. Se trata del movimiento de la información, del mensaje. “Así como los sistemas se perciben y se influyen mutuamente, así cambia el mundo, así cambian las partes del mundo. Comprender el mundo, ya lo hemos dicho, acaso sólo sea comprender dos cosas: el cambio y la relación entre el todo y sus partes”⁵³. Todo mensaje antes de ser emitido tiene cierto valor de información, pero debido a que siempre se produce un ruido de fondo, el mensaje nunca llega íntegramente a su destino, se produce un error. Se trata de una primera ley fundamental. Sin embargo, una pequeñísima parte de los sistemas del mundo se esfuerza en que el error sea mínimo. El procedimiento más simple para lograr que una mínima parte de la información llegue es la *redundancia*. Luego, como dice Wagensberg, “contra la presión del ruido, la defensa de la repetición”⁵⁴, ya que “la redundancia hace que lo desconocido lo sea menos”⁵⁵.

Si consideramos el mundo dividido en dos partes complementarias, una parte finita, el sistema, y otra universal, su entorno, entonces, elegir un sistema (real o ficticio) supondrá definir la frontera que lo separa de su entorno, que en principio determinamos sea permeable para dejar paso a la información en ambos sentidos; si partimos luego de un mensaje, cuya fuente es el sistema destinado al entorno y cuya cantidad de información transmitida dependerá de la diversidad de estados de comportamiento del sistema, es decir de la *complejidad* del sistema, encontramos la primera cantidad fundamental, siendo menos compleja una piedra que un árbol, o un pájaro menos que el hombre.

Si ahora consideramos el entorno como fuente de un mensaje destinado al sistema, la cantidad de información transmitida dependerá de la diversidad de estados de la fuente, en este caso del entorno. Dependerá por tanto de la complejidad del entorno, es decir, de la segunda cantidad fundamental, la *incertidumbre* del entorno. Por ejemplo, una porción del espacio presenta menos complejidad que el mismo volumen de un pedazo de desierto, y este menos que un trozo de paisaje urbano.

⁵³ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 46.

⁵⁴ *Ibidem*, p. 46.

⁵⁵ *Ibidem*, p. 125.

Pero, como ya dijimos, no toda la información que se transmite llega al destino, ni viceversa; hay errores. El primer error dependerá de la diversidad de comportamiento del sistema, una vez fijado cierto comportamiento del entorno (nicho). Se trata de la tercera cantidad fundamental, la capacidad de *anticipación* del sistema. Esta será mayor en una lombriz capaz de rastrear las humedades, pero no de prevenir una pisada, que, en una planta capaz de orientarse hacia la luz, pero no de desplazarse previniendo un huracán. El error inverso en la transmisión de la información, desde el entorno al sistema, también dependerá de la diversidad de estados del entorno compatibles con los del sistema. Cuanto menor sea dicha variedad, más repercusión tendrá en él la influencia del sistema. Dependerá, por tanto, de la cuarta propiedad fundamental: la *sensibilidad* del entorno. Por ejemplo, en un prado influirá más una oveja que una mariposa.

En definitiva, la ecuación informativa se resolverá de la siguiente forma: “la información neta que llega a un destino se obtiene, lógicamente, sustrayendo el error a la información de la fuente. Por lo tanto, la complejidad del sistema, menos su capacidad de anticipación no es sino la información que el comportamiento del entorno provee sobre el comportamiento del sistema. Y en sentido inverso: la incertidumbre de un entorno menos su sensibilidad no es sino la información que el comportamiento del sistema provee sobre el comportamiento del entorno”⁵⁶. De modo que una segunda ley fundamental dictamina que los mensajes de ambos lados de la ecuación tienen idéntica cantidad de información. Y que cualquier perturbación en un término de la ecuación supondrá la inmediata reacomodación de los restantes. Cuando en la dialéctica sistema-entorno se salvan todos los problemas sin dejar de cumplir la ley fundamental, es cuando decimos que hay una adaptación. Por ejemplo, la piel de gallina frente al frío, el sudor frente al calor, la agricultura frente a la carestía. El sistema reorganiza su estructura interna para seguir siendo compatible con su entorno.

Si ante las variaciones (fluctuaciones) de alguno de los términos no es posible la reacomodación de los otros tres, la adaptación se quiebra, de modo que el sistema o bien se extingue, o bien cambia súbitamente, se autoorganiza. Ante las posibles bifurcaciones (catástrofes), si el sistema logra ser compatible con la nueva situación entrará en una nueva adaptación. “A esta posibilidad de varios estados accesibles para un entorno determinado tenemos que añadir la existencia de una infinidad de estados a través de los

⁵⁶ *Ibidem*, p. 48.

cuales el sistema se adapta a la gran variedad de modificaciones del entorno”⁵⁷. Y así, la historia continuará siguiendo la esencia del cambio: “la ignorancia de un sistema con respecto a su entorno es un reto para el sistema, de modo que éste se ve obligado a aumentar su complejidad para hacer frente a tal ignorancia. Por ello todo lo que vemos es complejo. Complicarse o morir, sería la frase”⁵⁸.

La ley general de cambio provoca que, si la incertidumbre del entorno de un individuo aumenta, el abanico de posibilidades comprenderá la mejora de la anticipación, de la tecnología o de la movilidad. La ley general de cambio supone una restricción, no una obligación, luego da margen para elegir, para seleccionar. Y puesto que es una ley universal, puede aplicarse a individuos tanto del mundo inerte, vivo o culto. De modo que si la incertidumbre del entorno de un individuo aumenta, las selecciones -fundamental, natural o culta- actuarán como filtro, dejando pasar las innovaciones emergentes que faciliten su independencia.

Así, según nuestro esquema conceptual, introduciremos la propiedad *función*, de la que hablaremos más extensamente en el siguiente apartado, como una forma de ganar independencia del individuo perseverando frente a la incertidumbre de su entorno. De modo que podemos alegar que *comprender* un objeto de la realidad equivale a captar sus funciones o garantías de independencia local, las cuales permiten su frecuencia y perseverancia en ella. Hay que aclarar que se trata de una independencia local o relacionada con la incertidumbre del momento. En el caso de los organismos vivos, dentro de su incertidumbre, hay que incluir al resto de organismos, pudiéndose considerar un tiempo corto (biológico), y uno más largo (geológico). Es decir, que de ser visible su frecuencia, el término progreso, del que hablábamos anteriormente, se engazaría aquí respecto a un tiempo geológico a largo plazo, que se podría registrar observando sus restos fósiles.

En definitiva, la ley general de cambio puede extenderse a cualquier tipo de materia, por lo que, si ampliamos la idea de perseverar en la realidad del ser vivo spinoziana de forma más general, diremos que la manera que posee un ser inerte de perseverar en la realidad frente a la incertidumbre es la de resistir; la de un ser vivo es la de modificar la incertidumbre, y la de un ser culto residirá en buscarla. A continuación,

⁵⁷ GARCÍA VELARDE, M. y FAIREN LE LAY, V. “Estructuras disipativas, algunas nociones básicas (1)”. *El Basilisco: Revista de materialismo filosófico*, N. °10, 1980, p. 12.

⁵⁸ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 68.

teniendo en mente la forma generalizada de evolucionar en el ser vivo, desglosaremos en tres modos las soluciones con que ganar independencia:

- La *independencia pasiva*: el individuo se aísla del medio dejando de intercambiar materia, energía o información, teniendo lugar así su muerte. Pero hay modos límite (por ejemplo, cerca del equilibrio termodinámico) de aislamiento por *simplificación*, en que se reduce la actividad interior del individuo casi a cero. Es el caso de sistemas simples como semillas, esporas, etc., que permanecen inactivos a la espera de condiciones más favorables; o de la hibernación, el letargo o de la latencia a la que se someten individuos más complejos. Otro caso de independencia pasiva se desarrolla por aislamiento, en que se anula el intercambio de materia y energía con el exterior y sólo permanece la actividad interior del individuo: son el *abrigo* (el crecimiento de pelo invernal, la protección de un caparazón blindado, o de un nido) o la *inercia* (cuando el aislamiento es difícil se recurre al aumento de tamaño). Cuanto mayor es un individuo más difícil es que sea devorado, como le ocurriría a una ballena frente a un pez payaso. También se puede producir una alteración de *la forma*, de la frontera del individuo frente al exterior: consiste básicamente en reducir o aumentar su volumen en relación a la superficie. Lo hace un pájaro al extender sus alas aprovechando mejor las corrientes de aire; por el contrario, si lo que se pretende es no perder energía, el individuo reduce su superficie, se acurruca, tendiendo a la forma de una *esfera*.

- La *independencia activa*: el individuo está dispuesto a cambiar tanto su actividad interna como de intercambio con el exterior, con tal de mantener su identidad. Una manera consistirá en aumentar la capacidad de anticipación. Un individuo cuanto más evolucionado esté, más tenderá a mejorar dicha capacidad, salvo excepciones, donde algunos individuos que viven en entornos poco cambiantes se especializarán, mejorando la eficacia de sus funciones en detrimento de mejorar su capacidad de anticipación. Es lo que les ocurre a las especies que viven en las profundidades abisales. La tecnología surge al mejorar la capacidad de anticipación para cambiar el entorno, y la movilidad al favorecerlo. Ejemplos que surgen al poner en práctica la tecnología son la agricultura, la ganadería, el comercio frente al trueque, la búsqueda de abrigo a modo de refugios y construcciones, la arquitectura. Intrínsecas al desarrollo humano son la inteligencia y el sistema inmunitario. Otras más generales, el encriptarse, mimetizarse con el entorno, o encontrar un paisaje que se parezca al individuo y esconderse en él; también la dotación de alas y aletas en algunos seres vivos, así como la dualidad de crecimiento y movilidad que supone la función de empaquetamiento mediante la forma espiral.

- La *independencia nueva*: consiste en la renuncia de la propia identidad individual, y seguir vivo con otra para ganar algo de independencia respecto de la incertidumbre de su entorno. La reproducción y la asociación son los procedimientos más eficaces para crear identidades nuevas. La incertidumbre de un entorno no tiene por qué mantenerse constante. Cuando aumenta la incertidumbre, la complejidad de los sistemas tiende a aumentar. Cuando disminuye la incertidumbre, lo que aumenta es la eficacia (gastar menos, aprovechar más, evitar la competencia). En nuestro planeta, la oscilación de incertidumbres es probable, lo que posibilita la consideración de la inseparable independencia y relación del individuo con su entorno intercambiando energía, materia e información, así como que las líneas evolutivas emerjan. Y es que para que el progreso evolutivo se produzca, han de intercalarse largos períodos críticos, como grandes catástrofes, en que han de seleccionarse seres complejos de entre los fabricados durante intervalos, normalmente cortos, de paz o baja incertidumbre, y profusos en variedad. (Volveremos a profundizar en esta capital idea evolutiva más adelante en nuestra tesis).

Otra manera de crear una nueva identidad es hacerlo a partir de otras dos viejas. Es cuando dos individuos se asocian para crear uno nuevo. Hay dos modos posibles: entre individuos similares, digamos sociedades, y entre individuos distintos, digamos *simbiosis*. En el primer tipo podemos incluir desde el concepto de familia hasta el de sociedad, pasando por el de mero agregado o manada. El mecanismo fundamental es la reproducción, sobre todo sexual. Hay múltiples ejemplos: los pingüinos resisten mejor las fluctuaciones de temperatura gregariamente; los insectos sociales, como las abejas, constituyen un individuo vivo más independiente de la incertidumbre del entorno y más complejo que cualquiera de sus miembros por separado.

Hace cientos de millones de años, ante el aumento de la incertidumbre, muchas bacterias se agruparon para, con ello, dar lugar a una textura fina y consistente. Del mismo modo fueron avanzando las estructuras jerárquicas en la evolución. La reproducción sexual es el gran mecanismo por el cual se generan nuevas identidades a partir de las antiguas. Con la sexualidad surge el concepto de muerte necesaria.

En el segundo tipo se encuentra la integración de dos o más individuos distintos o *simbiosis*. En ella se produce una interacción no nula, como cuando una célula que se alimenta bien y se mueve mal se funde con otra que se alimenta mal y se mueve bien, dando lugar a una nueva célula más independiente que cada una de ellas por separado. La presión de la incertidumbre del entorno es el gran estímulo para que los pactos simbióticos

en todos los niveles biológicos se produzcan (Retomaremos esta idea más adelante en nuestra tesis).

2.7. Ventaja para seguir siendo: la Función

Cuando se rebasa la frontera del ser, un objeto puede transformarse en otra cosa con otro ser. Por ejemplo, el agua pasa del estado líquido al sólido cuando supera los 0° C. de temperatura. “Los biólogos dicen que toda la morfología está sujeta a la adaptación, lo que supone que a través de las generaciones una especie alterará su forma para acomodarse mejor al clima, territorio, movimientos, obtención de alimento, etc. Y todas las innumerables circunstancias que integran su medio ambiente y la vida que lleve dentro de éste; es decir, su funcionamiento”⁵⁹.

Tal y como venimos diciendo, para que algo exista previamente ha debido de ser seleccionado. Continuamente se selecciona todo aquello que puede permanecer en la realidad. Las propiedades que superan selecciones de los objetos suponen una ventaja para perseverar en la realidad y seguir existiendo. A toda propiedad que supera la selección fundamental podemos denominarla propiedad fundamental. De tal forma que “la selección fundamental regula, mediante las leyes y el margen de azar que aquellas permiten, el grado de necesidad para que un objeto exista con las (mismas) propiedades que se observan en su realidad”⁶⁰. A estas propiedades que nos hacen inteligible la realidad las llamaremos funciones. Una vez planteado este esquema conceptual, matizaremos que será empleado el término función tanto para las formas inertes como para las vivas o las cultas, ampliando respecto al lenguaje su significado, y, además, en el caso de las inertes, dejando de lado cualquier connotación intencional o teleológica.

En el mundo inerte, la propiedad forma esférica es más necesaria en un planeta que en un canto rodado. “La necesidad tiene, por tanto, grados, según sea la dosis de azar que permitan las leyes, y es el resultado de la selección fundamental. Se diría entonces que en algún sentido la selección fundamental [...] conduce a la evolución de los objetos inertes (no vivos, no cultos)”⁶¹. Una estrella renunciará a la forma esférica al ser sometida por una eventual fuerza exterior, pero con el tiempo tornará a ella, al ser más necesaria

⁵⁹ WILLIAMS, C. *Los orígenes de la forma*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1984, p. 76.

⁶⁰ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 96.

⁶¹ *Ibidem*, p. 96.

esta configuración en relación con la combinación de leyes y contingencia características de la realidad en que se encuentra, siendo seleccionada entre las posibles, al conferirle mayor estabilidad con la que resistir las ulteriores fluctuaciones. La esfericidad, en este caso, será pues una ventaja para perseverar en la realidad. A este tipo de plusvalía es a lo que denominaremos con el término “función”. Una función en el mundo inerte proporcionará resistencia a los cambios ambientales. De manera que el final del ciclo hacia la estabilidad lo encontramos, por ejemplo, en el mundo inerte, comparando un grano de arena vieja redondo con otro joven irregular. La historia particular de este objeto estará condicionada por la acción de sucesivas selecciones fundamentales, que determinarán al final de su trayecto la *función fundamental*. “Es una fuerte intuición conocer las funciones fundamentales de lo real, ya que tiene que ver con la comprensión de la realidad”⁶².

En el mundo vivo, el símil de la esfera será la forma huevo, ya que esta forma protege contra el enfriamiento y la depredación. Además, no rueda tanto como la esfera, y es más fácil su salida del cuerpo de la madre que lo genera. Una función en el mundo vivo permitirá a un individuo mantener lo máximo posible su identidad, modificando lo que haya que modificar para perseverar, proponiendo innovaciones compatibles con la selección natural. La forma esférica evolucionada como ovoide, en este caso, será una *función natural*. “Luego, la incertidumbre ambiental puede seguir promocionando nuevas selecciones naturales, y con ellas nuevas funciones. Cada golpe de cincel de la selección natural distorsiona pues una o varias propiedades de los objetos vivos y les dota de nuevos matices funcionales. [...] La selección natural se encuentra con las funciones”⁶³.

A diferencia de las selecciones fundamental y natural, que generan funciones como la función fundamental y la función natural, la selección cultural las busca; la función en el mundo culto se anticipa a la incertidumbre. Hay en ella una intención. Crear en el mundo culto es seleccionar. El pintor ha de decidir el encuadre desde el cual representar un paisaje, de entre todos los posibles. Crear quizás sea una ilusión, pero para comprender también hay que seleccionar. Si no existiese ningún tipo de selección, todos los objetos y sucesos serían igualmente probables y no habría, por tanto, nada que comprender.

⁶² *Ibidem*, p. 97.

⁶³ WAGENSBERG, J. “Las tres selecciones (fundamental, natural y artificial)”. *Monografías humanitas*, N. °3, 2004, pp. 2-3.

La tarea planteada en esta tesis es la de comprender las formas de los objetos favorecidas por las tres clases de selección –fundamental, natural y cultural-, a través de sus funciones, por su frecuencia relativa en la realidad.

Al igual que ocurre en el acto de la percepción, cuando el científico descubre que algo se repite en la naturaleza, cuando descubre casos comunes en objetos y fenómenos diferentes, agudiza su ingenio. Como asevera el profesor de filosofía de la ciencia Héctor Vázquez Fernández: “si no hubiera comportamientos modelo estables en la naturaleza, la ciencia misma no tendría sentido, pues supone en su búsqueda metodológica la presencia de una serie de regularidades a describir”⁶⁴. En pocas palabras, cuando de forma oculta o no actúa algún tipo de restricción, de selección, que determina una ley, esto da lugar al conocimiento, a la inteligibilidad. Así, como dice el catedrático de filosofía Alfredo Marcos a propósito de la relación de semejanza como principio de inteligibilidad de la naturaleza, “a mi modo de ver, la naturaleza no es inteligente, pero sí es inteligible. Si contiene indicios de inteligencia, es en este sentido preciso, no porque en ella exista inteligencia, sino porque existe inteligibilidad. [...] Además la propia evolución de la Naturaleza ha generado seres inteligentes, como son los seres humanos. Por tanto, efectivamente, se da una doble relación genética entre inteligencia y naturaleza”⁶⁵.

Si observamos formas helicoidales como colas o trompas en un paisaje vivo, y tornillos, o cuerdas en un paisaje culto, conoceremos que la presencia de la hélice en la realidad viene asociada a la función de agarrar. Comprender la forma de un objeto consiste en observar sus funciones fundamentales, naturales o cultas, que comparte con otros objetos de igual o parecida forma. Dichos objetos constituyen una familia que, definida por su frecuencia en la realidad, puede haber sido resultado de una o varias de las selecciones fundamental, natural o culta, para perseverar (resistiendo, modificando o anticipando) en la realidad. Cuanto más ha perseverado un objeto, más probabilidades de seguir haciéndolo tiene.

“Si comprender tiene que ver con lo común entre lo diverso, entonces comprender la forma tiene que ver por lo menos con dos cosas: los objetos que comparten forma y las formas que comparten función”⁶⁶.

La singularidad nos gusta. Comprender tiene que ver con lo frecuente. Cuantos más objetos relacionables muestren una esencia común, más sencillo nos será

⁶⁴ RODRÍGUEZ, F. *La inteligencia en la naturaleza. Del relojero ciego al ajuste fino del universo*. Madrid: Biblioteca Nueva, 2012, p. 188.

⁶⁵ *Ibidem*, p. 74.

⁶⁶ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 135.

comprenderla. Dicha esencia común es su inteligibilidad, la función. La inteligibilidad de un objeto puede depender de la inteligibilidad de sus propiedades (composición, estructura interior, su forma, su tamaño, su frecuencia, diversidad y función exterior), o puede depender de la mente que pretende comprenderlo. Para ello se puede enfrentar su propiedad forma con una propiedad que podemos examinar y que tiene que ver con su perseverancia en la realidad, su función. Algunos objetos muy diferentes en muchos aspectos presentan la misma forma, o parecida.

Uno de los principios del método científico es el de elegir de entre varias posibilidades la más abstracta, la más compacta. El lenguaje común se ocupa de nombrar una forma sin aludir al objeto que la presenta. Usamos la palabra esfera en vez de decir forma de naranja. En el idioma moderno existe un número mucho más pequeño de palabras que de objetos. En ciencia, el lenguaje de la vida diaria se queda corto. Por eso surge la matemática, con un lenguaje propio más abstracto y flexible. La selección matemática puede ser el cuarto tipo de selección.

La comprensión de las formas reales tiene que ver con la observación de las mismas, con la frecuencia de su presencia, con los tipos de selección que dan sentido a la forma en el contexto general de la evolución. Ya Aristóteles dijo: “La abstracción elimina los atributos más particulares de los casos más específicos y, de este modo, llega a los conceptos superiores, que son de contenido más pobre, pero de extensión más vasta”⁶⁷. Con la selección matemática el esquema conceptual gana un grado: “A la selección fundamental (que regula la emergencia de las formas en la realidad inerte), la selección natural (que las consagra y concentra en la realidad viva) y la selección cultural (que las inventa en la realidad inteligente) se añade ahora una cuarta selección matemática (que las define y las nombra como entidades comunes a una diversidad de objetos)”⁶⁸. La selección fundamental se encarga de favorecer la existencia de innovaciones (formas, por ejemplo) de entre las que emergen (como se esfuerza en demostrar la biología moderna, que trata de dar explicación a la complejidad observada, como resultado de la actividad de fenómenos físico-químicos diversos entre los que destacan las dinámicas no-lineales de las que hablaremos largo y tendido más adelante), con el permiso y colaboración de la incertidumbre propia del lugar y del momento, pudiendo ser consagradas o no posteriormente a favor de algún individuo vivo. De modo que, aunque emerjan en la realidad inerte, su probabilidad de presencia en la realidad viva dependerá

⁶⁷ ARNHEIM, R. *El pensamiento visual*. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica, 1986, p. 22.

⁶⁸ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 142.

mayoritariamente de su inteligibilidad, habiendo rebasado la frontera de lo vivo (en relación con la mente que las piensa), y, por tanto, habiendo superado la selección natural y cultural que advierta su presencia por su frecuencia, logrando de este modo perseverar en la realidad. Por ende, los modelos matemáticos que tratan de explicar la complejidad determinarán leyes locales o universales dependiendo de que sean pocos o muchos los sucesos y fenómenos que aprehenden, y siempre siguiendo la premisa de que la complejidad de dicha descripción matemática no supere la de la realidad misma. De manera que “la mejor comprensión de un pedazo de realidad es la mínima expresión del máximo común denominador de todas sus manifestaciones”⁶⁹.

La propiedad común en cualquier tipo de realidad, inerte, viva, o culta, es la de perseverar. En todos los casos, la penúltima *oportunidad* es la de cambiar de identidad. La materia inerte supera la selección fundamental mediante la estabilidad. La materia viva supera la selección natural mediante la adaptabilidad. La materia culta supera la selección culta mediante la creatividad. Estas funciones se suceden y superponen: un ser vivo puede sacrificar su estabilidad en favor de una eventual adaptabilidad, y un ser culto su adaptabilidad en favor de una posible creatividad. Las grandes funciones se abastecen de subfunciones como la idea de seguir vivo anticipando mejor la incertidumbre mediante subfunciones como la inteligencia, la movilidad o la tecnología.

La ley general de cambio da cuerpo a nuestra idea de teoría de la forma, ya que en los objetos inertes su complejidad tiende a la de su contexto; puesto que apenas se rebelan contra las posibles fluctuaciones, su independencia se puede decir que es pasiva. Y como los límites de la materia en la mayoría de los casos no son nítidos, algo similar se puede decir que ocurre con ciertos objetos vivos cuyo comportamiento es prácticamente inerte, como el de las semillas en el mundo vegetal, o el comportamiento vegetal de algunos animales. Sin embargo, para superar la capacidad de resistir el entorno del mundo inerte, y de modificarlo del mundo vivo, se requiere de la independencia activa, que supone superar los cuatro términos que ya describimos de la ley general de cambio. Así, ya algunos animales, que no vegetales, explotan su particular capacidad de modificar su entorno mediante la anticipación, la movilidad y la tecnología. Por su parte, los individuos cultos superan dicha capacidad creando su entorno al provocar cambios de identidad. Por ejemplo, la evolución se vuelve creativa renunciando en ocasiones a la propia identidad mediante la simbiosis, o afianza identidades colectivas humanas cultas como el folclore,

⁶⁹ *Ibidem*, p. 148.

las ideologías, el arte o la ciencia, sin perder, en la mayoría de los casos, la componente adaptativa de su naturaleza inmediata.

En resumen, podemos decir que:

1. Utilizamos el lenguaje matemático para nombrar las diferentes formas. Muchas de las formas matemáticas observadas en la naturaleza son ya palabras del lenguaje común: esfera, recta, hexágono, etc. Así, D'Arcy Thompson⁷⁰ decía:

El estudio de la forma puede ser meramente descriptivo o puede llegar a ser analítico. Empezamos describiendo la forma de un objeto con las palabras del lenguaje ordinario, terminamos definiéndolo con el lenguaje preciso de las matemáticas; y un método tiende a seguir al otro en un estricto orden científico y continuidad histórica. Así, por ejemplo, la forma de la tierra, de una gota de lluvia o de un arco iris, la forma de una cadena colgante, o la trayectoria de una piedra arrojada al aire, pueden describirse todas, aunque inadecuadamente, con palabras comunes; pero cuando hemos aprendido a comprender y a definir la esfera, la catenaria o la parábola, hemos realizado un avance maravilloso y tal vez múltiple. La definición matemática de una forma tiene una cantidad de precisión de la cual carecía bastante nuestro estadio más temprano de mera descripción; se expresa en pocas palabras o incluso con símbolos más breves, y estas palabras o símbolos están tan impregnados de significado que economiza el pensamiento mismo; nos conducimos por medio de esto en armonía con el aforismo de Galileo (tan antiguo como Platón, tan antiguo como Pitágoras, tan antiguo, tal vez, como la sabiduría de los egipcios), que “La filosofía está escrita en este gran libro continuamente abierto ante nuestros ojos, me refiero al universo, pero no se puede comprender si antes no se ha aprendido su lenguaje y nos hemos familiarizado con los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, y los caracteres son triángulos, círculos y demás figuras geométricas, sin los cuales es humanamente imposible entender ni una sola palabra; sin ellos se da vueltas en vano por un oscuro laberinto⁷¹.”

2. La realidad se compone de aquello que resulta de las tres selecciones: fundamental, natural y cultural.

⁷⁰ D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948). Profesor en zoología en la Universidad escocesa de St. Andrews, fue un gran erudito, ya que además de matemático, físico-biólogo y experto conocedor de los clásicos griegos y latinos, era un humanista y polígrafo incansable. Su tratado *Sobre el crecimiento y la forma* es un compendio genuino de todos estos saberes donde da una visión dinámica de la morfogénesis, de la física aplicada al estudio de los seres vivos, y propone una matemática aplicada a la biología. Centrará su estudio en el conocimiento del diseño integrador en la naturaleza y las formas diversas que proliferan en ella, observando el patrón de crecimiento de las células, la estructura de los copos de nieve o las franjas aposemáticas de animales como las cebras.

⁷¹ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y de la forma*. Madrid: Ediciones Akal, 2011, p. 258.

3. En esta realidad encontramos muchas formas cercanas a las formas que abstractamente define la selección matemática.
4. La frecuencia con la que se observa una forma matemática en la realidad de este mundo se mide por el número de objetos reales que la comparten.
5. Las formas matemáticas que se observan no son igual de probables. La simetría circular es la que más prolifera.

3. PERCEPCIÓN DE LA FORMA

Hemos creído conveniente desarrollar este epígrafe desglosándolo en una serie de subapartados que, debido a la sutil de la frontera que diferencia los unos de los otros, recurren a una gran diversidad de fuentes, las cuales nos facilitarán una mejor exposición de nuestro discurso.

3.1. La percepción como primer contacto con la realidad

Podemos abordar este apartado teniendo en cuenta dos posiciones: la de los que opinan que, aun a pesar de la apariencia caótica que exhiben los estímulos, su organización está dada y el sujeto sólo ha de captarla, siendo las cualidades de la forma, las estructuras de campo, o los invariantes estímulares los que varían la percepción de las cosas; y la de los que consideran que los estímulos han de ser organizados por el sujeto. Al primer grupo pertenecen los estudiosos de la psicología de la forma o *Gestalpsychologie* y la escuela de J. J. Gibson; al segundo grupo pertenece la tendencia mayoritaria en la psicología actual. No obstante, antes de comenzar a abordar este tema creemos conveniente aclarar que, según Arheim: “la psicología, como ciencia humanística, está comenzando a nacer de un inestable acercamiento entre las interpretaciones filosóficas y poéticas del hombre, por un lado, y las investigaciones experimentales sobre los músculos, los nervios y las glándulas, por otro. Y apenas hemos llegado a acostumbrarnos a lo que pudiera ser una tal ciencia de la mente cuando nos vemos enfrentados con la tentativa de abordar científicamente la más delicada, la más

intangible, la más humana de las manifestaciones humanas. Ensayamos una psicología del arte”⁷².

Y es que, para los estudiosos de la psicología de la forma, también conocidos como los teóricos de la Gestalt⁷³, hablar de percepción no conlleva referirse a una función psíquica específica, sino a un conjunto del que forman parte también las sensaciones, al igual que la asociación y la atención, quedando definidas como:

- Sensación: los elementos que percibimos surgen en forma de sensaciones y se experimentan luego en forma de imágenes. Por lo tanto, cada sensación está relacionada con su estímulo (es la “hipótesis de la constancia”). Ante un estímulo, dependiendo del órgano sensorial que lo perciba, sabremos qué sensación experimentará el sujeto, resultando del grado de atención que ponga.
- Asociación: es actualmente el más importante principio de la memoria y, además, el factor que rige nuestras ideas. La relación creada entre determinados elementos, que en algún momento se encontraron en consecución espacial o temporal, provoca que posteriormente se perciban unidos.
- Atención: es el menos claro de los tres conceptos mencionados, pero está íntimamente relacionado con los otros dos. Para que nuestros sentidos capten un estímulo debe haber estado precedido de una llamada de atención; pues de no ser así, dicho estímulo habría pasado desapercibido. Por lo tanto, la atención es un factor que, además de influir en los procesos conscientes, se ve afectado por ellos.

Ya Platón arguyó sobre las sensaciones en el *Timeo*: “De la relación de los cuerpos particulares con el nuestro nacen las impresiones acompañadas o no de sensación, y desde luego las impresiones comunes al cuerpo entero (las del tacto)”⁷⁴.

La filosofía kantiana se refleja principalmente en el uso, por parte de los teóricos de la Gestalt, de la distinción entre sensibilidad, entendimiento y razón, y de la diferencia entre conceptos empíricos y conceptos puros. Además, tanto Kant como los psicólogos gestaltistas, reconocían alguna relación entre el término de sensación y el de percepción;

⁷² ARHEIM, R. *Hacia una psicología del arte. Arte y entropía*. Madrid: Alianza Forma, 1980, Introducción.

⁷³ Teoría perceptiva GESTALT. Creada durante las primeras décadas del siglo XX por los investigadores alemanes Wertheimer, Koffka y Köhler. Parte de lo que formulan sobre el conocimiento Descartes y Kant, pues la mente está preparada y es sensible al acto de concebir, existe una predisposición para ello. Esto supone contar en principio con la capacidad de organización perceptual innata. Consideran la percepción como el proceso fundamental de la actividad mental, y suponen que las demás actividades psicológicas como el aprendizaje, la memoria, el pensamiento entre otros, dependen del adecuado funcionamiento del proceso de organización perceptual. El enfoque de la GESTALT, como planteamiento de la Psicología de la Percepción, influirá enormemente en posteriores estudios acerca de la Teoría de la Forma. El propio término GESTALT se traduce por “forma”, pero equivale más a “estructura” o “configuración”.

⁷⁴ AZCÁRATE, P. DE. *Obras completas de Platón. Puestas en la lengua castellana por primera vez por Patricio de Azcárate, Tomo VI*. Reproducción facsimil. Madrid: Medina de Navarro Editores, 1872, p. 136.

pero el filósofo hacia surgir la relación de los procesos mentales, y los psicológicos, de los procesos cerebrales.

Por otro lado, el filósofo alemán Edmund Husserl (1859-1938), que influyó notablemente en los gestaltistas, defendió que, tanto en los conceptos fundamentales de la Teoría de la Gestalt como en sus métodos experimentales, existe la necesidad de comprender la experiencia consciente como vía fundamental para la descripción de los procesos mentales.

Así, según la Gestalt, “nuestras percepciones se estructuran de distinta forma que la estimulación sensorial”⁷⁵. Es decir, nuestras percepciones son diferentes de las sensaciones. Profundas investigaciones y experimentos confirmaron que podemos ver movimiento donde realmente no lo hay. De manera que demostraron que esto no ocurría debido a la fijación de los músculos de los ojos, tal y como se había defendido hasta el momento, sino que se debe al “fenómeno phi” o movimiento aparente, esto es, a ilusiones ópticas que se crean al simular movimiento mediante la presentación oportuna y continuada de estímulos estáticos iluminados. La percepción no está determinada por el estímulo, sino que la percepción misma es quien da forma y significado a los estímulos. “El sujeto no tiene que construir la percepción con sensaciones, sino que las sensaciones le llegan ya organizadas. Percibir es captar la estructura”⁷⁶.

En segundo lugar, la percepción es capaz de separar el campo perceptivo en dos partes: una en la que se focaliza la atención (figura), y otra menos clara e importante (fondo). Y, por último, aun habiendo hecho la anterior clasificación, nuestra percepción no recibe la información de forma individual, sino que tiende a estructurar ambas partes, formando una totalidad, de acuerdo con unas leyes: 1. Ley de la proximidad: los estímulos próximos entre sí tienden a percibirse agrupados; 2. Ley de la semejanza: los estímulos parecidos entre sí tienden a percibirse agrupados; 3. Ley del cierre: las figuras abiertas, inacabadas o incompletas, tienden a cerrarse, acabarse o completarse, con el fin de que adquieran una forma; 4. Ley del destino común: los elementos que se desvían de un modo similar respecto de un grupo mayor tienden a percibirse agrupados; 5. Ley de concisión: ley general que tiende a formar una “buena” Gestalt. El término “buena” incluye: regularidad, simetría, equilibrio, etc.; es decir, una suma de todas las leyes anteriores.

J. J. Gibson, alumno de Koffka (uno de los psicólogos de la Gestalt) y de sus seguidores, también coincidiría con los gestaltistas en que el sujeto no tiene que organizar

⁷⁵ MARGALEF, J. B. *La percepción, desarrollo cognitivo y artes visuales*. Barcelona: Editorial Anthropos, 1987, pp. 23-24.

⁷⁶ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 260.

los datos sensoriales, puesto que en los estímulos está toda la información necesaria, determinando todo cuanto ocurre en el proceso perceptivo.

Sin embargo, para los estudiosos del segundo grupo que mencionamos al inicio, los estímulos son organizados por el sujeto. Percibir es construir. De este modo, teniendo en cuenta a Rudolf Arnheim, el cual centró sus estudios en la percepción visual, se podría decir que “el conjunto de operaciones cognoscitivas mentales -tales como la recepción, el almacenaje, la repetición-, y el procesamiento de la información -percepción sensorial, memoria, pensamiento y aprendizaje-, son fundamentales en la percepción. En este sentido, se entiende por percepción visual al pensamiento visual”⁷⁷. “Completamos lo visto con lo sabido, damos estabilidad a lo que no la tiene, interpretamos los datos dándoles significado. [...] Así funciona la mirada inteligente: anticipa, previene, utiliza información sabida, reconoce, interpreta”⁷⁸.

Si tenemos en cuenta la descripción que los físicos hacen del proceso óptico, diremos que “los objetos de la realidad emiten y reflejan luz de modo que las lentes de nuestros ojos proyectan imágenes de esos objetos sobre las retinas, que transmiten mensajes al cerebro”⁷⁹; y, según Arnheim, “El mundo arroja su reflejo sobre la mente, y este reflejo sirve de material en bruto que debe ser examinado, probado, reorganizado y almacenado”⁸⁰. De este modo, podremos sostener que la percepción visual es eminentemente activa. También Marina mantiene que:

han sido los neurólogos, que con enorme talento han estudiado la complejidad de los acontecimientos nerviosos, los culpables de que hayamos perdido la ingenuidad. La mirada no sale hasta el objeto visto, como creían los antiguos, y como también cree el lenguaje. “Escudriñar” y “escutar” significaban originariamente visitar un lugar, recorrerlo. El ojo vagabundearía por las cosas, experimentándolas. “Experiencia” significa lo mismo: lo sucedido en un viaje. Tampoco podemos decir que el ojo sea una cámara fotográfica que recoja una imagen ya perfilada. Nuestro sistema visual se limita a reaccionar ante ondas electromagnéticas -la luz visible-, de las que extrae, por procedimientos que no conocemos bien, información sobre la realidad. No hay percepción sin estímulo, pero el estímulo no determina por completo la percepción. Hay una holgura

⁷⁷ ARNHEIM, R. *El pensamiento visual...*, p. 27.

⁷⁸ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 31.

⁷⁹ ARNHEIM, R. *El pensamiento visual...*, p. 22.

⁸⁰ *Ibidem*, p. 28.

entre ambos, que permite un juego. Justamente en el juego de la facultad de ver, la mirada se hace inteligente⁸¹.

Y es que, tal y como ya dijo Platón en el *Timeo*, “la luz del día encuentra la corriente del fuego visual (fuego interior) uniéndose íntimamente lo semejante a su semejante, se forma en la dirección de los ojos un cuerpo único, donde se confunden la luz, que sale de dentro, y la que viene de fuera. Este cuerpo luminoso, sujeto a las mismas afecciones en toda su extensión, a causa de la semejanza de sus partes, ya toque a cualquier objeto, o sea tocado, trasmite los movimientos, que recibe a través de todo nuestro cuerpo, hasta el alma, y nos hace experimentar la sensación que llamamos vista”⁸².

De lo dicho anteriormente podemos concluir que la percepción visual se anticipa al pensar y, por otra parte, que todo conocimiento es precedido por un proceso de percepción. “Ésta es la trayectoria del vuelo de la ciencia. Despega de la percepción, sube a las nubes del concepto y, o bien vuelve a la tierra de la que partió, para comprobar en ella sus ideas, o se queda para siempre en las nubes. Así describió Antonio Machado la tarea de pensar:

De la mar al percepto,
Del percepto al concepto,
del concepto a la idea
-¡Oh, la linda tarea!-,
de la idea a la mar.
¡Y otra vez a empezar!”⁸³.

La continua respuesta al medio constituye la base del sistema nervioso. Los sentidos evolucionaron como auxiliares biológicos. El estado vigilante hacia los constantes cambios del medio de la mente activa permite la supervivencia humana.

“Se nos dice que lo que una persona ve ahora no es más que el resultado de lo que ha visto en el pasado”⁸⁴. Sin embargo, matizando, Gaetano Kanizsa afirma: “Si hemos podido con las cosas de nuestro entorno, es precisamente porque ellas se han constituido

⁸¹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 30-31.

⁸² AZCÁRATE, P. DE. *Obras completas...*, p. 187.

⁸³ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 41.

⁸⁴ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual. Psicología del ojo creador*. Madrid: Alianza Editorial, 1979, p. 64.

para nosotros a través de las fuerzas de organización perceptual que actuaban con anterioridad, independientemente de la experiencia, permitiéndonos de ese modo experimentarlas. En segundo lugar, la interacción de la forma del objeto presente y de las cosas vistas en el pasado no es automática y omnipresente, sino que depende de que se perciba una relación entre ellas”⁸⁵. Así, según Wagensberg, “la operación de percibir - recibir información- puede abordarse según distintos grados de iniciativa por parte del pensador. En efecto, podemos percibir el mundo porque lo vemos. O porque lo miramos. O porque lo observamos. O porque experimentamos con él. [...] Experimentar equivale a enriquecer la información como consecuencia de provocar observaciones próximas según sea nuestro ingenio para intervenir en el resto del mundo”⁸⁶.

En definitiva, tal y como dijo el avezado Sir Ernst H. Gombrich, “Cuanta mayor importancia biológica tenga para nosotros un objeto, más sincronizados estaremos a reconocerlo, y más tolerantes serán nuestros criterios de correspondencia formal”⁸⁷.

3.2. La percepción selecciona

“La percepción tiene unos fines, es selectiva”⁸⁸, pues entre otras cosas se activa cuando percibe un cambio en el medio. Dichos cambios se acrecientan por el movimiento del propio cuerpo del observador y la visión, imponiendo al material que registra un orden conceptual, tendiendo a simplificar el mensaje. Este tipo de abstracción es innata. “En el plano neuropsicológico se producen varias etapas: la primera constituye una fase de búsqueda y de selección, distinguiendo el estímulo significativo del conjunto. Esto exige una exploración y, por tanto, el establecimiento de un plan, hay una anticipación. Finalmente, las sensaciones recogidas se seleccionan”⁸⁹. Por su parte, “los movimientos del ojo que seleccionan los estímulos que destacan dentro del propio campo visual se encuentran a medio camino entre el automatismo y la respuesta voluntaria”⁹⁰. Esto supone la distinción de un objeto respecto del contexto, por sí mismo o por atender a las propias necesidades del observador. Como dice Arheim: “De la correcta selección del nivel perceptual elegido dependerá el pensamiento cognoscitivo resultante”⁹¹. En segundo

⁸⁵ *Ibidem*, p. 64.

⁸⁶ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 90.

⁸⁷ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual...*, p. 66.

⁸⁸ *Ibidem*, p. 33.

⁸⁹ VIGOUROUX, R. *La fábrica de lo bello*. Barcelona: Editorial Prensa Ibérica, 1996, p. 177.

⁹⁰ *Ibidem*, p. 182.

⁹¹ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual...*, p. 27.

lugar, “se produce la aprehensión, la transmisión y el tratamiento de la información, apareciendo una representación mental del objeto. Y finalmente se produce la integración de los datos recogidos en el conjunto de las actividades neuropsicológicas. La cosa vista [...] se convierte en fenómenos vividos. La realidad es experimentada como tal, confrontada a las representaciones memorizadas e incorporada a la propia intimidad del universo mental”⁹².

3.3. Percibir la forma

“Percibir consiste en la formación de “conceptos perceptuales”. [...] Por tanto, la visión es una actividad creadora de la mente humana. La percepción realiza a nivel sensorial lo que en el ámbito del raciocinio se entiende por comprensión. La vista de cada uno de los hombres se anticipa modestamente a la capacidad del artista para hacer esquemas que interpreten válidamente la experiencia mediante la forma organizada. Ver es comprender”⁹³. Luego, “la forma interpreta el entorno”⁹⁴.

La percepción de la forma, siguiendo los preceptos de la teoría de la Gestalt, consiste en “la captación de los rasgos estructurales más que en el registro indiscriminado de los detalles que se encuentran en el material estimulante, organizado al llegar al cerebro con la configuración más simple compatible con él”⁹⁵. De este modo, la forma entendida como concepto perceptual destaca por dos propiedades: 1. Posee generalidad y, por tanto, ha de poder ser clasificada; 2. Es fácilmente identificable.

Siguiendo el principio de la Gestalt de “la buena continuación”, toda forma bidimensional o tridimensional, al sufrir una transformación proyectiva, sufre una deformación perceptual, “las varias proyecciones del sólido no se dispersan al azar en el espacio y el tiempo, sino que aparecen como secuencias legales de cambio gradual”⁹⁶. La armonía y concordancia inherente en esa secuencia logran la constancia de la forma. “Las varias proyecciones bidimensionales de un cubo se ven como un cubo porque ese sólido tridimensional es la forma más simple, simétrica y regular a que todas ellas pueden referirse. [...] La distorsión que produce la perspectiva en el cubo se percibe como una

⁹² VIGOUROUX, R. *La fábrica de lo bello...*, pp. 177 y 182.

⁹³ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual...*, p. 62.

⁹⁴ ARNHEIM, R. *Hacia una psicología del arte. Arte y entropía*. Madrid: Alianza Forma, 1980, p. 47.

⁹⁵ ARNHEIM, R. *El pensamiento...*, p. 41.

⁹⁶ *Ibidem*, p. 61.

desviación o convergencia geoméricamente simple de su forma invariable, y el carácter de estas modificaciones impuestas, que es conforme a ley, hace posible que la mente distinga entre lo que pertenece a la forma del objeto de por sí, y lo que se debe a la distorsión proyectiva. [...] La percepción más rica observa y goza de la hechizante y esclarecedora variedad de la forma proyectantemente cambiante”⁹⁷.

Este tipo de abstracción requiere de una mente capaz de percibir no sólo los aspectos que recibe en un momento dado, sino de ver lo momentáneo como parte integrante de un todo más amplio.

La penetración de la iniciativa individual en los sistemas perceptivos permite la aparición de la mirada creadora. Puedo buscar un significado visual nuevo. El estímulo es un pretexto donde puedo leer mi propio texto. Ni siquiera el paisaje, con su estabilidad geológica, permanece imperturbable ante la mirada. Para el ojo de Monet esa presunta estabilidad era un espejismo. [...] la luz cambia constantemente, y los estímulos que llegan a nuestra retina, también. A través de imágenes inestables percibimos un mundo estable. Aunque me mueva alrededor del árbol y se alteren las perspectivas, las luces y los colores, aunque cada fragmento sea distinto y el entramado de hojas y de tallos se construya y deshaga como el juego de un lento caleidoscopio, el árbol permanece idéntico. Ésa es la razón de que no podamos explicar lo que percibimos como si fuera un agregado de sensaciones. Vamos más allá: estabilizamos el flujo, adivinamos lo que no vemos, completamos con la memoria lo que se hurta a nuestros ojos. El estímulo cambia, pero el significado permanece. *Percibir es asimilar los estímulos dándoles un significado*. Y como el significado es parcialmente obra nuestra, pertenece a nuestra estirpe, cada hombre puede interpretar un mismo patrón estimular a su manera. Unos ven como fondo lo que otros ven como figura, la botella estará medio llena o medio vacía, la novedad será percibida como amenaza o como placer. Somos creadores de significados libres, aunque esta libertad esté siempre limitada. En este caso, lo está por el estímulo. Lo que hace la mirada es inventar posibilidades perceptivas en las propiedades reales del estímulo⁹⁸.

De modo que, como ejemplo ilustrativo de lo expuesto por Marina, creemos que es interesante introducir el reconocimiento del acto creativo inherente a la invención de la silueta según Alois Rielg: “[...] Dibujar, pintar o rayar por vez primera el mismo animal sobre una superficie exigió una actividad francamente creadora, pues no era en este caso

⁹⁷ *Ibidem*, pp. 63-64.

⁹⁸ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 32.

el cuerpo lo que se copiaba, sino la silueta, el contorno, que no existe en realidad y que hubo de inventar el hombre libremente”⁹⁹. Y si tenemos en cuenta que “el dibujo -decía Degas- no es la forma, sino la manera de ver la forma”¹⁰⁰, y que, según Ruskin, “no hay ojo inocente [...] si alguien quiere dibujar, lo primero que debe hacer es olvidar lo que sabe y a continuación mirar”¹⁰¹, no cabe duda de que percibir la forma es inventar posibilidades.

Si nos centramos en la invención de la forma artística, “una obra de arte es un intento de alcanzar lo trascendente. Es materia y es espíritu, es forma y contenido. Ha sido concebida primariamente para la vista”¹⁰². En uno de sus ensayos políticos, Balzac aseveró: “Todo es forma, la vida misma es una forma”¹⁰³. Resulta entonces que “el arte no se limita a revestir la sensibilidad con una forma, sino que despierta en la sensibilidad la forma”¹⁰⁴. De ahí que la forma deje de ser virtual cuando se representa o, como diría Ludwig Wittgenstein en el *Tractatus Logico-philosophicus*, parafraseado por Félix de Azúa: “De lo que no se puede hablar, mejor es callarse [...] ¡y pintarlo!”¹⁰⁵.

3.4. Percibir la forma matemática

“Uno: dibujar es siempre un ejercicio de abstracción y un ejercicio de inteligibilidad y conocimiento. No se puede dibujar sin separar, con algún criterio, la esencia de los matices, lo trascendente de lo superfluo. Además, dos: separar una parte de un todo equivale a subrayar esa parte dentro del todo”¹⁰⁶. Así,

Por regla general, son los estilos abstractos los que han prevalecido, no como etapas preparatorias en el camino de algo más perfecto, sino como expresión suficiente, plenamente materializada, de ciertas concepciones de la vida y del papel del arte en la vida. [...] La representación abstracta difiere de la correspondiente configuración estimular del modelo en que reproduce algunos rasgos esenciales de modo estructuralmente purificado. Ofrece así una interpretación del modelo, y esta cualidad es

⁹⁹ RIEGL, A. *Problemas de estilo. Fundamentos para una historia de la ornamentación*. Barcelona: Gustavo Gili, 1980 (1893), p. 9.

¹⁰⁰ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 36.

¹⁰¹ BONET CORREA, A. *Figuras, modelos e imágenes en los tratadistas españoles*. Madrid: Alianza Editorial, 1993, p. 237.

¹⁰² FOCILLON, H. *La vida de las formas y elogio de la mano*. Madrid: Xarait Ediciones, 1983, p. 9.

¹⁰³ *Ibidem*, p. 85.

¹⁰⁴ *Ibidem*, p. 50.

¹⁰⁵ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 128.

¹⁰⁶ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 204.

importante para explicar el estilo grandemente abstracto del arte primitivo. El origen de las formas extremadamente geométricas u “ornamentales” que se dan en diferentes periodos y por todo el mundo se ha atribuido fundamentalmente o al estímulo dado por la observación de formas simples en la naturaleza (el disco solar, el horizonte recto) o al influjo de ciertas artesanías, la tejeduría especialmente, que por razones puramente técnicas dan lugar a esquemas sencillos, triángulos, por ejemplo. [...] Si la representación abstracta realiza una interpretación, entonces tal vez haya que relacionar el estilo del arte primitivo con el hecho de que la orientación del hombre en el seno de su entorno, tan esencial para su supervivencia, tiene lugar, en un principio, a un nivel fundamentalmente perceptual. En el niño, lo mismo que en el primitivo, las ideas sobre las fuerzas que gobiernan la naturaleza y la vida se derivan de observaciones sensorias. Ahora bien, de acuerdo con el punto de vista presentado aquí, la comprensión perceptual sólo es posible en la medida en que unos esquemas de categorías perceptuales den cuenta del material estimular. Cuanto más simples sean esos esquemas, más facilitada quedará la comprensión. Las representaciones de forma sencilla son intentos de la mente joven de hacer comprensible el entorno sensorio presentándolo como una forma bien organizada. De ser esto así, el arte resulta ser a todas luces, no un lujo, sino una herramienta biológicamente esencial¹⁰⁷.

Partiendo de que “las figuras geométricas por excelencia son, en primer lugar, el círculo; a continuación, el cuadrado, el triángulo, el pentágono y los demás polígonos regulares, y, por último, tal vez las cónicas (la elipse, la hipérbola, y la parábola), las espirales y otras curvas notables. Estas figuras, consideradas las más puras, idolatradas en todas las épocas y dotadas de un gran contenido simbólico, han marcado el entorno de todos los asentamientos humanos. Seguramente son figuras arquetípicas, en el sentido empleado por el psicólogo Carl Jung, y se han utilizado profusamente como formas, bien sagradas bien profanas, en cualquier etapa de la historia”¹⁰⁸. Además, en el mismo sentido,

algunos investigadores han buscado pruebas de que los conceptos geométricos son innatos y de que no necesitan lenguaje ni cultura para manifestarse. Lo han comprobado realizando testeos comparativos a niños y adultos de la tribu amazónica de los Mundurukú, que se mantuvieron aislados de nuestra civilización durante más de cuatro siglos desde la llegada de los conquistadores europeos. Su ancestral conocimiento de la

¹⁰⁷ ARHEIM, R. *Hacia una psicología del arte. Arte y entropía...*, pp. 47-48.

¹⁰⁸ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 17.

geometría señala que existen, en nuestra especie, intuiciones geométricas que son independientes de un aprendizaje previo, de una experiencia anterior con mapas o símbolos gráficos, e incluso de un lenguaje de términos geométricos. Toda una revolución para la neurología, la antropología, la psicología o la hermenéutica, disciplinas que aún no han podido determinar si el lenguaje es absolutamente necesario para conocer lo real¹⁰⁹.

Por otra parte, a la hora de captar la forma, el sentido de la vista casi siempre la aprehende cogiendo un esquema global. Según defiende la Gestalt, “todo esquema estimulador tiende a ser visto de manera tal que la estructura resultante sea tan sencilla como lo permitan las condiciones dadas”¹¹⁰. En la naturaleza hay muchos sistemas que tienden a regularse, es decir, a formar una Gestalt. La relación entre las *gestalten* físicas y las *gestalten* fenoménicas es justificada mediante el “Principio del Isomorfismo Psicofísico”, por el cual el orden en el espacio y sucesión de los procesos mentales es idéntico. Es obvio que las figuras geométricas simples están muy lejos del tipo de esquema intrincado que normalmente encontramos en el arte y en la naturaleza. Pero también es verdad que las construcciones teóricas nunca pretenden otra cosa que dar una versión aproximada de las complejidades de la realidad. Por consiguiente, “la forma no puede derivarse por entero de los objetos representados en la obra de arte, por ser al mismo tiempo una contribución creativa del organismo. Tres tendencias creativas de este tipo han resultado ser inherentes a la forma de una obra de arte. Son las tendencias hacia: a) la simplificación; b) los esquemas equilibrados, regulares y simétricos; y c) el enriquecimiento de la estructura. Las tres pueden justificarse por fines genuinamente artísticos de representación y decoración. Sin embargo, se dan también condiciones en que alguna de ellas parece expresar la alteración en la actitud hacia la realidad objetiva”¹¹¹.

En suma, hasta aquí hemos estado hablando de la simplicidad absoluta, pero también ha de considerarse la simplicidad relativa, que se aplica a todos los niveles de complejidad. De modo que cuando se desea hacer una afirmación o desempeñar una función, hay que plantearse dos cuestiones: ¿cuál es la estructura más sencilla que servirá al fin buscado (parsimonia)?; y, ¿cuál es la manera más sencilla de organizar su estructura (orden)?

¹⁰⁹ *Ibidem*, p. 22.

¹¹⁰ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual...*, p. 70.

¹¹¹ ARNHEIM, R. *Hacia una psicología del arte. Arte y entropía...*, p. 51.

Así, para los científicos el principio de parsimonia adoptado, como ya se dijo anteriormente, exige que siempre que varias hipótesis den cuenta de los hechos, se tome la más sencilla.

Y en cuanto al arte, “lejos de expresar distanciamiento de la realidad, el primitivo, y en cierto sentido también el niño, desatiende la fidelidad “fotográfica” a favor de la realidad biológicamente importante, de lo “esencial”. Los estilos de representación “monumentales” ponen el acento en la realidad superior de las ideas. [...] La tendencia a la simplificación no puede separarse de la segunda: la tendencia a la forma equilibrada, regular y simétrica”¹¹².

Es más, a lo largo de la historia del arte, ambas visiones, científica y artística, se han complementado. Por ejemplo, el humanista temprano León Battista Alberti¹¹³, del cual hablaremos en más ocasiones a lo largo de esta tesis, influido por la exploración visible del universo que recientemente se acababa de descubrir en su época, adoptará una concepción general del mundo, dedicando gran parte de sus tratados a recalcar la importancia que han de tener los fundamentos científicos, concretamente las matemáticas en el arte, y llegando a describir la arquitectura como una imitación de la naturaleza que procede según determinadas leyes, ya que “la naturaleza más que desafiar *pone límites*”¹¹⁴; y según un método coherente, siendo la finalidad del arquitecto “introducir en sus obras algo de ese orden y ese método que encontramos en la naturaleza”¹¹⁵. Posteriormente, también Leonardo Da Vinci seguirá la fórmula de Aristóteles, diciendo: “Todo nuestro saber tiene su origen en nuestras percepciones”¹¹⁶. “El secreto del arte de dibujar es descubrir en cada objeto la manera particular como una línea fluctuante se dirige, como una ola central que se despliega en olas superficiales, a través de toda su extensión. Saber mirar, ése es el secreto. La inteligencia prolonga todos los ademanes que percibe en las cosas. Y lo hace saltando con deliciosa frescura de un nivel a otro: de la memoria al futuro, de lo concreto a lo abstracto, de la percepción al concepto, o al

¹¹² *Ibidem*, pp. 51-52.

¹¹³ Leon Battista Alberti (1404-1472). Se le considera el primer teórico del arte del Renacimiento. Gran humanista, cultivó con igual amplitud la filosofía, la ciencia, el saber clásico y las artes, siendo arquitecto, músico y poeta. Las ideas teórico-prácticas, que consideraba todo artista debía conocer, se encuentran esencialmente en tres de sus obras. La más antigua es el tratado *Della Pittura*. El segundo y más importante, *De re aedificatoria*, comprende los diez libros de arquitectura, y el último es un opúsculo sobre escultura *De statua*. El aspecto más innovador de sus propuestas consiste en partir de lo antiguo para dar forma a lo moderno, práctica que ya había comenzado Filippo Brunelleschi. Luego será un personaje activo en cuanto a las transformaciones ocurridas en el Renacimiento, posicionándose en contra de la tradición artística medieval, rescatando la literatura y las artes clásicas con vistas a un proyecto humanista y anticipando con cautela la subjetividad moderna.

¹¹⁴ TAFURI, M. *Sobre el renacimiento: principios, ciudades, arquitectos*. Madrid: Cátedra, 1995, p. 69.

¹¹⁵ BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600*. Madrid: Cátedra, 1985, p. 30.

¹¹⁶ En manuscrito preparado por H. Ludwig para los *Quellenschriften für Kunstgeschichte*, de Eitelberger, *apud* BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600...*, pp. 38-39.

revés. Es el libre juego de las facultades. El creador lo hace con deslumbrante soltura”¹¹⁷. Y es que, “tanto para Leonardo como para Alberti, la pintura es una ciencia porque tiene su fundamento en la perspectiva matemática y en el estudio de la naturaleza”. [...] “la veracidad de la pintura depende de elementos diversos. En primer lugar, del ojo, que es el órgano sensorial que más difícilmente se engaña. En segundo lugar, la pintura no se confía plenamente al ojo sino que verifica sus juicios con la medida. Y, en tercer lugar, la pintura se apoya en los principios de la geometría”¹¹⁸. Puesto que, como él aseveraba: “Los que se dedican a la práctica sin la ciencia son como los marinos que se hacen a la mar sin brújula ni timón y nunca saben decir a ciencia cierta hacia dónde van. La práctica debe fundamentarse siempre en una sólida teoría”¹¹⁹. Asimismo, habiendo sostenido este hábito, añadiremos también sus apuntes acerca de la geometría y la aritmética:

“Estas dos ciencias se aplican solamente al conocimiento de la cantidad..., pero no se preocupan de la cualidad que constituye la belleza de las obras de la naturaleza y la gloria del mundo”), implica también la imposibilidad de crear obras de arte por medios exclusivamente científicos. Sin embargo, la pintura “[...] estudia mediante la especulación sutil y filosófica las cualidades de la forma”. El pintor debe además “mostrar al ojo, por medio del dibujo y bajo una forma visible, la idea y la invención que primero existieron en su imaginación (*nella sua immaginativa*). Y en otro capítulo dice de manera todavía más general: “De hecho, todo lo que existe en cuanto esencia, forma material, o imaginación, el artista lo tiene primero en su mente y después en el trabajo de su mano”¹²⁰.

Así mismo, Galileo defendió que, en realidad, no basta con mirar, “hay que mirar con ojos que quieran ver, que crean en lo que ven y crean ver cosas que tienen valor”¹²¹. Pues como también el filósofo Francis Bacon aseveraría: “El hombre, ministro e intérprete de la naturaleza, hace y entiende en la medida en que haya observado el orden en la naturaleza, mediante la observación de la cosa o con la actividad de la mente; no sabe ni puede saber más. [...] Coinciden la ciencia y la potencia humana, ya que la ignorancia de la causa impide el efecto, y a la naturaleza sólo se la puede mandar si se la obedece: lo que en la teoría desempeña el papel de causa, en la actividad práctica se

¹¹⁷ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 35-36.

¹¹⁸ En manuscrito preparado por H. Ludwig para los *Quellenschriften für Kunstgeschichte*, de Eitelberger, apud BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia...*, pp. 38-39.

¹¹⁹ BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600...*, p. 40.

¹²⁰ *Ibidem*, pp. 49-50.

¹²¹ REALE, G. y ANTISERI, D. *Historia del pensamiento filosófico y científico. Tomo II. Del humanismo a Kant*. Barcelona: Herder, 1995, p. 228.

convierte en regla”¹²².

Y es que “las grandes obras de arte son complejas, pero también las elogiamos por su sencillez, con lo cual queremos decir que aúnan una abundancia de significado y forma dentro de una estructura global que define claramente el lugar y función de cada uno de los detalles del conjunto. A esa manera de organizar una estructura necesaria de la manera más simple que sea posible la podemos llamar su orden”¹²³. Efectivamente, también Spinoza, en la primera parte de su *Ética* sentará las bases de este concepto, al hablar de las cosas:

Apéndice: Pues decimos que están bien ordenadas cuando están dispuestas de tal manera que, al representárnoslas por medio de los sentidos, podemos imaginarlas fácilmente y, por consiguiente, recordarlas con facilidad; y si no es así, decimos que están mal ordenadas o que son confusas. Y puesto que las cosas que más nos agradan son las que podemos imaginar fácilmente, los hombres prefieren, por ello, el orden a la confusión, como si en la naturaleza, el orden fuese algo independiente de nuestra imaginación¹²⁴.

La unidad de concepción del artista conduce a una simplicidad que, lejos de ser incompatible con la complejidad, sólo muestra su virtud dominando la abundancia de la experiencia humana, en lugar de refugiarse en la pobreza de la abstinencia. [...] Ver y recordar implica la creación de totalidades organizadas¹²⁵.

De ahí que para los artistas el principio de parsimonia sea estéticamente válido, en cuanto que no debe ir más allá de lo que sea preciso para sus propósitos.

En relación con lo dicho, confrontemos ahora la visión científica. Por ejemplo, D’Arcy Thompson se ampararía en la matemática, aseverando: “Debemos aprender de los matemáticos a eliminar y a descartar; a mantener el tipo en la mente y abandonar el caso singular, con todos sus accidentes, único; y a encontrar en este sacrificio de lo que poco importa y en la conservación de lo que es imprescindible, las excelencias peculiares del método de las matemáticas”¹²⁶. Más aun: La naturaleza, en palabras de Isaac Newton, “no hace nada en vano, y lo más es en vano cuando bastaría con menos; pues la naturaleza se complace en la simplicidad, y no gusta de la pompa de las cosas superfluas”¹²⁷.

No obstante, en una de las conversaciones que Xavier Zubiri tuvo con Einstein,

¹²² *Ibidem*, p. 293.

¹²³ *Ibidem*, p. 76.

¹²⁴ SPINOZA, B. *Ética demostrada según el orden geométrico* ..., pp. 118-119.

¹²⁵ *Ibidem*, p. 81.

¹²⁶ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma*..., p. 259.

¹²⁷ ARNHEIM, R. *Arte y percepción visual*..., p. 46.

este comentó: “Yo no me he inspirado en el principio de economía¹²⁸ del pensamiento, me he inspirado en algo distinto: en que creo que la arquitectura de las leyes de la naturaleza ha de tener una belleza y una armonía. [...] También Poincaré sostenía que el trabajo matemático tiene tres partes: 1) el análisis inconsciente; 2) el período de incubación inconsciente; 3) la emergencia del producto de la actividad inconsciente a la consciencia. ¿Cómo sabe la mente inconsciente lo que debe transmitir a la mente consciente? Basándose en su experiencia, Poincaré concluye que el inconsciente no es capaz de determinar si una idea es correcta o no. Por eso muchas propuestas no son ciertas. Pero esas ideas, en cambio, tienen siempre el sello de la belleza matemática”¹²⁹.

3.5. Percepción de lo inteligible y de lo bello

“La lectura de un paisaje no se lleva a cabo según las leyes del azar. Es, al mismo tiempo, una captación inmediata de la información percibida y una anticipación. Recurre a una memoria predictiva. Necesita “un saber tácito subyacente”, que es la expresión de la historia personal y de la impregnación cultural del espectador. Pero exige también una estrategia de búsqueda, dependiente de hipótesis de placer establecidas a partir de hechos de memoria”¹³⁰. “Mediante la mirada -a la que tomamos como representante eximia de todo el conocimiento sensitivo- extraemos datos de la realidad. Esto es lo que significa percibir: coger. Pues bien, cogemos de nuestro alrededor lo que nos interesa, porque nuestro ojo no es un ojo inocente, sino que está dirigido en su mirar por nuestros deseos y proyectos”¹³¹. Por tanto, este suceso ocurre como si la mente se esforzara por satisfacer deseos inconscientes.

Luego “lo que caracteriza a la mirada inteligente es que aprovecha con suprema eficacia los conocimientos que posee. Pero, sobre todo, que dirige su actividad mediante proyectos. Cada vez que elegimos dónde mirar y la información que queremos extraer, dejamos que el futuro anticipado por nuestras metas nos guíe. Esta es la estructura básica

¹²⁸ El principio de economía, principio de parsimonia o la navaja de Ockham es un principio metodológico y filosófico atribuido al fraile franciscano, filósofo y lógico escolástico Guillermo de Ockham (1280-1349), según el cual “en igualdad de condiciones, la explicación más sencilla suele ser la más probable”. Esto implica que, cuando dos teorías en igualdad de condiciones tienen las mismas consecuencias, la teoría más simple tiene más probabilidades de ser correcta que la compleja. En ciencia, este principio se utiliza como una regla general para guiar a los científicos en el desarrollo de los modelos teóricos, más como un árbitro entre los modelos publicados. En el método científico, la navaja de Ockham no se considera un principio irrefutable, y ciertamente no es un resultado científico. “La explicación más simple y suficiente es la más probable, mas no necesariamente la verdadera”, según el principio de Ockham. En ocasiones la opción compleja puede ser la correcta.

¹²⁹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 325-326.

¹³⁰ VIGOUROUX, R. *La fábrica de lo bello...*, p. 183.

¹³¹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 29.

de todo comportamiento inteligente, incluido el artístico. Lo que caracteriza la creación poética es estar dirigida por un proyecto poético”¹³². Y es que los artistas no hacen más que prolongar la capacidad de buscar posibilidades que tenemos todos.

Hasta ahora lo que hemos aprendido es que podemos comprender las formas de la naturaleza, e incluso reproducirlas. Y, como ya dijimos anteriormente, para dar rienda suelta a nuestra creatividad previamente debemos comprender. Pero, ¿cuáles son los mecanismos que han sido seleccionados para este fin? La inteligibilidad y la belleza.

“La belleza es el estado de la mente al que se accede por un estímulo visual o cualquier otro sentido. [...] La inteligibilidad es el estado mental al que se accede por reflexión al descubrir lo común entre lo diverso”¹³³. Ambos empiezan en el exterior, pero mientras la inteligibilidad de un pedazo de realidad se refiere a su relación con el resto, la belleza de un pedazo de realidad, en cambio, tiene que ver con la relación entre las partes del pedazo mismo. “Parte de la belleza está en la realidad que percibimos y parte en nuestra propia mente. Con la inteligibilidad ocurre algo similar”¹³⁴.

Ahora bien, algo nos resulta inteligible cuando se repite entre una variedad. “Percibir es captar una estructura [...] es captar invariantes”¹³⁵. “La repetición en el espacio es la armonía. La repetición del tiempo es el ritmo. La belleza se compone de armonía y ritmo”¹³⁶. De modo que podemos definir belleza como el grado de repetición que puede percibirse entre las partes de un pedazo de realidad cuando se recorre el espacio y el tiempo. La simetría se da en pedazos de realidad cuyas partes se repiten. La simetría es un referente para la belleza.

Percibir la inteligibilidad es comprender. Comprender es separar lo común entre lo diverso. El grano de la paja. El ruido de la información. Percibir la inteligibilidad y la belleza puede producir gozo mental. ¿Cuándo surge el gozo al percibir la belleza? Éste se halla en una zona de equilibrio de la mente. Si al observar un pedazo de realidad no hay ningún tipo de regularidad, de orden, de repetición, si no hay ritmo ni armonía, y la mente no tiene nada que resolver, entonces llega un momento en que se rinde. Si, por el contrario, hay demasiado ritmo y armonía, la solución es demasiado obvia para la mente, y se aburre. Luego el gozo mental debe hallarse en un punto intermedio entre la frustración y el aburrimiento. De modo que Gombrich apuntilló: “El hecho más básico de

¹³² MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 34.

¹³³ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 276.

¹³⁴ *Ibidem*, p. 276.

¹³⁵ PORTOGHESI, P. *El ángel de la historia. Teorías y lenguajes de la arquitectura*. Madrid: Hernann Blume, 1985, pp. 260-261.

¹³⁶ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 276.

la experiencia estética justifica el hecho de que el deleite se encuentre en algún lugar entre el aburrimiento y la confusión. Si la monotonía dificulta la atención, un empacho de novedad sobrecargará el sistema y hará que abandonemos”¹³⁷. Por su parte, Ghyka señaló que: “El sentimiento de la perfecta adaptación de un objeto o de un animal a su razón de ser (o a sus condiciones de vida), sugerido por su forma a nuestro subconsciente, es lo que causa el placer estético que procura su contemplación”¹³⁸. Y Wagensberg remarcó que: “El grado de armonía o ritmo que produce gozo depende de la mente, muy especialmente de sus aspectos culturales”¹³⁹.

“La naturaleza del sentimiento estético necesita una recreación personal, a partir de la cual nace el placer. [...] Remite entre otras cosas a su memoria cultural, formada por el conjunto de recuerdos almacenados a lo largo de los aprendizajes, [...] que se transmiten de cerebro en cerebro, de individuo a individuo, de generación en generación, y de material artístico en material artístico”¹⁴⁰. Entonces, ¿cuándo surge el gozo por percibir la inteligibilidad? Lo que hay que tener claro es que ambos gozos son la constatación de una anticipación. El gozo mental, en el caso de la inteligibilidad, debe estar entre la predicción y la sorpresa.

Estudios paleontológicos confirman que el hombre era capaz de percibir la belleza mucho antes que percibir la inteligibilidad. Ciertas piezas de la industria lítica fabricadas por el *homo erectus*, en las que la simetría de las mismas es casi perfecta, lo prueban. La mente humana ha evolucionado inmersa en la realidad natural. En ella se suceden continuamente repeticiones de ritmos y regularidades. “Tan profundamente arraigada está nuestra tendencia a contemplar el orden como marca de una mente ordenante que reaccionamos instintivamente con admiración cada vez que percibimos regularidad en el mundo natural”¹⁴¹. La sucesión de las estaciones, o la salida y puesta del sol, son indicativas de que todo marcha bien. “A nuestro alrededor, la naturaleza late con unos ritmos complejos, y estos ritmos sirven para el propósito de la vida”¹⁴², pues ese orden, esa repetición y frecuencia nos indica que la incertidumbre es menor. Surge entonces “la necesidad del organismo como un agente activo que busca el entorno, no a ciegas ni al azar, sino guiado por su inherente sentido del orden”¹⁴³. La naturaleza está dotada

¹³⁷ GOMBRICH, E. H. *El sentido del orden*. Nueva York: Universidad de Nueva York-Phaidon Press Limited, 2004, p. 9.

¹³⁸ GHYKA, M. C. *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las Artes*. Barcelona: Editorial Poseidón, 1983, p. 16.

¹³⁹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 279.

¹⁴⁰ VIGOUROUX, R. *La fábrica...*, pp. 182 y 203.

¹⁴¹ GOMBRICH, E. H. *El sentido del orden...*, p. 11.

¹⁴² *Ibidem*, p. 11.

¹⁴³ *Ibidem*, p. 6.

equilibradamente de repeticiones y regularidades, de armonías y ritmos, gracias a los cuales funciona.

Y es que, del mismo modo, el primer hombre que fue capaz de gozar con la belleza por lo primaveral fue el que se percató de que cada año volvía a suceder. De esta forma surgió el gozo por la inteligibilidad. En definitiva, el gozo mental por la belleza está asociado a cierto grado de repetición en un punto de equilibrio entre la predicción y la sorpresa, entre el orden y la contingencia. Este grado varía con las culturas, pero existe una inteligibilidad común y un gozo mental de todos los individuos humanos. “La mente ha evolucionado en el entorno natural, por tanto, se puede decir que el grado de orden que produce el gozo mental por la belleza está en la misma dosis de orden propia de la naturaleza”¹⁴⁴.

La naturaleza está repleta de armonías y ritmos, de simetría¹⁴⁵ y de fractalidades, de períodos que se suceden. Tal vez en un momento dado de la evolución, el hombre fabricó una herramienta que no empleó para llevar a cabo la función habitual. La hizo igual por ambos lados. La dotó de simetría bilateral, como la que estaba acostumbrado a ver en los rostros de sus familiares, de los animales, de las hojas de las plantas, siguiendo el grado de incertidumbre de su entorno estable. Lo hizo así para contemplarlo, por su belleza. Esa forma simétrica asociada a la belleza ha permanecido, a través de las sucesivas selecciones, y ha dado lugar a lo que estamos intentando definir como gozo por lo bello. Así, por ejemplo,

Italo Calvino deja caer una curiosa afirmación: un clásico es un libro que equivale al universo. La primera reacción del lector es pensar que se le ha ido la mano. Además, si la ecuación es reversible, ¿equivale el universo a un libro clásico? Pues sí: Platón vio el cosmos como un gran animal, un todo armonioso en movimiento. Eso mismo es un clásico (libro, obra de arte): su perfección, reconocida culturalmente, lo dota de sentido. Un microcosmos que nos ayuda a entender -sintácticamente- el cosmos que lo contiene. El significado de *kósmos* abarca universo, orden, belleza (de cósmico a cosmético). En el modelo clásico, el mundo y la obra de arte son delicada y completamente inteligibles.

¹⁴⁴ DUTTON, D. *El instinto del arte. Belleza, placer y evolución humana ...*, p. 129.

¹⁴⁵ Simetría. (Del lat. *Simetría* y este del gr. *Συμμετρία*), según FATÁS, G. Y BORRÁS, M. G. *Diccionario de términos de arte y elementos de arqueología, heráldica y numismática*. Madrid: Alianza Editorial, 1992, p. 216: “Modo de disponer los objetos en torno a ambos lados de un eje real o imaginario, de modo que cada uno de ellos se corresponda con otro situado al otro lado de un eje. Una disposición estrictamente simétrica sobre un eje vertical se realiza de modo que, al ser doblada la figura por el eje, ambas mitades coinciden perfectamente. En general, equilibrio ordenado de las partes de una obra respecto de su eje mayor o principal”.

De todos modos, lo clásico alberga posturas antagónicas, que el tiempo acabará conciliando. En el mejor poema sobre el universo jamás escrito, Lucrecio deja toda la iniciativa al azar: “Los principios/de la materia no se han colocado/con orden, con razón ni inteligencia”. Lo llamativo es que sostiene esa teoría, heredera de Demócrito y Epicuro, en un tratado científico cuya gran belleza literaria contradice sus enseñanzas propias. En cambio, los estoicos defendían un universo racional, inteligible por bello. El astrónomo y poeta romano Marco Manilio es su portavoz insuperable: “Si el azar nos hubiera regalado este mundo/igualmente el azar lo regiría todo”. Y no es así, según él. Por último, pregunta: “¿Y por qué cada invierno, un año y otro año, se engalanan las noches con las mismas estrellas?”. Por cierto, esos versos acaban de ser citados por un científico, el geólogo Ángel Corrochano, en un estudio sobre el cambio climático. Lo inteligible y lo bello siguen teniendo repercusiones concretísimas.

Aristóteles había declarado, sorprendentemente, que se pueden saber muchas cosas, pero no se puede entender más que una. ¿Cómo es posible esto? San Agustín dio una respuesta digna de Platón: “Veremos toda nuestra ciencia simultáneamente con una sola mirada”. Tomás de Aquino cerró el debate: “Entender muchas cosas como una es entender una sola”. “Así”, asegura, “es como conozco los ángeles”.

En el Renacimiento florentino, un joven (y bello y platónico) filósofo, Pico della Mirandola, redactó un Discurso sobre la dignidad del hombre. Su Dios creador es un “artista supremo” que se dirige al hombre en estos términos: “Te puse en el centro del mundo para que pudieras contemplarlo todo más cómodamente”. Semejante contemplar es la intelección propia de científicos, artistas y poetas. De algunos¹⁴⁶.

También Alberti, en su *De re aedificatoria*, considerará que “la belleza es cualidad capaz de contribuir de modo conspicuo a la comodidad y hasta a la duración del edificio”¹⁴⁷, y definirá la belleza como “una especie de armonía y acuerdo entre todas las partes, que constituye un todo construido según un número fijo, una cierta relación, un cierto orden, tal como el principio de simetría -que es la ley más elevada y perfecta de la naturaleza- lo exige”¹⁴⁸. “La belleza “es el valor absoluto de un organismo estético, que irradia en el alma humana alegría interior, suscitando un acuerdo irremplazable entre el hombre y el universo mediante el cálculo matemático, el juego de las proporciones, o en términos tomados del *Timeo* de Platón, de las medidas pitagóricas”¹⁴⁹.

¹⁴⁶ GONZÁLEZ IGLESIAS, J. A. “Lo Inteligible y lo bello”. *Diario El PAÍS: Babelia*, 2016, p. 3.

¹⁴⁷ TAFURI, M. *Sobre el renacimiento: principios, ciudades, arquitectos ...*, p. 68.

¹⁴⁸ BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia del 1450 a 1600...*, p. 27.

¹⁴⁹ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2010, p.

Ahora bien, la modernidad es un progresivo quebrantamiento. Cuando Rilke escribió que lo bello no es sino el principio de lo terrible estaba formulando en voz alta uno de los axiomas del Romanticismo. Para esta estética (y una estética es un modo de percibir), lo bello es el principio de lo ininteligible. Rilke también se refería al ángel. En ambos casos tomaremos el ángel como metáfora del conocimiento superior. Lo inteligible, sabemos, no es la materia, sino la forma, que no por casualidad guarda relación con lo hermoso (*formosus*). La cultura da cuenta de la naturaleza porque la belleza es única. Eso nos devuelve al principio clásico que Aristóteles llamó mimesis y Horacio tradujo por imitación. Para captarlo hay que tener una determinada *forma mentis*, una “complexión mental”, según el poeta Gil-Albert, en la que lo congénito se alía con lo aprendido. Como dijo Platón, no veremos la idea de belleza si no tenemos ojos para verla. Y esos ojos son culturales. Los científicos que tengan aliento humano (poético, artístico, narrativo) serán los que nos hagan inteligible el universo. Los otros solo nos mostrarán un Cosmos hecho añicos¹⁵⁰.

En resumen, “no padecemos la experiencia, sino que la construimos. Percibir es asimilar los estímulos dándoles un significado y, si somos capaces, podemos inventar nuevas posibilidades perceptivas que conviertan nuestra mirada en una mirada creadora. Nuestro perspicaz ojo puede, de esta manera, inventar la belleza”¹⁵¹. Sólo así cabe comprender que un pintor, Van Gogh, escribiera a su hermano un texto como éste: “Encuentra bello todo lo que puedas; la mayoría no encuentra nada lo suficientemente bello”¹⁵².

Luego la selección cultural trabaja en favor del arte y de la ciencia. Para hacer ciencia es necesario percibir la inteligibilidad. Para hacer arte, la belleza. Pero, así como la ciencia no está reñida con lo bello, ni el arte con la inteligibilidad, el arte puede tan sólo intuir. De modo que puede haber arte sin inteligibilidad. La ciencia se puede comprender sin necesidad de intuir, mientras que el arte se puede intuir sin comprender. De ahí que, según palabras de Borges: “El arte no puede enseñarse, se puede enseñar el amor al arte”¹⁵³.

En definitiva, recapitulando lo dicho, “estos cuatro tipos funcionales corresponden a los medios evidentes por los cuales obtiene la conciencia su orientación hacia la

¹⁵⁰ GONZÁLEZ IGLESIAS, J. A. “Lo Inteligible y lo bello” ..., p. 3.

¹⁵¹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 258.

¹⁵² *Ibidem*, pp. 35-36.

¹⁵³ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 118.

experiencia. La *percepción* (es decir la percepción sensorial) nos dice que algo existe; el *pensamiento* nos dice lo que es; el *sentimiento* nos dice si es agradable o no lo es y la *intuición* nos dice de dónde viene y a dónde va. [...] otros son la imaginación, la memoria y demás”¹⁵⁴.

3.6. La mente como instrumento para el conocimiento

Ya el propio Aristóteles había señalado que

lo que aparece no es simplemente *verdadero*, sino tan sólo lo es para aquel a quien le parece, cuando le parece, en cuanto le parece y tal como le parece...; porque no todas las cosas parecen lo mismo a todos, y aun a uno mismo no siempre las mismas parecen iguales, sino muchas veces contrarias, hasta al mismo tiempo...; por esto, la naturaleza de un ser no se da nunca a nadie en su totalidad, sino solamente según algunos de sus *aspectos* y de acuerdo con nuestras propias *categorías*. [...] lo que está dado a los ojos (lo que se percibe por la vista) es la intención del alma; que no es el ojo el que ve, sino la psique [...] es decir, que la intención, el interés o deseo con que miramos las cosas tiene tanto poder sobre nuestros sentidos que acomodan, desvirtúan o transforman esos objetos adoptándolos perceptivamente a su perspectiva¹⁵⁵.

También según el psicólogo Carl Gustav Jung ¹⁵⁶ “nuestras impresiones conscientes, en realidad, asumen rápidamente un elemento de significado inconsciente que es de importancia psíquica para nosotros, aunque no nos damos cuenta consciente de la existencia de ese significado subliminal o de la forma en que, a la vez, extiende y confunde el significado corriente [...] cada palabra significa algo ligeramente distinto para cada persona, aun entre las que comparten los mismos antecedentes culturales [...] estas variaciones son subliminales, y por tanto, jamás advertidas”¹⁵⁷.

¹⁵⁴ JUNG, C. *El hombre y sus símbolos*. Barcelona: Caralt editor, 1984, p. 57.

¹⁵⁵ MARTÍNEZ MIGUÉLEZ, M. “Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad”. *Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, N.º 65, 2011, p. 48.

¹⁵⁶ Carl Gustav Jung (1875-1961). Fue un médico psiquiatra, psicólogo y ensayista suizo, figura clave de la etapa inicial del psicoanálisis y posteriormente fundador de la escuela de psicología analítica, también llamada de los complejos y psicología profunda. Se le relaciona a menudo con Sigmund Freud de quien fuera colaborador en sus comienzos. Su abordaje teórico y clínico enfatizó la conexión funcional entre la estructura de la psique y la de sus productos, es decir, sus manifestaciones culturales.

¹⁵⁷ JUNG, C. *El hombre y sus símbolos...*, p. 37.

Así como el cuerpo humano representa todo un museo de órganos, cada uno con una larga historia de evolución tras de sí, igualmente es de suponer que la mente está organizada en forma análoga. No puede ser un producto sin historia como no lo es el cuerpo en que existe. Por “historia” no doy a entender el hecho de que la mente se forme por sí misma por medio de una referencia consciente al pasado valiéndose del lenguaje y otras tradiciones culturales. Me refiero al desarrollo biológico, prehistórico e inconsciente de la mente del hombre arcaico, cuya psique estaba aún cercana a la del animal. Esa psique inmensamente vieja forma la base de nuestra mente, al igual que gran parte de la estructura de nuestro cuerpo se basa en el modelo anatómico general de los mamíferos. El ojo experto del anatomista o del biólogo encuentra en nuestro cuerpo muchos rastros de ese modelo originario. El investigador experimentado de la mente de igual modo puede ver las analogías entre las imágenes oníricas del hombre moderno y los productos de la mente primitiva, sus “imágenes colectivas” y sus motivos mitológicos¹⁵⁸.

Este autor llama, a estos “remates arcaicos”, “arquetipos” e “imágenes primordiales”:

El arquetipo es una tendencia a formar tales representaciones de un motivo, representaciones que pueden variar muchísimo en el detalle sin perder su modelo básico. [...] Son una *tendencia* tan marcada como el impulso de las aves a construir nidos, o el de las hormigas a formar colonias organizadas. Lo que propiamente llamamos instintos son necesidades fisiológicas y son percibidas por los sentidos. Pero al mismo tiempo también se manifiestan en fantasías y con frecuencia revelan su presencia sólo por imágenes simbólicas. Estas manifestaciones son las que llamo arquetipos. No tienen origen conocido y se producen en cualquier tiempo o en cualquier parte del mundo, aun cuando haya que rechazar la transmisión por descendencia directa o “fertilización cruzada”, o mediante “migración”¹⁵⁹. Los modelos de pensamiento colectivo de la mente humana son innatos, heredados¹⁶⁰. Los arquetipos en la experiencia práctica son al mismo tiempo, imágenes y emociones. [...] Son trozos de la vida misma, imágenes que están íntegramente unidas al individuo vivo por el puente de las emociones. Hay que aplicarlos en el conjunto vida-situación del individuo determinado a quien se refiere¹⁶¹.

En definitiva, según Jung “estamos impulsados por fuerzas internas y también por

¹⁵⁸ *Ibidem*, p. 65.

¹⁵⁹ *Ibidem*, p. 66.

¹⁶⁰ *Ibidem*, p. 72.

¹⁶¹ *Ibidem*, p. 94.

estímulos externos”¹⁶². Y es que si para Kant “nuestro conocimiento del mundo exterior depende de nuestros modos de percepción”¹⁶³, es por ello por lo que consideramos que no podemos ver el mundo sin la intervención de los sentidos físicos. Debemos tenerlos en cuenta a la hora de hablar de la evolución biológica del hombre, ya que “los órganos de los sentidos reciben datos codificados en estímulos físicos y químicos, y los traducen a otra forma de energía que es el impulso nervioso. Funcionan, pues, como *transductores* que convierten datos físicos en “informaciones”. Una energía se convierte en información cuando afecta a un receptor adecuado. No antes”¹⁶⁴. No obstante, aunque sigamos todo este recorrido del impulso nervioso hasta el cerebro, el modo en que se transforma en experiencia consciente continúa siendo un misterio.

Luego no podemos olvidar que “al percibir no nos comportamos como un espejo que refleja la realidad, sino como un entrevistador, más o menos sagaz, que la interroga”¹⁶⁵. Así, según Wagensberg, “el progreso de la elaboración de imágenes por parte de la conciencia, el progreso del conocimiento se mide mucho mejor por la historia de las preguntas que por la de las respuestas. Y aunque el pensamiento no empieza en la pregunta, sí termina en la respuesta. Por ello desconfía más de la segunda. [...] porque responder es un proceso de adaptación y preguntar un acto de rebelión”¹⁶⁶; y esta última garantiza mejor la supervivencia. Igualmente, Popper¹⁶⁷ ya había subrayado que “percibir es resolver problemas mediante hipótesis”¹⁶⁸. Y es que, en 1959, Hesse también aseveró:

No debemos olvidar que lo que observamos no es la naturaleza misma, sino la naturaleza determinada por la índole de nuestras preguntas. No es posible una observación sin teoría, porque la cantidad de información es demasiado grande, demasiado confusa, demasiado incompleta. Además, liberado de la tiranía del estímulo, el hombre bebe los vientos por la posibilidad. Sentimos la imperiosa necesidad de conocer las cosas, y también las posibilidades de las cosas y nuestras posibilidades. Ante la mirada inteligente, las realidades físicas se muestran inagotables e inseguras. La sola percepción no nos sosiega. Necesitamos comprender. Hemos de conseguir que lo ajeno se convierta en propio. En

¹⁶² *Ibidem*, p. 79.

¹⁶³ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación*. Barcelona: Gedisa Editorial, 1997, pp. 19-20.

¹⁶⁴ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 258.

¹⁶⁵ *Ibidem*, p. 254.

¹⁶⁶ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 76.

¹⁶⁷ Karl Raimund Popper (1902-1994). Fue un filósofo de la ciencia austriaco, considerado uno de los más importantes del siglo XX. Argumentó que una teoría de la ciencia empírica nunca puede ser probada, pero sí falsada para, tras ser examinada, estar en condiciones de diferenciar la ciencia de lo que no es ciencia.

¹⁶⁸ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 35.

esto consiste el conocimiento: conocer es comprender, es decir, aprehender lo nuevo con lo ya conocido¹⁶⁹.

Fue Kant quien “escribió, en el prólogo de su primera *Critica*, que los experimentos son preguntas que el científico dirige a la Naturaleza. Aun acertando en lo principal, redujo la importancia del asunto, pues no es el juicio la actividad fundamental del entendimiento, sino la interrogación. Ésta es la forma fundamental *a priori* de la humana inteligencia, que nos permite ordenar el caos de las sensaciones, porque la Naturaleza, que es recóndita y esquiva, pero atenta, se muestra respondiendo no sólo a nuestros experimentos sino además a todas nuestras preguntas, en las que tienen su origen las categorías”¹⁷⁰. Luego será Kant, quien, en esta misma dirección, dé lugar a una nueva concepción de pensamiento epistemológico general, que se denominará “revolución copernicana de Kant”, donde sintetizará que, para él, “la mente humana es un partícipe activo y formativo de lo que ella conoce”. [...] “La mente constituye su objeto informando la materia amorfa por medio de formas personales o categorías y como si le inyectara, en parte, sus propias leyes. El intelecto será entonces, de por sí, un constitutivo estructural de su mundo”¹⁷¹.

Además, algo que diferencia al ser humano del resto de especies de la naturaleza es que se trata de un animal que practica el arte y la ciencia, y lo hace conjuntamente. Pero también ejercita la capacidad única de imaginar. Si tenemos en cuenta el término imaginación, diremos que “es una palabra que deriva de la producción de imágenes en la mente, de aquello que Wordsworth llamó “la mirada interior”¹⁷², lo que refuerza la idea de lo condicionadas que están por la vista las actividades del hombre, así como su evolución. La vista se ha transformado en el modo de percepción por antonomasia que tenemos del mundo exterior, pasando a ser la capacidad culturalmente formativa del hombre, condicionando facultades como la memoria, la imaginación, o la simbolización, así como el modo en que pensamos las cosas que aparecen en nuestra mente, en nuestro “libre albedrío”. Cuando hablamos de éste, “nos referimos en realidad a la visualización de alternativas y al acto de elegir entre estas. [...] el problema central de la consciencia humana radica en la capacidad de imaginar”¹⁷³. Así mismo, para el psicólogo Frank

¹⁶⁹ *Ibidem*, p. 38.

¹⁷⁰ *Ibidem*, p. 40.

¹⁷¹ MARTÍNEZ MIGUÉLEZ, M. “Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad” ..., p. 48.

¹⁷² BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 24.

¹⁷³ *Ibidem*, p. 32.

Barron, “por medio de su imaginación el hombre puede crear nuevos universos más próximos a los deseos de su corazón”¹⁷⁴.

3.7. Evolución del lenguaje simbólico

Por otra parte, el área del lenguaje del hombre que está justo encima del lóbulo temporal no existe en ningún otro animal. Se distinguen dos escuelas de pensamiento: la de los que consideran que el lenguaje, junto al habla, es una continuación evolutiva del sonido que mecánicamente emiten los animales; y la de los que opinan, como Noam Chomsky y Eric Lenneberg, que se trata de una capacidad exclusiva de los humanos que surge de forma discontinua respecto de cualquier función animal. Efectivamente, “en 1957, con tan sólo 29 años, Chomsky revolucionó el campo de la lingüística teórica con la publicación de la obra *Estructuras sintácticas*. Hasta entonces, se creía que la adquisición del lenguaje, como cualquier otra destreza humana, se producía por medio del aprendizaje y de la asociación. Sin embargo, Chomsky postuló la existencia de un dispositivo cerebral innato, el “órgano del lenguaje”, que permite aprenderlo y utilizarlo de forma casi intuitiva. Comprobó, además, que los principios generales abstractos de la gramática son universales en la especie humana, y postuló la existencia de una gramática universal”¹⁷⁵.

Sin embargo, Bronowski¹⁷⁶ se posicionará en favor de la primera posibilidad, destacando la capacidad comunicativa del lenguaje humano frente al mero código de señales animal. Somos capaces de captar lo que dice el mensaje y de separar ese contenido significativo de la carga emocional. También somos capaces de previsión, “la capacidad de aplicar el lenguaje no sólo a lo que se está dando ahora sino a lo que se dio en el pasado o se dará en el futuro”¹⁷⁷.

En un momento de su evolución, el hombre aprendió a decir no al estímulo. Inhibió una respuesta ordenada en él desde hacía siglos. [...] La transfiguración ocurrió un misterioso día, cuando al ver el rastro detuvo su carrera, en vez de acelerarla, y miró la

¹⁷⁴ BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2008, p. 17.

¹⁷⁵ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, pp. 22-23.

¹⁷⁶ Jacob Bronowski (1908-1974). Fue un matemático, poeta, y humanista polaco conocido por sus libros de divulgación científica sobre el desarrollo intelectual del ser humano, llegando a ser uno de los pocos representantes del humanismo renacentista en el siglo XX. Tras la Segunda Guerra Mundial, al igual que muchos físicos, volcó todo su interés por el estudio de las ciencias humanas y de la vida.

¹⁷⁷ *Ibidem*, p. 48.

huella. Aguantó impávido el empujón del estímulo. Y, de una vez para siempre, se liberó de su titánico dinamismo, aquellos dibujos en la arena eran y no eran el bisonte. Había aparecido el signo, el gran intermediario. [...] Bruscamente era capaz de pensar el bisonte, aunque ni en sus ojos, ni en su olfato, ni en sus oídos, ni en su deseo estaba presente ningún bisonte. Podía poseer el bisonte sin haberlo cazado. [...] La mirada, al ser penetrada por la libertad se convierte en mirada creadora. Y lo mismo le sucede a la memoria, al movimiento muscular o a la imaginación. Me gustaría rehabilitar una antigua locución griega. *Nous poietikos*, decía Aristóteles que éramos. Entendimientos activos, poéticos. Lo que llamamos “poesía” -o arte en general- es sólo un ejemplar del poder creador, [...] que se da en cada una de nuestras actividades mentales. No es más que una figura retórica de la inteligencia: la antonomasia del poder creador. [...] Lo que cuente sobre la inteligencia deberá ser válido para esa peculiar actividad inteligente que es el arte, y al revés. “Poéticamente habita el hombre la tierra”, escribió Hölderlin. [...] Inteligentemente habita el hombre la tierra, alumbrando en ella el reino de las posibilidades libres¹⁷⁸.

En definitiva, “la libertad es creación y realización de posibilidades”¹⁷⁹.

También nos parece adecuado recoger aquí la visión que del arte y del simbolismo propone Hegel en su *Fenomenología del espíritu*:

La belleza representa “la unidad del contenido y del modo de ser del contenido, que resulta de la apropiación, de la adecuación de la realidad al concepto”. Afirma que la primera forma de arte fue la simbólica u oriental, caracterizada por lo sublime, el esfuerzo por expresar lo infinito. Pero, aquí, lo infinito es una abstracción a la que ninguna forma se ve impelida más allá de toda determinación. La expresión no pasa a ser una tentativa, un ensayo que “producirá gigantes o colosos, estatuas con mil brazos o mil cuerpos”. En cuanto al símbolo, consistirá en una “representación con un significado que no se conjuga con la expresión, con la representación; se mantiene una diferencia entre la idea y la forma: el simbolismo se caracteriza por una diferencia entre lo de fuera y lo de dentro, por una carencia de adecuación entre una idea y una forma que tiene que significarla, por lo que esta forma no constituye la expresión pura de lo espiritual: hay una distancia entre la idea y su representación. [...] el arte simbólico se caracteriza por partir de intuiciones que provienen de la naturaleza, de las formas naturales. Estas formaciones son recogidas tal cual, pero se introduce en ellas, para darles un significado, una idea sustancial,

¹⁷⁸ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, pp. 26-28.

¹⁷⁹ *Ibidem*, p. 255.

universal, absoluta; interpretadas luego, a la luz de esta idea, aparecen como si la implicaran, como si la contuvieran. Esta manera de tratar las formaciones naturales constituye lo que se llama “panteísmo oriental”. En segundo lugar, viene el arte clásico [...] que alcanzó las cumbres más altas, pero tiene el “defecto de no ser sino arte, arte simplemente y nada más”. O sea: en él, el espíritu está enteramente absorbido en lo sensible y en lo corpóreo, haciéndose, pues, particular, y no absoluto y eterno, cosa que sólo puede encontrar su expresión en la espiritualidad pura. Finalmente, en una tercera y última fase, “el arte intenta elevarse al nivel superior”: es el arte romántico o cristiano. “El Arte romántico nació de la ruptura de la unidad entre lo real y la idea, y del regreso del arte a la posición que existía en el arte simbólico. Regreso este, no obstante, como deseo de recomenzar. [...]. La idea sólo existe en el espíritu, por el espíritu y para el espíritu”¹⁸⁰.

Por otra parte, somos capaces además de internalizar el lenguaje, de hablar con nosotros mismos. Esta capacidad se desarrolló en el momento en que fabricamos el primer utensilio hace más de un millón de años atrás. Todas estas herramientas tecnológicas son registros materiales del proyecto que las ideó. El hombre que la talló debía efectuar una internalización, un diálogo consigo mismo para saber si estaba trabajando correctamente la pieza según el diseño previo. “Los seres humanos poseen un don absolutamente único en el uso del lenguaje: pueden hablar consigo mismos”¹⁸¹.

Se trata, en última instancia, de lo que los lingüistas llaman la generatividad del lenguaje, que puede reordenarse recursivamente y producir nuevos significados. “Vivimos entre significados que damos a la realidad. Eso es el Mundo: la totalidad de significados que la persona *concibe*”¹⁸². A todo esto, la ambigüedad de esta palabra nos puede servir para relacionar la inteligencia con la realidad, ya que “*Concebir* significó en un principio “coger”, pero se trataba de un coger fecundante que acababa produciendo un nuevo ser. Lo mismo sucede con los “conceptos”, los significados que la inteligencia profiere. Lo recibido es transformado por el organismo captador. De la misma raíz procede la palabra “percibir”, que es también una manera de coger. [...] Percibir es coger información y dar sentido”¹⁸³.

Pero, ¿en qué consiste el acto de dar significado? Uno de los primeros procesos intervinientes puede ser el de los esquemas (acción o información vivida) innatos o

¹⁸⁰ PIGNATARI, D. *Semiótica del arte y de la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1983, p. 19.

¹⁸¹ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 49.

¹⁸² MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 43.

¹⁸³ *Ibidem*, p. 43.

biológicamente adquiridos que nos permiten asimilar información nueva. Otro proceso es el del reconocimiento. Existen significados prácticos, de acción, que son una ampliación de los sensoriomotores y permiten el reconocimiento de parecidos funcionales, a partir de los cuales emerge el significado de utensilio. Por ejemplo, tirar, golpear o agarrar. Luego, los humanos estratificamos el lenguaje, analizamos el mundo exterior distinguiendo los objetos de los fenómenos, de las acciones. Esta diferenciación comienza en el lenguaje, y está estrechamente relacionada con la imaginación visual llegando a dominar así el mundo exterior. “La consciencia puede definirse entonces como nuestro modo de descomponer el mundo exterior en objetos y acciones. [...] Nos tratamos como si fuésemos objetos del lenguaje y hablante del lenguaje al mismo tiempo, a la vez objetos del simbolismo y símbolos de este. Todas las difíciles paradojas que se remontan a los tiempos de los griegos y reaparecen en la matemática moderna dependen, en el fondo, de ello”¹⁸⁴.

Y es que “en ciencia estamos constantemente buscando un lenguaje que copie o refleje la estructura de la realidad. [...] Lo hacemos tratando la naturaleza como si fuese, como decía Leibniz, un gigantesco criptograma, una gigantesca serie de mensajes codificados. Y tratamos de descodificarla de tal modo que las entidades que emergen se conserven bajo distintos cambios y transformaciones”¹⁸⁵. Las dos operaciones básicas de la inteligencia son identificar y reconocer. “Allí donde encontramos un fenómeno de reconocimiento tenemos que admitir la existencia de un patrón o esquema que lo haga posible”¹⁸⁶. El reconocimiento tiene que hacerse comparando información nueva con la guardada en la memoria.

Por otro lado, según asevera Bronowski, “el mundo está totalmente conectado, lo cual quiere decir que no existe un solo acontecimiento en el universo que no esté vinculado, ligado, conectado, a todos los acontecimientos que se dan en todas y cada una de las regiones del universo”. [...] Por lo tanto cuando practicamos ciencia [...] siempre descodificamos una parte de la naturaleza que no está completa. Lo que ocurre es que nos resulta imposible despojarnos, salirnos de nuestra propia finitud”¹⁸⁷. Por ende, cada época revisa y modifica las teorías que en la época anterior resultaban relevantes. Cada vez que esto ocurre revisamos la totalidad de nuestra representación anterior. En el fondo, siempre que hacemos algo así es como si corrigiéramos una parte de la oración y no la oración

¹⁸⁴ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 59.

¹⁸⁵ *Ibidem*, pp. 60-62.

¹⁸⁶ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, p. 270.

¹⁸⁷ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 73.

entera, con lo cual este acto nunca tendrá fin. Por lo tanto, “si la naturaleza está totalmente conectada, entonces hemos de preferir aquellos lenguajes o sistemas que muestran la mayor conectividad en el universo; no porque efectivamente muestren dichas conexiones en la naturaleza sino porque son los que más se aproximan a ellas”¹⁸⁸. O sea, “el lenguaje proporciona los planos significativos del Mundo, permite crear y manejar significados libres, e interviene en la dirección de nuestro comportamiento. [...] Pasan las generaciones, cambian los tiempos y la historia, pero el lenguaje permanece”¹⁸⁹.

En definitiva, tanto la visión como el lenguaje son vitales en el proceso de evolución del hombre. “La visión es nuestro canal de acceso hacia el mundo exterior, el lenguaje es nuestro canal de comunicación con nuestros semejantes. [...] Hemos dividido la oración en palabras que se corresponden a objetos y palabras que se refieren a acciones, y tales palabras no se encuentran en el mundo, son el modo en que percibimos el mundo. Nuestra consciencia del mundo está dirigida a las acciones y las cosas porque así es como hablamos”¹⁹⁰. Por otra parte, “no existen conceptos científicos permanentes porque no son más que nuestras interpretaciones de los fenómenos naturales. [...] La parte del mundo que podemos inspeccionar y analizar es siempre finita. Siempre tenemos que decir que el resto del mundo no influye en esa parte, y nunca es cierto”¹⁹¹. Alan Turing¹⁹² llegó a aseverar que “no hay máquina capaz de hacer toda la matemática”¹⁹³. Y Tarski¹⁹⁴, más sutilmente, sostuvo que “no puede darse un lenguaje universal para la totalidad de la ciencia en todos los casos sin caer en paradojas”¹⁹⁵. Pero, entonces, ¿cómo surgen las paradojas? “Surgen cuando se usa el lenguaje del sistema para describir el sistema, es decir, se producen debido a lo que se conoce como “auto-referencia”. No obstante, la “auto-referencia” como la “auto-consciencia” son realmente la gloria de la mente humana. Es lo peculiar del funcionamiento de nuestro lenguaje”¹⁹⁶. Siempre que hacemos ciencia o matemáticas nos referenciamos a nosotros mismos y a lo que piensan los demás. Nuestra naturaleza lo dicta así:

¹⁸⁸ *Ibidem*, p. 103.

¹⁸⁹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, p. 288.

¹⁹⁰ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, pp. 108-109.

¹⁹¹ *Ibidem*, p. 110.

¹⁹² Alan Turing (1912-1936) fue un matemático, lógico, informático teórico, criptógrafo, filósofo, biólogo teórico. Considerado uno de los padres de la ciencia de la computación y precursor de la matemática moderna, proporcionó una influyente formalización de los conceptos de algoritmo y computación: “la máquina de Turing”.

¹⁹³ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 111.

¹⁹⁴ Alfred Tarski (1901-1983) fue un lógico, matemático y filósofo polaco, formó parte de la escuela polaca de lógica y filosofía. Una vez hubo emigrado a EE. UU., influyó en toda la investigación lógica posterior a la Segunda Guerra Mundial, haciendo aportaciones destacadas en la teoría de conjuntos, lógica polivalente, niveles del lenguaje, metalenguaje y conjuntos semánticos.

¹⁹⁵ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 111.

¹⁹⁶ *Ibidem*, p. 112.

La inteligencia comenzó siendo una mínima capacidad de autodeterminación, suficiente para hacer posible la creación y transmisión de la cultura, lo que a su vez amplió el poder de autodeterminación y la eficacia de la inteligencia. El hombre debió de tardar decenas de miles de años en construir el lenguaje. [...] Con el lenguaje recibimos una rica herencia. [...] la segmentación del mundo, los conocimientos y técnicas producidos por las generaciones anteriores y, sobre todo, los métodos para manejar irrealidades y para controlar nuestros propios comportamientos. [...] Todas las culturas enseñan a los niños el control de sus emociones [...] Esta sabiduría recibida permite al niño beneficiarse en pocos meses de lo que costó milenios aprender. En este sentido es verdadero decir que el niño se hace inteligente y libre gracias a la sociedad¹⁹⁷ [...] Mediante el lenguaje, la madre enseña al niño los planos semánticos del mundo que tiene que construir. La realidad en bruto no es habitable: es preciso darle significados, segmentarla dividirla en estancias y construir pasillos y relaciones para ir de una a otra. Es el niño quien ha de construirse su morada irremediamente, puesto que necesita apropiarse por sí mismo de la realidad, pero sería un gran incordio que tuviera que inventar la arquitectura. Desde que nace comienza su incansable edificación del Mundo. No necesita el lenguaje para proferir significados, ni siquiera para pensar. Sin embargo, el lenguaje supondrá un gran salto hacia adelante, porque gracias a él no dependerá tan sólo de su experiencia, sino que podrá aprovechar la experiencia de los demás¹⁹⁸.

También, según argumentaba el psicólogo ruso Vygotsky¹⁹⁹,

el lenguaje reestructura todas las funciones mentales. La madre no sólo introduce orden en el mundo objetivo, sino también en la subjetividad sin sujeto del niño. Le ayuda a convertirse en autor. [...] Ya no se trata sólo de transmitirle información heredada, sino de transformar el modo de manejar esa información. [...] Surge en situación social, fuera de la cual era tan sólo una “propiedad virtual”. [...] Exige elaborar una nueva noción de persona, en la que los demás hombres tienen una función catalizadora. [...] El lenguaje comienza siendo un medio de comunicación con los demás²⁰⁰. “Al aumentar su destreza lingüística, el niño comienza a hablarse a sí mismo y aparece el habla interior. [...]

¹⁹⁷ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, p. 289.

¹⁹⁸ *Ibidem*, pp. 63.

¹⁹⁹ Lev Semiónovich Vygotski (1896-1934) fue un psicólogo ruso, uno de los más destacados teóricos de la psicología del desarrollo, fundador de la psicología histórico-cultural y claro precursor de la neuropsicología soviética. Se le conocerá como el “Mozart de la psicología”. La idea fundamental de su obra es la de que el desarrollo de los humanos únicamente puede explicarse en términos de interacción social. El desarrollo consiste en la interiorización de instrumentos culturales (como el lenguaje) que inicialmente no nos pertenecen y vamos adquiriendo poco a poco. Luego la cultura, es fundamental para el desarrollo humano. El niño utiliza alguna clase de “herramienta” o “signo” para convertir relaciones sociales en funciones psicológicas.

²⁰⁰ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, pp. 70-71.

Comienza a emerger un Yo ejecutivo, autor, director, controlador, poético...etc., que introduce orden en sus propias ocurrencias²⁰¹.

Todo comportamiento intencional se basa en una irrealidad que es el proyecto. [...] El habla interior es el material del que están hechas nuestras voluntades. [...] Al aprender el lenguaje, el niño aprende a dirigir con él su acción, manejando el futuro mediante la invención de proyectos. [...] Una de las realidades que el sujeto puede manejar con facilidad gracias al lenguaje es su propia subjetividad. El niño aprende a tratar con su Yo, a analizarle, a dirigirle mediante el juego de anticipaciones y proyectos²⁰².

En definitiva, “la autodeterminación es, simplemente, la capacidad que tiene el sujeto de suscitar, controlar y dirigir sus operaciones mentales. [...] El ejercicio de la autodeterminación permite construir un sujeto más o menos libre”²⁰³. Por último,

lo que llamamos símbolo es un término, un nombre o una pintura que puede ser conocido en la vida diaria, aunque posea connotaciones específicas además de un significado corriente y obvio. Representa algo vago, desconocido u oculto para nosotros²⁰⁴. [...] Una palabra o una imagen es simbólica cuando representa algo más que su significado inmediato y obvio. Tiene un aspecto “inconsciente” más amplio que nunca está definido con precisión o completamente explicado. [...] Cuando la mente explora el símbolo, se ve llevada a ideas que yacen más allá del alcance de la razón. La rueda puede conducir nuestros pensamientos hacia el concepto del sol “divino”, pero en este punto, la razón tiene que admitir su incompetencia; el hombre es incapaz de definir un ser “divino”. [...] Como hay innumerables cosas más allá del alcance del entendimiento humano, usamos constantemente términos simbólicos para representar conceptos que no podemos definir o comprender del todo. Esta es una de las razones por las cuales todas las religiones emplean lenguajes simbólicos o imágenes²⁰⁵. [...] La historia del simbolismo muestra que todo puede asumir significancia simbólica: los objetos naturales (como piedras, plantas, animales..., etc.), o cosas hechas por el hombre (casas, barcos..., etc., o, incluso, formas abstractas (números, o el triángulo, el cuadrado, el círculo). De hecho, todo el cosmos es un símbolo posible. El hombre, con su propensión a crear símbolos, transforma inconscientemente los objetos o formas en símbolos (dotándolos por tanto de una gran importancia psicológica) y los expresa ya en su religión o en su arte visual. La historia entrelazada de la religión y del arte, remontándose a los tiempos prehistóricos, es el relato

²⁰¹ *Ibidem*, pp. 76.

²⁰² *Ibidem*, p. 77-78

²⁰³ *Ibidem*, p. 257.

²⁰⁴ JUNG, C. *El hombre y sus símbolos...*, p. 17.

²⁰⁵ *Ibidem*, p. 18.

que nuestros antepasados dejaron de los símbolos que para ellos eran significativos y emotivos²⁰⁶.

Por lo que, “es la vida la que produce emociones e ideas simbólicas”²⁰⁷. Así, según Giedion: “el artista, de hecho, actúa como el inventor o el descubridor científico: los tres buscan nuevas relaciones entre el hombre y su mundo. En el caso del artista, estas relaciones son de índole emotiva en lugar de ser de tipo práctico o cognoscitivo. El artista creador no quiere, por una parte, copiar cuanto le circunda, y tampoco, por otra, que nosotros le veamos. Es un especialista que en su obra nos enseña, como en un espejo, algo que nosotros, por propio albedrío, no hemos sido capaces de comprender: el estado de nuestro propio espíritu. Encuentra los símbolos exteriores para los sentimientos que en la realidad dominan, pero que todavía permanecen para nosotros en estado caótico y son, por lo tanto, inquietantes y obsesivos”²⁰⁸.

Por otra parte, también se puede comprender la arquitectura desde un punto de vista semiótico. Así lo hace Umberto Eco en su texto *La estructura ausente, introducción a la semiótica*, donde considera que la cultura es comunicación, de modo que fenómenos culturales como la arquitectura pueden estudiarse como sistemas de signos. Sin embargo, aunque los objetos arquitectónicos funcionan más que comunican, puesto que las utilidades asociadas a dichas funciones “tienen significados asociados a ellas, que me predisponen para el uso funcional”²⁰⁹, es por lo que se comprenden. Y pone como ejemplo que la bóveda suscita cobijo. Siendo la semiótica un conjunto de códigos, Eco clasifica la arquitectura en códigos sintácticos y semánticos, y divide estos últimos en dos grupos: la articulación de elementos arquitectónicos y la articulación de géneros tipológicos. Dentro de los primeros están los que denotan funciones primarias como techo, cúpula, escalera, etc.; los que denotan funciones secundarias, que denomina “simbólicas”, como metopa, frontón y tímpano; y los que denotan “carácter distributivo” y connotan ideologías, como aula común, comedor, etc.; mientras que, en el segundo grupo, se encontrarían los tipos sociales, como villa, palacio, entre otros; y los tipos espaciales, como templo de planta circular, griega, laberinto, etc.

²⁰⁶ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, p. 231.

²⁰⁷ JUNG, C. *El hombre y sus símbolos...*, p. 87.

²⁰⁸ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)*. Barcelona: Hoepli, S.L, 1955, pp. 448-449.

²⁰⁹ ECO, U. *La estructura ausente, introducción a la semiótica*. Barcelona: Lumen, 1989, p. 283.

3.8. La memoria creadora

El aprendizaje de los animales se basa en la observación de modelos percibidos, pudiendo darse automáticamente; por su parte, el hombre, además, amplía su aprendizaje al poder dirigirlo por proyectos, construyendo su propia memoria, personalidad y Mundo, logrando, por tanto, también regirse por modelos imaginados. Así mismo, la memoria inteligente no sólo no es un lastre para nuestro aprendizaje, sino que es un sistema dinámico que podemos elegir. Según Marina la memoria,

no es un almacén, ni un cementerio, sino una riquísima fuente de operaciones y ocurrencias. [...] El yo ejecutivo puede elegir su memoria, y diseñar los planos para su construcción, de ahí que la memoria no sea una imposición o un destino, sino un proyecto. [...] Un organismo sin memoria no podría ni siquiera percibir: vemos, interpretamos y comprendemos desde la memoria²¹⁰. [...]

La memoria se organiza como una red conceptual, semántica o narrativa que facilitará la pesca de información que necesite²¹¹. [...]

No hay inteligencia por un lado y memoria por otro. Lo que existe es una memoria inteligente, en la que habitamos, y desde la que contemplamos la realidad. La inteligencia penetra la memoria, que a su vez penetra en el movimiento, que a su vez penetra la mirada, en una colaboración circular que no acaba nunca. Es verdad que poéticamente habita el hombre la tierra, y para ello se construye su morada que es la memoria²¹².

Del mismo modo, podemos decir que en el hombre el cuerpo y la mente son un Todo inseparable. La mente posee “una portentosa cantidad de conexiones [...] de tal modo que cada conexión modula a las demás. El resultado es que el cerebro ha de estar utilizando una especie de lenguaje estadístico bastante diferente del lenguaje humano”²¹³. “La memoria en tanto que recubre con una capa de recuerdo un fondo de percepción inmediata, y en tanto también que reúne una multiplicidad de momentos, constituye el principal aporte de conciencia individual a la percepción, el lado subjetivo de nuestro conocimiento de las cosas...”²¹⁴. En resumen, como asevera Marina:

²¹⁰ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, pp. 118-119.

²¹¹ *Ibidem*, p. 121.

²¹² *Ibidem*, p. 122.

²¹³ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 117.

²¹⁴ BERGSON, H. *Memoria y vida*. Madrid: Alianza, 1977, p. 85.

Nuestro Mundo personal es una gigantesca síntesis de toda la realidad que hemos asimilado y de todos los significados que hemos proferido. [...] Los sentimientos son otro procedimiento para manejar grandes bloques de información de una vez. [...] El tema de la información integrada me hizo interesarme por el conexionismo, que también es una psicología holista. [...] En 1949, Donald Hebb²¹⁵ sugirió que el aprendizaje se podría basar en cambios cerebrales que proceden de actividades cerebrales correlacionadas. Si dos neuronas pretenden activarse juntas, la conexión entre ambas se fortalece; de lo contrario, disminuye. La conectividad del sistema depende de su historia, y de los comportamientos y tareas que ha realizado. Según estos autores, el cerebro trabaja en paralelo, integrando muchos canales de procesamiento, y esta cooperación global hace surgir propiedades nuevas en el sistema. Por eso hablan de propiedades emergentes o globales, dinámica de redes, redes no lineales, sistemas complejos, sinergias, sistemas autoorganizadores. A partir de microestructuras, de operaciones muy simples, que se realizan en el nivel básico, pretenden explicar la aparición de comportamientos de nivel superior²¹⁶.

3.9. La evolución del error y del progreso a través del gusto

“No percibimos más que el pasado, siendo el presente puro imperceptible progreso del pasado que corroe el porvenir”²¹⁷ [...] “La realidad a partir del Mundo es una presunción del espíritu. En busca de ese mar real, la inteligencia se lanza a la aventura. Eso es la ciencia. Y, además, la inteligencia, confiando en la resistencia de la realidad, nos hace inventar nuevas posibilidades reales, y así nacen las creaciones de la moral, el arte y la técnica”²¹⁸. El hombre *busca* el estímulo. Construye hábitos y destrezas que puedan controlar sus ocurrencias. Así es como aprendemos, por ejemplo, el lenguaje, que es un conjunto limitado de elementos que puede dar un conjunto infinito de ocurrencias verbales.

“Para poder resolver con maestría problemas en determinado terreno, en primer lugar, hay que aprender gran cantidad de conocimiento específico de campo, y, además, adquirir procedimientos generales para la resolución de problemas de modo creativo, que puedan aplicarse al conocimiento básico”²¹⁹. “La ciencia es una tentativa de representar

²¹⁵ Donald O. Hebb (1904-1985) fue considerado el pionero de la biopsicología.

²¹⁶ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora*, pp. 321-322.

²¹⁷ BERGSON, H. *Memoria y vida...*, p. 86.

²¹⁸ *Ibidem*, p. 125.

²¹⁹ *Ibidem*, p. 133.

el mundo conocido como un sistema cerrado por medio de un perfecto formalismo. [...] Si lo que se quiere es un sistema cerrado (esto es lo que los contemporáneos de Newton creían que se había logrado), hemos de pensar que el mundo entero ha sido descrito y que todo lo demás no es más que una suerte de bordado sin la menor importancia”²²⁰. Pero en realidad sabemos que el progreso de la ciencia no tiene término, puesto que, cuando se descubre una nueva inconsistencia del sistema anterior, volvemos a reorganizar todo usando nuestra imaginación. “Cada acto de la imaginación es el descubrimiento de una semejanza entre dos cosas que con anterioridad se pensaba que no tenían nada que ver una con la otra”²²¹. “El creador necesita menos información que el resto de los mortales para llegar a una buena conclusión. [...] Tiene “intuición”, [...] “gusto estético”, [...] “sexto sentido”²²².

“El gusto artístico es un sentimiento, y como tal, un gigantesco bloque de información integrada”²²³. También la “imaginación e intuición son vitales para nuestra comprensión. Y aunque la opinión popular corriente es que son valiosas, principalmente para poetas y artistas, de hecho, son igualmente vitales en los escalones más elevados de la ciencia”²²⁴. “Citaré a Einstein, que es el no va más del prestigio científico. Reflexionando sobre su obra, dijo: “durante todos estos años, tenía un sentimiento en una dirección, de ir en línea recta hacia algo concreto. Es muy difícil escribir el sentimiento, pero yo lo experimentaba como una especie de sobrevuelo, en cierto sentido visual”²²⁵. También G. H. Hardy²²⁶ atribuyó la genialidad del matemático Srinivasa Ramanujan a “un peculiar sentimiento de la forma matemática, entre otras cosas”²²⁷. Y es que “el sentido de la forma es una experiencia frecuente en matemáticas. Paul Dirac²²⁸ consideraba que la belleza de las matemáticas era una garantía de verdad. En una ocasión comentó que Schrödinger había descubierto su “bellísima” ecuación de onda sin fundamento experiencial. Trabajar para ganar belleza en una ecuación, si se tiene la vista sana, es un gran progreso. Terminaré citando de nuevo a Einstein: Busco la fuente de la

²²⁰ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, pp. 121-122.

²²¹ *Ibidem*, p. 123.

²²² MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 134-135.

²²³ *Ibidem*, p. 166.

²²⁴ JUNG, C. *El hombre y sus símbolos...*, p. 88.

²²⁵ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 135.

²²⁶ Godfrey Harold Hardy (1877-1947) fue un matemático británico que formuló la desigualdad que lleva su nombre. Fue el principal validador de la obra autodidacta del matemático Ramanujan (1887-1920), conocido por algunas de sus asombrosas fórmulas y su innata intuición matemática.

²²⁷ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 136

²²⁸ Paul Dirac (1902-1984) fue un ingeniero eléctrico, matemático y físico teórico británico, que contribuyó de forma notable al desarrollo de la física cuántica. Compartió el Premio nobel de física en 1983 con Erwin Schrödinger, por “el descubrimiento de las nuevas formas productivas de la teoría atómica”.

verdad en la simplicidad matemática”²²⁹.

Como hemos venido diciendo, no hay forma de copiar la complejidad de la realidad si no es mediante la irrealidad de un proyecto. Para poder aprehenderla, los artistas crean incluso técnicas nuevas. El mismísimo Monet decía: “cuanto más avanzo, más me cuesta plasmar lo que siento ante la naturaleza, lo cual hace que, para llegar a reproducir lo que experimento, olvide totalmente las reglas más elementales de la pintura, si es que existen. En dos palabras, permito que aparezcan muchos defectos para fijar más sensaciones. Para mí un paisaje no tiene la menor existencia como tal paisaje, ya que su aspecto cambia a cada momento. Pero cobra vida a través de lo que lo rodea, por el aire y por la luz, que cambian continuamente. Cuando se quiere ver muy exacto, se experimentan grandes decepciones al trabajar. Hay que saber captar el aspecto del paisaje, en el instante justo, pues ese momento no volverá nunca, y uno se pregunta siempre si la impresión recibida ha sido la verdadera”²³⁰.

Guiado por el proyecto que sólo él conoce, el autor continuamente restringe posibilidades. Según Paul Valéry, “las tres cuartas partes de un trabajo bien hecho consisten en rechazar”²³¹. Valéry asevera que

se necesitan dos para inventar algo. Uno ejecuta las combinaciones, el otro escoge, reconoce, en la masa de lo que el primero ha propuesto, aquello que es más importante para él o que está de acuerdo con sus deseos, lo que llamamos genio es mucho menos la operación del primero que la disposición del segundo para evaluar la importancia de lo que se le propone y decidir en consecuencia. Por supuesto, Valéry está en lo cierto, aunque se le podría objetar el uso del término “invención”, que sugiere el acto de crear algo de la nada. El que escoge, en la cita de Valéry, es una especie de censor, que converge, que puede, o quizá no, reconocer una buena idea en el momento de verla. Es más enérgico que el generador de ideas -Si lo podemos calificar así- divergente. Valéry no exagera cuando describe el genio como “la disposición del segundo para evaluar la importancia de lo que se le propone”. Si el trabajo del que escoge es tan importante, convendrá prestarle una atención adecuada. Resulta, pues, que nuestro problema excede con mucho el simple campo de la “creatividad”²³².

²²⁹ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 136.

²³⁰ *Ibidem*, p. 167.

²³¹ *Ibidem*, p. 196.

²³² BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas...*, p. 38.

Finalmente, su criterio, en el caso del artista su gusto personal, dirigirá todo el proceso. “Las operaciones con las que se evalúa el proceso creador son: el juicio de gusto, comparación con el proyecto, incorporación del hallazgo al patrón de búsqueda y percepción de las posibilidades derivadas de la integración. Es posible que la nueva información concrete el proyecto y al mismo tiempo lo cambie progresivamente”²³³.

Por otra parte, tal y como dice Marina: “cuando afirmo que la inteligencia humana es una inteligencia computacional que se autodetermina, sólo quiero decir que sus operaciones no son controladas por estímulos, sino por el propio sujeto. [...] Esta capacidad de control y autodirección permite manejar irrealidades. En efecto, si puedo evocar una información y compararla con otra, estoy operando con irrealidades. La autodeterminación es, simplemente, la capacidad que tiene el sujeto de suscitar, controlar y dirigir sus operaciones mentales. [...] El ejercicio de la autodeterminación permite construir un sujeto más o menos libre”²³⁴.

Asimismo, respecto al tiempo, si lo consideramos como un concepto a lo largo de las generaciones, este se habría abierto camino “cambiando primero del tiempo absoluto de Newton al tiempo de la relatividad, para luego involucrar a la cuestión del tiempo cósmico y, en particular, del tiempo de la evolución.”²³⁵ Y es que, en relación con este último concepto del tiempo en evolución, es central subrayar la noción de que los errores se cometen por naturaleza, de que la réplica no es perfecta. “La evolución se construye por la perpetuación de los errores, contra la segunda ley de la termodinámica, promoviendo el error la nueva norma, de tal modo que la segunda ley actúe ahora sobre un error y dé lugar a un nuevo error. Esto también es central en todos los actos inductivos y de imaginación”²³⁶. Por consiguiente, se puede pensar que todo acto imaginativo no es más que un error con respecto a la norma capaz de sostenerse, de reproducirse.

La experiencia del error muestra la inseguridad de las evidencias privadas. Como escribió Machado:

En mi soledad
he visto cosas claras
que no son verdad.

²³³ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 201.

²³⁴ *Ibidem*, p. 257.

²³⁵ *Ibidem*, p. 124.

²³⁶ *Ibidem*, p. 124.

La necesidad de ponerse a salvo del error obliga al hombre a buscar evidencias más fuertes, por lo que tiene que abandonar su confortable mundo y salir a la intemperie para tratar de encontrar “verdades reales”, que sean válidas en todos los demás Mundos personales, o lo que es igual, que puedan ser captadas y corroboradas por evidencias compartidas. El enajenado o fanático no puede abandonar la cárcel de sus evidencias. Pues bien, cuando se esfuerza por conseguir verdades universales -es decir que puedan ser percibidas por cualquier sujeto inteligente-, la inteligencia se convierte en razón²³⁷.

Así, por ejemplo, en ciencia todo el tiempo se buscan semejanzas imaginativas, y tras muchas tentativas y esfuerzo conjunto, se llega a un nuevo descubrimiento. “El progreso tiene lugar cuando exploramos nuestros propios errores. La evolución es la consolidación de aquello que en cada caso ha comenzado siendo un error. [...] Hay dos tipos de errores: los que se convierten en verdaderos y los que se convierten en falsos, que son la mayoría. Ambos tipos poseen la peculiaridad de ser el producto de la especulación imaginativa”²³⁸. “El gozo está en anticipar la incertidumbre. Pero, por otro lado, el gozo está también en la predicción fallida, en ese detalle que no encaja en las pautas descubiertas. El gozo es la garantía de que el trabajo de la mente aún no ha terminado, de que siempre hay un nuevo reto”²³⁹.

“El mecanicismo no es una explicación definitiva del mundo sino la única estrategia que conocemos para desentrañar las leyes”²⁴⁰. De forma que “ni la ciencia, ni el conocimiento o la literatura son empresas acabadas. Ir en busca de la verdad sólo tiene sentido si la verdad aún no ha sido hallada. [...] los científicos son quienes corrigen la representación de un momento en particular y la sustituyen por otra, cumpliendo con la evolución natural hacia la “verdadera” representación del Mundo”²⁴¹. “La personalidad creativa es siempre aquella que observa el mundo como una entidad sujeta a cambios y a sí misma como un instrumento que sirve para ese cambio. [...] La personalidad creativa piensa el mundo como si fuese un tejido de cambios y se considera a sí misma como el agente divino de tales cambios”²⁴².

“Supera la selección cultural lo que es suficientemente creativo, por lo que la creatividad es la gran función de la materia culta. Estabilidad, adaptabilidad y creatividad

²³⁷ *Ibidem*, p. 230.

²³⁸ *Ibidem*, p. 126.

²³⁹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 279.

²⁴⁰ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 132.

²⁴¹ *Ibidem*, p. 136.

²⁴² *Ibidem*, p. 137.

se suceden y superponen”²⁴³. “La creación de novedades es una exclusiva humana”²⁴⁴. “Cuando se da un momento de extraordinaria creatividad científica (como el de este siglo), el mundo de las artes se enciende igualmente sólo que de un modo diferente”²⁴⁵. Luego se trata de elaborar un conocimiento cerrado y al mismo tiempo cambiante. Pese a la estabilidad, es siempre dinámico. Así, en el artículo titulado *Le possible et le réel*, Henri Bergson ²⁴⁶ escribió: “Artesanos de nuestra vida, incluso artistas cuando lo queremos, trabajamos continuamente en esculpir, con la materia que nos es proporcionada por el pasado y el presente, una forma única, nueva, original, imprevisible”²⁴⁷.

3.10. Percibir la arquitectura

“Es innegable que describir la experiencia arquitectónica es describir los procesos básicos de la percepción”, y que la tarea del arquitecto es construir algo que sea al mismo tiempo agradable a la vista y funcional. “El placer estético no es inmediato en la forma en que lo son los placeres de los sentidos, sino que depende de los procesos de pensamiento y se ve afectado por ellos” ²⁴⁸ . Así, “podemos comenzar nuestra investigación haciendo una distinción entre placeres sensuales e intelectuales. El placer arquitectónico pertenece a esta segunda clase”²⁴⁹.

Existe una distinción entre percepción ordinaria e “imaginativa”, a la que pertenece la experiencia de la arquitectura. Sin embargo, debemos comenzar intentando disipar parte de la oscuridad que se da en la afirmación de que la experiencia de un edificio depende de una concepción de su objeto. Una causa importante de esa oscuridad está en la dificultad de separar el “pensamiento” o “concepción” implicada en la comprensión arquitectónica de la experiencia que la acompaña. [...]. Nuestra experiencia de un edificio tiene un carácter intrínsecamente interpretado, y “la “interpretación” es inseparable de la experiencia del edificio. Por citar un ejemplo: los arquitectos de las iglesias góticas estaban motivados por una relación percibida entre la iglesia terminada y la Ciudad Celestial con que especulaban los cristianos. Las iglesias góticas se pueden ver como

²⁴³ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 148.

²⁴⁴ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 25.

²⁴⁵ BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación...*, p. 138.

²⁴⁶ Henri Bergson (1859-1941) fue un filósofo y escritor francés, ganador del Premio Nobel de Literatura en 1927.

²⁴⁷ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 257.

²⁴⁸ SCRUTON, R. *La estética de la arquitectura*. Madrid: Alianza Forma, 1985, p. 77.

²⁴⁹ *Ibidem*, p. 79.

acumulación de edículos que forman una armoniosa ciudad de partes contiguas. Según filósofos y psicólogos, afirman que la percepción, la experiencia y la interpretación son inseparables. Según Kant, que cambió todo el curso de la filosofía moderna, atribuía un carácter particularmente íntimo a la relación entre experiencia y concepto. Sin embargo, pensaba que podía ponerse a la vista de alguna manera, postulando una facultad mediante la cual se unen la sensación y el concepto. A esta facultad le dio nombre de “imaginación”, y comprobó que esta misma facultad intervenía en el juicio estético, estando la diferencia en que, en la percepción normal, la imaginación está sometida a las reglas de la comprensión, mientras que en el gusto estético está libre. “Tanto Hume como Kant consideraron que era la imaginación la que reunía los datos dispersos de los sentidos para formar una imagen del mundo. Nos proporciona nuestras creencias del pasado y el futuro, y con ello esa conciencia de lo que es posible sin la cual no puede haber conocimiento de lo que existe²⁵⁰.

Otro punto destacable es que:

Una vez establecida cierta manera de construir, se la sigue practicando sin modificaciones sustanciales durante miles de años. Esto es lo que ocurrió con la tienda de cazadores de mamuts que, en cuanto forma de construir, parece haber sido abundantemente usada en Europa durante un período de treinta mil años. El mecanismo mediante el cual una forma se repite a través de grandes distancias temporales y geográficas está abierto a la polémica. Algunos prehistoriadores, en particular Gordon Childe (1925), defienden la explicación difusionista, según la cual las técnicas -ya se trate de construcción de herramientas o de armas, de la construcción de edificios o de hacer obras de arte- se originan en un punto y un momento determinados y se propagan después, mediante una serie de contactos culturales, por la superficie de la tierra. Otros como Levi-Strauss, defienden una explicación estructuralista, según la cual las técnicas se descubren como novedades en diversas ocasiones y en diversos sitios, debido a que el cerebro humano, enfrentado a un problema dado y con unos medios dados, tiende a responder de unos modos característicos, que determinan los tipos de solución más probables²⁵¹.

Breuil (1952) formula la hipótesis de que los primitivos pintores rupestres identificaban las formas de, por ejemplo, un bisonte o un ciervo en las grietas, bultos y concavidades de las rocas, y reforzaban estas formas con pigmentos, intensificando sus cualidades analógicas y haciéndolas de este modo patentes a los demás. Esta manera de generar formas nuevas parece un modo básico de operar de la mente humana. Se puede considerar

²⁵⁰ *Ibidem*, pp. 79-80.

²⁵¹ BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas...*, p. 42.

que esto corrobora las tesis estructuralistas, y supone que se trata de una técnica que surgió espontáneamente en muchos sitios distintos. Su primera aplicación a la arquitectura formal tuvo lugar, por lo que sabemos hoy, en el vasto complejo funerario que, según se dice, diseñó Imhotep para el faraón Djoser en Saqqara, cerca de Memphis (aproximadamente 2800 a.C.). [...] La técnica que adoptó, repetida muchas veces en el complejo, fue la de observar las formas de las construcciones existentes y labrarlas en piedra maciza. [...] Es muy importante que Imhotep hubiera hecho construir, por ejemplo, una cabaña, para trasladar las dimensiones directamente al edificio en piedra²⁵². El diseño analógico, con o sin uso de procedimientos especiales, es todavía la fuente más poderosa de ideas creativas en arquitectura²⁵³.

Las asociaciones, según el empirista Hume, proceden de tres causas: parecido, gracias a la cual la imaginación pasa espontáneamente de una idea a otra que se le parece; contigüidad, las ideas que aparecen juntas, en el espacio o en el tiempo, se encuentran juntas; y causa y efecto, cuando la existencia de una idea es un preludio necesario a la experiencia de otra. Esto le lleva naturalmente a una discusión de la probabilidad de que una determinada causa produzca un determinado efecto²⁵⁴.

Gombrich asegura astutamente que es imposible olvidar que “el hombre occidental es el heredero de una vieja tradición cultural y de una fuerte formación pedagógica que le impiden hacer tabla rasa del legado del pasado. Difícil es que sus actos sean espontáneos e inmaculados. En el arte no se puede prescindir de la artificialidad y menos aun de los esquemas de un lenguaje aprendido y decantado por generaciones sucesivas. A la postre, su obra se inscribe en una práctica consagrada por el tiempo y la memoria histórica, aunque su invención y voluntad artística sean incluso de ruptura”²⁵⁵.

Freud (1932), Arnheim (1954,1970), Ehrenzweig (1965, 1967), Schneider (1950) y otros han escrito críticas de arte desde un punto de vista psicoanalítico, mientras que Jung aplicó sus propias intuiciones al *Hombre y sus símbolos*. Sin embargo, apenas se ha publicado nada que considerase la arquitectura en términos de los principios del psicoanálisis, pese a que el simbolismo de las torres, aperturas y espacios abovedados en forma de útero es suficientemente obvio. La teoría de los *constructos personales* fue desarrollada por George Kelly sobre la base de sus intuiciones personales. Su postulado fundamental es que “los procesos de la persona se canalizan psicológicamente a través de

²⁵² *Ibidem*, p. 47.

²⁵³ *Ibidem*, p. 48.

²⁵⁴ *Ibidem*, p. 72.

²⁵⁵ BONET CORREA, A. *Figuras, modelos e imágenes en los tratadistas españoles...*, p. 237.

los modos como anticipa los eventos. [...] Una persona anticipa los eventos que van a ocurrirle construyendo réplicas de ellos. [...] Stringer (1970) introdujo la teoría de los constructos personales en el debate arquitectónico²⁵⁶.

“Hemos visto ya que la percepción consiste en una transacción entre lo que está físicamente ahí, en el mundo real, y nuestras experiencias pasadas, tal como las recordamos en el momento de la percepción. Todo experimento con los seres humanos se sumará inevitablemente a su experiencia y el experimento mismo alterará, por tanto, sus percepciones”²⁵⁷.

“Los modelos organicistas se basan en modelos, en analogías con los organismos vivos, especialmente en lo que se refiere a la estructura y la función”²⁵⁸.

“Un proceso completo de diseño estimulará la actividad creativa; los arquitectos que llamamos creativos lo han captado intuitivamente; en el momento apropiado del proceso de concepción, permiten que su imaginación corra libremente y en general se han basado en la analogía. [...] En la fría descripción, estos análogos parecen increíblemente ingenuos, y sin embargo constituyen la materia prima de la imaginación”²⁵⁹.

Por otra parte, teniendo en cuenta la visión de Hegel sobre la arquitectura, si sustituimos su idea de Dios por la del Todo:

Lo ideal, no es a-priori divino mecánicamente infuso en las cosas, en el espacio tiempo estático e indiferenciado: es el resultado dinámico de operaciones lógicas del espíritu actuando por oposiciones y conflictos (finito-infinito, particular-universal, sujeto-objeto, interior-exterior, racional-sensible, etc.), operaciones lógicas que se despliegan en espiral en torno a un eje en movimiento que se llama concepto. Si el arte se desenvuelve como un mundo, Dios, al desenvolverse, se convierte en el mundo²⁶⁰. [...]

Dentro del triadismo hegeliano, las artes particulares también se alinean u ordenan de acuerdo con la tabla evolutiva de las formas del arte. Siendo la arquitectura la realización del arte correspondiente a la forma simbólica. Es la arquitectura el arte de la exterioridad, el arte continente que pide un contenido, el arte de la “externalidad” dialéctica en busca de su “internalidad”²⁶¹. [...]

La misión de la arquitectura consiste en conferir a la naturaleza inorgánica transformaciones que, a causa de la magia del arte, la aproximan al espíritu. Los materiales

²⁵⁶ BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas...*, p. 79.

²⁵⁷ *Ibidem*, p. 82.

²⁵⁸ *Ibidem*, p. 90.

²⁵⁹ *Ibidem*, p. 324.

²⁶⁰ PIGNATARI, D. *Semiótica del arte y de la arquitectura* ..., p. 20.

²⁶¹ *Ibidem*, p. 20

con los que trabaja representan su aspecto exterior y directo, una pesada masa mecánica, y sus formas continúan siendo las de la naturaleza inorgánica ordenadas de acuerdo con las relaciones abstractas de la simetría. Aquí, el arte se inicia, pues a través de la naturaleza inorgánica, en ella se realiza y, como abstracto que es, su contenido sigue siendo exterior, para así en vez de mostrar a Dios exteriormente, limitarse sólo a la simple alusión²⁶². [...]

Finalmente, según el arquitecto Geoffrey Broadbend, “podemos, pues, describir un edificio como un filtro del entorno, un contenedor de actividades, que las ubica en determinados sitios, o una inversión de capital. [...] En ciertas épocas y lugares la actividad de construir surgió primordialmente para satisfacer la función de filtro con respecto al entorno. [...] Sin embargo, la arquitectura tiene aun algo más que ofrecer. Según Eco cualquier lugar marcado simbólicamente puede ser llamado arquitectura. El hombre primitivo escogía una determinada piedra o un conjunto de árboles como lugar de reunión o de trabajo; la acción de elegir un lugar es, en sí, una acción arquitectónica, y la arquitectura ha tenido siempre esta función simbólica, aparte de cualquier otra función que haya podido tener”²⁶³.

En definitiva, la arquitectura es una manifestación artística que el hombre crea como tecnología concebida para cambiar el entorno y, con ello, reducir la incertidumbre del medio. Gaudí es un claro ejemplo de artista, arquitecto y científico que observó las múltiples formas que se repetían en la naturaleza, y las incorporó por su belleza y eficiencia en su obra. “Ser original es acercarse a los orígenes”²⁶⁴. Así, las formas naturales que emergen en la obra de Gaudí cumplen las mismas funciones que en la naturaleza.

²⁶² *Ibidem*, p. 20.

²⁶³ BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas...*, p. 12.

²⁶⁴ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción*. Barcelona: Lunwerg Editores, 2002, p. 20.

Capítulo II

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN

4. ESTUDIO EVOLUTIVO DE LA MATERIA

El término evolución hace alusión a algo que se extiende, aunque puede aplicarse para describir cualquier proceso que se encamina hacia una dirección concreta. En este apartado se abordará el estudio evolutivo de la materia desde áreas como la física y la biología, siguiendo no un orden lógico de la historia organizada a posteriori, sino tal y como ésta ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Así podremos apreciar que, en las diferentes épocas, el interés se centrará en unos objetos concretos, desiguales a los estudiados en otros períodos, quizás debido a que la accesibilidad de dichos objetos, y la disponibilidad de medios para abordar su estudio desde las distintas disciplinas, no son los mismos. Por ejemplo, en los siglos XVII y XVIII, época denominada clásica en Francia, todo el mundo, desde los distintos ámbitos de la cultura, hablará de la apariencia de lo visible. Y más tarde, a principios del siglo XIX, se producirá un cambio brusco, apareciendo nuevos términos y objetos de los que antes nunca se había hablado, por ejemplo, la organización.

Y, puesto que, cuando se empieza a trabajar sobre un mismo tema, normalmente se está obligado a considerar lo que se ha hecho hasta entonces, creándose una imagen lineal de lo que ha pasado, esto dará lugar a una visión continua y en ocasiones irreal de la evolución de los problemas, y de la forma en que se resuelven. Durante mucho tiempo la historia de la ciencia se ha hecho de este modo. Sin embargo, comprobaremos que la evolución sucede cuando se producen determinados acontecimientos relacionados entre sí, que sólo tienen una finalidad lógica muy a posteriori. Por otra parte, al estudiar la historia de una ciencia es muy difícil separarla de otras ciencias, así como de otros aspectos coetáneos que no tienen que ver con ella, como el contexto social y económico del momento. Por ejemplo, la historia natural, que más adelante se denominará biología, tendrá una relación muy estrecha con la física a través del mecanicismo en el siglo XVII. Así, la magia, la mística y la religión, que hasta entonces habían intervenido en Física al estudiar el cosmos, son remplazadas por un universo que funciona como un reloj, con péndulos y poleas. En biología, en el mismo período, también los seres vivos y su

funcionamiento deberán ser considerados como autómatas y mecanismos, al ser este el único concepto que existía. Se precisará, pues, que las leyes que intervienen en el movimiento de los astros y la caída de los meteoritos sean las mismas que expliquen los seres vivos. No obstante, muy pronto se verá que el mecanicismo resultará insuficiente para dar explicación a individualidades tan complejas como las de la materia orgánica.

Sin embargo, a finales del siglo XVIII se hablará de la vida y de la muerte. Se empezará a estudiar lo vivo y lo inerte. En el período siguiente, el siglo XIX, la biología ya no se contentará con la clasificación de los seres vivos: intentará dar explicación de la vida y sus funciones; ya no se limitará a estudiar la superficie de lo visible, sino que aspirará a relacionar lo que se ve con algo que no se ve, se estudiará su *organización*. Además, como podremos comprobar a medida que nos adentremos en este capítulo, aunque a la nueva ciencia de la termodinámica le costará ser aceptada dentro de la familia de la física, al introducir el concepto del tiempo, se transformará en una ciencia clave para la comprensión y descripción general del cambio, siendo su área de mayor impacto la misma biología.

4.1. BREVE REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS LEYES EVOLUTIVAS BIOLÓGICAS

4.1.1. TEORÍA BIOLÓGICA EVOLUTIVA

El hombre siempre ha querido conocer sus orígenes y, tratando de dar respuesta a incógnitas tales como quiénes somos y de dónde venimos, ha creado múltiples hipótesis, teorías, religiones, dogmas, mitos y leyendas. Como resultado de éstas, poco a poco se irá fraguando la que conocemos como la teoría de la evolución biológica, avance que supondrá uno de los mayores logros de la ciencia, al dotar de una dimensión temporal y dinámica al orden biológico que observamos en la naturaleza. Su génesis y desarrollo, como ya dijimos, irán tomando cuerpo vinculados a cada contexto histórico, económico y social.

En general, la bibliografía situará, como más adelante describiremos, a Charles Darwin como la figura que mejor supo defender la corriente de pensamiento evolucionista, convirtiendo la evolución en una hipótesis de trabajo para los naturalistas

de su tiempo, y proponiendo, junto a su homólogo Alfred Russel Wallace ²⁶⁵ , un mecanismo de acción lineal y simple, denominado Selección Natural, que podía ser testado de acuerdo con los cánones científicos del momento, y que posteriormente dará lugar a lo que hoy se conoce como darwinismo.

Pero en este punto es importante conocer, aunque sea someramente y de forma cronológica, la historia de la ciencia que precedió al darwinismo, y sobre la que se fue fraguando la estructura de este principio teórico.

4.1.1.1. Pensamiento preevolucionista

Según el estudio del Nobel François Jacob en su obra *La lógica de lo viviente*, el periodo de inicio de la historia de “la biología” se situaría en el siglo XVI. Sin embargo, un siglo antes, para científicos como Charles Jean Julien Depéret ²⁶⁶ ya se podían reconocer conceptos claves del evolucionismo, como el dinamismo de la naturaleza y la mutabilidad biológica en los filósofos de la antigua Grecia como Anaximandro, Empédocles o Lucrecio.

“Aunque el elemento primordial varíe en cada caso, -en Tales es el agua, en Anaximandro lo indefinido (“ápeiron”), en Anaxímenes el aire-, todos ellos [filósofos jónicos del s. VI a.C.] coincidieron en ver el cosmos en un incesante fluir, como un mundo cambiante, en “evolución” natural y continua. En sus concepciones cosmogónicas predominó la idea de continuidad de la naturaleza, de la cual tuvieron una visión dinámica. [...] Para Empédocles, por ejemplo, tanto el hombre como los animales habrían surgido de la tierra y se habrían originado de miembros y órganos unidos al azar, siendo sólo viables las uniones armónicas”²⁶⁷.

Más adelante, Aristóteles rechazará la evolución y, siendo ateo, contradirá también la creación. A pesar de mantener una visión estática de la naturaleza, sin embargo, marcará la tendencia a seguir en los siglos venideros, convirtiéndose en un avanzado a su tiempo al reconocer problemas importantes para la futura biología como la sexualidad, la herencia, el crecimiento, o la adaptación. Además, sus conocimientos

²⁶⁵ Alfred Russel Wallace (1823-1913) fue un naturalista, explorador, geógrafo, antropólogo y biólogo británico, conocido por haber propuesto una teoría de evolución a través de la selección natural independiente de la de Charles Darwin, que motivó a este a publicar su propia teoría.

²⁶⁶ Charles Jean Julien Depéret (1854-1929) fue un geólogo y paleontólogo, miembro de la Academia francesa de las Ciencias, también de la sociedad geológica francesa y decano de la facultad de Ciencias de Lyon.

²⁶⁷ TEMPLADO, J. *Historia de las teorías evolucionistas*. Madrid: Alhambra, 1974, p. 2.

basados en estudios de anatomía comparada supondrán la base de los sistemas de clasificación posteriores.

En otro orden de cosas, para los naturalistas cristianos premodernos del medievo lo que distinguirá a los seres vivos será, por una parte, lo que se denominará el *calor innato*, y, por otra, el tipo de alma que la divinidad pondría en cada uno de ellos. El nacimiento de cada ser vivo determinará un acto único e independiente del resto. La creencia se basará en que para que un ser vivo nazca será necesario que el propio Dios le insufla el alma, y, a partir de este momento, empezará a vivir. Por tanto, en este período se considerará que los seres vivos no se reproducen, sino que son engendrados. Sólo se hablará de generación.

Será pues a partir del siglo XVII cuando las cosas empiecen a variar. Como ya avanzamos en el anterior capítulo, la ciencia se definirá por el orden y la medida tal y como los determinó Descartes²⁶⁸. La ciencia moderna la inaugurará Galileo, y en el estudio de los seres vivos se introducirá la clasificación. La Historia Natural intentará desligar el estudio de los seres vivos de toda relación con la serie de creencias e ideas mágicas heredadas arraigadas en el tiempo. Nacerán en Europa las primeras sociedades y academias científicas. Así, por ejemplo, en 1603 Federico Cesi fundará en Roma la *Accademia dei Lincei* (Academia de los Linceos), de la que Galileo formará parte. El propio Cesi la presentará diciendo:

Al no existir una institución ordenada, una milicia filosófica para empresa tan digna, tan grande y tan propia del hombre como es la adquisición de sabiduría, y de modo particular con los medios de las disciplinas principales, con esta finalidad e intención se erigió la Academia o verdadera asamblea de los Linceos, para que -con una proporcionada unión de sujetos aptos y preparados para dicha obra- procure con buen orden suplir todos los errores y carencias que se han dicho antes, quitar todos los obstáculos e impedimentos y llevar a cabo este buen deseo, proponiendo al sagacísimo linceo como continuo estímulo y recuerdo de la búsqueda de aquella agudeza y

²⁶⁸ René Descartes (1596-1650) fue un filósofo, matemático y físico francés, considerado el padre de la filosofía moderna. Muchos elementos de su filosofía tienen precedentes en el aristotelismo tardío, el estoicismo o en filósofos medievales como San Agustín, pero como dirá Russell, nunca aceptará los cimientos edificados por sus predecesores y se esforzará por construir *ex novo* un edificio filosófico completo, algo que no ocurría desde los tiempos de Aristóteles y es síntoma de la confianza que los hombres tienen en sí mismos, engendrada por el progreso científico. En su filosofía natural, rechazó cualquier apelación a los fines finales, divinos o naturales, al explicar los fenómenos naturales en términos mecánicos. En su teología, insiste en la libertad absoluta del acto de creación de Dios. Afirmó un dualismo sustancial entre el alma y el cuerpo, rompiendo con la tradición aristotélica. Su declaración filosófica más conocida es "Pienso luego existo" que se encuentra en su *Discurso del método* (1613) y en *Principios de la Filosofía* (1644). Descartes sentó las bases del racionalismo moderno del siglo XVII, más tarde defendido por Spinoza, Malebranche y Leibniz, contrario a la escuela inglesa compuesta por Hobbes, Locke, Berkeley y Hume. La influencia de Descartes en las ciencias y matemáticas es igualmente evidente. Hizo contribuciones en física y óptica. Al igual que Galileo, se unió al sistema cosmológico copernicano. El sistema de coordenadas cartesianas es uno de sus legados epónimos. Se le acredita como el padre de la geometría analítica, el puente entre el álgebra y la geometría, utilizada en el descubrimiento del cálculo infinitesimal.

penetración del ojo de la mente, necesaria para conocer las cosas, y contemplando minuciosa y diligentemente, desde fuera y desde dentro, en todo lo que convenga, todos los objetos que se encuentran en el gran teatro de la naturaleza²⁶⁹.

Posteriormente, en 1657, también el príncipe Leopoldo de Toscana, amigo y discípulo de Galileo, fundará la *Accademia del Cimento* (Academia del Experimento), cuyo lema distintivo será la expresión “probando y volviendo a probar”, y abarcará el estudio de toda la gama de las ciencias naturales desde la fisiología, la botánica, la mecánica, la zoología o la óptica, entre otras. También en 1662 nacerá la *Royal Society* de Londres como consecuencia de las reuniones celebradas a partir de 1645 por un grupo de partidarios de la filosofía nueva o experimental, cuyo objetivo será redactar “informes fidedignos de todas las obras de la naturaleza”²⁷⁰, en un lenguaje austero y natural que sea accesible a los artesanos, los campesinos y los comerciantes, más que a los filósofos. “Un lenguaje de esta clase era, lógicamente, el lenguaje de las ciencias: la matemática, la anatomía, el magnetismo, la mecánica o la fisiología”²⁷¹. En 1665, la *Royal Society* comenzará a publicar las *Transactions*, considerándose como la primera revista periódica científica en Europa, con el objetivo de constituir una invitación y un estímulo a que los estudiosos investiguen y comuniquen sus descubrimientos, contribuyendo al proyecto consistente en el conocimiento de la naturaleza y en el perfeccionamiento de todas las artes y ciencias filosóficas. Así, Isaac Newton ²⁷², que será uno de sus miembros, y posteriormente su secretario, publicará una memoria con el título de “La nueva teoría en torno a la luz y los colores” en las *Philosophical Transactions*, en la que formulará su audaz teoría de la naturaleza corpuscular de la luz a partir de sus experimentos sobre la descomposición de la luz blanca a través de un prisma.

²⁶⁹ REALE, G. y ANTISERI, D. *Historia del pensamiento filosófico y científico. Tomo II. Del humanismo a Kant ...*, p. 277.

²⁷⁰ *Ibidem*, p. 280.

²⁷¹ *Ibidem*, p. 280.

²⁷² Isaac Newton (1643-1727), físico, teólogo, inventor, alquimista y matemático inglés, que “llevó a su culminación la revolución científica, y con su sistema del mundo se configuró la física clásica. No fueron sólo sus descubrimientos astronómicos, ópticos o matemáticos (de forma independiente de Leibniz, inventó el cálculo diferencial e integral) los que le otorgaron un lugar en la historia de las ciencias filosóficas. Newton, además, estuvo preocupado por importantes cuestiones teológicas y elaboró una cuidadosa teoría metodológica. Sin embargo, [...] sin una comprensión adecuada del pensamiento de Newton, no estaríamos en condiciones de entender a fondo gran parte del empirismo inglés, ni tampoco la ilustración –sobre todo la francesa- y ni siquiera el mismo Kant [quien como escribirá Popper, creará que la tarea del filósofo consistirá en explicar la unicidad y la verdad de la teoría de Newton]. En realidad [...] la razón de los empiristas ingleses, limitada y controlada por la experiencia, que ya no la deja moverse a su arbitrio en el mundo de las esencias, [ya que como aseveró Descartes: “Si me abstengo de pronunciar un juicio sobre una cosa, cuando no tengo ni una idea lo suficientemente clara y distinta, es evidente que hago un óptimo uso del juicio y que no me engaño, pero si me determinase a negar o afirmar dicha cosa, entonces ya no me sirvo como debería de mi libre arbitrio” (*Ibidem*, p. 281)] es precisamente la razón de Newton. [...] Su libro más famoso, los *Philosophiae naturalis principia mathematica*, fue uno de los acontecimientos más importantes de la historia de toda la física. Este libro puede ser considerado como la culminación de miles de años de esfuerzo por comprender la dinámica del universo, los principios de la fuerza y el movimiento, y la física de los cuerpos en movimiento en medios distintos. (...) Isaac acaba una fase en la actitud de los filósofos hacia la naturaleza y comienza otra nueva”. En: REALE, G. y ANTISERI, D. *Historia del pensamiento filosófico y científico. Tomo II. Del humanismo a Kant ...*, p. 257.

Finalmente en Francia, en 1666, se erigirá la *Académie Royale des Sciences* (Academia Real de las Ciencias), en la que la ocupación principal será “dedicarse a la historia natural según el plan trazado por Bacon²⁷³ [...], siendo el plan en sus líneas maestras “experimentar sobre el vacío a través de bombas, [...] analizar la fuerza explosiva de la pólvora, [...] examinar la fuerza del vapor, la fuerza y velocidad de los vientos, y estudiar su utilización para la navegación y para las máquinas, [...] la naturaleza del peso, del calor, del frío, de la luz, de la atracción magnética, la respiración animal, la composición de la atmósfera, la manera en que crecen las plantas, y así sucesivamente”²⁷⁴.

Luego, se compararán los seres vivos entre sí, y se les catalogará en especies, géneros y órdenes, llegando esta tendencia a su apogeo con la clasificación de las plantas de Carlos Linneo²⁷⁵. El mundo visible se considerará entonces como una viable combinatoria de formas posibles. El problema de la generación se planteará ahora desde un punto de vista diferente, tratando de discernir cómo se perpetúa la estructura visible a través de las sucesivas generaciones. No podemos olvidar tampoco la gran atención que los académicos concederán a la construcción de instrumentos cada vez más exactos: termómetros, higrómetros, microscopios, péndulos, etc., descubriéndose así un mundo insospechado hasta el momento de partículas, en medios diferentes, desde el barro al agua, etc. Sin embargo, para dar explicación a la formación del organismo, la ciencia aún se apoyará en mecanismos o fuerzas que actúan sobre partículas, llegando a ser propuestas teorías sorprendentes, como la de la preformación.

También en este período la predisposición tendente a dejar de lado cualquier explicación creacionista relacionada con lo divino, o sobrenatural, se volcará en la existencia del “homúnculo”, una especie de hombre en miniatura ya totalmente formado en el espermatozoide, donde se precisaría tan sólo de las leyes de la mecánica para hacerle crecer. Esta teoría, por muy absurda que nos parezca ahora, será amparada por la ciencia durante al menos dos siglos.

A partir del siglo XVIII, el acúmulo de detonantes previos se manifestará asociado a tres importantes sucesos en relación a una nueva forma de concebir la naturaleza: 1) la

²⁷³ Francis Bacon (1561-1526) fue un célebre filósofo, político, abogado y escritor inglés. Considerado el padre del empirismo filosófico y científico, concretamente el filósofo de la era industrial. En su *Novum organum* precisa las reglas del método científico experimental y en su *De dignitate et augmentis scientiarum* (Sobre la dignidad y progresos de las ciencias) desarrollará una teoría empírica del conocimiento.

²⁷⁴ *Ibidem*, p. 280.

²⁷⁵ Carlos Linneo (1707-1778) fue un científico inglés, considerado el creador de la clasificación taxonómica de los seres vivos. Linneo desarrolló un sistema de nomenclatura binomial en 1731, que se convertiría en clásico, basado en la utilización de un primer término, con su letra inicial escrita en mayúscula, indicativa del género y una segunda parte, correspondiente al nombre específico de la especie descrita, escrita en letra minúscula. Por otro lado, agrupó los géneros en familias, las familias en clases, las clases en tipos y los tipos en reinos. Se le considera como uno de los padres de la Ecología. El propio Goethe dijo sobre él que, con la excepción de Shakespeare y Spinoza, no había conocido a nadie, entre los que aún vivían, que le hubiera influido tan intensamente.

interpretación del pasado fósil; 2) los descubrimientos de especies novedosas fuera de Europa; y 3), el renacimiento de la cultura científica durante el período del materialismo ilustrado, caracterizada por promover una visión del mundo centrada en el conocimiento, darán como germen novedosas ideas como la de *progreso*, que, más adelante, superado el período evolucionista, se reformulará como *tendencia al incremento progresivo de la complejidad*. Además, la asunción generalizada del sistema linneano en las ciencias naturales impulsará la idea aristotélica de una cadena de sucesión en complejidad, o *Scala Naturae*, que explicitará por vez primera la diferencia entre los seres vivos. En cuanto al primer punto de los enumerados hay que señalar que, en este período, se comenzará a tener en cuenta la noción del tiempo. Un tiempo interviniendo en el mundo viviente que hasta ese momento no se había considerado, ya que se creía que los seres vivos no tenían historia, y que únicamente se repetían uno tras otro de forma idéntica, generación tras generación. Del mismo modo, se empezará a considerar que la tierra tiene pasado; el estudio del terreno, de la geología, y el estudio de los seres vivos, según la distribución de los fósiles, proporcionará una historia de la tierra. Anteriormente, sólo se consideraba que intervenía en el mundo viviente una especie de tiempo exterior a los organismos, un tiempo de cataclismos, que provocaría el buen orden de las especies.

En relación con el segundo punto, la documentación de las especies, se abrirá un abanico enorme de nuevos datos y puntos de vista en torno a la distribución de las especies afines y nuevas. Sobre el tercer punto hay que exponer que el período de la ilustración francesa se hallará nutrido de grandes figuras (algunas ya mencionadas) del pensamiento, como Goethe²⁷⁶, Darwin, De la Mettrie²⁷⁷, Diderot²⁷⁸ o Buffon²⁷⁹, etc., entre otros, quienes proveerán de importantes aportaciones preevolucionistas a la ciencia, como el método científico, y la propia racionalidad de la Ilustración. Así, con relación al origen de la naturaleza de la vida, el varón de Holbach²⁸⁰ afirmará “que la materia inerte podía *autoorganizarse* en estructuras complejas; cuando llegaban a ser suficientemente

²⁷⁶ Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832). Poeta, novelista dramaturgo y científico alemán, contribuyente fundamental del Romanticismo. Su obra, que abarca géneros como la novela, la poesía lírica, el drama e incluso controvertidos tratados científicos, dejó una profunda huella en importantes escritores, compositores, pensadores y artistas posteriores, siendo incalculable en la filosofía alemana posterior y constante fuente de inspiración para todo tipo de obras.

²⁷⁷ Julien Offray de la Mettrie (1709-1751). Médico y filósofo francés, fue uno de los primeros escritores materialistas de la ilustración.

²⁷⁸ Denis Diderot (1713-1784). Escritor y filósofo francés ilustrado. Autor junto a su coetáneo Jean-Baptiste le Rond d'Alembert, de la primera enciclopedia francesa editada entre los años 1751 y 1772, denominada *L'Encyclopédie*.

²⁷⁹ George-Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) fue un naturalista, botánico, biólogo, cosmólogo, matemático y escritor francés. Pretendió compendiar todo el saber humano sobre el mundo natural en su obra en 44 volúmenes *Histoire naturelle*. Su enfoque influyó en la *L'Encyclopédie* de Diderot y Jean le Rond d'Alembert, y sus ideas también lo hicieron sobre las siguientes generaciones de naturalistas, en particular sobre Lamarck, Cuvier y Darwin.

²⁸⁰ Paul Henri Thiry d'Holbach (1723-1789) fue un escritor, filósofo y enciclopedista francoalemán. Considerado una figura prominente de la ilustración francesa. Conocido por su ateísmo y sus voluminosos escritos contra la religión. Según su pensamiento, la materia es eterna y base determinante de cualquier fenómeno. Fue uno de los colaboradores de la *L'Encyclopédie* de Diderot y Jean le Rond d'Alembert.

complejas, estas estructuras materiales mostraban propiedades de la vida”²⁸¹. Por otra parte, Denis Diderot defenderá una visión unitaria y dinámica de la naturaleza: “no vio ni rastro de diseño o planificación divina. Cualquier forma de ser vivo podía generarse a sí mismo en un proceso estrictamente natural” ²⁸². En esta misma línea, De la Mettrie “describió la vida como un principio básico de la propia materia orgánica, y no como resultado de la actuación independiente de un alma que residiera en dicha materia”²⁸³. George-Louis Leclerc, conde de Buffon, en su obra de historia natural, también propondrá una novedosa teoría de la reproducción como principal intento de desmarcarse de la idea de la generación espontánea imperante, donde imaginará que los seres vivos están constituidos por partículas, como también lo están los cuerpos no vivos. Pero no dispondrá aún de ningún medio para comprobar experimentalmente dicha teoría.

Aunque la teoría de Buffon será duramente criticada por Georges Cuvier²⁸⁴ -que era enormemente respetado en los círculos científicos del momento por sus impresionantes estudios sobre anatomía comparada y paleontología, gracias a sus observaciones geológicas, que le permitirán apreciar la progresión de las formas más sencillas a las más complejas-, propondrá una pauta histórica contraria a la de los cataclismos dominante, centrada en la idea de que inundaciones catastróficas acabarían con la vida terrestre hasta que, posteriormente, la tierra se repoblase de nuevo, efecto de la migración, y de la creación. Poco a poco, se irá llegando a la conclusión de que las cosas han ido cambiando progresivamente debido a la erosión, las erupciones volcánicas, etc. Todo ello sentará las condiciones que posibiliten la futura teoría de la evolución.

En 1796, la propuesta de Simón Laplace²⁸⁵ sobre la formación de los planetas, fruto de la condensación de nebulosas de polvo y gas que, por efecto de su propia gravedad, son aplastadas en rotación, serviría de inspiración para los naturalistas del siglo XIX. Entre ellos estará William Buckland²⁸⁶, quien defenderá la sucesión orgánica de

²⁸¹ LARSON, E. J. *Evolución, la asombrosa historia de una teoría científica*. 1ª ed. Castellano. Barcelona: Debate, 2006, p. 33.

²⁸² *Ibidem*, p. 33.

²⁸³ *Ibidem*, p. 34.

²⁸⁴ George Léopold Chrétien Frédéric Dagobert Cuvier (1769-1832). Naturalista francés, primero en proponer que la extinción de los dinosaurios de debió a una catástrofe natural. Fue el primer promotor de la anatomía comparada y la paleontología. Ocupó varios puestos de importancia en la educación nacional francesa en la época de Napoleón, y tras la restauración de los Borbones, fue nombrado profesor de anatomía comparada del Museo Nacional de Historia Natural de Francia.

²⁸⁵ Pierre-Simon Laplace (1749-1827) fue un astrónomo, físico y matemático francés. Continuador de la mecánica newtoniana que descubrió y desarrollo “la transformada de Laplace” y “la ecuación de Laplace”. Como estadístico sentó las bases de la teoría analítica de la probabilidad. Como astrónomo planteó la teoría nebular sobre la formación del sistema solar. Y compartió la doctrina filosófica del determinismo científico.

²⁸⁶ William Buckland (1784-1856). Prominente naturalista, geólogo y paleontólogo inglés favorable al creacionismo antiguo de la Tierra y la teoría del Diluvio Universal, fue convencido de la realidad de las glaciaciones propuesta por Louis Agassiz.

especies hasta el hombre, producto del enfriamiento gradual geológico, y gracias a la creación finalista por parte de un Dios bondadoso.

Por otro lado, no será hasta finales del siglo XVIII cuando se imponga el término “biología”, ya que hasta ese momento no habrá una verdadera separación entre lo viviente y no viviente, y prácticamente el concepto de “vida” no se utilizará para estudiar los seres vivos. A partir de entonces se comenzarán a valorar no las diferencias de estructura entre los organismos, sino lo que tienen en común los seres vivos, y lo que los diferencia de los no vivientes. Se clasificarán los objetos del mundo entre lo orgánico y lo inorgánico, y se perfeccionarán instrumentos como el microscopio, pudiendo discernir las unidades más básicas de lo viviente: las células. Este suceso fraguaría en la nueva Teoría Celular, según la cual todos los seres vivos están formados de la misma manera. Existe, pues, una organización microscópica, al lado de una macroscópica, en la que las funciones, las necesidades funcionales, son las que dictaminan la estructura de los organismos. A partir de este momento, con la biología las funciones serán lo importante, y las estructuras orgánicas dependerán de la forma en que deben organizarse y coordinarse las mismas.

En 1802, Jean-Baptiste de Monet de Lamarck²⁸⁷, conocido como Lamarck, pupilo y protegido de Buffon, publicará su teoría de la transmutación: una especie de naturalismo vital basado en la generación espontánea y progresiva de los organismos en respuesta a los cambios externos, y a las necesidades internas. Según su visión, una fuerza vital se concentraría en distintas zonas del organismo en función de un mayor uso, atrofia y expansión de los órganos preexistentes, dando lugar al aumento de la complicación y transformación espontánea y progresiva de la materia en los seres vivos, pudiendo posteriormente ser transmitidos estos cambios a sus descendientes. Con esta aportación, será el primero en crear un cuerpo teórico con unos mecanismos y leyes que expliquen la evolución, donde la *función* y la *forma* se diferencien como una unidad directriz vital en relación con el medio, y cuyo desarrollo en el tiempo dé lugar a la historia orgánica de la tierra. Según sus propias palabras, “es evidente, en efecto, que el estado en que vemos a todos los animales es, por un lado, el producto de la composición creciente de la organización que tiende a formar una gradación regular y, por otro lado, es la influencia de una multitud de circunstancias muy diferentes que tienden continuamente a destruir la regularidad en la gradación creciente de la organización”²⁸⁸.

²⁸⁷ Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829) fue un naturalista francés. Uno de los grandes hombres de la sistematización de la historia natural, cercano en su influencia a Linneo, Leclerc y Cuvier. Formuló la primera teoría de la evolución biológica y acuñó el término “biología” para designar la ciencia de los seres vivos. También fue el fundador de la paleontología de los invertebrados.

²⁸⁸ LAMARCK, J. B. *Filosofía Zoológica*. Barcelona: Alta Fulla. 1986, p. 221.

Una vez más, Cuvier también criticará duramente esta teoría, alegando no ajustarse en absoluto a su principio fijista de correlación de las partes, y aduciendo, a favor de su discurso arribista, la falta de especies de transición intermedia entre unas formas y otras, como venía observando, en sus descubrimientos fósiles.

En consecuencia, a pesar de que Lamarck planteó un programa metodológico y epistemológico de investigación, al no ser popular en los círculos científicos, políticos e ideológicos de su tiempo, apenas tendrá alcance en la ciencia evolucionista posterior, hasta que, a principios del siglo XX, D'Arcy Thompson lo relacione con la teoría física, como describiremos más adelante.

Y es que, además, en este momento también surgiría para quedarse la teoría evolucionista de Darwin, basada en el mecanismo de la Selección Natural, que a continuación intentaremos explicar. Pero antes de abordarla de lleno, creemos conveniente exponer, aunque sea someramente, otras teorías rivales que también surgirían a partir del siglo XX, como la ontogénesis (evolución por mecanismos intrínsecos al organismo, no por el ambiente), el neolamarckismo, la teoría de la mutación o saltacionismo (evolución a saltos), y el finalismo o evolucionismo teísta (teoría natural que incluye el evolucionismo).

Si el mecanismo de la Selección Natural se fundamentará en la presión del medio ambiente, que de forma paulatina afecta a los seres vivos a lo largo del tiempo, tanto la ontogénesis que organizaría las especies en líneas ordenadas a partir de su registro fósil, basándose en fuerzas internas que rigen la evolución, como el neolamarckismo, fundamentado en la adquisición de caracteres al final del desarrollo embrionario, serán teorías finalistas, cuyos cambios no son azarosos. En cambio, en este punto es importante resaltar que lo que hace la evolución es reorganizar las estructuras del organismo, de modo que, si alguna de dichas modificaciones es útil para la vida, se selecciona, pero sin buscar ningún otro propósito. Por último, la teoría de Hugo Vries²⁸⁹, de la mutación o saltacionismo, se basará en que los mutantes se someterían a la selección del medio.

A mediados de siglo, la síntesis moderna del darwinismo y la genética dará lugar a la teoría denominada neodarwinista, hoy en día dividida en tres ramas: neodarwinismo, equilibrio puntuado y saltacionismo renovado.

Según los defensores del equilibrio puntuado, la selección actúa no sólo a nivel del individuo, sino también de la especie. Para Darwin, la especiación (proceso de

²⁸⁹ Hugo de Vries (1848-1935) fue un botánico neerlandés y uno de los primeros genetistas que redescubrió las leyes fundamentales de la genética publicadas por George Mendel en 1865.

generación de una especie a partir de la anterior) tenía su origen en el cambio morfológico por Selección Natural. Pero ni el cambio, ni la adaptación resultada de la Selección Natural, son especiación. Para los neodarwinistas el cambio es constante en el tiempo, siendo más rápido en las poblaciones pequeñas o aisladas, y más lento en las grandes poblaciones; mientras que, para los defensores del equilibrio puntuado, el cambio en la morfología se produce en el momento de la especiación, siendo más rápido, pero no a saltos. Sin embargo, los nuevos saltacionistas como Richard Goldschmidt piensan que la especiación nunca es resultado de la Selección Natural, sino de la alteración en el desarrollo del individuo.

Aunque en general, la genética lo niega, algunos consideran que la semejanza en genes operadores reguladores de la expresión de otros, en especies muy aisladas, constituye una posibilidad para el saltacionismo, ya que pequeños cambios en dichos genes provocan grandes cambios morfológicos.

Hoy, pese a las diversas corrientes, la evolución es uno de los pilares de las ciencias de la vida. Con su teoría, Darwin consiguió conectar al ser humano con otras formas de vida, siendo uno de los científicos que más ha influido en la historia de la ciencia.

4.1.1.2. Breve introducción a la teoría de la Selección Natural

El siglo XIX fue, fundamentalmente, el siglo del evolucionismo. Revolucionó ramas de conocimiento como la biología con Darwin, la filosofía con Hegel²⁹⁰ o la Física con Boltzmann.

Pero Darwin será quien, con su libro *El origen de las especies*, publicado en 1859 y completado doce años más tarde con *La descendencia humana* y *La selección sexual*, provocará un antes y un después en el estudio de la evolución biológica. Su teoría de la *supervivencia y reproducción de los organismos mejor adaptados* se basará en el concepto de la transformación evolutiva de una especie en otra distinta, partiendo de dos ideas fundamentales: la variación al azar (conocida más tarde como mutación aleatoria) y la selección natural. Así Darwin, en el capítulo final de su obra, sintetizará diciendo:

²⁹⁰ George Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831). Filósofo alemán cuyo pensamiento revolucionó la filosofía introduciendo el sistema denominado *dialéctica*. Entre sus obras más reconocidas está *Fenomenología del espíritu* publicada en 1807.

Es interesante contemplar un enmarañado ribazo cubierto por muchas plantas de varias clases, con aves que cantan en los matorrales, con diferentes insectos que revolotean y con gusanos que se arrastran entre la tierra húmeda, y reflexionar que estas formas, primorosamente construidas, tan diferentes entre sí, y que dependen mutuamente de modos tan complejos, han sido producidas por leyes que obran a nuestro alrededor. Estas leyes, tomadas en un sentido más amplio, son: la de crecimiento con reproducción; la de herencia, que casi está comprendida en la de reproducción; la de variación por la acción directa e indirecta de las condiciones de vida y por el uso y desuso; una razón del aumento, tan elevada, tan grande, que conduce a una lucha por la vida, y, como consecuencia a la Selección Natural, que determina la divergencia de caracteres y la extinción de las formas menos perfeccionadas. Así, la cosa más elevada que somos capaces de concebir, o sea la producción de los animales superiores, resulta directamente de la guerra de la naturaleza, del hambre y de la muerte. Hay grandeza en esta concepción de que la vida, con sus diferentes fuerzas, ha sido alentada por el Creador en un corto número de formas o en una sola, y que, mientras este planeta ha ido girando según la constante ley de la gravitación, se han desarrollado y se están desarrollando, a partir de un principio tan sencillo, infinidad de las formas las más bellas y portentosas²⁹¹.

Luego, según su concepción, todos los organismos vivos estarán emparentados por una ascendencia común, emergiendo las diferentes formas de vida de dicha ascendencia mediante procesos de variación a lo largo de miles de millones de años. Sin embargo, ya que durante este proceso se producen muchas más variaciones de las que pueden sobrevivir, se eliminarán muchas por selección natural, quedando sólo las que alcancen un ajuste suficientemente adecuado para sobrevivir y reproducirse. Dicha teoría se considerará totalmente loable y dotada de un rigor científico indiscutible, tanto que será aceptada por gran parte de la comunidad científica de la época, a excepción de la élite dirigente científico-clerical.

4.1.1.3. Teoría Neodarwinista

Sin embargo, existirán ciertas diferencias entre la teoría de Darwin y la nueva teoría que emergerá de ésta, centrada fundamentalmente en la cuestión del dinamismo de la evolución, así como en los mecanismos por los que se rigen los cambios evolutivos.

²⁹¹ MELOGNO, P. *Elementos de historia de la ciencia*. Uruguay: Colecciones Manuales didácticos, 2011, p. 306.

En efecto, Darwin basó el concepto de variaciones al azar rigiéndose por la visión que sobre la herencia se tenía en el siglo XIX, donde se creía erróneamente que las características de cada individuo representaban la mezcla en partes iguales de los genes de sus progenitores. De ese modo, cada descendiente de un progenitor con una variación al azar útil heredaría sólo el 50% de la nueva característica, pudiendo traspasar sólo el 25% a la generación siguiente, siendo así muy poco probable que dicha característica perdurara con el tiempo y se estableciera por selección natural. La solución a este flanco débil de la teoría de Darwin vendría de los experimentos con guisantes que muchos años antes había realizado el monje austríaco aficionado a la botánica Gregor Mendel. Éste dedujo que existían “unidades de generación” (más adelante llamados “genes”) que no se mezclaban en el proceso de la reproducción, sino que eran transmitidas a cada generación sin cambiar su identidad.

De modo que, con la consideración de este hallazgo, se podía asumir que las mutaciones aleatorias de los genes lograban perseverar, bien saliendo fortalecidas, o siendo eliminadas por selección natural, lo que supuso un gran avance en el afianzamiento de la teoría darwiniana de la evolución, así como el inicio de un nuevo campo de investigación que, a principios de siglo XX, el biólogo británico William Baterson²⁹² denominaría, “genética”. La combinación de los estudios de Gregor Mendel sobre la estabilidad genética con la teoría de Darwin de cambios evolutivos graduales, dará origen a la actual síntesis neodarwinista, según la cual toda variación evolutiva es el resultado de una mutación aleatoria, es decir, de cambios genéticos aleatorios, seguida de selección natural, motivando esta vez la aceptación absoluta de la comunidad científica internacional. Por ejemplo, si una especie animal necesita una capa externa extra que le proteja de un clima muy frío, no desarrollará pelaje, sino que desplegará toda clase de cambios genéticos aleatorios que heredarán sus descendientes, tendiendo a ser seleccionados los que desarrollen pelaje espeso, al ser los más aptos para sobrevivir y reproducirse en ese medio. De forma que, tal y como aseveraría el biólogo genetista Jacques Monod²⁹³, “únicamente el azar es la fuente de toda innovación, de toda creación en la biosfera”²⁹⁴.

²⁹² William Baterson. (1861-1926) fue un biólogo y genetista inglés, uno de los redescubridores del trabajo de Mendel, razón por la cual fue considerado uno de los fundadores de la genética humana. Baterson fue muy crítico con la concepción exclusivamente cromosómica de la herencia, y defendió una teoría saltacionista de la evolución en oposición a la teoría gradualista de Darwin.

²⁹³ Jacques L. Monod (1910-1976) fue un biólogo y bioquímico francés, ganador del Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1965, compartido con François Jacob y André Lwoff, por sus descubrimientos referentes al control genético de la síntesis de enzimas y virus.

²⁹⁴ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 235.

Sin embargo, se puede reseñar en este momento que, como consecuencia de la “cruzada antievolucionista” que llegó a darse en EE. UU. en los años veinte, apoyada por el sector creacionista, surgirá, disfrazada de ciencia experimental, la que a día de hoy se ha dado en llamar “teoría del diseño inteligente”, la cual sostiene que la evolución es el resultado de acciones racionales y deliberadas de un agente inteligente.

4.1.1.4. Vías de creatividad

Continuando con la teoría neodarwinista, hay que reseñar reflexiones como la de la afamada bióloga Lynn Margulis ²⁹⁵ considerándola una teoría defectuosa al estar basada, según su criterio, en conceptos reduccionistas desfasados, formulados en un lenguaje matemático inadecuado. Como ella misma aseveraría, “el lenguaje de la vida no es la aritmética y el álgebra ordinarios, sino la química”²⁹⁶. Margulis consideraría que la mayoría de los evolucionistas pertenecen a una tradición zoológica, no microbiológica, que es la que se requiere para discernir que las principales vías de creatividad evolutiva se desarrollaron mucho antes de que aparecieran los primeros animales. Según Margulis, la concepción reduccionista sobre el conjunto de genes de un organismo (genoma), consecuencia del descifre en biología molecular del código genético tendiendo a representar el genoma como una disposición lineal de genes independientes, cada uno correspondiente a un rasgo biológico, está desfasada, ya que, según sus investigaciones, un solo gen puede influir en un gran número de rasgos; y, por otro lado, muchos genes separados a menudo se combinan para producir un solo rasgo. Y es que recientemente los biólogos han empezado a entender el genoma de un organismo como *una red altamente compleja*, y a estudiar sus actividades desde una perspectiva sistémica.

Verbigracia, como los últimos estudios realizados por la microbiología atestiguan, existe una red planetaria compuesta de miríadas de microorganismos que permanecieron como única forma de vida durante los primeros dos mil millones de años de evolución de la Tierra. En el transcurso de ese período, las bacterias transformaron, de forma continuada, tanto la superficie como la atmósfera terrestre, dando origen a mecanismos

²⁹⁵ Lynn Margulis (1938-2011) fue una destacada bióloga estadounidense, considerada una de las principales figuras en el campo de la evolución biológica, respecto al origen de las células eucariotas. Su teoría sobre estas células postula su aparición como consecuencia de la incorporación simbiótica de diversas células procariotas. Posteriormente también plantearía una hipótesis según la cual la simbiogénesis sería la principal fuente de novedad y diversidad biológica.

²⁹⁶ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 236.

esenciales para la vida como la fotosíntesis, la fermentación, la fijación del nitrógeno, la respiración y los dispositivos rotativos para el movimiento rápido, siendo tres los grandes caminos de evolución de las bacterias investigados en los últimos treinta años:

1. La mutación aleatoria de genes en que se basa la teoría neodarwinista, parte de un *error* accidental en la autorreplicación del ADN. No obstante, puesto que se calcula que sucede uno entre cada varios centenares de millones de células, precisamente por lo escaso de su frecuencia parece poco probable que haya sido la única causa de la diversidad de las formas biológicas actuales, más aun sabiendo que la mayoría de las mutaciones son dañinas y que muy pocas variaciones resultan útiles. Sin embargo, en el caso de las bacterias, la situación es muy diferente, debido a que una sola célula puede reproducirse de forma trepidantemente rápida, provocando que una sola bacteria mutante exitosa se propague eficazmente en su entorno.

2. Se trata del traspaso que libremente hacen las bacterias de rasgos hereditarios en una red global de intercambio denominada recombinación del ADN. Se considera este segundo camino mucho más eficiente que la mutación, ya que como Lynn Margulis y Dorion Sagan²⁹⁷ describieron, “en los últimos cincuenta años, aproximadamente, los científicos han observado que (las bacterias) transfieren rápida y rutinariamente distintos bits de material genético a otros individuos. Cada bacteria dispone periódicamente del uso de genes accesorios, provenientes en ocasiones de muy diferentes linajes y que cubren funciones que quizás su propio ADN no podría desarrollar. Algunos de estos bits son recombinados con los genes originales de la célula, otros vuelven a ser puestos en circulación. Como resultado de esta habilidad, todas las bacterias del mundo tienen acceso a un único banco de genes y, por ende, a los mecanismos de adaptación de todo el reino bacteriano”²⁹⁸. La rapidez con que se propaga por la red de comunicaciones bacteriana la resistencia a los fármacos da muestra de la eficiencia de este mecanismo respecto al de la adaptación de las mutaciones. “El constante intercambio de genes entre las bacterias da lugar a una asombrosa variedad de estructuras genéticas además de su ramal principal de ADN. Estas incluyen la formación de virus, que no son sistemas autopoyésicos ²⁹⁹ completos, sino consisten meramente en una tira de ADN o ARN en una funda

²⁹⁷ Dorion Sagan (1959) es un divulgador científico estadounidense, hijo de la bióloga Lynn Margulis y el astrónomo Carl Sagan. Autor de varias obras sobre cultura, evolución, e historia y filosofía de la ciencia entre las que destaca *La termodinámica de la vida* que escribió en coautoría con el físico Eric D Schneider, versando sobre la relación entre la termodinámica de no equilibrio y la vida.

²⁹⁸ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 240.

²⁹⁹ La autopoiesis o autopoyesis es un neologismo que designa la cualidad de un sistema capaz de producirse y mantenerse a sí mismo. Fue propuesto por los biólogos Humberto Maturana y Francisco Varela en 1973 para definir la química de automantenimiento de las células vivas. Una descripción breve sería decir que es la condición de la existencia de los seres vivos en la continua producción de sí mismos.

proteica.”³⁰⁰. Una bacteria no es una célula completa, sino que toma importancia dentro de la red microscópica a la que pertenece.

3. La *Simbiosis* (que ya introdujimos al comienzo de nuestro estudio) será la tercera y principal propuesta que Lynn Margulis postulará como camino para la evolución de los organismos multicelulares y de todas las formas mayores de vida. Parte de que, para los microbiólogos, la principal división de las formas de vida no es la comúnmente conocida entre animales y plantas, sino entre células sin núcleo o procariotas (a la que pertenecen las bacterias) y células con núcleo o eucariontes (a la que pertenecen todos los organismos superiores restantes). Para Margulis resultó sorprendente descubrir que no todos los genes de una célula nucleada están dentro de su núcleo. Tras años de investigación descubriría que estos “genes irregulares” procedían de bacterias, siendo como pequeñas células vivas anidando dentro de otras mayores. Esta situación de convivencia en íntima asociación, y a menudo dentro unos de los otros, es tan común como, por ejemplo, la que se da entre las bacterias alojadas en nuestros intestinos, y supondrá el punto de partida para que Margulis proponga su hipótesis de simbiosis de larga duración, comprendiendo bacterias y otros microorganismos viviendo en células mayores, produciendo nuevas formas de vida.

Así, la teoría completa de Margulis se conocerá como *simbiogénesis*, siendo por ejemplo el surgimiento de las mitocondrias una de sus manifestaciones más sorprendentes. Y es que, según argumentaría Margulis, las mitocondrias, como responsables de la respiración celular de toda célula vegetal o animal, conteniendo su propio material genético y reproduciéndose independientemente del resto de la célula, se aposentaron en tiempos pasados como bacterias libres dentro de otros microorganismos, y poco a poco evolucionaron a formas de vida más complejas, que respirarían oxígeno. La teoría de Margulis supondrá un cambio radical en la percepción del pensamiento evolutivo, obligando a los biólogos, asentados en la idea de competencia difundida por los darwinistas sociales del siglo XIX, a considerar la *cooperación continua*, y de mutua dependencia entre todas las formas de vida, como aspectos fundamentales de la evolución.

En definitiva, “el despliegue evolutivo de la vida a lo largo de miles de millones de años es una historia sobrecogedora. Movida por la creatividad inherente a todos los seres vivos, expresada por tres caminos distintos -mutaciones, intercambio de genes y

³⁰⁰ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 240.

simbiosis- y espoleada por la selección natural, la pátina viva del planeta se expandió e intensificó en formas de creciente diversidad”³⁰¹.

4.1.1.5. Forma y fuerzas mecánicas en las Ciencias Naturales

Una de las principales aportaciones que se produjo a principios del siglo XX, siguiendo las ideas de Lamarck basadas en que la forma en la naturaleza es resultado de la función que cumple, siendo la necesidad la que diseña los órganos, existiendo una evolución de la materia viva en la que se percibe una tendencia hacia la complejidad y la perfección, fue la de D’Arcy Thompson, que trabajó en demostrar que

las formas en la naturaleza pueden siempre explicarse por la acción de fuerzas y cuando la búsqueda de la eficiencia es lo primordial, tanto las estructuras naturales como las diseñadas por el hombre pueden seguir los mismos principios morfológicos. Las medusas, los empaquetamientos de las células o de las burbujas, los panales de abeja o los esqueletos de los radiolarios, son algunos de los ejemplos más sencillos que utiliza D’Arcy Thompson para analizar cómo las fuerzas físicas determinan la forma de los organismos y de los fenómenos de la naturaleza. Cada organismo tiene sus propiedades específicas y gracias a ellas adopta una forma determinada, pero existen innumerables fenómenos morfológicos que no son exclusivos de los seres vivos, sino que son manifestaciones más o menos simples de leyes físicas ordinarias, afirmaba, como la ley del área mínima o del gasto mínimo de energía³⁰².

Luego para D’Arcy la herencia genética no será la única responsable de la morfología de los seres vivos: “Si bien algunos miembros de una ballena se parecen a los de una morsa, no significa esto que dicha similitud provenga necesariamente de un ancestro en común, puede deberse a la necesidad de adaptación a condiciones ambientales similares. Tanto moluscos como vertebrados han desarrollado por separado ojos sofisticados de idéntica morfología. La física y química de la visión son comunes y en ambos casos determinan la forma estructural de los órganos. Según D’Arcy Thompson, entonces, la selección natural tiene una función limitada en la evolución de las especies,

³⁰¹ *Ibidem*, pp. 242-243.

³⁰² FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. Tesis Doctoral presentada en el Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Universidad Politécnica de Alicante, 2012, p. 55.

sólo elimina aquello que no se adapta a su medio, pero las nuevas estructuras, vivas o inertes, surgen a causa de propiedades físicas y matemáticas de la materia”³⁰³.

De modo que son diversas las fuerzas que actúan condicionando la forma de los objetos de la realidad, tal y como ya introdujimos en el Capítulo I de nuestra tesis.

La forma de los organismos vivos depende de la combinación de fuerzas internas de cohesión molecular, interacción electroquímica de la materia y fuerzas generales como la gravedad. Los mamíferos, por ejemplo, viven en un mundo dominado por la gravedad. En el mundo de las bacterias la gravedad tiene escasa influencia y son determinantes, en cuestiones morfológicas, las propiedades electroquímicas de la materia. Por ello la forma de nuestro cuerpo, hasta donde podemos entenderla hoy en día, presenta una extraordinaria complejidad que surge de la organización jerárquica en la que siempre las tensiones a que están sometidas las distintas partes pueden explicar con bastante certeza sus formas, desde la compleja estructura de las proteínas a una escala microscópica hasta la disposición de las trabéculas de los huesos porosos, la forma tubular de los huesos compactos o la morfología de nuestro esqueleto a una escala mayor. Esta extraordinaria complejidad formal es la responsable de extraordinarias propiedades físicas de nuestro cuerpo. La información genética aislada, entonces, no especifica por completo la forma, esta queda también determinada por la acción combinada de las fuerzas naturales presentes en el medioambiente y las leyes matemáticas³⁰⁴.

Finalmente, también la energía, que es escasa, determinará la forma natural condicionando tanto los procesos de formación como la relación con sus funciones. Así pues, “forma y función se encuentran intrincadamente relacionados en los seres vivos. Los genes de un individuo, se cree hoy día, no poseen la información de su forma final, sino más bien la información del proceso de generación de su forma en un determinado entorno. [...] La información genética depende, según esta teoría, de la física de procesos denominados “*form finding*” para poder generar la forma del individuo”³⁰⁵. Tal y como trataremos de explicarlo en el capítulo V de esta tesis.

³⁰³ *Ibidem*, p. 55.

³⁰⁴ *Ibidem*, pp. 55-56.

³⁰⁵ *Ibidem*, p. 210.

4.1.2. TEORÍA TERMODINÁMICA

A continuación hablaremos de la ley Termodinámica que, junto a la descrita ley de la Selección Natural, se han considerado como las principales leyes intervinientes en la evolución biológica hasta hace unos pocos años. Y es que, como iremos exponiendo, la termodinámica será una ciencia “clave para la comprensión y descripción general del cambio”³⁰⁶, siendo su mayor área de impacto la biología.

Para empezar diremos que, cuando hablamos de termodinámica, estamos haciendo referencia a una ciencia físico-química y práctica, cuya denominación procede de los términos griegos que designan el calor y el movimiento, y que surge mucho antes incluso de conocerse la existencia de los átomos. Debieron de pasar dos siglos, desde que Isaac Newton describiera las leyes de las interacciones mecánicas en términos matemáticos precisos, para que se diese sentido al concepto de energía. Según una de las leyes más básicas de la Física, la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. El dominio de la energía para realizar trabajo mediante el agua, el viento y el calor en combustión fue lo que propició la Revolución Industrial, pero el término energía no se acuñó hasta 1807.

Durante los siglos XVII y XVIII, mientras los científicos ideaban máquinas útiles y teorías sobre el comportamiento macroscópico de la naturaleza, también realizaban experimentos para revelar los secretos del flujo de energía.

A principios del s. XIX, concretamente en 1822, el físico e ingeniero Nicolas-Léonard-Sardi Carnot³⁰⁷, en un intento por comprender mejor la conversión del calor en trabajo, centrado en la tecnología del vapor, creó un motor de vapor hipotético funcionando según un ciclo *reversible*. De este modo, observó que el calor siempre fluía del fuego al hielo, de lo caliente a lo frío, nunca en sentido inverso, y que este flujo de calor podía generar una potencia mayor, cuanta más diferencia de temperatura (gradiente) hubiera entre la caldera muy caliente, y el radiador mucho más frío. Así, llegó a la conclusión de que el potencial de extracción de energía, mientras lo demás no cambiase, aumentaría más cuanto más intenso fuera el *gradiente* (aunque no demasiado). A partir de este descubrimiento, Carnot establecerá que “La energía, el trabajo y el calor son conceptos clave en la termodinámica. La energía es la capacidad de realizar trabajo”³⁰⁸;

³⁰⁶ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 29.

³⁰⁷ Nicolás Léonard Sadi Carnot (1796-1832). Físico e ingeniero francés. Pionero en el estudio de la Termodinámica.

³⁰⁸ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 56.

lo cual, unido a observaciones como: “en primer lugar, el calor fluye de los cuerpos calientes a los fríos. En segundo lugar, es imposible convertir enteramente calor en trabajo, ya que en todos los casos se pierde algo en la transformación. [...] Y es imposible componer una máquina del movimiento perpetuo. No hay creación sin destrucción”³⁰⁹, le servirán para fundar la segunda ley termodinámica clásica.

De modo que los estudios de Carnot, determinando que a medida que se emplea la energía, ésta no se agota, y que lo que sí que se pierde en el proceso es la capacidad de realizar trabajo con esa energía, supondrán un gran avance científico. Sin embargo, en lo que Carnot se equivocará será en decir que el calor fluye. Como aclaración diremos que, según la ciencia moderna, se entiende por *calor* a los átomos con velocidades medias elevadas, que tienden a mezclarse con átomos de velocidad media más baja, correspondiente a una menor temperatura. Y es que los humanos no somos capaces de percibir los movimientos atómicos y moleculares sino en bloque, en forma de *sensación* de calor. Se trata por tanto de una abreviación sensorial.

En definitiva, el calor es nuestra percepción macroscópica del movimiento microscópico de un número enorme de las partículas, que no podemos ver. Cuanto más rápido se mueven, más caliente sentimos una sustancia. Dicho movimiento solo cesa a 0° grados Kelvin ³¹⁰, considerándose ésta la mínima temperatura posible. “El calor que abandona un cuerpo moribundo puede antojársenos un fluido que escapa, pero hoy se explica como un entrechocar de átomos en movimiento en que *la diferencia de temperatura*, el gradiente, se desvanece”³¹¹.

“La termosfera, más allá de la estratosfera, a pesar de que se encuentra a una temperatura extremadamente alta, contiene tan pocas moléculas que, si nos expusiéramos a ella, moriríamos congelados. Sus moléculas excitadas por la radiación solar se mueven muy deprisa, pero son tan escasas, que la termosfera nos quemaría de frío, no de calor”³¹².

Más adelante, el físico Benjamin Thompson³¹³, seguido del físico Robert Julius Mayer³¹⁴, serán quienes, considerando inadecuada la explicación de Carnot del calor

³⁰⁹ *Ibidem*, p. 70.

³¹⁰ El Kelvin (símbolo: K), antes llamado grado Kelvin, es la unidad de temperatura de la escala creada en 1848 por William Thomson, primer barón Kelvin, sobre la base de grado Celsius, estableciendo el punto cero en el cero absoluto (-273,15°C) y conservando la misma dimensión. A sus 24 años, Kelvin introdujo la escala de temperatura termodinámica, cuya unidad fue nombrada en su honor en 1968.

³¹¹ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 66.

³¹² *Ibidem*, p. 69.

³¹³ Benjamin Thompson (1753-1814). También conocido como Conde Rumford, fue un físico e inventor británico, nacido en Estados Unidos, cuyos desafíos de la física teórica establecida, formaron parte de la termodinámica del siglo XIX.

³¹⁴ Julius Robert von Mayer (1814-1878) fue un físico y médico alemán, que a la vez que Joule, pero con independencia de él, logró comprobar primero la transformación de trabajo mecánico en calor, y viceversa, obteniendo incluso, en 1842 el valor de la caloría. En 1845 presentó “la relación de Mayer”, proceso por el cual había obtenido sus resultados, consistente en la medida de la

como un fluido, tras varios años de investigaciones confirmarán que el calor no tiene sustancia. Posteriormente, en 1873, el científico aficionado James Prescott Joule³¹⁵ dará un paso crucial en el dominio de la energía, al precisar su cuantificación. Para llevar a cabo este fin, Joule concibió un experimento de conversión del calor en trabajo. Consistía en un recipiente adiabático (aislado), en cuyo interior dispuso unas palas sumergidas en agua, accionadas desde el exterior por una manivela sin rozamiento. Con un termómetro de alta precisión, supo medir el equivalente mecánico del calor, determinando la unidad de medida “jule” como el equivalente al trabajo requerido para elevar un peso de un kilogramo hasta una altura de un metro. Así, conectando la mecánica newtoniana clásica con la termodinámica, “probó que la energía no era un fluido visible. La energía era proteica: podía *cambiar* de forma”³¹⁶. Finalmente, la idea de que “la energía, nunca se pierde, sino que sólo se transforma”, dará pie a lo que más adelante conformará la primera ley termodinámica.

Como explicación de apoyo a lo dicho, añadiremos que “una clase de energía puede transformarse en otra, como el nacimiento de las estrellas a partir de la agregación de nubes de escombros cósmicos. La materia misma, como establece la ecuación de Einstein $E=mc^2$ (energía igual a masa por el cuadrado de la velocidad de la luz), constituye un vasto reservorio potencial de energía”³¹⁷. La energía, a tenor de lo que, como veremos, sugiere el primer principio de la termodinámica, cambia sutilmente de forma, pero no desaparece del todo. El calor, o mejor, flujo calorífico, y el trabajo, son procesos, no cosas, de transferencia de energía. Una partícula puede poseer energía en relación a su posición (energía potencial) y su movimiento (energía cinética). El calor es un traspaso de energía a través de gradientes de temperatura. El trabajo realizado sobre un sistema es un traspaso de energía en una acción coherente. Una raqueta de tenis transfiere energía cinética a una pelota, de modo que todos sus átomos y moléculas viajan en bloque en un movimiento coherente, en una misma dirección. Sin embargo, cuando calentamos un sistema, a medida que se transfiere energía en forma de calor, el

diferencia de las capacidades calóricas molares de los gases. En 1846, presenta otra memoria dedicada a los fenómenos eléctricos y biológicos, “El movimiento orgánico”, en la que enuncia el principio de la conservación de la energía.

³¹⁵ James Prescott Joule (1818-1889) fue un físico inglés de los más notables de su época. Conocido sobre todo por sus investigaciones en electricidad, termodinámica y energía, estudió el magnetismo, y descubrió su relación con el trabajo mecánico, lo cual le condujo a la teoría de la energía. La unidad internacional de energía, el calor y el trabajo, el Joule, fue bautizada en su honor. Trabajó con Lord Kelvin para desarrollar la escala absoluta de la temperatura. Hizo observaciones sobre la teoría termodinámica (efecto Joule-Thompson) y encontró una relación entre la corriente eléctrica que atraviesa una resistencia y el calor disipado, llamada actualmente ley de Joule.

³¹⁶ *Ibidem*, pp. 70-71.

³¹⁷ *Ibidem*, p. 56.

movimiento térmico de las moléculas del cuerpo calentado se vuelve más incoherente, siendo más difícil determinar su posición y movimiento.

Finalmente, de 1840 a 1865, será el físico Rudolf Julius Emanuel Clausius³¹⁸ quien definitivamente completará la obra de Carnot, enunciando que “no es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la transferencia de energía de un cuerpo más frío a otro más caliente”³¹⁹. Además, interpretará los conductores eléctricos de Joule, corroborando que el calor no es más que una de las muchas formas de “energía”, e introducirá la noción de entropía a partir de su étimo griego, que significa *transformación*.

Por consiguiente, en este punto podemos revisar que el primer principio o ley de la termodinámica, también denominado/a “ley de la conservación de la energía”, afirma que la energía se conserva a pesar de cambiar de forma. El segundo principio o ley para un sistema aislado o “cerrado” (que no intercambia materia ni energía con el exterior), establece que en cualquier proceso de transformación de energía se genera *entropía*³²⁰, considerada ésta como la medida del *desorden* molecular, la cual crecerá hasta un “máximo”, o hasta lo que en física se considera un punto de *equilibrio* termodinámico. Luego, “En termodinámica, la entropía mide un *proceso irreversible*, el decrecimiento natural en la calidad de la energía, a medida que la materia adopta distribuciones más probables (distribuciones que ya no son susceptibles de convertirse en trabajo o estructura). [...] La entropía termodinámica no tiene que ver con objetos macroscópicos, sino con partículas microscópicas medidas por la temperatura”³²¹. “El aumento de la entropía indica entonces la dirección del futuro, en el nivel de un sistema local o bien del universo en su conjunto. Por esta razón, Eddington ³²² lo asoció con la *flecha del tiempo*” ³²³. Así, como más adelante explicaremos, si el primer principio de la termodinámica resultaba ser restrictivo, el segundo será el que realmente determine una pauta de comportamiento de evolución hacia el futuro; será, pues, el principio director,

³¹⁸ Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888). Físico y matemático alemán. Reformuló el principio de Nicolás Léonard Sadi Carnot sobre la teoría del calor comúnmente conocido como “Ciclo de Carnot”. En su trabajo más importante sobre la teoría mecánica del calor, publicado en 1850, estableció por primera vez las ideas básicas de la segunda ley de la termodinámica, e introdujo el concepto de Entropía.

³¹⁹ *Ibidem*, p. 76.

³²⁰ Entropía: Magnitud termodinámica que se define como la parte de energía generada por un sistema, que se gasta en mantener su propia estructura, y que por tanto no es útil para hacer un trabajo. Cuanto más evoluciona un sistema, más entropía produce, si bien, ese aumento se incrementa aún más, cuanto más irreversible es el camino recorrido para que se dé esa evolución. Por el contrario, si la evolución de un sistema fuese totalmente reversible, sería inservible, pues no podría generar trabajo, llegaría al equilibrio y moriría. Es decir, si el cambio pudiera ser totalmente reversible, la entropía generada sería mínima, empleándose exclusivamente para el cambio de estructura. O también que, cuanto más brusco es el cambio producido, más entropía se genera y, por ello, más difícil es volver atrás. El aumento excesivo de entropía es negativo, porque supondría una degradación muy rápida de la Naturaleza, pero, por el contrario, cuanto más rápidamente se genere entropía por unidad de tiempo, más potencia tendrá el sistema. Fue Rudolf J. E. Clausius quién le dio nombre y la desarrolló durante la década de 1850; y Ludwig Boltzmann, quien encontró en 1877 la manera de expresar matemáticamente este concepto desde el punto de vista de la probabilidad.

³²¹ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 49.

³²² Arthur Stanley Eddington (1882-1944). Astrofísico británico famoso por su trabajo sobre la Teoría de la Relatividad.

³²³ PRIGOGINE, I. *El fin de las certidumbres*. Madrid: Santillana/Taurus, 1997, pp. 25-26.

ya que todo sistema físico aislado o cerrado tenderá hacia el creciente desorden, al equilibrio, y por tanto al estado de máxima entropía.

Con la formulación del enunciado de la segunda ley de la termodinámica, la fricción y la entropía introduciendo el factor tiempo de Clausius, y la presentación prácticamente en el mismo período de la teoría de la evolución de las especies por selección Natural de Darwin, el perfecto cuadro newtoniano dominante se quebrará. Es más, con la llegada de la nueva termodinámica de no equilibrio, que a continuación vamos a explicar, definitivamente la idea del cosmos funcionando como un reloj se desvanecerá del todo.

Pero antes de continuar, brevemente queremos aclarar el comportamiento que, correlacionado con su distancia al equilibrio, según Schneider y Sagan, caracteriza a cuatro tipos distintos de sistema:

1. El estado de equilibrio. Aquí no pueden esperarse cambios posteriores en el sistema. Este estado se asocia con grandes números de moléculas distribuidas más o menos aleatoriamente dentro de un recipiente aislado. Puede haber pequeñas fluctuaciones, pero, con unos niveles de energía tan bajos, el sistema no cambia de estado. Los estados de equilibrio van desde una taza fría de café con leche hasta el sombrío estado final del universo postulado por la termodinámica clásica, pasando por el cosmos después de la gran explosión, pero antes de que la gravitación iniciara la combustión nuclear de las estrellas. Un ejemplo químico de estado de equilibrio es la reacción del hidrógeno y el oxígeno en un recipiente cerrado: ambos elementos reaccionan produciendo agua, y después ya no ocurre mucho más.
2. Sistemas casi en equilibrio. Estos retornarán al estado de equilibrio si se les permite hacerlo. Por ejemplo, considérese un sistema con moléculas que se encuentran en dos frascos conectados a través de un tubo cerrado. Un frasco contiene más moléculas que el otro. Si se abre la llave de paso, el sistema llegará a un estado de equilibrio con un número aproximadamente igual de moléculas en cada frasco.
3. Sistemas cercanos al equilibrio. Se trata de sistemas que se mantienen fuera del estado de equilibrio por la aplicación de un gradiente continuo. El sistema alimentado desde el exterior no se instala en el equilibrio, sino que responde de una manera *lineal* y predecible a los cambios que se producen en esas condiciones físicas.
4. Sistemas alejados del equilibrio. Aquí es más difícil predecir el comportamiento del sistema. Un cambio en una variable puede inducir un cambio *casi lineal* en otra variable, o puede suscitar cambios impredecibles que no es posible modelar con ecuaciones matemáticas razonablemente simples. Muchos sistemas clasificados como “alejados del

equilibrio” (los organismos, por ejemplo) tienen atributos de sistemas cerca del equilibrio³²⁴.

4.1.2.1. Mecánica estadística

Aunque Clausius fue quien, en 1854, descubrió el segundo principio termodinámico para explicar el sentido de *progreso* de los sistemas físicos, y definió lo que hoy se considera *el concepto fenomenológico de entropía* [basado en la observación macroscópica], sería Ludwig Eduard Boltzmann³²⁵ el que, en la segunda mitad del siglo XIX, proporcionaría una interpretación estadística de la fórmula más general de cálculo de ésta, empleada para determinar el índice de configuraciones posibles que puede tener un sistema. Así, según esta,

la entropía contiene la desinformación del observador macroscópico y representa el número de configuraciones microscópicas compatibles con el estado de equilibrio en cuestión. La entropía de Boltzmann asocia al sistema la idea de orden (se trata ya de una medida de la *complejidad*) que crece con la disminución de la entropía. Con esto, el segundo principio se convierte en una ley de desorganización progresiva, y los sistemas que la obedecen [y en contraste con los sistemas mecánicos] se olvidan de las condiciones iniciales³²⁶. [...] La unificación de la termodinámica clásica y la mecánica newtoniana, supone un descubrimiento *fenomenológico* (basado en la observación) al conectar la mecánica, con su tiempo *simétrico* y reversible, al *flujo del tiempo*, que en la experiencia cotidiana es *irreversible*³²⁷.

Puesto que es humanamente imposible desandar lo andado molécula a molécula para volver al estado inicial, tal y como lo haría el sistema newtoniano, aunque perdamos información (al desconocer el estado inicial), teniendo una visión más global, (como cuando empleamos la palabra “mamífero” que, al ser menos precisa, puede sernos más útil para hacernos comprender lo que es un *Ornithorhynchus anatinus*), empleando el

³²⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, pp. 57-58.

³²⁵ Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). Físico austriaco pionero en la mecánica estadística, autor de conceptos fundamentales en la termodinámica como la constante que lleva su mismo nombre, o la expresión matemática de entropía desde el punto de vista de la probabilidad (la relación entre los estados macroscópicos y microscópicos).

³²⁶ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 30.

³²⁷ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 85.

método estadístico de Boltzmann, ésta será más ajustada a nuestro sentido cotidiano de paso del tiempo y nos ayudará, por consiguiente, a comprender mejor nuestra realidad.

“Efectivamente la termodinámica había encontrado una manera de tratar la materia como un bosque, no como una suma de árboles”³²⁸. La nueva visión microscópica y estadística del universo aportada por la termodinámica de poblaciones de partículas de Boltzmann nos facilitaba una comprensión teórica, tal y como nuestros sentidos lo entendían en la práctica, no de una manera newtoniana abrumadoramente detallada, sino a grandes rasgos, aplicando la teoría de la probabilidad a la tendencia de la materia al equilibrio. Es decir:

Reconoció el poder de la estadística para tratar con números descomunales de partículas y observó que, con un número de casos suficiente, lo ideal y lo real convergían. [...] Pero esta taquigrafía logarítmica requerida para el manejo de grandes números no se restringe a la ciencia. [...] La evolución también la ha implantado en nuestra herencia genética. Un grito que hiele la sangre, medido por la energía de las ondas sonoras que viajan por el aire, [...] es un billón de veces más ruidoso que la caída de una aguja [...]. La escala de decibelios que refleja nuestra percepción auditiva es logarítmica. El oído reduce la diferencia multiplicativa, poco manejable, a una diferencia auditiva, [*seleccionando*], economizando la percepción mediante una distorsión de la realidad³²⁹.

Es más, Boltzmann, interesado en comprender la vida desde el punto de vista de la nueva termodinámica estadística, creyó posible formular una descripción evolucionista de los fenómenos físicos con su definición de la flecha del tiempo, inspirándose en la acción de la selección natural darwiniana para cambiar la materia viva. Pero los sistemas con tendencia al equilibrio estadístico (a la muerte térmica) en que basó sus estudios dentro de un recipiente cerrado contradecían la descripción de Darwin, donde había un crecimiento evolutivo de complejidad por selección natural minimizando su entropía en dicho proceso. Sumido en estas disquisiciones, en 1886 “sugirió proféticamente que el gradiente energético impuesto por el sol sobre nuestro planeta impulsa los procesos de la vida. Postuló la existencia de una competencia por la entropía (hoy sustituimos dicho término por energía libre capaz de realizar un trabajo), al estilo darwiniano, entre los sistemas vivos consumidores de energía:

³²⁸ *Ibidem*, p. 86.

³²⁹ *Ibidem*, pp. 80-81.

Entre la tierra y el sol, sin embargo, hay una colosal diferencia de temperatura, de manera que entre ambos cuerpos la energía no se distribuye en absoluto conforme a las leyes de la probabilidad [...]. Las formas intermedias adoptadas por la energía solar hasta que desciende la temperatura terrestre pueden ser altamente improbables, lo que nos permite usar la cesión del calor del Sol en la Tierra para la realización de trabajo [...]. La lucha general de los seres animados por la existencia no es, por tanto, una lucha por las materias primas [...], ni por la energía, que cualquier cuerpo posee en forma de calor (aunque desafortunadamente, no sea transformable), sino una lucha por la entropía, disponible en virtud de la transferencia de energía solar, antes de que su temperatura caiga hasta la terrestre, por llevar a cabo, de manera aún inexplorada, ciertas síntesis químicas de las que nadie en nuestros laboratorios tiene hasta ahora la menor idea. Los productos de esta cocina química son el objeto de la lucha del mundo animal³³⁰.

Sin embargo, puesto que sus investigaciones acerca de la segunda ley termodinámica eran de naturaleza estadística y probabilística, al no poderse comprobar, al haber una mínima posibilidad de que no se cumplieran, al basarse en unas partículas microscópicas que aún no se conocían (cincuenta años más tarde se conocerían como átomos), al no entrar en la formulación de las leyes fundamentales de la mecánica newtoniana, que únicamente estudiaba objetos visibles y comprensibles, defendida por la élite europea de físicos pertenecientes al Círculo de Viena, integrado por “positivistas lógicos” aun imperante, su idea sería relegada al dominio de la fenomenología.

Antes de buscar una solución convincente, conviene que tengamos en cuenta reflexiones que el propio Einstein hacía al respecto, reseñando que “lo más misterioso del universo es que podamos comprenderlo. Tal vez parte del problema estribe en que formamos parte de la estructura que intentamos observar, por lo que únicamente podemos hacernos una representación parcial de ella. Si la entendemos en un sentido, puede que tengamos que renunciar a entenderla en el otro: no estamos fuera del rompecabezas que intentamos componer, sino que somos piezas de ese rompecabezas”³³¹.

Entre los científicos dispuestos a validar la teoría de Boltzmann, destacó el físico escocés James Clerk Maxwell³³². Interesado en poner a prueba la segunda ley de la

³³⁰ *Ibidem*, pp. 92-93.

³³¹ *Ibidem*, p. 92.

³³² James Clerk Maxwell (1831-1879) fue un científico escocés especializado en el campo de la física matemática. Su mayor logro fue la formulación de la teoría clásica de la radiación electromagnética, que unificó por primera vez la electricidad, el magnetismo y la luz como manifestaciones distintas de un mismo fenómeno. También contribuyó al desarrollo de la distribución de Maxwell-Boltzmann, un medio para describir de forma estadística ciertos aspectos de la teoría cinética de los gases. Sus descubrimientos fueron cruciales para entrar en la física moderna, sentando los cimientos de campos como la relatividad especial o la mecánica cuántica. Muchos físicos consideran a Maxwell el científico del siglo XIX con más influencia en la física del siglo XX.

termodinámica, ideó en 1867 un experimento que hoy se conoce como el “demonio de Maxwell”, protagonizado por un diminuto duende, o demonio como se le conoce en la actualidad, capaz de percibir la tendencia de la materia a fluir en direcciones de alta probabilidad. Dicho duende, situado en el interior de un recipiente cerrado, junto a una trampilla que se abría y cerraba sin rozamiento, como si de un portero de discoteca se tratara, podría seleccionar las moléculas que se aproximaran a la trampilla dejando pasar sólo las más rápidas. Puesto que, como ya hemos explicado, la velocidad molecular se correlaciona con el calor, el duende clasificador de moléculas estaría elevando más la temperatura del recipiente en un lado que en el otro de la trampilla, de modo que, aplicando su percepción, crearía una diferencia de temperaturas, un gradiente (en vez de deshacerlo). Así, como el propio Maxwell aclararía:

La energía *disipada* es energía que no podemos atrapar y dirigir a placer, tal como la energía de la confusa agitación de las moléculas que llamamos “calor”. Ahora bien, la “confusión”, con el término correlativo “orden”, no es una propiedad de las cosas materiales en sí mismas, sino sólo en relación con la mente que las percibe [...]. Sólo para un ser en la fase intermedia, que puede atrapar algunas formas de energía, mientras que otras eluden su captura, la energía parece estar pasando inevitablemente del estado disponible al estado disipado. Maxwell afirma aquí que sólo el rompedor de gradientes puede reconocer, usando su percepción imperfecta, el gradiente que lo alimenta, en medio de la confusión de un mundo rico en energía, y con una gradación fina. Así como el demonio imaginario crea gradientes sin nada más que su percepción, así también los duendes reales extraen la energía que necesitan del entorno a base de reconocer gradientes y actuar para acceder a ellos. Si se vuelven más perceptivos o inteligentes (y así parece que ocurre a lo largo del tiempo evolutivo), los organismos tendrán más gradientes a los que recurrir para alimentar su crecimiento³³³.

En la vida real no existen duendes generadores de gradientes, ni sus equivalentes mecánicos [...] Lo que más se aproxima al demonio de Maxwell en la vida real son los propios seres vivos³³⁴.

Finalmente, al poco tiempo también Einstein publicaría sus trabajos sobre el movimiento Browniano³³⁵ y la cinética térmica, basándose en la observación al

³³³ *Ibidem*, p. 100.

³³⁴ *Ibidem*, p. 96.

³³⁵ “A principios de siglo XIX, el botánico escocés Robert Brown descubrió una gota que quedó atrapada en un fragmento de roca ígnea durante su solidificación. Al enfocar dicha gota con el microscopio, observó trazas de partículas minúsculas que oscilaban sin cesar con un movimiento absolutamente irregular. Este movimiento le resultaba familiar, ya que lo había observado al estudiar los

microscopio del movimiento de partículas suspendidas en el agua, golpeadas por moléculas aún más pequeñas que éstas, demostrando así la viabilidad exigida a la teoría cinética del calor. Las partículas, ahora denominadas “átomos” invisibles, podían ser observadas, chocando aleatoriamente, de acuerdo con la segunda ley, con partículas mayores.

La mecánica estadística de Boltzmann por fin era verificada. Definitivamente, la teoría de la probabilidad formaría parte, primero, de la termodinámica, y, luego, de la mecánica cuántica (que introduciremos en breve).

Sin embargo, habría que esperar a que científicos como Josiah Willard Gibbs³³⁶ pulieran el tratamiento matemático de los agregados de partículas de Boltzmann. Sus investigaciones de sistemas energéticos de toda clase, especialmente reacciones químicas, extendería la termodinámica bastante más allá de los estudios del calor y el trabajo. Gibbs ampliaría la termodinámica de los sistemas idealizados aislados, sin contacto alguno con el exterior, donde el número de partículas y energía total del sistema se mantenía constante, a la de sistemas “cerrados”, que sí permiten el *flujo* (intercambio) de energía, pero no de materia, y, también, a la de los sistemas “abiertos”, donde se propiciaría tanto el intercambio de energía como de materia entre el sistema y el mundo exterior. Hoy se entiende por “energía libre de Gibbs” la cantidad de trabajo útil que se puede obtener de un sistema termodinámico. El sistema estará en equilibrio cuando se minimice la energía libre de Gibbs, se maximice la entropía y cese toda acción.

Hasta el momento las termodinámicas microscópicas y macroscópicas habían sido perfiladas lo suficiente como para admitir descripciones ajustadas de los sistemas de flujo de energía, y transformaciones energéticas naturales no ideales. Para muchos científicos, la historia de la termodinámica había tocado techo con las aportaciones de Boltzmann y Gibbs. Sin embargo, la termodinámica de sistemas abiertos y en evolución no había hecho más que empezar. En una alocución para una reunión formal de la Academia Imperial de Ciencias, en mayo de 1886, Boltzmann juzgaba así el progreso de la ciencia decimonónica:

granos de polen suspendidos en el agua. La explicación del fenómeno que dio Brown es que la vitalidad de las moléculas de una planta se mantenía durante un tiempo después de su muerte. Sin embargo, esta explicación perdió crédito con posterioridad, y se pensó a pensar que dicha agitación, bautizada como movimiento browniano, se debía más bien a un fenómeno físico que a uno biológico. Por ejemplo, cuanto menor es la partícula o mayor la temperatura, mayor era la velocidad del movimiento de la misma. No fue hasta 1905 cuando Albert Einstein estableció las primeras implicaciones de la teoría cinética de los gases elaborada por James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann, y las aplicó al estudio del movimiento browniano. [...] La trayectoria de una partícula en movimiento browniano fue uno de los primeros fenómenos naturales en los que se reconoció una autosimilitud a diferentes escalas de aumento. [...] La trayectoria que sigue una partícula browniana es tal que mantiene una estructura de complejidad similar al cambiar la escala de tiempos de observación”. En BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 45.

³³⁶ Josiah Willard Gibbs (1839-1903). Físico estadounidense que contribuyó de forma destacada a la fundación teórica de la termodinámica.

Si contemplamos el aparato de la ciencia experimental como un conjunto de herramientas para obtener beneficios prácticos, ciertamente no podemos negar su éxito. Se han logrado resultados no imaginados. Las fantasías que soñaban nuestros antepasados en sus cuentos de hadas se han visto superadas por las maravillas que la ciencia, conjuntamente con la *tecnología*, ha hecho realidad ante nuestros atónitos ojos. Al facilitar la circulación de hombres, cosas e ideas, la ciencia ha contribuido a elevar y difundir la civilización. [...] Sin embargo, pienso que no son estos logros los que dejarán su sello en nuestro siglo: si me preguntan cuál es mi convicción más íntima acerca de cómo será recordado este siglo, si como el siglo del hierro, el vapor o la electricidad, responderé sin dudarle que será conocido como el siglo de la visión mecánica de la naturaleza, la visión de Darwin³³⁷. Aunque para muchos la evolución darwiniana todavía parece contradecir la segunda ley, nada menos que un pensador como Boltzmann fue un firme creyente en ambas³³⁸.

4.1.2.2. Hacia la nueva termodinámica

Si recapitulamos, finalizando el siglo XIX, dos visiones del cambio evolutivo diametralmente opuestas, la del mundo vivo extendiéndose hacia un creciente orden y complejidad, y la de un motor en agotamiento, un mundo en creciente desorden, amenazaban con reemplazar la ciencia de las eternas trayectorias reversibles, la ciencia mecánica newtoniana.

Tras la introducción de estas dos teorías clásicas, biológica y física, podemos observar que términos como “evolución” y “probabilidad estadística” están relacionados en ambas. No obstante, mientras que, para la teoría biológica de Darwin, la evolución viene asociada a la creación de nuevas estructuras, para la teoría física termodinámica de Boltzmann ocurre exactamente lo contrario, la probabilidad llega a un máximo cuando se llega a la uniformidad, al equilibrio, destruyéndose las condiciones prevalentes. Por consiguiente, la evolución física es, en definitiva, una sucesión de estados cada vez más desordenados, más caóticos, más probables. Y el estado final es el compatible con la máxima probabilidad, donde ya nada más puede ocurrir -es el denominado en Física estado de equilibrio termodinámico-. Pero, si tenemos en cuenta que “para los seres vivos

³³⁷ *Ibidem*, pp. 104-105.

³³⁸ *Ibidem*, p. 105.

el equilibrio termodinámico equivale a la muerte”³³⁹, ¿acaso los seres vivos desobedecen esta ley termodinámica?

Para responder a esta pregunta empezaremos invocando al biólogo Ludwing von Bertalanffy³⁴⁰, quien, aunque no sabría descifrar del todo el dilema planteado, sí que abriría camino en su resolución, al puntualizar que, en contra de lo que se creía, los organismos vivos no son sistemas cerrados, sino abiertos, porque para sobrevivir necesitan estar abiertos al flujo de materia y energía del entorno, por lo que no pueden ser descritos por la termodinámica clásica. Los sistemas abiertos logran mantenerse en un estado “estable”, lejos del equilibrio térmico caracterizado por un continuo flujo y cambio al que Bertalanffy denominó *fliessgleichgewicht* (“equilibrio fluyente”). Dedujo claramente que la termodinámica clásica, que trata de sistemas cerrados o cerca del estado de equilibrio, no podía describir los sistemas abiertos estables y lejos del equilibrio, donde la entropía podía decrecer y donde, en definitiva, la segunda ley no se cumpliría. Especuló con la ampliación de la ciencia clásica en dirección a una nueva termodinámica de sistemas abiertos, pero lamentablemente, en esa época, las técnicas matemáticas necesarias para dar con tal avance aún no estaban a su alcance. No obstante, Bertalanffy sí lograría relacionar las características del estado estable con el metabolismo, lo que le permitiría postular la autorregulación como la cualidad esencial de los sistemas abiertos (volveremos sobre esta idea más adelante).

Pero si tenemos en cuenta afirmaciones como la del genetista Theodosius Dobzhansky, “nada tiene sentido si no es a la luz de la evolución”³⁴¹, el aparente confrontamiento al que la convivencia de estas dos ciencias, física y biológica, pueden dar a lugar, se resuelve al considerar la biología no sólo como una ciencia histórica, sino como un puente entre la historia y la físico-química.

La física tradicional mecanicista se basaba en la formación presente. Consideraba que la manera en que funcionaban las cosas no precisaba conocer su historia. Sin embargo, las explicaciones físicas tradicionales calaron tanto que aún hoy siguen condicionando la aplicación de la biología (a pesar de los progresos que supuso el darwinismo), bien desde un punto de vista en la línea de las causas actuales (físicas), o, por el contrario, de las causas pasadas (evolutivas). Empero, puesto que la matemática y la geometría son intemporales, biólogos como D’Arcy Thompson se decantarían por esta

³³⁹ *Ibidem*, p. 21.

³⁴⁰ Karl Ludwing von Bertalanffy (1901-1972). Biólogo y filósofo austriaco, reconocido fundamentalmente por su teoría de sistemas.

³⁴¹ DOBZHANSKY, T. *et al. Evolución*. Barcelona: Omega, 1993, p. 49.

vía, considerando la explicación matemática de la complejidad de la vida como reemplazo de la explicación por selección natural: “El hecho de que muchas formas biológicas parecen seguir reglas matemáticas o geométricas sencillas, indica que la existencia de fuerzas de constricción en su crecimiento es una explicación más parsimoniosa que la selección natural”³⁴². “El análisis de las diferencias entre el mundo orgánico e inorgánico, de los objetos animados e inanimados, dice, ha ocupado la mente de muchos hombres, mientras que pocos se han dedicado a la búsqueda de aquellos principios comunes o similitudes esenciales entre ellos”³⁴³. No obstante, Thompson también haría una buena defensa de la física, diciendo: “Es imposible predecir hasta qué punto el matemático podrá describir, y el físico explicar, la constitución del cuerpo [...] tanto como comprender el alma. Pero en lo referente a la constitución, crecimiento y funcionamiento del cuerpo, así como a todo lo que existe en el mundo material, la ciencia física es, en mi humilde opinión, nuestro único maestro y guía”³⁴⁴. “Las fuerzas físicas son las que forman directamente a los organismos y los ideales de la geometría euclidiana predominan en las formas naturales simplemente porque las leyes naturales favorecen la simplicidad como la óptima representación de esas fuerzas”³⁴⁵.

A nosotros no nos interesará particularmente darle cuerpo a esta tesis, empleando explicaciones físicas complementarias, ni algorítmicas, sino termodinámicas. De ahí que nos decantemos por la visión de la física de científicos como Erwin Schrödinger³⁴⁶, quien en la búsqueda de la fundamentación físico-materialista de la vida tampoco abandonará la senda de la explicación de la evolución por selección natural.

En 1926, Erwin Schrödinger escribirá varios artículos que cambiarían el mundo de la física. Estos artículos, junto a la obra de su contemporáneo, el físico alemán Werner Heisenberg, pondrían los cimientos matemáticos de la mecánica cuántica. La teoría de la probabilidad ya podía describir el mundo de las partículas subatómicas, pero no podía representarse en términos de la realidad ordinaria. Schrödinger lograría describir el colapso de las realidades múltiples en una sola realidad observacional, empleando el experimento conocido como “el gato de Schrödinger”, según el cual el comportamiento de la naturaleza dejará de ser predecible, como sugerían las leyes de Newton, para ser

³⁴² SÁNCHEZ GARDUÑO, F. “Sobre la teoría morfogenética de Turing”. En: https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf?2.955e3700e06db01f.353630352e706466.pdf, p. 77.

³⁴³ Cfr. FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* p. 36.

³⁴⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida*...., p. 46.

³⁴⁵ Cfr. FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* p. 36.

³⁴⁶ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961). Físico austriaco. Realizó importantes contribuciones en los campos de la mecánica cuántica y la termodinámica. Recibió el Premio Nobel de Física en 1933, por desarrollar la ecuación que lleva su nombre.

irreduciblemente estadístico. Al menos para los observadores humanos la naturaleza será, desde entonces, irreduciblemente probabilística.

“La fe de Einstein en el determinismo, delatada por la inmortal frase “Dios no sólo juega a los dados”, [...] parece ahora equivocada. Dios no sólo juega a los dados en el casino cósmico de la realidad material, sino que parece ser un jugador compulsivo. La biología evolutiva, la termodinámica y la mecánica cuántica integran el *azar* en sus visiones del mundo. Puede que esto refleje nuestra estupidez, nuestra incapacidad para encontrar la razón real que se esconde tras los fenómenos, o puede que el azar sea irreducible”³⁴⁷.

En definitiva, los avances de la teoría cuántica repercutirán en gran medida en la ciencia y en la filosofía. Hablaremos sobre ello más adelante.

Sin embargo, Schrödinger también se interesará por buscar la explicación del aparente incumplimiento de la segunda ley termodinámica por la vida, y, a demostrar que la vida, a pesar de su complejidad, debía observarse desde el punto de vista materialista como fenómeno físico, empleará gran parte de su existencia. Así, Schrödinger sostuvo que la vida “es materia que repite su estructura a medida que crece, como un cristal, un extraño “cristal aperiódico”. Pero la vida es mucho más fascinante e impredecible que cualquier mineral cristalizado: la diferencia entre ambas estructuras viene a ser como la que encontramos entre un papel pintado ordinario, en el que el mismo dibujo se repite una y otra vez en períodos regulares, y una obra maestra de un bordado como, por ejemplo, un tapiz de Rafael, que no presenta una repetición tediosa, sino un diseño elaborado, coherente y lleno de sentido, trazado por el gran maestro”³⁴⁸.

Finalmente, en 1944 publicará sus reflexiones en torno al tema, en el libro titulado *¿Qué es la vida?* En dicha elaboración esbozará dos programas de investigación. En el primero, centrado en la idea del orden a partir del orden, será donde Schrödinger, investigando acerca de cómo se produciría la transferencia de la herencia en el material genético de un organismo a otro, aseveraría: “la vida parece ser el comportamiento ordenado y reglamentado de la materia, que no está asentado exclusivamente en su tendencia de pasar del orden al desorden, sino basado en parte en un orden existente, que es mantenido”³⁴⁹. Este planteamiento posteriormente contribuiría al importante

³⁴⁷ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 102.

³⁴⁸ MARGULIS, L. y SAGAN, D. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets, 1996, p. 12.

³⁴⁹ SCHRÖDINGER, E. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets, 2001, p. 108.

descubrimiento del conocimiento de la estructura y función del ADN, dándole fama internacional.

Sin embargo, a nosotros nos interesa más el segundo programa de su investigación, aquel en el que Schrödinger abordará el problema del orden a partir del desorden. Con él, no sólo hilvanará la respuesta a la paradoja que llevaba su nombre, sino que, buscando nuevos conceptos para reconciliar la teoría termodinámica con los hechos de la biología, contestará a la pregunta que anteriormente planteamos, al afirmar que los organismos no desobedecen la segunda ley porque ésta, tal y como se formula, sólo se aplica a sistemas cerrados o aislados. Y es que, teniendo en cuenta que “la segunda ley termodinámica sólo es una tendencia probabilística, *no una necesidad*, y eso da cierto margen de movimiento”³⁵⁰, y asimismo que, ante la pregunta por cómo un organismo evita la rápida degradación al estado inerte, de “equilibrio”, Schrödinger respondería diciendo:

La contestación es obvia, es: comiendo, bebiendo, respirando, fotosintetizando, etcétera. El término técnico que engloba todo eso es metabolismo. La palabra griega de la que deriva [...] significa cambio o intercambio. ¿Intercambio de qué? Originariamente, la idea subyacente es, sin duda alguna, intercambio de material. [...] Por lo tanto, un organismo vivo aumentará continuamente su entropía o, como también puede decirse, produce entropía positiva -y por ello tiende a aproximarse al peligroso estado de entropía máxima que es la muerte-. Sólo puede mantenerse lejos de ella, es decir, vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente. [...] De lo que un organismo se alimenta es de “entropía negativa”. O, para expresarlo menos paradójicamente, el punto esencial del metabolismo es aquél en el que el organismo consigue liberarse a sí mismo de toda entropía que no puede dejar de producir mientras está vivo. La maravillosa facultad del organismo vivo de retardar la degradación al equilibrio termodinámico, [...] como si el organismo atrajera hacia sí una corriente de entropía negativa para compensar el aumento de entropía que produce viviendo, manteniendo así el nivel estacionario y suficientemente bajo de entropía. [...] - (entropía) = $k \log (1/D)$, la entropía expresada con signo negativo es una medida de orden (= un nivel bastante bajo de entropía) consiste realmente en absorber continuamente orden de su medio ambiente³⁵¹.

³⁵⁰ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia*. Barcelona: Tusquets. 2013, p. 123.

³⁵¹ SCHRÖDINGER, E. *¿Qué es la vida? ...*, pp. 109-114.

Es por lo que tendremos argumentos suficientes como para poder decir que la paradoja de Schrödinger desaparece al considerar los organismos vivos como sistemas complejos, que no son experimentos aislados o cerrados, sino abiertos, como ya dijo Bertalanffy, y que, además, se alimentan de la organización superior externa de los cuantos de luz solar rica en energía y de los gradientes que hay en su entorno, como preconizó Boltzmann, a cambio de generar con sus desechos la entropía suficiente para cumplir la ley.

Por ende, “las interacciones altamente ordenadas de la química celular consiguen mantener los sistemas vivos en estados alejados del equilibrio termodinámico. Contrarrestan localmente el incremento de la entropía interna como si el curso del tiempo termodinámico se parara o incluso se invirtiera dentro del organismo. Y la complejidad creciente de las estructuras y procesos orgánicos, que caracteriza la evolución a gran escala, también parecen ir en contra del incremento del desorden y el decremento de las correlaciones físicas”³⁵².

Hoy podemos aclarar que Schrödinger habló de “entropía negativa” en lugar de “energía disponible para realizar trabajo”, y de “orden” en lugar de “organización” (término más adecuado en termodinámica por su énfasis de actividad continuada y concentrada, de función). Sobre todo, contempló la vida como un proceso material, que analizó no sólo en términos de energía, sino de información, lo que anticiparía el brillante descubrimiento de la comprensión de la vida como sistema hereditario informacional basado en el ADN, y el desarrollo de la biología molecular.

Aunque intercambian una gran variedad de materiales y una enorme cantidad de información, todos los seres vivos comparten, en última instancia, un pasado común. Antes que a un “cristal aperiódico” de Schrödinger, la vida se parece más quizás, a un fractal, un diseño que se repite a diversas escalas. Los fractales, delicadamente bellos y sorprendentes por su aparente complejidad, se generan por ordenador mediante un programa gráfico que itera, o repite, miles de veces una operación matemática sencilla. Los “fractales” de la vida son las células, las agrupaciones de las células, los organismos pluricelulares, las comunidades de organismos, y los ecosistemas de comunidades. Repetidos millones de veces a lo largo de miles de millones de años, los procesos de la vida han conducido a los maravillosos *patrones* tridimensionales visibles en los

³⁵² DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 123.

organismos, colmenas y ciudades en el conjunto de la vida planetaria. El cuerpo de la vida es un barniz de materia en crecimiento y mutua interacción, que envuelve la Tierra³⁵³.

Podríamos decir que los procesos vitales, abiertos al entorno, generan complejidad, concentran información e intercambian datos, a medida que se amplía el dominio de sus operaciones energéticas añadiendo *caos* al entorno del que dependen. [...] Cuando miramos a Schrödinger, encontramos maneras de mirar a través de la vida los procesos energéticos que gobiernan tanto los sistemas animados como inanimados. La complejidad de la vida no se debe únicamente a su procesamiento de datos químicos, sino también a su *función* como transformadora de energía. De hecho, las tareas de replicación del ADN y de síntesis de las proteínas quizás entraron en escena a lomos de un caballo termodinámico. El papel de esas tareas adquiere sentido en el contexto de una función previa de reducción de gradientes. La vida no es una mera entidad genética. Los genes por sí solos no hacen más que los cristales de sal. La vida es un sistema abierto y *cíclico*, organizado por las leyes de la termodinámica. Y no es el único³⁵⁴.

4.1.2.3. Procesos irreversibles

A pesar de todo lo expuesto, las demostraciones hechas hasta el momento de la segunda ley termodinámica basadas en experimentos mentales y físicos en relación a los motores ideales de Carnot o a la mecánica estadística de Boltzmann, aunque rigurosos, resultarán limitados. El siguiente gran avance en termodinámica vendría de la mano del matemático alemán Constantin Carathéodory³⁵⁵, quien expuso “que el incremento de la entropía no es tanto el enunciado general de la segunda ley como su observación más fundamental: que todos los fenómenos naturales son irreversibles”³⁵⁶. Dicha afirmación también fue suscrita por científicos como Murray Gell-Mann³⁵⁷, que en *The quark and the jaguar*, expresó al respecto: “la explicación (de la irreversibilidad) es que existen más maneras de que clavos y monedas estén mezclados que separados. Los potes de mermelada tienen más maneras de contaminarse entre sí que de guardar su pureza. [...] En la medida que se dejan las cosas al azar, se puede prever que un sistema cerrado, caracterizado por algún orden inicial, evoluciona hacia el desorden, que ofrece muchas

³⁵³ MARGULIS, L. y SAGAN, D. *¿Qué es la vida? ...*, p. 14.

³⁵⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida ...*, p. 52.

³⁵⁵ Constantin Carathéodory (1873-1950). Matemático alemán de origen griego. A él se le deben importantes contribuciones en varios campos de la Matemática, como el cálculo de variaciones y las teorías de función variable real y compleja, y la formulación axiomática de la termodinámica.

³⁵⁶ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida ...*, p. 107.

³⁵⁷ Murray Gell-Mann (1929-2019). Físico estadounidense. Profesor catedrático de física teórica y miembro de la NASA.

más posibilidades”³⁵⁸. Una vez desordenado, no hay vuelta atrás. El proceso es por tanto irreversible, pues ya existe una sola dirección, desde el orden hacia el caos.

Luego, según el segundo principio de termodinámica, “lo que llamamos estructura organizada o belleza (ya sea de un cristal, una célula o una pintura al óleo) corresponde a un número menor de configuraciones posibles. [...] En el universo la vida es improbable, la belleza es improbable, todo lo que despierta nuestra atención es improbable” ³⁵⁹ . Además, “una evolución espontánea es, como todo cambio, una colección de estados [...] ¿qué es lo que determina la flecha o dirección de tal evolución? Un sistema abandona un estado para ocupar el siguiente accesible, porque el segundo es más probable que el primero. El proceso consiste pues en una sucesión de estados cada vez más probables y, en consecuencia, cada vez más caóticos, aburridos y feos”³⁶⁰. En suma, el estado final en termodinámica es el más probable, aquel en que está orientada la flecha del tiempo donde nada más sucede, el de máximo equilibrio.

El primer experimento que, según el matemático y profesor emérito de la Universidad de Virginia Don Mikulecky, se puede emplear como verificación de la teoría de Carathéodory fue el concebido por James Prescott Joule, basado en un recipiente adiabático ya expuesto. En dicho experimento, Joule no sólo demostró, como ya sabemos, el primer principio termodinámico sobre la conservación de la energía al medir el equivalente mecánico del calor, sino también el principio fundamental de la irreversibilidad, ya que mostraba que convertir trabajo en calor es un camino de no retorno. “Podemos elevar la temperatura de un fluido a base de agitarlo, pero no hay manera de recuperar la energía mecánica invertida en la agitación a partir del calor generado”³⁶¹.

Por otra parte, como también aseveró el propio Carathéodory, “el experimento de Joule revelaba otro principio termodinámico de gran importancia: la diferencia entre la memoria cíclica de los sistemas complejos y el “olvido” de las condiciones iniciales por parte de los sistemas aislados”³⁶². Es como si se borraran las huellas de las trayectorias seguidas, para llegar a esa situación. Da igual qué método de combinación de calor y trabajo se hubiera empleado para causar el incremento de calor y, por tanto, de temperatura, dado que el resultado hubiera sido siempre el mismo.

³⁵⁸ PRIGOGINE, I. *El fin de las certidumbres...*, p. 27.

³⁵⁹ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 31.

³⁶⁰ *Ibidem*, p. 31.

³⁶¹ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 108.

³⁶² *Ibidem*, p. 108.

En suma, un proceso irreversible puede entenderse como una serie de *ligaduras* internas, eliminadas una a una, hasta que el sistema llega al equilibrio. Las ligaduras pueden ser mecánicas, como, por ejemplo, una serie de puertas que dividen el sistema en compartimentos. En síntesis, si tenemos en cuenta que, “contrariamente a la energía que se conserva, la entropía permite establecer la distinción entre los procesos reversibles, donde la entropía permanece constante, y los procesos irreversibles, que producen entropía”³⁶³, y que la entropía, o su producción, sólo puede calcularse en sistemas que están en equilibrio o tienden a él, la generalización de Carathéodory, centrada en la irreversibilidad de los procesos termodinámicos, más que en los incrementos de entropía de los mismos, proporcionará una mayor claridad teórica para continuar investigando gran variedad de sistemas termodinámicos, desde reacciones químicas hasta una taza de café caliente que se va enfriando.

Por otra parte, como ya vaticinaron tanto Schrödinger como Bertalanffy, si los sistemas vivos son sistemas que intercambian materia y energía con su entorno, es decir, son sistemas termodinámicamente abiertos, habrá por tanto que abrir la posibilidad de generalizar la segunda ley termodinámica para sistemas no aislados. “Los sistemas abiertos permiten el paso de flujos entrantes y salientes de energía y materia a través de sus límites. Son sistemas que, en lugar de alcanzar un equilibrio final predeterminado y desaparecer, aceleran el tránsito hacia el equilibrio del entorno. Es cierto que los sistemas aislados están previsiblemente abocados a la ruina, pero tales sistemas son raros. Casi todos los sistemas reales, aparte de los estudiados en el período clásico de la termodinámica, son abiertos”³⁶⁴. “La física tradicional vinculaba conocimiento completo y certidumbre, que, en ciertas condiciones iniciales apropiadas, garantizaban la previsibilidad del futuro y la posibilidad de retroceder al pasado. Apenas se incorpora la inestabilidad, la significación de las leyes de la Naturaleza cobra un nuevo sentido. En adelante expresarán posibilidades”³⁶⁵.

A continuación, vamos a citar tres situaciones en las que la ley de la termodinámica descrita tiene que hacer concesiones:

- En el mundo inanimado tenemos infinidad de ejemplos de sistemas de baja entropía, ordenados y en equilibrio. Los cristales de hielo se ajustan a esta descripción. Son sistemas que consiguen resistir independientes del medio sin consumir energía,

³⁶³ PRIGOGINE, I. *El fin de las certidumbres...*, pp. 25-26.

³⁶⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 105.

³⁶⁵ PRIGOGINE, I. *El fin de las certidumbres...*, p. 12.

formando estructuras que logran crecer y expandir su forma hasta una situación estable de equilibrio. Pero lo que es más sorprendente, y resulta difícil explicar, es cómo, a temperaturas ordinarias, “las moléculas pueden organizarse hasta formar complejas estructuras que, a su vez, realizan las coordinadas funciones vitales. Las citadas estructuras de equilibrio se mantienen indefinidamente sin el consumo de proceso alguno de transformación de energía”³⁶⁶.

- En los niveles más simples de la vida, los virus. Consideradas estructuras de equilibrio que se asemejan a estructuras inorgánicas como los cristales, se mantienen aislados sin necesidad de intercambiar material con el medio. Sin embargo, para realizar funciones vitales como la reproducción se hospedan en sistemas abiertos y de no equilibrio, como las células.

- En el mundo vivo, si a un ser lo aislamos privándole de intercambio de energía y materia con el medio, este tenderá al estado de equilibrio y morirá. Luego los sistemas vivos han de evitar el equilibrio. Y es que un sistema puede llegar a una situación estable fuera del equilibrio, como ya lo predijo Schrödinger denominándolo “estado estacionario”, manteniendo con ello su estructura intacta, produciendo cierta cantidad de entropía que puede disipar al exterior dada su condición de abierto, y provocando una variación total de entropía nula.

La irreversibilidad nos conduce de nuevo a ellos, a los protagonistas que faltaban por definir, a los sistemas abiertos.

4.1.2.4. Sistemas de no equilibrio. La naturaleza aborrece los gradientes

A todo esto, cuando los sistemas abiertos aún no habían sido descritos por el flujo continuo a través de sus contornos, el científico Alfred Lotka³⁶⁷ “sugirió que la vida era un “proceso disipativo metaestable”. Con lo que quería decir que, aunque estable y tomada como una “cosa”, la vida era en realidad un proceso. La materia viva se encontraba en un flujo continuo (de calor, electricidad o reactantes químicos), apartada del equilibrio por la energía solar. Lotka subrayó que la vida en la Tierra era un sistema abierto. Se trataba de un fenómeno bioenergético y biofísico, y, por tanto,

³⁶⁶ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 32.

³⁶⁷ Alfred James Lotka (1880-1949). Estadounidense matemático, físico químico y estadista. Fue famoso por su trabajo en la dinámica de las poblaciones y la energética.

termodinámico”³⁶⁸. Observó que los sistemas cercanos al equilibrio que parecen estáticos, en realidad consiguen permanecer en un “estado estacionario”, como también dijo Schrödinger, “comiéndose” un gradiente.

Según argumentó Lotka, la superficie terrestre se mantenía “metaestable” por el continuo aporte y sustracción de partículas recicladas. Es lo que le ocurre, por ejemplo, a una pelota de plástico que no cae al suelo mientras sea proyectada en el aire por la corriente constante que fluye de un aspirador. “Los organismos son algo similar; no caen hacia el equilibrio, ya que se produce un aporte continuo de energía a nivel celular”³⁶⁹. La primera publicación sobre el tratamiento teórico de los sistemas metaestables o estacionarios vino en 1931 de la mano de Lars Onsager ³⁷⁰, donde expuso cuatro importantes observaciones:

- Primera: en los procesos cercanos al equilibrio termodinámico como la difusión del calor, se produce la generación de estructura. Las moléculas de gas se separan en respuesta a un gradiente de calor: las rápidas se agrupan en el extremo caliente del recipiente, y las lentas en el frío.

- Segunda: determina “las relaciones de reciprocidad” que llevan su nombre. En los procesos cercanos al equilibrio, fuerzas y flujos se acoplan.

- Tercera: en los procesos cercanos al equilibrio la potencia se conserva³⁷¹.

- Cuarta: a cierta distancia del equilibrio se consigue la metaestabilidad, donde el sistema abierto a gradientes moderados se acopla en un estado estacionario de producción mínima de entropía específica (por unidad de masa).

Hasta este momento, Onsager y Prigogine habían introducido una nueva termodinámica que se salía del cerco de la termodinámica clásica. Se trataba de una nueva termodinámica de estados estables fuera del equilibrio. Una termodinámica basada en flujos de materia y energía en sistemas abiertos simples, que podía ayudar a explicar los sistemas vivos.

A continuación, hablaremos del concepto “balance de entropía”, introducido por Ilya Prigogine y suscitado por la obra de Erwin Schrödinger. Si partimos de un sistema aislado según el segundo principio, la entropía producida en su interior será positiva

³⁶⁸ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 115.

³⁶⁹ *Ibidem*, p. 115.

³⁷⁰ Lars Onsager (1903-1976). Físico químico y profesor estadounidense de origen noruego. Premio Nobel de química en 1968 por sus estudios sobre los gradientes de temperatura como base de la termodinámica de los procesos irreversibles bajo el nombre de “relación de reciprocidad de Onsager”.

³⁷¹ Durante la Segunda Guerra Mundial, las teorías de Onsager fueron aplicadas a la puesta a punto de un método (difusión gaseosa) para la separación del uranio-235 y el uranio-238. Este paso fue fundamental para la producción de bombas nucleares. SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 116.

durante el desarrollo de los procesos irreversibles, y nula en el equilibrio. Mientras que, en un sistema abierto, se debe completar la expresión con el término de flujo de entropía que intercambia con el ambiente. El balance entrópico será la suma de lo que se produce más lo que se intercambia. Si se entiende la entropía como medida de desorden, claramente los sistemas aislados tenderán al máximo caos; sin embargo, en los sistemas abiertos se da la posibilidad de que se produzca una estructuración nueva si la competencia entre los términos del balance se resuelve de forma favorable. El balance entrópico refleja el “estado estacionario” que se produce cuando el sistema envía al ambiente toda la entropía que produce en su interior, manteniéndose la entropía del sistema constante sin que su grado de organización ni estructura sufran alteraciones. Según Ilya Prigogine³⁷² y su colaboradora Isabelle Stengers³⁷³: “Cuando las condiciones de contorno impiden que el sistema llegue al equilibrio, éste hace lo mejor que puede hacer: se instala en un estado de mínima producción de entropía, esto es, un estado lo más cerca posible del equilibrio”³⁷⁴.

Estos enunciados fundamentales de la segunda ley termodinámica, junto a la generalización de los mismos realizada posteriormente, comprendiendo la entropía sin mencionarla y abarcando también sistemas a cierta distancia del equilibrio, que, como hemos dicho, al eliminar alguna ligadura llegan a un equilibrio local, constituirán el preámbulo de la termodinámica también como destructora de gradientes. Así, tal y como el físico italiano Enrico Fermi, en sus lecciones de 1936, indicó, todo cambio en las condiciones externas (de la incertidumbre) de un sistema en equilibrio térmico tendrán como consecuencia que dicho sistema tienda a moverse en dirección opuesta a dicha alteración, según enuncia el principio de Le Châtelier: “Todo sistema en equilibrio químico, bajo la influencia de un cambio en cualquiera de los factores de equilibrio, experimenta una transformación en un sentido tal que si dicha transformación tuviera lugar por sí sola, produciría un cambio en el sentido opuesto del factor en cuestión. Los factores de equilibrio son la temperatura, la presión y la fuerza electromotriz, correspondientes a las tres formas de energía: calor, electricidad y energía mecánica”³⁷⁵. Este comportamiento termodinámico de las reacciones químicas descrito por Le Châtelier, ampliado tanto a sistemas cerrados como abiertos, será descrito por varios

³⁷² Ilya Prigogine (1917-2003). Físico, químico, sistémico ruso. Profesor de química física en la Universidad Libre de Bruselas, galardonado con el Premio Nobel de Química en el año 1977 por sus investigaciones que lo llevaron a popularizar el concepto de estructuras disipativas en 1967, dentro de la teoría termodinámica aplicada a sistemas lejos del equilibrio.

³⁷³ Isabelle Stengers (1949). Química, filósofa e historiadora de la ciencia belga. Son importantes sus escritos acerca de la filosofía de la ciencia y la epistemología. Ha colaborado con destacados intelectuales como Ilya Prigogine y Bruno Latour.

³⁷⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 117.

³⁷⁵ *Ibidem*, p. 111.

científicos de manera independiente. Para Wagensberg será “la ley general de cambio” (de la que ya hablamos en el Capítulo I).

Por lo tanto, lo que podemos extraer que manifiestan los principios anteriores es “la aversión de la naturaleza hacia los gradientes. Éstos pueden ser de presión, concentración química, temperatura o cualquier potencial relativo al trabajo. Si un gradiente aparta al sistema del equilibrio, éste *cambia de estado* para oponerse al gradiente aplicado. En general cuanto más se fuerza a un sistema a apartarse del equilibrio, más energía se requiere para mantenerlo en esta situación”³⁷⁶. Así, Don Mikulecky, tras elaborar un modelo matemático aplicando la termodinámica de redes para explorar la cuestión teórica de la reducción espontánea de gradientes en sistemas aislados, concluirá que “la segunda ley termodinámica se traduce simplemente en una tendencia a la reducción de gradientes, que se manifiesta sólo cuando el sistema está aislado y se le permite llegar al equilibrio. En los estados estacionarios de no equilibrio esta tendencia persiste en el *flujo estacionario*, a través del sistema que resulta en la disipación continuada de la energía”³⁷⁷.

Finalmente, siguiendo el hilo de lo expuesto, Eric D. Schneider aseverará que “la naturaleza aborrece los gradientes”. En resumidas cuentas, al centrarnos en la óptica de la reducción irreversible de gradientes, y no sólo en la producción de entropía, el mundo se comprende mejor.

4.1.2.5. Primera componente de la esencia del cambio: la adaptación

Por otra parte, la evolución de un estado inicial a uno estacionario supone la adquisición de dicha estructura organizada final, que se ha dado en llamar una adaptación interna del sistema a las condiciones impuestas por el medio. La adaptación del sistema al entorno será la primera componente de la esencia del cambio. Dentro del régimen “lineal”, el mantenimiento del sistema estacionario no variará. Cualquier posible perturbación azarosa (fluctuación) será anulada, no teniendo oportunidad de progresar ni trascender macroscópicamente. Este fenómeno es consecuencia de la ley principio de producción de la mínima entropía demostrado por Ilya Prigogine: “el estado estacionario se caracteriza por un valor mínimo de la producción de entropía compatible con las

³⁷⁶ *Ibidem*, p. 112.

³⁷⁷ *Ibidem*, p. 112.

ligaduras impuestas: la producción de entropía es una magnitud no negativa que decrece durante cualquier evolución y que se hace constante y mínima una vez se ha alcanzado el estado estacionario”³⁷⁸. Una adaptación es la consecuencia de una prolongada historia de *ligaduras* transferidas generación tras generación, incorporadas a sustratos muy distintos. La teoría de la evolución se basa precisamente en la transferencia de la función a sustratos cada vez más idóneos. Las propiedades que han sido reclutadas por la selección natural sólo son una pequeña parte del residuo de lo que no se ha eliminado. “La evolución no es diseño impuesto, sino ligadura progresiva”³⁷⁹.

4.1.2.6. Nueva esencia del cambio: estructuras disipativas

Por ahora nos hemos referido a los fenómenos que observamos en la complejidad del mundo dentro de las situaciones de linealidad, pero aún quedan muchos otros por explicar que no encajan en este comportamiento. “La materia toma decisiones “al azar”, -o sea, partiendo de las condiciones iniciales o de factores externos que en otros contextos serán irrelevantes-. Pero eso no basta para comprender su esencia. Una vez que ha tomado una decisión, se vuelve “real” y el azar deja de actuar”³⁸⁰. Más allá de la región de Onsager cercana al equilibrio se encuentran los sistemas “alejados del equilibrio”, tal y como los denominaron Ilya Prigogine y sus colaboradores de la Universidad Libre de Bruselas. Efectivamente, cuando los sistemas son llevados lo bastante lejos del equilibrio, entran en un régimen “no lineal”; se vuelven inestables en relación con la perturbación; se *bifurcan*. El azar decidirá cuál de las fluctuaciones en el punto exacto denominado “punto de bifurcación” impondrá el resultado del sistema macroscópico, produciéndose, como consecuencia, nuevas soluciones. “En tales puntos críticos, el azar se hace creador y causa (¡!) un nuevo orden”³⁸¹. El estado estacionario compatible con las condiciones ambientales ya no es el único, y las fluctuaciones espontáneas pueden amplificarse, creando un nuevo orden; arrastrando a todo el sistema a imprevistos estados estables que suponen nuevos estados de la materia denominados “estructuras disipativas”. Estos

³⁷⁸ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 37.

³⁷⁹ POPPER, K. R. “Selección natural y la emergencia de la mente”. *Teorema: Revista internacional de filosofía*, Vol. 10, N.º 2-3, 1980, p. 435.

³⁸⁰ LAUGHLIN, R. *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*. Buenos Aires: Katz, 2007, p. 60.

³⁸¹ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 61.

estados ya no responden al orden de Boltzmann, y, por lo dicho, el nuevo orden se llama orden por fluctuaciones.

Ilya Prigogine, conocido principalmente por su trabajo sobre reacciones químicas cíclicas por el que recibió el Premio Nobel de química, difundió con su trabajo la noción de sistemas disipativos (término introducido por Lotka), cuyas características definitorias son: sistemas dinámicos de no equilibrio, abiertos, manteniendo su estado estable de baja entropía con gradientes internos, mediante relaciones reguladoras no-lineales, a base de captar e importar materia y energía a través de sus fronteras, a la vez que adquieren complejidad mediante la exportación (disipación) de entropía al entorno. Descubriría que, a medida que un sistema se aleja del equilibrio, pasa por más transiciones súbitas o bifurcaciones, hasta que se instala en un estado menos articulado como las turbulencias aleatorias, pudiendo alcanzar incluso estados dinámicos macroscópicos estables.

Sin duda, es muy curioso que la descripción de un sistema con bifurcaciones implique la coexistencia de ambas soluciones lineales y no lineales, reinando entre ambas las leyes deterministas, mientras que, cerca de ellas, gobierna el azar. Muchos casos de autoorganización obedecen a este nuevo “orden por fluctuaciones”. La evolución natural termodinámica de los procesos irreversibles tiene una interesante proyección en los conceptos biológicos de crecimiento, diferenciación y evolución. “Huir del equilibrio predispone a la intervención del azar a través del orden por fluctuaciones, que aporta (en contraste con la adaptación) las novedades genuinas para el cambio. La consolidación de tales novedades depende de una selección posterior, según una funcionalidad bien convincente: la supervivencia. En este hecho descansa la seguridad de una evolución que nunca tendrá fin”³⁸².

En efecto, en el curso de los últimos decenios nació una nueva ciencia: la física de los procesos de no equilibrio. Esta ciencia condujo a conceptos nuevos como la autoorganización y las estructuras disipativas, hoy ampliamente utilizados en ámbitos que van de la cosmología a la ecología y las ciencias sociales, pasando por la química y la biología. La Física de no-equilibrio estudia los procesos disipativos caracterizados por un tiempo unidireccional y, al hacerlo, otorga una nueva significación a la irreversibilidad. Antes, la flecha del tiempo se asociaba a procesos muy simples [...]. Se podía concluir que esos procesos eran inteligibles con la sola ayuda de las leyes de la dinámica. No sucede lo mismo hoy. La irreversibilidad ya no solo aparece en fenómenos tan simples.

³⁸² *Ibidem*, p. 45.

Está en la base de multitud de fenómenos nuevos, como la formación de torbellinos, las oscilaciones químicas o la radiación láser. Estos fenómenos ilustran el papel constructivo de la flecha del tiempo. La irreversibilidad ya no se puede identificar con una simple apariencia que desaparecería si accediéramos a un conocimiento perfecto. Es condición esencial de comportamientos coherentes en el seno de poblaciones de miles y miles de millones de moléculas. Conforme a una fórmula que me gusta repetir, la materia es ciega al equilibrio allí donde no se manifiesta la flecha del tiempo, pero cuando ésta se manifiesta lejos del equilibrio, ¡la materia comienza a ver! Sin la coherencia de los procesos irreversibles de no-equilibrio sería inconcebible la aparición de la vida en la Tierra³⁸³.

Según afirmaba el químico Frank L. Lambert³⁸⁴,

la segunda ley explica lo mejor y lo peor de la vida. Para los organismos, el equilibrio representa la muerte, pero por el camino se crean todas las magníficas estructuras de la vida, la tecnología y la cultura. Como señala el propio Lambert, la cinética química (es decir, la dinámica química) es la contrapartida de la segunda ley, que “sujeta firmemente la flecha del tiempo en el arco tensado de la termodinámica desde milisegundos hasta milenios”. La cinética levanta obstáculos que, a todos los efectos, se comportan como máquinas naturales; aunque no manufacturadas, captan energía y realizan trabajo. Estas máquinas químicas, interpuestas entre la segunda ley y su “meta” natural del equilibrio, tienen la degradación continua como función general, si bien poseen otras funciones específicas. Por un lado, nuestra capacidad, como seres vivos creativos, de canalizar la energía hacia obras de teatro, ciudades, telescopios en órbita, etcétera, constituye nuestra mayor fuerza. Pero, por otro lado, la segunda ley no sólo es la “madre” de esos epigramas humorísticos conocidos colectivamente como “leyes de Murphy”, sino también el implacable principio conducente al tipo de equilibrio termodinámico que nuestra evolución nos ha llevado a temer: la muerte y descomposición. Nos encontramos continuamente amenazados por una producción de entropía cuyo exceso destruiría nuestros delicados cuerpos³⁸⁵.

³⁸³ PRIGOGINE, I. *El fin de las certidumbres...*, pp. 16-17.

³⁸⁴ Frank L. Lambert (1918-2018). Profesor académico emérito de química del Occidental College de Los Ángeles. Conocido por cambiar en los libros de química general de EE. UU. la insuficiente definición de entropía termodinámica como “desorden” al decir que la entropía era simple cualitativamente. Describió el aumento espontáneo de la entropía debido fundamentalmente a la tendencia de todos los tipos de energía a dispersarse en el espacio si no está restringida.

³⁸⁵ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 120.

En realidad, aunque obedecemos la tendencia química inherente en la segunda ley, gracias a nuestro metabolismo, mediante mecanismos intrincados autorreguladores, ardemos lentamente, metabolizando.

En definitiva, es aquí donde la aparente contradicción dejada entre paréntesis en el apartado anterior entre las teorías evolutivas descritas se revela como una ilusión. La nueva ciencia termodinámica, aún en proceso de desarrollo, dedicada al estudio de estos sistemas abiertos que crecen naturalmente a base de alimentarse de la destrucción de gradientes, constituye la ciencia de “destrucción creativa”³⁸⁶, y adopta distintas definiciones como termodinámica de sistemas abiertos, termodinámica de sistemas alejados del equilibrio, termodinámica de estructuras disipativas o termodinámica de la vida. Entre los caminos para compensar los gradientes se hallará el desarrollo de estructuras y procesos notablemente organizados; de forma contradictoria, a medida que se organizan internamente, los procesos complejos eliminan con más eficiencia los gradientes de su entorno. Como dirían los estudiosos del caos determinista, “un pequeño cambio puede tener efectos desproporcionados (el aleteo de una mariposa puede acabar dando lugar a una violenta tormenta)”³⁸⁷. Así mismo pequeños cambios pueden observarse también a nivel local. Una lata en la que se hierve agua, una vez tapada herméticamente dejando salir el vapor, creará un vacío. Para compensar el gradiente de presión resultante, las moléculas de gas del interior (en su mayor parte aire) comprimirán la lata, hasta reducir el gradiente de presión al mínimo. Luego “la segunda ley puede estrujar latas, accionar pistones e impulsar motores, así como propiciar ciclos elaborados dentro de membranas en sistemas que acabarían convirtiéndose en células replicantes”³⁸⁸.

4.1.2.7. Sistemas alteroorganizados

Las dinámicas no-lineales rigen muchos sistemas termodinámicos inertes, como los tornados o los láseres, y también vivos, donde “la autoorganización conlleva una

³⁸⁶ “Destrucción creativa”: Locución que Alan Greenspan, ex presidente de la Reserva Federal de Estados Unidos, tomó prestada para referirse a la nueva economía impulsada por Internet, se asocia con el economista austriaco de Harvard Joseph Alois Schumpeter, cuya obra (1939,1942) resaltaba la capacidad del capitalismo para crear nuevos productos (como el automóvil de Henry Ford o el ordenador personal), aunque en ese proceso destruya las industrias no competitivas (la empresa Ford fue desbancada por General Motors, “destruida” a su vez por la competencia japonesa). Así pues, Greenspan rindió tributo a Schumpeter. Sin embargo, la idea aparece bastante antes, no ya en la filosofía hindú (en la forma de la totalmente destructiva Shiva) o en la obra de filósofos alemanes como Friedrich Nietzsche (cuyo *Así habló Zaratustra* sostiene que las viejas estructuras sociales deben destruirse para crear otras nuevas), sino también en la economía, en los trabajos de Werner Sombart. Nosotros empleamos la expresión en sentido termodinámico. Introducido por SCHNEIDER, E. *La termodinámica de la vida...*, p. 114.

³⁸⁷ *Ibidem*, p. 112.

³⁸⁸ *Ibidem*, p. 113.

jerarquía de estructuras o niveles de funcionamiento que va desde la célula hasta las sociedades y los ecosistemas, pasando por los organismos, que se mantienen gracias a mecanismos intrínsecos de control. En definitiva, cabe decir que los seres vivos no son sino eslabones de una jerarquía de “Estructuras Disipativas”³⁸⁹.

Aunque normalmente se han designado como autoorganizativos, en realidad, puesto que no son autónomos del todo, sino que son organizados por los gradientes que consumen, tal y como dijo Wagensberg, sería más correcto denominarlos sistemas “autorreferenciales”. Esta puntualización también abarca las simulaciones por ordenador como el Juego de la Vida, y los autómatas celulares que, para ejecutar sus intrincados ciclos, dependen del gradiente eléctrico creado por una fuente de energía externa. Por otra parte, más adelante también los designaremos como sistemas morfodinámicos, tal y como los describe el físico Terrence Deacon.

De modo que, puesto que todo organismo sometido a la segunda ley debe, como reembolso de la entropía reducida, exportar un aumento análogo de la misma al entorno, por ejemplo, en forma de desechos, como lo es para la humanidad tecnológica la polución, inevitablemente cualquier sistema termodinámico fuera del equilibrio, al perder su capacidad de canalizar la energía externa, tenderá al máximo equilibrio, a la máxima entropía, y morirá. Sólo en ese momento se puede argumentar que permanecerá totalmente estático, y otros organismos que procesan energía activamente lo aprovecharán. En una jungla bien desarrollada, por ejemplo, la de la selva amazónica, con un ecosistema maduro, cuando una hoja cae o un insecto muere, sus moléculas se reciclan y pasan a formar parte de otros organismos. La evolución de todos los organismos, aun siendo irracionales, se ha producido aprovechando materiales relativamente limitados en un entorno con energía relativamente ilimitada. A diferencia de nosotros, microorganismos como las bacterias o los hongos, como expertos recicladores, devuelven al equilibrio energético a organismos antes vivos al descomponer en sus partes constituyentes sus moléculas complejas, pudiendo posteriormente reincorporarse de nuevo al ecosistema, siendo el calor resultado de dichas transformaciones energéticas el único desecho que no pueden reciclar. “La energía fluye, la materia se recicla”³⁹⁰ en palabras de Harold Morowitz.

Y es que, como ya adelantó Schrödinger, cualquier microbio, para mantener su biomasa estable y no morir, necesita ingerir alimento rico en energía y baja entropía, en

³⁸⁹ GARCÍA VELARDE, M. y FAIREN LE LAY, V. “Estructuras disipativas, algunas nociones básicas (1)” ..., p. 13.

³⁹⁰ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 123.

cantidad suficiente como para reponer el material que desecha, de baja energía y alta entropía, producto de su actividad metabólica. Luego la reducción de gradientes está garantizada. Los sistemas vivos, por tanto, son procesos “metaestables” que mantienen su identidad. Todos tienen en común la construcción anabólica de sus cuerpos y la disipación catabólica de energía, mediante flujos materiales nutritivos entrando y saliendo de sus fronteras. Pero ¿está la vida muy alejada del equilibrio termodinámico? De ser así, ¿a qué distancia se encuentra?

Aunque Prigogine y la escuela de Bruselas nunca definieron con precisión la lejanía del equilibrio que presentan los sistemas vivos, ésta parece surgir cuando existe un ciclo energético y material suficiente, pero no excesivo. Con independencia de cómo los llamemos, lo que sí se conoce es que estos sistemas pueden manifestar comportamientos marcadamente no lineales, y mantener estructuras estables, más allá del ámbito de las relaciones recíprocas de Onsager. Además, a pesar de no existir una concreción para el dominio “lejos del equilibrio”, tradicionalmente se ha considerado que es posterior a la primera bifurcación.

Ante la distinción que algunos científicos realizan entre la metaestabilidad como cercanía al equilibrio (por ejemplo, la de una pelota suspendida sobre un chorro de aire), y metaestabilidad como pauta (por ejemplo, el sistema interconectado de relaciones que supone un organismo), se optará por pensar que el organismo puede ser metaestable en ambos sentidos. Cualquier reacción individual, a causa de la energía libre extraída del alimento, está sólo ligeramente apartada del equilibrio, mientras que, como sistema complejo de ciclos interconectados, como forma material específica, el organismo está lejos del equilibrio. Tales *ciclos* visibles en las estructuras complejas naturales, incluidas las vivas, se producen cuando recursos materiales limitados se apresuran a proporcionar un vehículo para la exportación de entropía. “Somos inventos nanotecnológicos del tebeo, y nuestros pasados físicos interconectados, se reproducen unos a otros en cada generación, aunque se añadan otros nuevos. Así como un brochazo individual de un Monet, o un Cézanne puede parecer bastante ordinario, así también nuestras reacciones químicas a nivel subcelular no resultan tan peculiares, pero juntas, constituyen una obra maestra, un tapiz schrödingeriano”³⁹¹.

³⁹¹ *Ibidem*, p. 125.

4.1.2.8. Ciclos

Otro de los principios de la termodinámica de no equilibrio, que algunos consideran una cuarta ley (como Stuart Kauffman), y que más bien creemos constituye una ampliación de la primera y segunda aplicada a los sistemas abiertos, afirma que en las regiones de flujo de energía se desarrollan ciclos. En las estructuras complejas naturales (incluidas las vivas) estos ciclos visibles se desarrollan cuando recursos materiales limitados se convierten en vehículos facilitadores de exportación de entropía. David Bohm los describe poéticamente diciendo: “En esta corriente, uno puede ver una pauta siempre cambiante de vórtices, ondulaciones, olas, salpicaduras, etcétera, que evidentemente no tienen existencia independiente como tales. Más bien se abstraen del movimiento fluyente, surgiendo y desvaneciéndose en el proceso total del flujo. Tal subsistencia transitoria, en la medida en que puedan poseerla estas formas abstraídas, implica tan sólo una relativa independencia o autonomía de comportamiento, no una existencia absolutamente independiente como sustancias últimas”³⁹².

Y es que, como más adelante trataremos, los sistemas individualizados (entre los cuales se encontrarían los ciclos químicos confinados en contenedores membranosos que precedieron a las primeras formas de vida) importan, disipan y degradan energía a medida que emergen en su entorno, manteniendo con ello su estructura, expandiéndola con su crecimiento y, cuando hay reproducción, copiándola. “La química de nuestros cuerpos obedece las leyes de la termodinámica; la vida, como el universo, fluye termodinámicamente corriente abajo. Somos remolinos en un mar termodinámico, parte del proceso de un universo lleno de energía vivificadora”³⁹³. Y es que “se encuentran ciclos en la pauta eólica de los huracanes y tornados, en los remolinos y en las reacciones no biológicas, en los sistemas abiertos. Los ciclos están presumiblemente detrás del crecimiento, la complejidad, el cambio y, en última instancia, en la reproducción diferencial de variantes”³⁹⁴.

En 1910 Alfred Lotka se convertiría en el primer científico en hacer un análisis importante de la autoperpetuación que opera en un ciclo natural. Dicho análisis supondría el origen de las redes ahora descritas en los sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales y tecnológicos. Las redes están constituidas por elementos diversos conectados

³⁹² SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 114.

³⁹³ *Ibidem*, p. 130.

³⁹⁴ *Ibidem*, p. 131.

en un sistema cíclico, en que el producto de una reacción serviría de reactante de otra. Al proceso de formación de las redes es a lo que Lotka denominó “autocatálisis”. En 1968 Harold Morowitz³⁹⁵ publicó su libro *Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics*. En él, al enunciar que “en los sistemas en estado estacionario, el flujo a través del sistema, desde una fuente hasta un sumidero, acarrearía al menos un ciclo en el sistema”³⁹⁶, estará conectando lo vivo, con lo inerte, puesto que los ciclos energéticamente impulsados acumulan complejidad con el paso del tiempo, al incorporar una memoria natural, un recuerdo, de sus estados pasados.

En sus estudios más actuales Morowitz, buscando similitudes entre los metabolismos bacterianos, en la idea de que algunos pudieran ser reminiscencias anteriores al ADN, o en los mecanismos de replicación estables, afirmaría que, teóricamente, “El metabolismo” [...] recapitula la biogénesis”. Dicho de otro modo, “los ciclos bioquímicos de las células actuales pueden contener reminiscencias no sólo de sus ancestros bacterianos, sino de los ciclos termodinámicos a partir de los cuales evolucionaron las propias bacterias”³⁹⁷. Otra de las investigaciones gira en torno a los hiperciclos (de los que hablaremos más tarde). Se cree que nuestras células puedan ser descendientes vivos de estos, donde se perpetúan formas primigenias de sensibilidad, concretamente del ciclo primordial de la luz diurna proveedora de energía y de la desaparición nocturna del sol. De modo que degradarían mucha más energía a la luz del día que en la oscuridad, llegando a anticipar el deleite de su regreso, lo que supondría una ventaja selectiva. Como dijo la poetisa Edna St. Vincent Millay: “la vida no es una condenada cosa tras otra. Es la misma condenada cosa una y otra vez”³⁹⁸.

Podemos diferenciar entre los ciclos biológicos más simples, como el ciclo del día y la noche asociado a la rotación de la tierra y las estaciones, y los ciclos no necesariamente biológicos, como el conjunto de las reacciones autocatalíticas descritas por Lotka, donde A produce B, que a su vez produce C, y así sucesivamente, hasta volver a A de nuevo. Un ejemplo autocatalítico de este tipo podría deberse a la acción de un fotón que cause la excitación química que produzca un incremento de A y, como consecuencia, un incremento de compuestos intermedios, que incrementarían la producción de A. O también, en un sistema en equilibrio, la acción de una minúscula

³⁹⁵ Harold Morowitz (1927-2016) fue un biofísico estadounidense que estudió la aplicación de la termodinámica a los sistemas vivos. Siendo el origen de la vida su principal interés de investigación.

³⁹⁶ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 132.

³⁹⁷ *Ibidem*, p. 132.

³⁹⁸ *Ibidem*, p. 131.

fluctuación elevaría momentáneamente una partícula a un nivel de energía mayor, antes de volver a su estado de equilibrio.

En abstracto, el círculo bidimensional representa un ciclo eterno, la onda sinusoidal representa un ciclo extendido en el tiempo, y los ciclos helicoidales en forma de sacacorchos serán representaciones tridimensionales con el tiempo como tercera variable, como los de la escala ecosistémica y evolutiva. “El acoplamiento de procesos y ecuaciones lineales y no lineales suele manifestar periodicidad en sus resultados, lo cual equivale a la existencia de ciclos”³⁹⁹. En la actualidad, con la llegada de los ordenadores, se ha agilizado mucho el poder analizar el comportamiento de las ecuaciones no lineales acopladas.

4.1.2.9. Relojes químicos

Los ciclos naturales se dan en ciertas reacciones químicas, y no suelen responder a los ciclos simulados por ordenador. Al ser sistemas abiertos, recogen materiales y energía de su entorno, pudiendo llegar a amplificarse. Un ciclo autocatalítico positivo es aquel en que A produce más de sí mismo, a través de una serie de intermediarios químicos. Cuanto más A haya, más habrá. Un caso de retroacción positiva física se da cuando un altavoz está demasiado cerca de un micrófono y comienza a chirriar, consecuencia de que el ruido del altavoz, al ser detectado por el micrófono, se amplifica de vuelta al altavoz. Las redes autocatalíticas abiertas al entorno importan materia y energía; y si toman más de lo que reponen, crecen.

En 1910, con la aplicación de ecuaciones novedosas simuladoras de la autocatálisis cuyas soluciones tenían carácter cíclico, Lotka lograría conectar de manera singular y definitiva la vida con la física y la química.

Una de sus aplicaciones reales puede observarse en sistemas químicos como el de las reacciones llamadas “BZ” o “relojes químicos”, descubiertas por los científicos Boris Pávlovich Belousov y Anatol M. Zhabotinsky, a finales de los años cincuenta. Se trata de fenómenos de reacción-difusión autocatalíticos, cuya descripción explicaremos en detalle en el capítulo IV de nuestra tesis, cuando abordemos la emergencia de la forma

³⁹⁹ *Ibidem*, p. 134.

matemática espiral y de la onda, frecuentes por su función de empaquetar y comunicar respectivamente.

Al analizar todos estos ejemplos, Prigogine demostró que, a diferencia de la termodinámica clásica, en que la disipación llevaba implícita la noción de pérdida, ahora, en los sistemas abiertos, la disipación es sinónimo de *fuerza de orden*. Además, las estructuras no sólo se mantienen en un estado estable lejos del equilibrio, sino que, si el flujo de materia y energía a través de ellas aumenta, pueden sufrir nuevas inestabilidades, que ya no serán producto del aporte de energía exterior, sino resultado de fluctuaciones internas, ampliadas por bucles de retroalimentación positiva, y transformarse en nuevas estructuras de incrementada complejidad, siendo la amplificación de la retroalimentación expansiva, no destructiva, como tradicionalmente era contemplada, sino fuente de un nuevo orden y complejidad.

4.1.2.10. Hiperciclos

También en los años sesenta, Manfred Eigen, premio Nobel en Química y director del Instituto Max Planck de Química Física de Göttingen, utilizaría el mismo concepto de la autoorganización como propuesta explicativa del origen de la vida.

Según Eigen, la vida sobre la tierra habría surgido de un proceso de organización progresiva en sistemas químicos de reacciones especiales alejados del equilibrio, involucrando “hiperciclos” de bucles de retroalimentación múltiples. Reivindicaba una fase prebiótica de evolución, en la que los procesos de selección ocurrirían en el ámbito molecular, describiéndolo como “autoorganización molecular”.

Eigen se focalizó en el estudio de reacciones especiales como las reacciones catalíticas, que son el centro de los sistemas químicos autoorganizadores, tales como los relojes químicos estudiados por Prigogine. Un catalizador es una sustancia que incrementa su nivel de reacción química, sin cambiar en sí mismo durante el proceso. Uno de los ejemplos más eficientes y fundamentales es el de las enzimas que promueven procesos metabólicos vitales. Cuando en los años sesenta Eigen y sus colegas estudiaban estas reacciones, se dieron cuenta de que los sistemas bioquímicos alejados del equilibrio, como los expuestos a los flujos de energía continuos, si se mantienen el tiempo suficiente, llegan a combinarse en diferentes reacciones catalíticas para formar redes complejas, que pueden contener bucles cerrados que denominaron “hiperciclos”, en los que las enzimas

producidas en un ciclo actúan como catalizadores del ciclo subsiguiente. Estos “hiperciclos” no sólo son muy estables, sino que logran autorreproducirse exactamente, y, al corregir errores, son lo que podría decirse autoinstructivos. Luego pueden llegar a conservar y transmitir información compleja. Este estudio demuestra que los “hiperciclos” químicos son sistemas autoorganizadores, que aparecerían en la vida antes de la formación de la estructura genética. Por lo que, según la teoría de Eigen, la vida tendría sus raíces profundas en el reino de la materia no viva. Una de las propiedades emuladoras de la vida de los “hiperciclos” es que pueden evolucionar aun a pesar de las inestabilidades, y crecer en su organización, presentando gran riqueza de componentes y estructuras; por lo cual, al ser así creados, pueden competir por la selección natural. Eigen fue revolucionario al adoptar un planteamiento darwiniano para describir los fenómenos de evolución a nivel prebiótico y molecular.

Podemos encontrar ciclos materiales asociados a flujos de energía en una gran variedad de fenómenos, desde los torbellinos y las ondas químicas hasta los átomos de carbono de las plantas que, una vez muertas, forman depósitos subterráneos que volverán a ponerse en circulación si se produjese una erupción volcánica.

Los ciclos materiales de la vida tienen también un contexto termodinámico amplio, ya que los sistemas prebióticos y bióticos dan soluciones estables a problemas termodinámicos concretos de ruptura de gradientes. Estamos de acuerdo con los investigadores de la complejidad, como Eric D. Schneider y Dorion Sagan entre otros, que buscan fuentes de organización u orden que suplementan la selección natural sin reemplazarla por otros principios evolutivos. Consideramos que la termodinámica es especial, al proporcionar no sólo una fuente suplementaria de complejidad, sino una base metaestable para el crecimiento y la reproducción, que, debido a su imperfección, es el equivalente de la selección natural.

4.1.2.11. Autocatálisis ecológica

Si de los hiperciclos moleculares pasamos al análisis de los ciclos termodinámicos a mayor escala, nos toparemos con el trabajo del ingeniero químico, catedrático de ecología teórica de la universidad de Maryland, Robert Ulanowicz, centrado en concebir métodos para cuantificar los flujos de energía en los sistemas biológicos. Ulanowicz concibe que la segunda ley de la termodinámica genera complejidad en la naturaleza, pero

matiza que posteriormente la autocatálisis selecciona, entre las nuevas combinaciones, aquellas que seguirán formando parte de sistemas en evolución. De forma que la idea extendida de ciclos y nodos conectados que se constituyen en redes mayores en las redes sociales e internet puede remontarse a las ideas biológicas sobre autocatálisis, puesto que Ulanowicz ha descubierto procesos cíclicos en todos los niveles de organización ecosistémica. Por ejemplo, la planta carnívora *Utricularia*, que crece en lagunas someras, tiene sus hojas y ramas cubiertas de comunidades de algas simétricas conocidas como fiatomeas. A su alrededor nadan crustáceos microscópicos (zooplacton) que se alimentan de estas algas, mientras que la propia planta también devora el zooplacton. De modo que, si alguna de estas tres poblaciones aumentase, contribuiría al crecimiento de las restantes; luego cada miembro de esta red actúa como un catalizador. Así, Ulanowicz subraya que cualquier crecimiento dentro de la red autocatalítica, sea viva o no, mientras los materiales necesarios para ello estén disponibles, producirá un crecimiento del sistema entero. Pero estas redes autocatalíticas no pueden crecer indefinidamente, ya que factores como el espacio, la escasez de alimento, o incluso la gravedad, sirven de limitadores.

Al igual que Eigen, Ulanowicz observa la existencia de selección dentro de los sistemas autocatalíticos. Si, por ejemplo, el cambio en un comportamiento supusiera un aumento de recursos necesarios, y esto a su vez aumentase su nivel de funcionamiento, puesto que supondría una ventaja selectiva para todos los miembros de la configuración, el propio bucle se volvería un atractor de materia y energía. Luego el ciclo catalítico no sólo reacciona respecto a su entorno, sino que crea activamente su dominio de influencia. En su obra, Ulanowicz propone que no nos consideremos sólo individuos miembros de una sociedad, sino pertenecientes a una red autorreforzante. “Heráclito tenía razón, afirmaba Popper, no somos cosas, sino llamas. O, más prosaicamente, somos, como todas las células, procesos metabólicos, redes de vías químicas”⁴⁰⁰.

Los procesos autocatalíticos ligados constituyen en gran medida la vida. Al integrar nuevos elementos, estos pueden aumentar la armonía y la funcionalidad y agrandar el conjunto. Los ciclos autocatalíticos anidados mantienen su estructura a través de un continuo, que va desde las escalas cuánticas hasta los ecosistemas, abarcando numerosos órdenes de magnitud, donde redes anidadas almacenan y recuperan la energía necesaria para su funcionamiento cíclico.

⁴⁰⁰ *Ibidem*, p. 141.

4.1.2.12. La segunda ley impulsa la vida según Wicken

A este grupo de pensadores hay que añadirle las aportaciones del bioquímico Jeffrey Wicken, el cual llegaría a completar ciertas reflexiones de Lotka y de Schrödinger acerca de la naturaleza termodinámica de la vida, al considerar la segunda ley instrumental en su origen y evolución. Entre 1978 y 1990 publicaría 35 artículos y un libro, donde argumentaría aplicaciones biológicas de la termodinámica de no equilibrio y su conexión con la autocatálisis (redes conectadas que se perpetúan a sí mismas), mostrando que “estaban tejidas con la misma lana, en un mismo tapiz cuyo bordado incluye el origen de la vida, la reproducción y el mantenimiento de las especies, la emergencia de los ecosistemas y la evolución de la vida”⁴⁰¹. Wicken definía los sistemas vivos como “organizaciones autocatalíticas informadas”, cuyas manifestaciones están en todos los niveles, desde las secuencias de ARN hasta la energética de los ecosistemas. Se trata de sistemas semiautónomos inextricablemente ligados a los flujos de energía locales. En conclusión, la segunda ley termodinámica, combinada con gradientes impuestos, impulsa el proceso de la vida y le da sentido.

Estando al corriente de las sutilezas filosóficas de la teleología y del abandono que ha venido sufriendo con el advenimiento del método científico moderno, así como de las diferencias matemáticas entre la teoría de la información y las interpretaciones termodinámicas de la entropía, Wicken nos instó, desde una perspectiva científica, a terminar con el tabú del porqué de la vida, lamentando que, queriendo arrojar luz sobre la vida, se haya considerado la termodinámica como un intento más de reducir la vida a la materia y el movimiento: “la termodinámica es, por encima de todo, la ciencia de los procesos espontáneos, el “ímpetu” de las cosas. El enfoque termodinámico de la evolución nos permite acomodar la “vitalidad” de la vida a la legitimidad de los procesos físicos. [...] La emergencia y la evolución de la vida son fenómenos causalmente conectados con la Segunda Ley; y [...] la termodinámica hace posible comprender la naturaleza orgánica, desde los organismos hasta los ecosistemas, como procesos relacionalmente constituidos, ligados por relaciones funcionales entre el todo y las partes”⁴⁰².

⁴⁰¹ *Ibidem*, p. 144.

⁴⁰² *Ibidem*, p. 145.

Los sistemas vivos comparten dinámicas de no equilibrio con otros sistemas impulsados por gradientes, produciendo islas de complejidad creciente, pero con la diferencia de ser mantenidos genéticamente, y logrando permanecer más tiempo.

No hay una conexión a priori entre la disipación y la estructuración. La razón de que ambas tiendan a acoplarse, de que los fenómenos evolutivos en el sentido progresivo sean posibles, es que las fuerzas de la naturaleza son en su mayor parte asociativas. En un universo donde la expansión cósmica mantiene un desequilibrio entre las formas potencial y térmica de la energía, esto significa que juntar entidades menores para formar entidades mayores generará entropía a través de la conversión de energía potencial en calor. De ahí que los pozos de energía potencial hacia los que tienden a fluir los procesos naturales se correlacionen con la construcción de estructura [...]. La disipación es la fuerza motriz de la tendencia constructiva o integrativa del universo. La disipación entrópica propulsa la estructuración evolutiva; las fuerzas de la naturaleza le dan forma⁴⁰³.

A diferencia de otros autores, Wicken apelaba a la segunda ley como promotora de la vida, extendiendo la perspectiva darwiniana y posicionando las ciencias de la vida sobre una base científica más amplia. Señaló que el mismo entramado genético que perpetúa los sistemas metaestables es susceptible de alterarse, mutar y desorganizarse espontáneamente, de acuerdo con la segunda ley.

Así mientras la reproducción contiene una base termodinámica (las células y los seres formados por ellas continúan como vehículos de disipación), los propios vehículos de degradación están expuestos a avería y cambio. En consecuencia, tanto la reproducción como la mutación genética (los ingredientes primarios de la selección natural en la formulación actual más aceptada) tienen una conexión termodinámica. [...] Los potenciales termodinámicos y su disipación requerida impulsan los sistemas complejos. Si se impone un gradiente a un sistema, éste seguirá cualquier vía disponible para degradarlo. El gradiente de radiación impuesto a la Tierra promueve el empleo de energía libre (la captura de fotones) para construir estructuras complejas a través de la autocatálisis. La energía capturada se disipa en procesos posteriores de reducción de gradientes: reproducción, fisiología y comportamiento⁴⁰⁴.

⁴⁰³ *Ibidem*, pp. 145-146.

⁴⁰⁴ *Ibidem*, p. 146.

4.1.2.13. El universo de Erich Jantsch

También, teniendo como referente a Prigogine, el astrofísico austríaco Erich Jantsch argumentaba, en su libro *The Self-Organizing Universe*, que el universo entero, del que surgieron las estructuras disipativas es autoorganizativo. Defendía un enfoque “de arriba abajo”, donde no sólo son importantes las partes internas, sino la totalidad del universo exterior continente, y donde para entender el futuro debemos conocer el pasado. Jantsch, con su enfoque cosmológico, complementaría la visión mecanicista que describe los sistemas complejos a partir de sus partes. Así afirmaba que la principal dicotomía de los sistemas complejos se produce con la disyuntiva entre la novedad de, por ejemplo, introducir nuevos procesos o materiales a la red cíclica u organización termodinámica, y la repetición de lo ya ensayado y acertado.

Junto a la obra de la bióloga Lynn Margulis, de la Universidad de Massachusetts, y de la del químico atmosférico independiente James Lovelock, del Reino Unido, Jantsch integró su cosmología para su primera síntesis termodinámica dedicada a Prigogine. Cuando Lovelock descubrió que la atmósfera terrestre no se encontraba en equilibrio termodinámico, comenzó a explorar la manera en que los organismos, como sistemas abiertos interconectados, mantienen el entorno en un estado metaestable. Lynn Margulis le mostró que los microbios intercambiadores de gases eran los responsables de que nuestra atmósfera se encontrara en un estado altamente energético y químicamente improbable, y es así como Jantsch pudo demostrar que el universo es más comprensible como un sistema de flujo que no mecánico. Había que concebirlo como un sistema termodinámico de arriba abajo, de fuera adentro. Enlazaría la idea de totalidad, de dependencia mutua, con la importancia de la energía. “La vida es un proceso temporal y espacialmente vinculante: nuestros cuerpos retienen ciclos de la biosfera primitiva y, al hacerlo, mantienen vivos entornos pasados que de otra manera habrían desaparecido. Así, según Jantsch, cada uno de nosotros es un flujo prigogineano, un torbellino reticular de genes y células en una biosfera fuera del equilibrio, prolongada en un universo creativo y generador de novedades”⁴⁰⁵.

En resumidas cuentas, la vida es un sistema complejo. En los últimos treinta años se ha ido gestando una nueva ciencia de la complejidad, que es no reduccionista y aplica un enfoque sistémico al estudio de la naturaleza. Ludwing von Bertalanffy, considerado

⁴⁰⁵ *Ibidem*, p. 143.

el padre de la teoría de sistemas, fue el impulsor de muchos programas de investigación que, a día de hoy, contemplan las propiedades emergentes e intentan integrar los enfoques reduccionistas y holísticos en el marco de los sistemas complejos, no lineales, de propiedades dinámicas y que pueden experimentar bifurcaciones. Entre los principales nombres que han contribuido al desarrollo de estas ciencias, destacan: Bertalanffy y Laszlo (teoría general de sistemas); Allen, O'Neill, Salthe y Patte (teoría de las jerarquías); Wiener y Turing (teoría de computación); Lorenz, Ruelle, Smale y Feigenbaum (dinámica caótica); Poincaré y Abraham (sistemas dinámicos); Prigogine y Nicolis (sistemas disipativos); Thom (teoría de catástrofes); Bak (leyes potenciales y criticalidad autoorganizada); Haken (sinérgica); Rashevsky y Rosen (biología relacional); Katchalsky, Oster y Mikulecky (termodinámica de redes); Brown, West y Enquist (biología alométrica); Kauffman y Wolfram (biología computacional); Mandelbrot (geometría fractal); y Ulanowicz y Barabási (análisis de redes ecológicas). Estas ciencias sistémicas presentan nuevos enfoques, y pretenden fomentar la búsqueda de principios generales, sobre todo en el campo de la biología, afirmando que “los organismos actúan como totalidades autorreferenciales mientras buscan y degradan los recursos energéticos del entorno donde crecen, organizándolo, ampliando la frontera de reducción de entropía y juntando genomas y células para crear nuevas especies y formas de vida”⁴⁰⁶.

4.1.2.14. La fluidez de la individualidad

Nos diferenciamos del mundo exterior, pero a la vez estamos conectados con él. Para entender la naturaleza de esta relación, y de la individualidad que nos caracteriza, nos adentraremos en las raíces de la complejidad del mundo real partiendo de los sistemas más simples, los sistemas no vivos.

Por ejemplo, al calentar ciertos fluidos, la transferencia de calor, no coherente molécula por molécula, que ocurre primero repentinamente, y de una manera estadísticamente muy improbable, se vuelve coherente en la convección. Y es que la naturaleza se vale de sistemas, en ocasiones bien complejos, para deshacerse de los gradientes y exportar caos molecular al entorno. Los ciclos materiales energéticamente

⁴⁰⁶ *Ibidem*, p. 144.

impulsados, las redes autorreforzantes, dan lugar a “estructuras individualizadas” que, no nos equivoquemos, no están aisladas ni cerradas, sino que aparecen como sistemas abiertos metaestables en un mar de flujos de energía. Teniendo en cuenta la expresión “genes egoístas”, de la que ya hablamos, “los genes carecen de ego; únicamente las células son auténticas individualidades. [...] Sin proteínas ni redes metabólicas de aminoácidos o de intermediarios recursivos, los genes son impotentes, no más “egoístas” que una tostadora desenchufada”⁴⁰⁷. Sistemas termodinámicos tan dispares como los huracanes y nosotros mismos somos sistemas metaestables, con miles de millones de años de historia como estructuras disipativas, que establecen fronteras que no les aíslan del medio, sino que les permiten seguir existiendo. La individualidad biológica depende de una membrana semipermeable lipídica celular, que la capacita de una sede, al principio microscópica, para la expansión de los procesos de no equilibrio. Otros sistemas menos complejos, como los remolinos, como los vórtices, pueden desarrollarse y multiplicarse sin bioquímica o incluso sin química. Por otra parte,

las bacterias simbióticas, las algas coloniales y los plasmodios, los insectos sociales, [...] y las comunidades lingüísticas humanas son ejemplos evolutivos de sociedades que se seleccionan como unidades. Las unidades de selección quedan evolutivamente instituidas cuando lo que antes eran individuos, en realidad sistemas abiertos, se unen bajo el imperativo termodinámico de la segunda ley. Si las presiones selectivas son lo bastante intensas, las sociedades se convierten en organismos por derecho propio. Por ejemplo, esto es lo que ocurrió en la gran transición evolutiva de las colonias de células a los primeros animales. [...] Siempre obligadas a negociar por los flujos, las estructuras degradativas de la vida pueden actuar simultáneamente a distintas escalas. No sólo divergen (en la especiación), sino que se entrelazan, amalgamando flujos y fuerzas con otros sistemas para crear degradadores más poderosos⁴⁰⁸.

4.1.2.15. Los hexágonos de Bénard

Se trata de un fenómeno de convección térmica que, aunque fue descrito por primera vez en 1790 por Benjamin Thompson, hoy se conoce como “inestabilidad de Bénard”, en honor al físico francés Henri Bénard. Efectivamente, fue Bénard quien

⁴⁰⁷ *Ibidem*, p. 151.

⁴⁰⁸ *Ibidem*, pp. 294-295.

organizó por primera vez una comprobación sistemática sobre el experimento. Posteriormente, el Nobel Lord Rayleigh intervendrá para explicar de forma concluyente que se produce por el calentamiento uniforme de una fina capa de líquido (habitualmente aceite), considerado hoy el caso clásico de autoorganización, el cual hemos explicado más exhaustivamente en el apartado quinto de nuestra tesis.

La explicación de este evento se debe a que las columnas de flujo hexagonales se crean ya que tanto las superficies de calentamiento del fondo como las superficies de enfriamiento son planas, de modo que la cobertura más efectiva del espacio basada en subdivisiones del mismo tamaño es la de forma hexagonal, lo que propicia la distribución más uniforme posible de las columnas de líquido en movimiento inverso.

Bénard examinó los factores responsables de las formas observadas. Al cambiar el flujo de calor, la temperatura y el grosor de la capa líquida, descubrió que podía ajustar el tamaño de las celdillas y su apariencia. Aunque su definición teórica apareció sesenta años después, Bénard determinó la diferencia de temperatura crítica necesaria para la formación de sus hexágonos. Las estructuras cinéticas complejas aparecen solo en gradientes con la intensidad adecuada: lo suficientemente fuertes, pero no demasiado fuertes, así como otras restricciones. Una vez que comienzan los ciclos, pueden crecer con acceso a más materiales del entorno. Además, los sistemas complejos pueden regular los gradientes de los que dependen, reducirlos y dejar de intervenir cuando el gradiente disminuye temporalmente debido a su disipación por el sistema complejo. Entonces el gradiente puede recuperarse, y el ciclo comienza de nuevo. Este puede ser el comienzo de la fisiología. Al observar las celdas casi perfectamente hexagonales de Bénard, es difícil aceptar la naturaleza casi milagrosa del proceso. No son el resultado de una reacción química o actividad biológica, sino de un simple proceso físico impulsado por un gradiente de temperatura. La inestabilidad de Bénard es un patrón complejo generado por procesos termodinámicos, y no por un programa informático.

Al deshacer la anterior complejidad, la anterior improbabilidad, surgen nuevas complejidades, nuevas estructuras improbables. Las células de Bénard, que no son ni biológicas ni químicas, sino hidrodinámicas, contribuyeron al desarrollo de las “ciencias de la complejidad”. Son una llamada de atención a que los sistemas complejos no surgen de ningún lugar, sino que son producto de gradientes existentes. “No aparecen por iniciativa propia, ni por el designio de una conciencia externa, ni por un proceso de

selección natural”⁴⁰⁹. Su complejidad no proviene de adentro, sino de la nervura de su realidad. Aunque aparentemente simple, la diferenciación espacial de un gradiente vulnera la tendencia hacia la uniformidad probabilística implícita en la segunda ley. El hecho de que un sistema complejo pueda tomar forma, hacer circular materiales y resistir hasta que se corrija la situación en su favor sugiere que el gradiente realmente simple es, de hecho, complejidad intrínseca.

En 1904, el inglés, premio Nobel en Física, John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh, intentó dar con una demostración matemática para el fenómeno de las células de Bénard. Para lograrlo ideó un modelo carente de tensión superficial, en el que el fluido se mantenía bajo una cubierta o placa. Al prescindir de dicha presión, su modelo no daría lugar a celdillas hexagonales, sino a cilindros, círculos y diseños lineales y cuadrados. Con su modelo, Rayleigh predijo la diferencia de temperatura crítica en la que se producía la convección, conociéndose ésta como “número de Rayleigh”.

4.1.2.16. Función a partir del flujo

En el caso convectivo de las células de Bénard se produce una transformación que deriva del aumento del gradiente que existe en el paso del estado de reposo en el equilibrio, del caos molecular, a otro en el que el sistema asume una estructura espontánea. En el primer estado, la diferencia de densidad provocada por el gradiente de temperatura induce el movimiento rítmico lineal de todas las moléculas presentes. El aumento del gradiente de temperatura acaba provocando una ruptura brusca, una “bifurcación” del flujo de calor en el límite del número de Rayleigh. Si se supera este límite, aparece un nuevo estado configurando las celdas hexagonales de Bénard y aumentando la transferencia de calor entre el fondo y la superficie del líquido. La compleja organización en respuesta al gradiente no solo es hermosa, tiene *forma* y *función*. Este matrimonio entre estética y utilidad no es una invención de los arquitectos, ni de ninguna divinidad visible. Sus raíces se encuentran en los procesos físicos del mundo energético. El placer de ver, la magnífica organización de los sistemas de convección Bénard-Rayleigh, implica, en comparación con sus hermanos más caóticos, un notable incremento en la producción de entropía.

⁴⁰⁹ *Ibidem*, p. 156.

En los sistemas de convección circula más calor que en los sistemas conductivos. A través de las células circula no solo calor, sino energía, la misma cantidad que entró, solo que degradada en su constitución. En el proceso no se viola ninguna de las leyes termodinámicas, lo único que se degrada es la calidad de la energía que se ha empleado en construir estructuras complejas individualizadas. A diferencia de los organismos vivos, que pueden *buscar* nuevos gradientes para mantener sus estructuras de no equilibrio, las células inertes de Bénard emanan espontáneamente del gradiente, y desaparecen cuando este se termina. En el caso de la vida, las condiciones de su nervura conllevan bucles retroactivos muy complejos, que canalizan la energía a través de la cinética química. Las ligaduras posponen la degradación inmediata dentro del sistema, aunque promuevan la degradación del entorno.

Tanto los procesos reversibles como los irreversibles de equilibrio son mucho más predecibles que los irreversibles que consumen energía para acumular complejidad en ciclos robustos. Los procesos de destrucción creativa se dan en todas las estructuras de no equilibrio, desde las estrellas, a las células vivas. Pero su organización funcional no sólo precisa de un flujo de energía impulsado por un gradiente, sino que para mantener su organización compleja son también necesarias *ligaduras* de calidad, que actúan como una presa. Precisamente, aquellas que mejor realicen su función de intensificar el flujo del cual proceden serán objetivo de la selección fundamental. “Del caos emergen formas cuya función es precisamente intensificar el flujo del cual derivan. [...] las células giratorias inanimadas nacen del vientre de la naturaleza. [...] Se trata pues de una termodinámica de *formas emergentes*, [...] en la que Carnot y Boltzmann ni siquiera podían soñar. No es tan sólo el modo de ser de la vida, porque es más que la vida. Es un modo de ser de la naturaleza”⁴¹⁰.

4.1.2.17. Vórtices de Taylor

En 1923 el físico inglés G. I. Taylor analizaría el criterio de estabilidad de Rayleigh para los fluidos en rotación. Necesitaría tan solo tres años para predecir las condiciones causantes de los patrones observados en fluidos entre dos cilindros rotatorios.

⁴¹⁰ *Ibidem*, p. 165. Esta misma hipótesis se aborda actualmente, desde su perspectiva propia y con los instrumentos de la teoría morfogenética, en la semiótica del mundo natural, de inspiración semiofísica. *Vid.* GONZÁLEZ DE ÁVILA, M. *Semiótica. La experiencia del sentido a través del arte y de la literatura*. Madrid: Abada, 2021, pp. 159-167.

Diseñaría varios ingeniosos experimentos, valiéndose de gradientes de presión de fluidos para producir patrones de flujo complejos. Superado el umbral crítico del número de Taylor, surgirían vórtices en forma de tubos giratorios siempre de dos en dos, volviéndose ondulatorios al aumentar la velocidad, de modo que el número de formas onduladas y su longitud de onda dependerán de las condiciones iniciales, por lo que nunca habría más de un patrón de vórtices de manera similar. “El sistema entero, sometido a una entrada de energía mecánica, y una constricción espacial, encuentra vías creativas y matemáticamente descriptibles para alcanzar el equilibrio. Puesto que el camino hacia el equilibrio está localmente bloqueado, el sistema guarda memorias a corto plazo de sus estados pasados. El sistema presente y su historia producen nuevos patrones, los cuales se mantienen y elaboran, siempre que dispongan de un gradiente del que alimentarse”⁴¹¹. Aquí lo que se produce es una suerte de emergencia de sistemas cíclicos energéticamente dependientes en su historia y desarrollo, e incluso un tipo de reproducción, para emplear el flujo de energía incrementado, no siendo sólo características exclusivas de la vida. “En estos fluidos constreñidos no existen reacciones químicas, ADN, genes ni lenguaje conocido. Con todo, exhiben complejidad, el tipo de intrincación basada en gradientes que requerirían, en su forma química, la genética y el origen de la vida”⁴¹².

4.1.2.18. Ciclones, huracanes y tornados

Nuestra herencia cultural nos insta a pensar que el camino más corto entre dos puntos es la línea recta. Pero el experimento comúnmente conocido del “tornado en una botella” nos demuestra que la forma más eficaz en que una botella puede vaciarse es mediante un remolino, una estructura cíclica compleja e improbable.

Las tormentas y los huracanes son tornados reales, procesos disipativos a gran escala también inducidos por gradientes (Fig. 1). Mientras que los huracanes son ciclones tropicales con vientos que superan los 120 km/h acompañados frecuentemente de actividad eléctrica y lluvia, los tornados son tormentas pequeñas. El centro de un tornado es la sede de una violenta corriente ascendente donde el aire central es succionado, y la presión barométrica cae en picado. El gradiente de presión que atraviesa un tornado es tan grande que arrasa con todo lo que encuentra a su paso. Para que un ciclón se pueda

⁴¹¹ SCHNEIDER, E. *La termodinámica de la vida...*, p. 171.

considerar un huracán debe superar los 120 km/h, y suelen originarse sobre aguas cálidas en los frentes oceánicos. A medida que una borrasca con vientos ascendentes arrastra aire caliente y húmedo hacia arriba, el gradiente impulsará el huracán que se crea entre el agua oceánica caliente (mínimo los 27°C) y las temperaturas muy inferiores de las capas altas de la atmósfera, generando una succión de aire cálido. A su vez, este aire succionado creará una caída de la presión en la superficie oceánica, estableciéndose un gradiente de

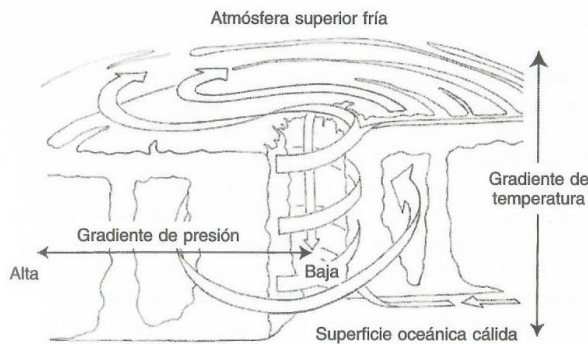


Fig. 1. Gradientes y corrientes asociadas a un huracán. Fuente: SCHNEIDER, E y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 177.

presión entre el interior y el exterior de la borrasca, conocido como “el ojo del huracán”. Las moléculas de aire en movimiento, antes independientes, se agruparán en una tormenta organizada. Succionando aire y liberando calor, el huracán es un organismo físico, una individualidad eólica, cuya función

natural es la disipación del calor en el frío, fomentando el caos molecular del equilibrio.

Del mismo modo, el gradiente que organiza la vida en la tierra y condiciona al clima es el gradiente solar. Si no hubiera transferencia de calor por parte de los vientos y las corrientes oceánicas que suavizaran las grandes diferencias entre los polos, se produciría un gradiente tan enorme que la vida en el planeta desaparecería. Estos sistemas trabajan para conservar el equilibrio termodinámico global, ayudando a mantener el clima en que la vida prospera.

Hoy en día, gracias al estudio de modelos sistémicos computacionales abstractos, como las redes neuronales en los procesos de redes computacionales, a pesar de no tratarse de dinámicas físicas, al implicar una perturbación regular muy iterativa de un estado dado y ser posible su amplificación recursiva, análoga al crecimiento constante de los procesos físicos, se ha logrado comprender gran parte de la lógica de los procesos morfodinámicos, y su desarrollo en tecnologías tan importantes como la producción de luz láser y la superconductividad.

4.2. SÍNTESIS DE LA TERMODINÁMICA Y SELECCIÓN NATURAL EN LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA

Como ya dijimos, la realidad se organiza en objetos y sucesos: los objetos se constituyen de materia, energía e información, mientras que las variaciones temporales de los objetos son los sucesos. Cualquier suceso es consecuencia de resolver tres incógnitas: un Por qué, o causa que lo produce, un Cómo o mecanismo, y una Oportunidad que lo hace posible, e incluye el resto de factores circunstanciales como el material, el tiempo, el espacio, etc. En ocasiones, también puede darse una intencionalidad, o Para qué; aunque todo tiene una justificación, puede no tener una intencionalidad, y darse simplemente porque así lo determinan las leyes físicas. Justamente, la evolución biológica está condicionada por estas tres leyes, cuya aplicación da respuesta a cada una de las incógnitas arriba planteadas.

4.2.1. Por qué. Termodinámica y entropía

Somos sistemas químicos que, “como una noria que reconduce su corriente poderosa para impulsar un molino, pueden fallar. Es posible que no obtengan suficiente energía libre, o que sus procesos de síntesis sean defectuosos. La capacidad de la vida para canalizar energía puede verse comprometida por la enfermedad y la disfunción, y ser destruida por la muerte. No obstante, la materia viva ha encontrado una manera de burlar la inevitable degradación entrópica de sus sistemas: la reproducción”⁴¹³. Y, además, partiendo de la idea de que en cualquier sistema que tenga como objetivo transmitir una información a la descendencia, la premisa de la evolución es un fenómeno inevitable, ya que no puede darse un material replicable ni un mecanismo que lo origine sin que se provoquen errores; y puesto que en la Naturaleza, las leyes tanto físicas como químicas que la gobiernan, son estadísticas (no se cumplen al cien por cien, sino que aunque se cumplan en una alta proporción, esta nunca será absoluta), es por lo que podemos afirmar que “los planes de la experiencia se establecen a tientas, fundándose en probabilidades”⁴¹⁴. Luego en la Naturaleza, cuanto más complejos sean sus sistemas, como el de los seres vivos, dichas leyes menos garantizarán su comportamiento.

⁴¹³ *Ibidem*, p. 120.

⁴¹⁴ JACOB, F. *El ratón, la mosca y el hombre*. Barcelona: Crítica, D.L. 1998, p. 22.

Por otra parte, “la termodinámica interesa al problema de la vida desde sus mismos cimientos”⁴¹⁵: si la evolución biológica está condicionada por el segundo principio de la termodinámica que establece que, sometida a la acción de un campo termodinámico, su tendencia natural es a evolucionar aumentando su entropía. Y, de acuerdo con la proposición de Clausius, “cuanto más débil es el campo (cuanto más reversible es el proceso) menos entropía genera. Si en la evolución de un sistema particular observamos una disminución de entropía, eso nos dice que todo él está sometido a un campo más general, en el cual la entropía aumenta”⁴¹⁶.

Tras lo expuesto, definitivamente podremos afirmar que la evolución de los seres vivos, al estar sometidos a distintos campos termodinámicos, debidos a las distintas reacciones químicas de la vida, debe realizarse cumpliendo el mismo segundo principio termodinámico que da respuesta a la pregunta del porqué de la evolución, pasando dicho principio a ser, por tanto, la primera ley biológica universal de ésta. Así, “la segunda ley nos ayuda a comprender quiénes y qué somos y por qué estamos aquí. Integralmente ligados al entorno del que están separados, pero del que obtienen la energía para crecer, los organismos encuentran nuevas maneras de mantener y expandir su forma. Se turnan en la explotación y agotamiento de fuentes finitas de energía. Su inteligencia, sea consciente y mental o inconsciente y fisiológica, les ayuda a hacerlo. Al consumir energía, al realizar trabajo y construirse a sí mismos, desempeñan una función natural: la producción de entropía prescrita por la segunda ley de la termodinámica, que describe la tendencia al incremento de la desorganización y la generación de caos atómico en cualquier proceso real”⁴¹⁷.

Pero la entropía no se debe interpretar sólo como un mero índice del desorden de un sistema, ya que existen al menos tres tipos de entropía: la entropía de complicación, la entropía de desorden y la entropía de diversidad. Complicación no es sinónimo de complejidad. “La complejidad implica en general mayor número de interacciones entre los elementos, pero todas ellas útiles y no intercambiables, y por tanto significa tener menor libertad de intercambio, es decir, menos entropía. Complicación, significa un exceso de elementos intercambiables, y, en consecuencia, un sistema tiene más entropía cuanto más complicado sea. Lo que es complicado puede simplificarse sin problemas; lo que es complejo no, sin que pierda ciertas propiedades. El incremento en complejidad

⁴¹⁵ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 29

⁴¹⁶ MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica: del origen de la vida al cáncer*. La Laguna: Universidad de la Laguna, 2001, p. 5.

⁴¹⁷ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 19.

implica una reducción de entropía, mientras que el aumento de complicación es una ganancia”⁴¹⁸.

Luego cualquier sistema (aislado), según la segunda ley termodinámica, evoluciona, dependiendo de las posibilidades físicas que encuentre a su paso, hacia el desorden y hacia la complicación, generando con ello entropía en todos sus aspectos.

4.2.2. Cómo y Para qué. La Selección Natural

La vida produce continuos descensos locales de entropía, por ejemplo, cuando las plantas desarrollan sus estructuras fijando el dióxido de carbono atmosférico. Pero también aumentos, por ejemplo, cuando se produce una extinción masiva, provocando la consiguiente reducción de biomasa.

Por lo tanto, desde un punto vista general, como consecuencia del desarrollo de la vida desde su origen hasta nuestros días, se ha producido una disminución neta de la entropía global. Pero con la aparición de los seres vivos, manteniéndose constante la biomasa, el sistema ha evolucionado, por un lado, hacia la diversidad y la complicación, aumentando la entropía, y por otro, hacia la complejidad y la disminución de ésta.

Hasta aquí hemos explicado por qué la entropía aumenta en la evolución. Ahora toca abordar el cómo y por qué se reduce. Qué fuerza o mecanismo se encarga de ello, y de qué manera logra generar a su vez mayor organización y complejidad. Pues bien, la respuesta no es otra que la selección natural. Este es, pues, el mecanismo específico responsable de la evolución biológica citada con anterioridad. Supongamos un escenario en el que se den muchas variables, y haya que optar por una combinación de varias de ellas. Por ejemplo, una gran variedad de materiales de construcción, con distintos tamaños, texturas, calidades, etc., y que hubiese que elegir la combinación de ellos más adecuada para construir un edificio. En la vida se producen constantemente situaciones parecidas, que los matemáticos denominan problemas de “optimización”. Así como la solución analítica de dichos problemas sería costosísima, más bien como buscar una aguja en un pajar, la selección natural ha resultado ser el mecanismo más eficaz para resolver este tipo de situaciones, en el menor espacio de tiempo posible.

⁴¹⁸ *Ibidem*, p. 5.

El teorema de la selección natural (o teorema de Darwin) se considera hoy, pues, el teorema fundamental de la biología, el cual puede expresarse así: un sistema que se encuentra en condiciones de mecánica natural darwiniana, la cual se caracteriza por las siguientes hipótesis: (1) el sistema está formado por un conjunto de seres que reproducen su especie; (2) esta reproducción no es siempre exacta, de forma que se producen variaciones (errores) en su descendencia; (3) esas variaciones han de tener tres cualidades: (a) pequeñas, (b) aleatorias, (c) hereditarias; (4) algunas de esas variaciones pueden producir una ventaja a quienes las poseen; (5) hay competencia entre las unidades reproductoras, debido a una superproducción de descendientes, de forma que no todos son capaces a su vez, de producir descendencia. Pues bien, el teorema afirma que, en esas condiciones, un sistema optimizable converge rápidamente hacia el valor máximo de la función, habiendo analizado tan sólo una pequeñísima fracción de los casos posibles, en el espacio de búsqueda. [...] La selección natural es, expresada en términos matemáticos, un algoritmo de búsqueda rápida y muy eficaz: correctamente aplicado, encuentra el máximo de la función con una probabilidad muy alta, y en un tiempo muy corto. [...] Si no existiese este algoritmo de búsqueda, la aparición de la vida y su progreso, habrían sido imposibles⁴¹⁹.

En resumen, la selección natural, ante la posible complejidad de los sistemas biológicos constituidos por muchas estructuras, en que el perfeccionamiento de una puede perjudicar la función de las otras, una vez que el oportunismo ha fijado el nicho (hábitat) donde ha de desenvolverse esa especie, normalmente tenderá hacia donde esté basada la competencia (grupo con más posibilidades de perseverar).

¿Cuál es el objetivo entonces de la selección natural? Optimizar estructuras con el fin de maximizar la descendencia viable con capacidad reproductora. “La dirección de la evolución es la de las organizaciones que buscan el equilibrio de la termodinámica de sistemas abiertos. [...] La reproducción proporciona medios estables de reducción de gradientes. [...] Pero la variación ligada a la reproducción de los organismos, requerida por la selección natural para producir cambios evolutivos, también es termodinámica”⁴²⁰. De modo que, si por lo general, la pérdida de la actividad sexual hace que los individuos dejen de ser útiles a la Naturaleza, en consecuencia, una vez superada la edad reproductora, sus estructuras dejarán de estar salvaguardadas por la selección natural, u optimizadas para mantener su forma.

⁴¹⁹ *Ibidem*, p. 8.

⁴²⁰ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, pp. 292-293.

Sin embargo, existe una paradoja sobre lo expuesto. Si la existencia de cualquier especie está justificada para ocupar un nicho ecológico, poniendo como ejemplo que el motivo de la enorme diversidad de las aves se basa en la novedad de su capacidad para volar; y si, de la misma forma, en el hombre dicha optimización fue recreada en el desarrollo de su cerebro, en comparación con la de cualquier otra especie, entonces, puesto que el completo desarrollo del cerebro humano sólo se produce en su totalidad con la madurez intelectual, la cual normalmente se adquiere sobrepasada con mucho la edad reproductora (adolescencia), “nadie sabe por qué la mente humana sigue evolucionando hasta la edad adulta y la vejez”⁴²¹. Es decir, ¿cómo, al contradecir lo expuesto, podemos justificar nuestra ganancia de complejidad, sin recurrir a otros mecanismos fuera de los puramente metafísicos? Quizás la respuesta podamos hallarla en que, como ya justificamos al comienzo de nuestra tesis, el desarrollo de nuestro cerebro, a diferencia de nuestra capacidad reproductora, nos allana el camino hacia la probabilidad.

La inteligencia no es, por tanto, la capacidad para resolver problemas, sino, sobre todo, la capacidad para plantear problemas. Es decir, inventar proyectos de investigación. Sin esta actividad rompedora, que desequilibra la estabilidad de lo sabido, no hubiera habido progreso científico. Los animales son eficaces solucionadores de problemas, por eso sobreviven. Pero lo son de un repertorio problemático fijo, por eso no progresan⁴²². Así, según asevera Konrad Lorenz⁴²³, “la curiosidad y la exploración lúdica son típicas de la infancia de todos los animales superiores, pero que en los animales desaparecen o se debilitan bruscamente cuando los animales alcanzan la madurez sexual. El hombre mantiene una permanente veta infantil”⁴²⁴. La capacidad de proyectar, problematizar, curiosear y jugar no están tan alejadas. Todas ellas tienen que ver con la capacidad de crear irrealidades. Incluso la curiosidad del animal está determinada por los estímulos reales. Es la novedad del estímulo lo que despierta su interés. En el hombre no ocurre así, pues puede crear sus propios estímulos, que son irrealidades. Cuando alcanza la madurez, el animal queda encarrilado en las conductas adultas: sexuales, predatorias, etc. El ser humano, al poderse guiar por irrealidades, tiene un régimen distinto de vida. Sospecho que la liberación de la sexualidad humana del ciclo biológico de la ovulación tiene que

⁴²¹ LAUGHLIN, R. *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia...*, p. 248.

⁴²² MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, p. 337.

⁴²³ Konrad Lorenz (1903-1989) fue un zoólogo, etólogo y ornitólogo austriaco que obtuvo el Nobel de Medicina en 1973. Estudiando el comportamiento animal llegó a ser conocido por sus descripciones de la impronta como vehículo instintivo.

⁴²⁴ LORENZ, K. *La otra cara del espejo: Ensayo para una historia natural del ser humano*. Barcelona: Plaza y Janés, 1973, p. 276.

ver con esta capacidad de responder a estímulos irreales causados por sí mismo. Su interés sexual y su curiosidad por otras cosas pueden estar permanentemente renovados⁴²⁵.

De cualquier modo,

el imperativo termodinámico proporciona a los individuos, en cuanto sistemas abiertos, un incentivo para organizarse en entidades de orden superior, energéticamente más eficientes. En otras palabras, la diversidad, la especialización profesional dentro de una economía progresiva y la estratificación en general pueden refinarse por selección natural, ejercida no sólo sobre individuos reproductores a varias escalas, sino también sobre comunidades que, como las moléculas de las células de Bénard, se organizan para prestar mejor el servicio exigido por la naturaleza: la reducción efectiva de gradientes. La variación ofrece nuevas posibilidades, y la selección natural las poda para labrar sistemas potentes adaptados a un entorno dado⁴²⁶. Así, cabe pensar que cuanto más complejo es un sistema, tanto mayor es el número de posibilidades de adaptación a los cambios del entorno. Por esta razón, como generadora de variedad, la complejidad es en cierta manera un certificado de garantía en contra de la inadaptación frente a situaciones de cambio rápido. En ecología, es la gran variedad de especies y de interacciones entre éstas lo que asegura la supervivencia del medio. La destrucción de especies, y no nos faltan ejemplos a nuestro alrededor, es una fuente permanente de desequilibrios. La misma situación parece existir en la sociedad humana donde quizá la pluralidad de ideas y la riqueza de interacciones entre individuos proporcionan una mejora en las posibilidades de respuesta del colectivo frente a situaciones nuevas⁴²⁷.

De ahí que sigamos evolucionando al sobrepasar la edad reproductora, mejorando nuestro sistema cognitivo con la experiencia, bien de forma individual o en un grupo individuado, adquiriendo complejidad para seguir perseverando con más garantías en nuestro Mundo.

⁴²⁵ MARINA, J. A. *Teoría de la Inteligencia creadora...*, pp. 337-338.

⁴²⁶ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, pp. 307-308.

⁴²⁷ GARCÍA VELARDE, M. y FAIREN LE LAY, V. "Estructuras disipativas, algunas nociones básicas (1)" ..., pp. 12-13.

4.2.3. Dónde, Cuándo y Con qué material y otras circunstancias. El Oportunismo

Justamente, el oportunismo es la tercera ley de la evolución natural que, mediante el aprovechamiento de las posibilidades físicas circundantes, el material, el sitio, el tiempo y el nicho ecológico, hace viable la practicidad de las otras dos leyes: el expandir su entropía y la selección natural.

La termodinámica obliga a la expansión de la entropía complicando los sistemas, donde sea posible. Una muestra es la generación de gran diversidad de seres diferentes de una misma especie, aprovechando las posibilidades físicas que permite esa repetición, de modo que el oportunismo interviene cuando se prueban funciones nuevas con esos entes excedentes; y la selección elige los más convenientes y los va modificando para crear funciones que produzcan una ventaja selectiva (es decir, reduce esa diversidad para acomodar cada especie al lugar donde con mayor probabilidad pueda perseverar).

Por ejemplo, supongamos que estamos en el río navegando en una piragua, y, de pronto, nos damos cuenta de que se nos está inundando. En esta situación, no tenemos a nuestra disposición ningún recipiente con qué achicar, pero sí que podríamos emplear el bidón de plástico que observamos flotando frente a nosotros en el agua, aunque no sea ésta su función habitual. De modo que la ley del oportunismo intervendrá en el mismo momento en que nos percatemos de que, dado que tenemos ese bidón, no necesitamos por ejemplo pedirle a otro piragüista que nos preste un cubo. Es decir, “todo ocurre siempre espontáneamente por el camino que existe, aunque sobre el papel -teóricamente- pudiese existir otro mejor”⁴²⁸. Hemos empleado el bidón de plástico varado para que desempeñe una nueva función. Si, además, cada vez que encontremos recipientes indebidamente arrojados al río, los recogemos y los usamos como materia prima para construir otros objetos, además de dotarles de nuevas funciones al reciclarlos, estaremos emulando la evolución natural. Efectivamente, en la Naturaleza con frecuencia se originan nuevas funciones empleando materiales viejos modificados. El mundo macroscópico está repleto de estos casos: el camaleón emplea su lengua para capturar sus presas, y los gatos para cepillar su pelo, las gallinas emplean sus alas para arropar a sus polluelos en vez de para volar, etc. “También es importante comentar que una misma función puede asomar en la evolución como consecuencia de dos golpes de selección bien

⁴²⁸ MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica...*, p. 10.

diferentes: las plumas no son imprescindibles para volar, como bien saben los murciélagos, ciertos insectos, ciertas semillas”⁴²⁹.

Y es que, aun sin ningún propósito en el proceso global evolutivo y de progreso, se pueden diferenciar patrones de desarrollo que la selección aprueba, como el de la “convergencia”, que exhiben objetos no relacionables tendiendo a desarrollar formas similares, como respuesta a funciones parecidas. “Es el caso de la forma de los delfines (mamíferos) y la de los atunes (peces)”⁴³⁰, o la de los ojos que han evolucionado siguiendo rutas dispares en gusanos, caracoles, insectos y vertebrados, o también de las alas evolucionando independientemente en insectos, reptiles, murciélagos y pájaros. El mundo microscópico también participa de este proceso. Un buen ejemplo de ello, en la evolución del metabolismo, lo tenemos en el ciclo de Krebs, donde muchas encimas, cuya anterior función era la síntesis de aminoácidos, son empleadas aquí para desarrollar esta compleja ruta metabólica consecuencia del metabolismo aeróbico. Finalmente, como ejemplo, también el *object trouvé* ⁴³¹ podría entenderse en tanto aplicación de la convergencia en el mundo culto.

Luego, por lo general, la selección natural interviene optimizando funciones que tienen un origen oportunista, pero no por ello son menos eficaces. El propio François Jacob⁴³² lo corroboró al decir: “la improvisación oportunista, en la evolución, es un mecanismo que opera en el origen de una estructura nueva, pero la selección natural se ocupa luego de perfeccionarla y de adaptarla a las condiciones que le exige la vida, como lo haría el mejor artesano”⁴³³.

Pero, en la Naturaleza, ni todas las funciones de los seres vivos son optimizables, ni las que se optimizan son consecuencia sólo de la selección natural, sino que surgen de forma espontánea.

Cuando la evolución de un sistema depende del comportamiento de muchos individuos, se dice que es estadístico y por tanto determinista. Pero en ocasiones solo depende del comportamiento individual, por lo que se dice que es estocástico. Estos fenómenos estocásticos son muy frecuentes en la Naturaleza, aunque no se puedan

⁴²⁹ WAGENSBERG, J. “Las tres selecciones (fundamental, natural y artificial)”..., p. 3.

⁴³⁰ *Ibidem*, p. 3.

⁴³¹ El término arte encontrado -más comúnmente *objeto encontrado* (en francés *objet trouvé*; en inglés, *found art* o *ready-made*) o *confeccionado*- describe el arte realizado mediante el uso de objetos que normalmente no se consideran artísticos, a menudo porque tienen una función no artística, sin ocultar su origen, pero a menudo modificados. Marcel Duchamp fue su creador a principios del siglo XX. http://es.wikipedia.org/wiki/Arte_encontrado y empleado en SCRUTON, R. *La estética de la arquitectura*. Madrid. Alianza Forma, 1985.

⁴³² François Jacob. (1920-2013). Biólogo francés, galardonado con el premio Nobel en Fisiología y Medicina en 1965, por sus descubrimientos sobre el control genético de la síntesis de las enzimas y virus.

⁴³³ MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica...*, p. 11.

justificar todo lo que sería deseable. “Las contingencias estocásticas y dinámicas sacuden constantemente el mundo biológico”⁴³⁴. Por ejemplo, otro patrón a destacar es la reiterada aparición de catástrofes -quizás puntos de bifurcación planetarios-, seguidas de períodos estables de crecimiento y desarrollo innovador. Posiblemente hace dos mil millones de años, como consecuencia de una catástrofe que redujo el hidrógeno en la atmósfera terrestre, se comenzó a usar el agua en la fotosíntesis, surgiendo esta exitosa tecnología. Lo que provocaría, millones de años después, la catástrofe de polución de oxígeno tóxico, que desencadenaría, a su vez, la evolución de bacterias respirando oxígeno, como gran innovación de la vida. Más recientemente, la más desastrosa extinción conocida vendría seguida de la evolución de los mamíferos, y hace sesenta y seis millones de años, la extinción de los dinosaurios daría paso a la evolución de los primeros primates y, posteriormente, de la especie humana. Por consiguiente, “el hecho de que en la naturaleza ocurran eventos aleatorios no evita la direccionalidad dada por la segunda ley ni su orquestación de los usos sutiles de la energía en sistemas que se vuelven más complejos a lo largo del tiempo evolutivo”⁴³⁵.

En concreto, la selección natural descrita por Darwin es un mecanismo determinista, aunque su funcionamiento esté basado en procesos individuales. De ahí que para que resulte, es necesario que intervenga una población muy grande, estadísticamente representativa. Dicho mecanismo debe denominarse, por tanto, selección natural darwiniana, diferenciándose de la selección natural estocástica que se da de forma espontánea, y sin que intervenga la optimización.

4.2.4. Biodiversidad

De lo dicho hasta el momento podemos deducir que la responsable de la diversidad biológica es la termodinámica, ya que promueve que los seres vivos se dispersen, ocupando todas las áreas disponibles en el espacio, pero procurando también que aumente su número al propiciar el apareamiento y la posibilidad de reproducción, y, como consecuencia, incrementando la producción de biomasa. La reducción local de entropía, acaecida tras depurar la mezcla con la selección de una especie o estructura, ocurre a expensas de un mayor aumento de la entropía global debido a la dispersión

⁴³⁴ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, pp. 295.

⁴³⁵ *Ibidem*, pp. 295-296.

genética y espacial, mediante la fabricación de una masa mucho mayor de estructuras que se desechan. Sin esa masa adicional de relleno no puede darse la selección natural. En resumen: el aumento masivo de individuos que genera la competencia crea el campo termodinámico.

4.2.5. Optimización

La selección natural darwiniana, a diferencia del segundo principio de la termodinámica, no es un mecanismo universal de evolución, sino un mecanismo de optimización de estructuras. Aunque no todas las funciones son optimizables, en los seres vivos constituidos de estructuras complejas surgen con frecuencia casos en que, entre varias posibles, una función tiene una solución global máxima, que no perjudica demasiado a las otras. En general, existen tres tipos de funciones optimizables en los seres vivos:

- *Funciones optimizables*: aquellas en que, además de darse las condiciones del teorema, así como en la cantidad de población suficiente como para que sea determinista, son objeto de selección natural. En estos casos, como dice Meléndez-Hevia, “hemos demostrado lo que podemos llamar, creo con merecimiento, la habilidad y mente matemática de la Naturaleza -y que me perdonen el antropocentrismo- cuando vemos que la selección natural ha resuelto complicados problemas de optimización. Quizá a partir de ahí, las matemáticas empiecen a ser una materia más interesante para un biólogo, no como una mera herramienta de cálculo, [...], y se conviertan en una *propiedad* de los seres vivos”⁴³⁶.

- *Funciones no optimizables de selección única*: es el caso de la ruta metabólica del ciclo de Krebs.

- *Funciones no optimizables de varias soluciones*: entre estos casos no optimizables, en que una solución no es mejor que otra, podemos destacar el código genético, donde no hay ninguna razón destacable por la cual la relación entre la secuencia de bases en el ADN y la correspondiente de aminoácidos en la proteína se deba a alguna propiedad previa, ni donde un código sea mejor que otro. Pero dado que todos los seres que pueblan el planeta tienen el mismo código genético, se demuestra que todos proceden

⁴³⁶ MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica...*, p. 13.

de la misma célula. La vida que conocemos sólo se produjo una vez. Estas son variables de carácter irreversible, que una vez que se toman no tienen marcha atrás, y por ello se pueden considerar funciones marcadores de una rama evolutiva. Dichos caracteres se denominan homologías y su estudio es la base de la filogenia y la taxonomía biológica.

4.2.6. Isoenzimas

Dentro de los organismos ocurre que muchas enzimas con distinta estructura catalizan una misma reacción metabólica, como hemos comentado al introducir los hiperciclos. A estas enzimas se las denomina también “isoenzimas”, y son una manifestación más del segundo principio de la termodinámica, consecuencia del desarrollo de la vida aumentando la entropía. Así, con el tiempo y ciertas dosis de oportunismo, algunas se seleccionaron para desempeñar una función concreta. Son, por tanto, un ejemplo más de la expansión de la entropía impuesto por el segundo principio termodinámico. Concreción de la expansión de los grupos biológicos al complicarse el ecosistema mediante la diversidad, con la posterior selección de algunos elementos que terminarán especializándose y dejando de ser intercambiables. O, de acuerdo con lo que dijo Boltzmann, ejemplo de la disminución de la entropía del sistema, al cambiar lo complicado por lo complejo.

4.2.7. Simplicidad y complejidad

La termodinámica, tendente a generar más caminos e interacciones de las necesarias, complica los sistemas y las estructuras. Mientras que la selección natural, al eliminar los caminos y estructuras inútiles y elegir los más adecuados para cada función, los simplifica. Luego podríamos afirmar, entonces, que, en un desarrollo ideal de la vida, la selección tendería al aumento de la complejidad sin complicación, es decir, al aumento simultáneo de la complejidad y la simplicidad. En efecto, el resultado general de la selección natural (en la mayor parte de los casos) es producir reducciones locales de entropía al generar estructuras organizadas, o seleccionar unas estructuras entre un conjunto muy amplio. Sin embargo, en la realidad, la selección que actúa condicionada por la casuística del momento no tiene por qué ir siempre a contracorriente de la tendencia

termodinámica, sino que, por ejemplo, cabe la posibilidad de que estructuras más entrópicas puedan ser las más adecuadas para realizar una función concreta, o incluso que éstas se optimicen espontáneamente, sin que haya competencia o apenas gasto de energía. También puede ocurrir que, si las condiciones en que se da la selección natural se recrudecen demasiado por haber demasiadas variaciones o excesiva competencia, la información genética se pierda por tener demasiados errores o porque un competidor ocupe su espacio, y esto provoque la extinción de la especie.

4.2.8. Evolución independiente del entorno

Por otra parte, la presión ambiental no determina el máximo de una función. Por ejemplo, en el diseño del metabolismo y de las estructuras moleculares existen funciones universales de optimización independientes del ambiente. Este hecho se ha demostrado recientemente en casos relacionados con el mundo molecular del metabolismo, como la estructura de cuatro rutas metabólicas básicas, y en el diseño de la molécula de glucógeno, que posee un diseño optimizado de estructura fractal: “además de tener propiedades fractales, se fabrica en la célula con un algoritmo matemático de construcción, que funciona en forma de ruta metabólica repetitiva. [...] La condición fractal es ahí una propiedad biológica, no sólo una forma matemática de describirla. Indiscutiblemente la célula viva sabe matemáticas y las usa. [...] Esa estructura fractal, [...] determina un objetivo universal de optimización, el mismo para todos, desde las bacterias hasta los mamíferos, independientemente de que sean terrestres, acuáticos, o aéreos, de su tamaño, de su régimen alimenticio, la temperatura o cualquier otro factor ambiental”⁴³⁷. Es por ello por lo que podemos afirmar que, puesto que la selección natural no sólo actúa condicionada por los cambios ambientales, tampoco lo hace la evolución.

Las mutaciones y, en general, todo el conjunto de variaciones genéticas que pueden producirse en la descendencia, a diferencia de lo que dicen los genetistas que incluso han creado, como ya dijimos, una nueva teoría denominada neodarwinismo, en realidad no son mecanismos distintos de la selección natural, sino parte de ella. Del mismo modo, tal y como dijo Darwin, los cambios mutacionales deben ser siempre graduales: “Si pudiera demostrarse que ha existido un órgano complejo que se formó sin

⁴³⁷ *Ibidem*, p. 17.

modificaciones ligeras numerosas y sucesivas, toda mi teoría se vendría al punto del suelo”⁴³⁸.

No obstante, a día de hoy no es claro que la evolución biológica, guiada por la selección natural operando sobre individuos con variaciones genéticas aleatorias (variaciones que además, son independientes de su utilidad respecto a la supervivencia y reproducción del individuo), sea capaz de explicar por sí sola cualquier cambio adaptativo, y menos aun que el tiempo transcurrido desde la aparición de la vida en la Tierra haya sido suficiente para explicar la complejidad actual de los organismos. La evidencia indica que los mecanismos espontáneos de autoorganización tienen un papel relevante en el desarrollo evolutivo, como ya hemos explicado.

4.2.9. Evolución imparcial

Además, no toda la evolución biológica se hace o se ha hecho con arreglo a la selección natural. Es, por ejemplo, el caso de la distribución de manchas en las alas de algunos insectos. Esto ocurre porque la selección natural es un algoritmo de optimización, tal y como explicamos. Cuando la función de que se trata no es optimizable o ya está optimizada, la selección natural no puede actuar. “La teoría de la selección natural establece que ésta no puede operar en ciertos casos, pero esa misma teoría también dice que, cuando se trata de una función optimizable y en el sistema se dan las condiciones necesarias, la selección natural tiene que funcionar obligatoriamente, y el sistema debe encontrar el máximo buscado en un tiempo razonablemente corto”⁴³⁹.

4.2.10. ¿Qué es la vida?

La capacidad de generar entropía y de reducirla, junto a la de reproducirse, no ocurren exclusivamente en el mundo vivo, como anteriormente se ha expuesto. Estructuras inertes como los tornados o las nubes son ejemplos disipativos de gradientes que, además, en el caso de estas últimas, unido a la formación de estructuras inanimadas de equilibrio como los cristales, por ejemplo, son susceptibles de crecimiento, y, por

⁴³⁸ *Ibidem*, p. 20.

⁴³⁹ *Ibidem*, p. 45.

tanto, de reproducción. Pero la propiedad que sí caracteriza únicamente a la vida es la evolución y, con ella, el mecanismo de la selección natural: “La vida es la cualidad de un sistema de transformación química que le permite llevar a cabo una selección natural darwiniana”⁴⁴⁰. Gracias a la acción de la selección natural se produce la vida, pero organismos como los virus, que no se consideran vivos, también precisan de la selección natural para existir. Luego podemos decir que la selección natural es un mecanismo universal previo a la vida.

En cuanto al origen de la vida, y desde el punto de vista estructural, ésta requiere de tres componentes básicos para darse: información, metabolismo y membrana. La vida no puede explicarse sin metabolismo, porque implica unas transformaciones químicas específicas para producir los materiales que se necesitan, y evitar otros que interfieren o bloquean el proceso que interesa. La vida es un fenómeno tan específico que su origen sólo puede justificarse por selección a partir de un mundo enorme de contingencias químicas. En realidad, la vida es una selección coherente de una serie de reacciones químicas en un contexto determinado. Pero aunque esta selección de reacciones sólo puede conseguirse con catalizadores específicos, la teoría más consensuada acerca de cómo comenzó la vida determina que, en un principio, lo más probable es que no hubiese enzimas, sino que se produjeran de forma continua y espontáneamente reacciones químicas incontroladas, generándose de este modo gran cantidad de productos orgánicos, algunos de los cuales, en un acercamiento a lo que posteriormente hará las veces de selección natural, se acumularon unos más que otros al ser capaces de producir copias de sí mismos, o incluso de catalizar ciertas reacciones químicas específicas, compitiendo unos con otros por los recursos escasos a su alcance. Pero aún no habría emergido la vida.

Al igual que sucede con las estructuras disipativas, se trata de piezas inertes del puzle químico prebiótico que se han puesto en marcha espontáneamente, produciendo unos materiales que enseguida van a ser aprovechados para construir la vida por primera vez. Sin embargo, las condiciones del teorema aún no se cumplen del todo, pues para que exista competencia es preciso que la actividad catalítica ejercida por cada entidad sólo la beneficie a ella; el sistema tiene que hacerse egoísta, porque si esos productos están mezclados, al alcance de todos, no está claro que las moléculas con mayor capacidad catalítica para producirlos sean precisamente las que se repliquen más y mejor. Si no es así, el valor selectivo de los catalizadores más eficaces disminuye muchísimo, pues todos

⁴⁴⁰ *Ibidem*, p. 46.

se benefician de su actividad, y las otras moléculas pueden dedicarse únicamente a replicarse sin molestarse en fabricar materia prima, de manera que, funcionando como un parásito, ganarán la competencia de replicación a las primeras y pueden extinguirlas fácilmente, desbaratando el sistema. Es evidente que la única forma de asegurar la supervivencia y el progreso del sistema es que cada entidad reproductora-catalítica tenga una membrana que le permita delimitar su espacio.

En realidad la selección natural, como algoritmo recurrente, es en sí misma una estructura disipativa temporal, y para que los avances en el algoritmo recurrente se mantengan, y no haya que comenzar de nuevo cada vez, la selección establece que ha de haber obligatoriamente información transmisible a la descendencia (una molécula autorreplicable), y, a su vez, para que las ventajas selectivas se presenten y el algoritmo funcione, ha de haber un territorio de propiedad (una membrana que determine el espacio propio). La teoría más aceptada por los especialistas al respecto, la que de forma más sencilla demuestra todo lo expuesto, es la sustentada en moléculas RNA (ácido ribonucleico) con capacidad informativa replicable y catalítica. La vida, por tanto, comenzó con el mundo RNA. Más tarde, parte de este generó ADN y parte proteínas, para dar lugar al esquema clásico de transferencia de información: (a) replicación: ADN: ADN; y (b) expresión: ADN: RNA proteína, separando el genotipo del fenotipo, lo que permite muchas más posibilidades evolutivas.

4.2.11. ¿Cómo empezó la vida?

Tras lo expuesto, podemos afirmar que “con todo, el móvil original (arreglárselas para disipar energía de la manera más eficiente posible y con los materiales disponibles) es el de la segunda ley. Antes de que intervenga la selección natural, la segunda ley “selecciona”, de entre las distintas opciones cinéticas, termodinámicas y químicas, aquellos sistemas más capaces de reducir gradientes, dadas ciertas condiciones. Por muy complejo que sea el desarrollo biosférico, debe entenderse en un contexto energético. Como el origen de la vida, la regulación celular y el desarrollo y mantenimiento de organismos y ecosistemas, la segunda ley impulsa la evolución de las especies”⁴⁴¹. De modo que, de forma espontánea, algunas estructuras disipativas reductoras de gradientes

⁴⁴¹ SCHNEIDER, E. y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 308.

(como formas autoorganizativas espaciales o temporales acaecidas en situaciones locales muy alejadas del equilibrio) pudieron ser empleadas como soportes físicos que la selección natural aprovechó para construir la vida. Así, ejemplos de estas estructuras los tenemos en las nubes, los tornados, las olas del mar o los anticiclones que, aunque son disipativos, son de equilibrio. Y es que muchas estructuras biológicas se sustentan en este tipo de formaciones, como es el caso de las bacterias (pero no de los virus). “En lo más profundo de los ciclos bioquímicos de las bacterias actuales, existen vías metabólicas, reliquias químicas, que repiten, con menor o mayor variación, los pasos que siguió la materia hasta cobrar vida”⁴⁴².

En segundo lugar, otro hecho que sustenta esta hipótesis es, como asevera Meléndez-Hevia, la formación de los coacervados (agregados de proteínas y lípidos, formando una especie de protocélulas), que no son estructuras disipativas sino de equilibrio, y la formación de intermediarios metabólicos y precursores de proteínas, ácidos nucleicos y membranas que se han conseguido reproducir en el laboratorio, intentando imitar las condiciones que había en la Tierra hace 3500 millones de años. A medida que fueron surgiendo todos los materiales, la selección natural también se fue perfeccionando, hasta que el sistema llegó a ser autónomo, comenzando a darse la vida.

Hoy existe prácticamente un consenso general entre la comunidad científica sobre el que estos hechos se produjeron en el origen de la vida, aunque aún quedan algunos detalles por resolver. A partir de aquí, estos sistemas vivos empezarán a evolucionar. El progreso de la vida es un proceso de perfeccionamiento también de la selección natural. Hoy se estima que el proceso mínimo para que se diera la vida fue lentísimo, principalmente porque la química prebiótica y la termodinámica de procesos irreversibles tuvieron que trabajar durante millones de años para fabricar una cantidad suficiente de productos orgánicos y estructuras disipativas sobre las cuales pudiese intervenir la selección natural. En primer lugar, tuvo que surgir un mecanismo que contrarrestase la tendencia a la degradación impuesta por la segunda ley termodinámica, reparando componentes dañados y sintetizando otros nuevos. Y, en segundo lugar, tuvo que darse un mecanismo que resistiera la degradación de las ligaduras sobre las relaciones iterativas de los componentes.

Una vez que se produce la vida, su evolución da lugar a un aumento sin fin de la complejidad y diversidad, en permanente desarrollo mediante el aprovechamiento

⁴⁴² MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica...*, p. 17.

continuo de todo lo que las rodea, en la búsqueda constante de formas con que adaptarse a las condiciones más adversas, con tal de invadir nuevos territorios, y de crecer.

La evolución biológica produjo la biodiversidad que hoy conocemos, pero ya hace casi dos mil millones de años que se originó la vida, apareciendo los primeros organismos multicelulares y, finalmente, los vertebrados, que son los organismos que más han evolucionado, y entre los que nos encontramos. En todo ese proceso ha intervenido la selección natural, no sólo trabajando fuera, fabricando las diferentes formas de vida, sino dentro de los propios organismos, como ley universal de la naturaleza que es. En conclusión, la vida no es un fenómeno que funcione al margen de las leyes físicas. Sin embargo, tal y como aseveran Lynn Margulis y Dorion Sagan:

El mundo como una vasta máquina no puede dar cuenta de nuestra autoconciencia y autodeterminación, porque la visión mecanicista del mundo niega el libre albedrío. [...] Así pues, rechazamos el mecanicismo por ingenuo y el animismo por anticientífico. Aun así, la vida como comportamiento emergente de la materia y la energía es un fenómeno bien comprendido por la ciencia. Schrödinger estaba en lo cierto al abogar por la investigación de los fundamentos físico-químicos de la vida. También Watson y Crick y los demás físicos y biólogos moleculares que saludaron la estructura del DNA como la llave de los secretos de la vida. Como una cuerda que acciona los engranajes blandos de la vida, el DNA se replica y dirige la producción de proteínas que juntas forman las manchas de leopardo, las piñas del abeto y los cuerpos vivos en general. La comprensión del DNA tal vez sea la mayor evolución científica de la historia. Aun así, ni el DNA ni ninguna otra clase de molécula puede, por sí sola, explicar la vida⁴⁴³.

Y es que, como apuntó Ilya Prigogine, al hablar sobre la teoría de la evolución de Darwin, “en su concepción se combinan dos elementos: por un lado, la asunción espontánea de fluctuaciones en las especies biológicas, que posteriormente, merced a la selección del medio, conducen a la evolución biológica irreversible. Por lo tanto, su modelo combina dos elementos que mencionaremos con frecuencia: la idea de fluctuaciones o azar, de procesos estocásticos, y la idea de evolución, de irreversibilidad. Pongamos de relieve que, a nivel biológico, de una asociación resulta una evolución, que corresponde a una complejidad creciente, y a la autoorganización”⁴⁴⁴.

⁴⁴³ MARGULIS, L. y SAGAN, D. *¿Qué es la vida?*, p. 17.

⁴⁴⁴ PRIGOGINE, I. *¿Tan sólo una ilusión?: una exploración del caos al orden*. Madrid: Tusquets, 1988, p. 18.

Capítulo III

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA COMPLEJIDAD EMERGENTE

5. EVOLUCIÓN DEL ESTUDIO DE LA FORMA COMPLEJA

Hasta ahora lo que hemos aprendido es que en el estímulo de intentar comprender el orden que percibimos en nuestro entorno nos hemos topado con la necesidad de comprender la complejidad del mundo, y puesto que “las complejidades que más lejos han llegado en las formas de conocimiento están de una forma u otra relacionadas con la cuestión vital”⁴⁴⁵, teniendo en cuenta que la aportación más importante surgida en los últimos años para el conocimiento de la complejidad ha venido de la mano de la termodinámica de los procesos irreversibles y de la teoría matemática de la comunicación que, como veremos, parten de la idea de que “la evolución de la vida y de la mente son un caso de la general cuestión: sobre la interacción de las partes para la formación de un todo”⁴⁴⁶, y, por lo tanto, consideran que “el pensador frente a la complejidad es el pensador frente a la elección de las partes y los todos”⁴⁴⁷, en este apartado, siguiendo la senda en espiral hasta ahora trazada, pretendemos continuar nuestra búsqueda de una teoría del orden que dé explicación a las formas ordenadas más complejas que son las que emergen de nuestros pensamientos. Así reflexiono que el contenido de mis pensamientos, y el significado de una frase donde los describo, no son los garabatos empleados para representar letras en una hoja de papel o una pantalla, tampoco son los sonidos que dichos garabatos podrían inducirnos a pronunciar, ni tan siquiera lo son el hervidero de eventos neuronales que tiene lugar en nuestro cerebro mientras leemos. El significado de una frase, aquello a lo que se refiere, carece de las propiedades típicamente necesarias para que algo tenga alguna incidencia en el mundo. La información contenida en esta frase no tiene masa, ni momento, ni carga eléctrica, ni solidez, ni ninguna extensión clara en nuestro espacio interior, ni en nuestro entorno, ni en ninguna otra parte. Aún más perturbador es que las frases que el lector está leyendo ahora mismo, podrían no tener sentido, en cuyo caso no hay nada en el mundo con lo que pudieran corresponderse. Sin

⁴⁴⁵ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 18.

⁴⁴⁶ *Ibidem*, p. 15.

⁴⁴⁷ *Ibidem*, p. 15.

embargo, esta propiedad de aspiración al significado tendrá incidencia física en el mundo, si de algún modo influye en nuestra manera de pensar y de actuar. Luego el contenido de una frase -un algo que no es una cosa- tiene consecuencias físicas. Pero, ¿cómo?

El significado no es lo único que plantea un problema de esta clase. Otras relaciones cotidianas comparten este carácter ambiguo. La función de una pala no es la pala. La referencia del movimiento de una mano al saludar no es el movimiento en sí, sino el recuerdo de experiencias vividas y compartidas. Mi propósito al dibujar no es depositar grafito en un papel, sino comunicar algo no encarnado por ninguno de los procesos y objetos físicos: ideas. Y, curiosamente, es su carencia de atributos físicos lo que permite que las ideas puedan compartirse con decenas de miles de lectores sin que se agoten. Por decirlo de otro modo, todo lo que nos representamos es algo diferente de aquello material en que supuestamente se encarna; es más, una configuración idéntica podría significar algo totalmente diferente, e incluso podemos representar lo mismo mediante formas distintas de lo real. Aún más enigmático es que la determinación del valor de esta empresa es casi imposible de conectar con ninguna consecuencia física específica.

Se trata de algo casi enteramente virtual. Cada una de estas categorías de fenómenos: función, referencia, propósito o valor, está de algún modo incompleta. Todos tienen en común una deficiencia intrínseca análoga, una carencia integral. Según el neurólogo Terrence W. Deacon, todos poseen un rasgo ausencial (fenómenos cuya existencia viene determinada por una ausencia esencial). Esta cualidad paradójica de existir respecto de algo ausente es irrelevante cuando se trata de seres inertes, pero es una propiedad definitoria de la vida y de la mente. Una teoría completa del mundo que incluya al hombre y a su experiencia del mismo debe dar sentido a la manera en que tales ausencias específicas nos originan y conforman. Sin embargo, en la ciencia actual paradójicamente, el papel causal de la ausencia y del por qué ocurren las cosas como ocurren no se contempla. La ciencia moderna únicamente se interesa por el comportamiento de los objetos físicos y su influencia causal. Por ejemplo, ante la preferencia que tenemos hacia ciertas ordenaciones regulares de las cosas como muchas otras especies (la forma en que disponemos las palabras en un texto es comparable a cómo un ave construye su nido), de manera que muchas funciones y propósitos vienen condicionados por dicha disposición, aun a pesar de ir en contra de la tendencia espontánea hacia el desorden, que la lógica y la ciencia termodinámica predicen, la ciencia suele atribuir su explicación al diseño humano o la intervención divina.

Y es que desde que se tienen registros de nuestra historia, hechos como la observación de la regularidad de los procesos celestes, o el aparente exquisito diseño de los animales y plantas, se han atribuido a los dioses y demás fuentes trascendentales y desencarnadas, hasta que fenómenos inorgánicos tan misteriosos como el calor, las reacciones químicas o el magnetismo comenzaron a explicarse por mecanismos físicos, dando con ello lugar a la ciencia formalizada a principios del siglo XIX, y dejando fuera de juego cualquier explicación ausencial. Más adelante Charles Darwin proporcionaría en 1859 un mecanismo, “la selección natural”, para dar cuenta de la destacada correlación entre los rasgos de las especies y las condiciones de su existencia, incluso del orden implícito en sus diseños orgánicos. Finalmente, el triunfo de la explicación mecanicista de los fenómenos, antes sólo explicables en términos teleológicos o mentalistas, culminaría en la segunda mitad del siglo XX con el estudio de los procesos de autoorganización, como la formación de los cristales de hielo o la convención regularizada, entre otros muchos que expondremos en profundidad en esta tesis. Es más, incluso hoy en día, numerosos científicos de renombre creen posible dar con la explicación de las relaciones orgánicas y mentales desde perspectivas totalmente físicas, en base a los fenómenos de autoorganización complejos.

A pesar de ello, en los años ochenta algunos pensadores comenzaron a dudar de si los sistemas dinámicos y los enfoques evolutivos de la vida y la mente podían explicarse enteramente desde un punto de vista mecanicista. Así, por ejemplo, un grupo de investigadores influidos por la visión sistémica como Humberto Maturana y Francisco Varela, entre otros, definieron con el término autopoyesis (autocreación) la dinámica autorreferencial, tanto de la vida como de la mente, que constituye una perspectiva observacional. Sin embargo, dicha teoría tampoco incluirá los fenómenos dependientes de algo ausente o no realizado, porque los fenómenos sólo se definen en ella de manera interna. La información no es sobre algo, sino que es una relación formal co-creada dentro y fuera de esa clausura autopoyética. A pesar de pretender dar una explicación mitad física, mitad mental, esta última sigue quedando relegada al terreno de lo heurístico e ilusorio en las ciencias naturales.

En la actualidad ha surgido una ola de interés por el estudio de la consciencia, pero esta o se sigue atribuyendo a procesos materiales, o se sigue negando que exista. Llegados a este punto como dice el filósofo David Chalmers:

Para cualquier proceso físico que especifiquemos, quedará una pregunta por responder: ¿por qué este proceso debería dar lugar a la experiencia? Dado cualquiera de tales procesos, es conceptualmente coherente que pudiera verificarse la ausencia de experiencia, de lo que se sigue que ninguna mera descripción del proceso físico nos dirá por qué surge la experiencia: la emergencia de la experiencia va más allá de lo que puede derivarse de la Teoría Física⁴⁴⁸.

Siguiendo la argumentación de Chalmers, en este trabajo trataremos la experiencia consciente como un fenómeno que se define por su carácter ausencial. Al igual que la función, el propósito, el significado, o el valor, la experiencia consciente puede no estar físicamente, pero es relevante por su efecto materialmente causal, organizando lo que está físicamente presente, pero con el añadido particular de que lo que está presente en el caso de la consciencia es el cerebro en funcionamiento, y lo que está explícitamente ausente somos nosotros mismos.

En definitiva, en esta tesis, no dejaremos de lado la explicación mecanicista del orden observado en los procesos vitales, neuronales, e incluso sociales, basada en los procesos termodinámicos, darwinianos y de dinámica de sistemas complejos, pero, partiendo de los mismos, intentaremos reformular nuestras nociones de causalidad en procesos como la geometría dinámica, evitando concebirlos únicamente en términos de objetos materiales en movimiento, solo afectados por contactos y campos de fuerza físicos. Se trata pues de describir formas de causalidad basadas en la restricción de lo posible. De modo que la creatividad que observamos en el mundo y en la vida, y que en definitiva dio lugar a la conciencia, es producto de una explosión de orden que surgió de una notable menor libertad. Lo que pretendemos describir es que los procesos entencionales, que generan orden, tienen una circularidad propia y característica, cuya potencia causal no se localiza en ninguna materia física última, sino en su propia organización dinámica. Pretendemos caracterizar con precisión esta geometría de formas dinámicas emergentes, englobando desde los procesos termodinámicos hasta los procesos vitales y mentales, y explicar con tales mimbres sus relaciones de dependencia mutua. En definitiva, se aspira a proporcionar un entramado de puente conceptual que explique la forma de organizarse de la materia emergiendo de lo que existe, pero de manera sustancialmente diferente.

⁴⁴⁸ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 20.

Me gusta comparar la evolución con el tejido de un gran tapiz. La fuerte y firme urdimbre de este tapiz está formada por la naturaleza esencial de la materia no viva elemental, y por la manera en que dicha materia se ha agregado a la evolución de nuestro planeta. En la construcción de esta urdimbre, la segunda ley termodinámica ha tenido un papel preponderante. De la abigarrada trama que constituye el detalle del tapiz, me gusta pensar que se ha tejido principalmente por mutación y selección natural. Mientras que la urdimbre establece las dimensiones y sustenta el conjunto, es la trama lo que más intriga el sentido estético del estudioso de la evolución orgánica, al mostrar como lo hace la belleza y variedad de la adaptación de los organismos a su entorno. Pero ¿por qué deberíamos prestar tan poca atención a la urdimbre, que después de todo, es una parte básica de la estructura entera? Quizá la analogía sería más completa si se introdujera algo que en ocasiones se ve en las telas: la participación activa de la urdimbre en el propio patrón. Sólo entonces, creo, capta uno el pleno significado de la analogía. Harold F. Blum⁴⁴⁹.

5.1. EMERGENCIA DE LOS PROCESOS ENTENCIONALES

Hace 13.000 millones de años surgieron las primeras partículas, los primeros átomos, estrellas y planetas, pero ninguna de estas transiciones cósmicas provocaría tanta divergencia organizativa de la norma universal como la generada por la aparición de la vida y la mente. Hasta ese momento no hubo propiedades entencionales⁴⁵⁰ en el universo. Hasta hace poco más de 3000 millones de años, cuando surgieron las primeras formas de vida, no hubo en la tierra nada parecido a una función. Hasta hace unos pocos millones de años, cuando evolucionaron los primeros animales con cerebro, no hubo el menor indicio de vida mental. Hasta que los primeros seres humanos comenzaron a pensar simbólicamente, no hubo en la tierra ninguna concepción sobre lo bueno y lo malo, lo correcto o incorrecto. Todas estas maneras de organizar la materia y la energía, de producir formas innovadoras de influencia sobre los sucesos del mundo, surgieron a partir de formas de organización antecedentes que no poseían esas propiedades. Estas

⁴⁴⁹ SCHNEIDER, E. *La termodinámica de la vida* ..., p. 185.

⁴⁵⁰ Entencional. Término acuñado por Terrence Deacon en su libro *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia* y descrito en el glosario del mismo como "adjetivo para describir los fenómenos intrínsecamente incompletos en el sentido de estar en relación con, constituidos por, u organizados para conseguir algo no intrínseco. Es decir, lo emplea para referirse a todo aquello construido u organizado para la consecución de algo que no es intrínseco al fenómeno en cuestión, a todo lo que se completa con una actividad dirigida. Esto incluye función, información, sentido, referencia, representación, agencia, propósito, sensibilidad y valor". Agrupa por tanto no sólo los fenómenos que relacionamos con la conciencia, sino todos aquellos procesos vitales que se explican por su valor para la supervivencia y la copia, situados en el nivel más bajo de organización dinámica, capaces de introducir un mecanismo causal orientado a un fin.

transiciones capitales en la organización de las cosas suelen concebirse como emergentes porque tienen la apariencia de novedad espontánea.

Por lo general, y desde la antigüedad, la gente ha dado por sentado que las cosas cambian debido a alguna intervención como causa. Pero la realidad en ocasiones no es tan simple. Algunos cambios se dan espontáneamente, y puede que ocurran siempre si no se evitan de manera activa o pasiva. Además, muchos cambios espontáneos no suponen un movimiento. Lo que tienen de desafiante los procesos entencionales es que aparentan surgir de una reorganización global de sus interdependencias dinámicas componentes, que sólo tienen sentido respecto de relaciones no intrínsecas. Por consiguiente, debemos explicar como pueden presentar una organización causal (al menos en apariencia) contraria a la pauta de organización causal del mundo físico.

5. 2. CONTEXTO CULTURAL

5.2.1. Gestándose el cambio. Parte y Todo.

A principios de siglo, la exploración del mundo subatómico llevó a los físicos a una crisis de identidad, al darse cuenta de lo ineficaz que resultaba su método mecanicista para describir los fenómenos en escalas mínimas. Las consecuencias de dicha crisis han sido discutidas por físicos y filósofos durante décadas. Según Thomas Kuhn⁴⁵¹ supusieron un “cambio de paradigma” en la percepción de la realidad, que aún se está produciendo en nuestros días. Así, de una ciencia predominantemente mecanicista, reduccionista y atomista, se ha ido pasando paulatinamente a una ciencia de corte eminentemente holista ⁴⁵², organicista y ecológica. No se trata de un cambio uniforme, engloba revoluciones científicas, sacudidas y movimientos oscilantes, que aparentemente se repiten de modo aleatorio, pero que han ido conformando, metafóricamente hablando, una red de acontecimientos, un patrón complejo y altamente organizado de comportamientos, soporte de novedades aún por venir.

⁴⁵¹ Thomas Samuel Kuhn (1922-1996). Físico, historiador y filósofo de la ciencia estadounidense, conocido por su contribución al cambio de orientación de la Filosofía y la Sociología científica en la década de 1960.

⁴⁵² “Holismo (del griego antiguo *holos* que significa «la totalidad», “un algo entero”) es un neologismo forjado en 1926 por el estadista sudafricano Jan Christian Smuts, en su obra “Holismo y Evolución”. Según este autor, holismo es “la tendencia de la naturaleza y a través de la evolución creadora, a construir sistemas (conjuntos) que en muchos aspectos son superiores y más complejos que la suma de sus partes”. El holismo por tanto se define globalmente por el pensamiento, tendiendo a explicar las partes y sus funcionamientos a partir del todo. De esta manera, el pensamiento holístico se encuentra en oposición al pensamiento reduccionista que tiende a explicar la globalidad (el todo) a partir de las partes”. Cfr. <https://es.wikipedia.org/wiki/Holismo>.

Pronto nos daremos cuenta de que la tensión entre mecanicistas y holistas no es algo nuevo, sino que se trata de dos maneras distintas de enfrentarse al conocimiento, poniendo el énfasis en la comprensión de las partes para los primeros, o en el todo integrado para los segundos, y que ambos acercamientos a la realidad se han ido sucediendo a lo largo de nuestra tradición científica y filosófica.

Durante el siglo XX la ciencia de corte holista será conocida como “pensamiento sistémico”, cuyas principales características empezaron a emerger simultáneamente a principios de siglo en distintas disciplinas, todas ellas centradas fundamentalmente en el conocimiento de la naturaleza de la vida poniendo el énfasis en la visión de los organismos vivos como un todo integrado, entre las que destacará principalmente la Biología como paradigma de la complejidad, ya que sus sistemas son los más complejos y susceptibles de simulación: la materia viva y la materia inteligente. Más adelante también influirán en su configuración las aportaciones de disciplinas como la Psicología Gestalt, la Ecología o la Física Cuántica.

5.2.2. Substancia versus forma

Esta disyuntiva se reducirá, en Biología, a la histórica dualidad en torno al estudio de la *substancia* (materia, estructura y cantidad), y el estudio de la *forma* (patrón, orden, cualidad). Hoy se sabe que lo biológico es más que una forma, o una configuración estática de componentes en un todo. Hay un flujo continuo de materia a través del organismo vivo, mientras que su forma se mantiene, produciéndose su desarrollo y evolución. Es por eso por lo que para comprender este aspecto biológico debemos penetrar en los procesos metabólicos y relativos al desarrollo evolutivo.

Y es que el estudio de la *substancia* comenzó ya en el siglo VI cuando filósofos de la Grecia antigua, como Tales de Mileto, Parménides y otros, tratando de dar respuesta a las preguntas “¿De qué está hecha la realidad?”, “¿Cuáles son los constituyentes últimos de la materia?” o “¿Cuál es su esencia?”, definirán las diversas escuelas de la temprana filosofía griega.

Los pitagóricos distinguieron el patrón, o lo que denominaron “número”, como aquello que daba *forma* y limitaba a la materia o *substancia*. Más adelante, Aristóteles, a quien se podría considerar como el primer biólogo de la tradición occidental, también distinguiría entre materia y forma, pero las vincularía a través del desarrollo, y, a

diferencia de Platón, consideraría que la materia y la forma eran interdependientes. Según Aristóteles, la materia contenía la naturaleza esencial de todas las cosas, pero sólo como potencialidad, siendo a través de la forma como esa esencia se transformaba en algo real o actual. A esta autorrealización o proceso de desarrollo, donde materia y forma son sólo separables mediante la abstracción, lo denominó “entelequia”, creando con ello un sistema formal de lógica, y un conjunto de conceptos unificadores, que en adelante adaptaría a las principales disciplinas de su tiempo: Historia Natural, Física, Metafísica, Ética y Política. Esta ciencia y Filosofía “orgánica”, viviente y espiritual, creada por Aristóteles, dominaría el pensamiento occidental de los siglos XVI y XVII.

5.2.3. El objetivo de la ciencia: el descubrimiento de las formas

Según Ortega y Gasset, para gran parte del mundo antiguo, “las cosas estaban ahí fuera por sí mismas, en forma ingenua, apoyándose las unas a las otras, haciéndose posibles las unas a las otras, y todas juntas formaban el universo. Y el sujeto no era sino una pequeña parte de ese universo, y *su conciencia un espejo* donde los trozos de ese universo se reflejaban. La función del pensar no consistía más que en un encontrar las cosas que estaban ahí, un *tropezar* con ellas. Así, el conocimiento no era sino un *representar* esas cosas en la mente, con una buena *adecuación* a las mismas, para ser *objetivos*. No había situación más humilde para el yo, ya que lo reducía a una cámara fotográfica”⁴⁵³. Esta misma correlación de cámara oscura será en la que se fundamente la concepción del intelecto humano de John Locke y la corriente empirista inglesa de los siglos XVII-XVIII, así como también constituirá la base del racionalismo más radical durante el siglo XIX y principios del XX. Sin embargo, en el período barroco del siglo XVII las transformaciones en el proceso del conocimiento se van a acrecentar con las aportaciones de la emergente ciencia moderna, sobre todo de las ciencias de la naturaleza; el conocimiento científico experimentará un enorme progreso con notables consecuencias en la vida práctica del ciudadano y su visión del mundo. Se forjará un nuevo racionalismo y un nuevo empirismo, apoyado por instrumentos cada vez más precisos, y por una teoría más metódica y matemática. Nos parece interesante aportar como ejemplo de este momento la opinión de Francis Bacon, considerado el filósofo de la era industrial, sobre

⁴⁵³ *Ibidem*, p. 50.

cuál ha de ser el propósito de la ciencia:

Que reside en el descubrimiento de la forma de una naturaleza particular, es decir, su verdadera diferencia, o naturaleza naturante, o fuente de emanación”. [...] Bacon halla en Aristóteles la doctrina de las cuatro causas necesarias para la comprensión de una cosa. Se trata de las causas material, eficiente, formal y final. Si consideramos una estatua, por ejemplo, podremos comprenderla si entendemos de qué está hecha (causa material: el mármol, por ejemplo); quién la hizo (causa eficiente: por ejemplo, el escultor); su forma (causa formal: la idea que el escultor esculpe en el mármol); y el motivo por el que fue hecha (causa final, verbigracia, la razón que empujó a hacerla al escultor). Pues bien, Bacon coincide con Aristóteles en el hecho de que “el verdadero saber es el saber mediante causas”. Sin embargo, agrega, entre tales causas “la final se halla tan lejos de aprovechar a las ciencias, que más bien las corrompe; puede valer sólo para el estudio de las acciones humanas”; y, por otra parte, la causa eficiente y la material “como causas remotas e independientes del proceso latente que lleva a la forma, son causas extrínsecas y superficiales, y que casi carecen de importancia para la ciencia verdadera y activa”. Por lo tanto, sólo queda la causa formal. Esta es a la que debemos conocer si queremos introducir nuevas naturalezas en un cuerpo determinado. “Un hombre que conozca las formas puede descubrir y obtener efectos jamás conseguidos con anterioridad; efectos que las mutaciones naturales, el azar o la experiencia y la laboriosidad de los hombres nunca produjeron y que tampoco habría podido prever la mente humana”. Conocer las formas de las diversas cosas o naturalezas quiere decir, en suma, penetrar en los íntimos secretos de la naturaleza y otorgarle poder sobre esta. Bacon opinaba que estos secretos de la naturaleza eran demasiados en comparación con la gran variedad y riqueza de fenómenos tan diversos en apariencia. En el fondo, Bacon pretendía adueñarse de aquel alfabeto de la naturaleza que a continuación permitiría entender las expresiones de su lenguaje, es decir, los fenómenos tan variados. En otras palabras: las palabras del lenguaje de la naturaleza serían los fenómenos, y las letras del alfabeto serían las formas, pocas y simples. Pero ¿qué son tales formas?, ¿cómo las concibe Bacon? Para comprender la idea de forma es preciso hablar de dos nuevos conceptos introducidos por Bacon: el proceso latente y el esquematismo latente. El *proceso latente* es aquel que no se ve a través de la observación de los fenómenos: “No pretendemos, en efecto, hablar de medidas, signos o grados del proceso visible en los cuerpos, sino de un proceso reiterativo, que en su mayor parte no es apreciable por los sentidos”. Con respecto al *esquematismo latente*, Bacon afirma que “ningún cuerpo puede dotarse de una nueva naturaleza, ni puede transmutarse adecuadamente y con éxito en un cuerpo nuevo, si no conoce a la perfección la naturaleza del cuerpo que hay que alterar o transformar”. La anatomía de los cuerpos

orgánicos -en opinión de Bacon- proporciona una cierta idea del esquematismo latente, si bien resulta insuficiente. En pocas palabras, cabría decir que el esquematismo latente es la estructura de una naturaleza, la esencia de un fenómeno natural; en cambio, el proceso latente es como una ley que regula la generación y la producción del fenómeno. Comprender la forma significa, por consiguiente, comprender la estructura de un fenómeno y la ley que regula el proceso que le es peculiar. Los acontecimientos se producen de acuerdo con una ley, y “en las ciencias dicha ley -su investigación, su descubrimiento y su explicación- es la que sirve como fundamento del saber y del obrar. Bajo el nombre de forma entendemos esta ley y sus artículos”. “Quien conozca la forma, abraza la unidad de la naturaleza incluso en las materias más desemejantes [...]. Por eso, del descubrimiento de las formas se sigue la versión en las especulaciones y la libertad en el obrar”. Casi podría llegarse a decir que, con estas especulaciones, Bacon ha vislumbrado en cierto modo la realidad del bioquímico o, incluso, la aventura de los físicos atómicos contemporáneos⁴⁵⁴.

El hombre había sido creado por Dios para interpretar y mantener el dominio sobre la naturaleza subordinándola a su voluntad.

5.2.4. El mecanicismo cartesiano

Por tanto, el estable período de corte organicista de Aristóteles sería arrasado en la época moderna por la nueva visión metafórica del mundo como máquina. Los nuevos descubrimientos en Física, Astronomía y Matemáticas, vinculados con los nombres de Copérnico, Galileo Galilei, Descartes o Newton, supondrán una revolución científica sin precedentes. La cualidad y el patrón quedarían excluidos de cualquier mención científica, siendo exclusivamente la *substancia* el foco de interés de esta etapa. Según Galileo Galilei nada podía englobarse dentro del campo científico sin ser medido o cuantificado. René Descartes creó el método de pensamiento *cartesiano*, que consistiría en desmenuzar los fenómenos complejos en sus partes para llegar a comprender, una vez estudiadas las propiedades de las mismas, el conocimiento del todo. Para Descartes el universo material, incluidos los seres vivos, podía ser comprendido como máquina, a partir de sus partes constituyentes. Descartes trasladará definitivamente las matemáticas del mito hacia la luz

⁴⁵⁴ REALE, G. y ANTISERI, D. *Historia del pensamiento filosófico y científico. Tomo II. Del humanismo a Kant ...*, pp. 298-299.

de la razón, dejando de ser un argumento cosmológico para tornarse instrumento y modelo máximo de una razón universal, como signo de verdad. Si la matemática y la geometría eran antes instrumentos de representación de la naturaleza en cuanto sinónimo de orden y unidad, en el contexto moderno irán abandonando este sentido a favor de su sustentación científica. Finalmente, la ciencia mecanicista, gobernada por leyes matemáticas exactas del siglo XVII, quedaría completada con Isaac Newton y su sintética mecánica newtoniana. Todos estos logros científicos, sin embargo, no significarán el fin de la sombra religiosa; por ejemplo, en la nueva cosmología newtoniana, el Creador, que ya era un arquitecto divino, ahora será un maestro en matemáticas y un gran relojero, siendo el hombre el que habría logrado descifrar el orden matemático y divino del universo. La razón matemática adquirirá un potente estatus en el conocimiento humano de la naturaleza. Su desarrollo desde Galileo, hasta Newton y Leibniz, será extraordinario. En general, toda esta explosión del interés científico denotará la necesidad de separación de los campos de estudio para optimizar los resultados de la investigación, la cual finalmente dará lugar a las academias surgidas a mediados del siglo XVII, especializadas en los diferentes frentes de trabajo, pero con el objetivo común del conocimiento e investigación de la naturaleza, y de la producción de saber técnico (algunas de ellas están expuestas en detalle en el capítulo II). El modelo cartesiano o analítico será considerado como un dogma al final del siglo XVII, en todos los campos de estudio, inclusive en las artes y en la arquitectura. Por ejemplo, en Historia Natural William Harvey lo adaptará con gran éxito para explicar el fenómeno de la circulación sanguínea.

Sin embargo, otros fisiólogos fracasarían siguiendo este mismo modelo para explicar funciones del cuerpo humano como la digestión o el metabolismo, al desconocerse en aquella época los procesos químicos intervinientes. Como consecuencia pronto comenzarán a surgir diversos movimientos reticentes o escépticos frente a la racionalidad vigente, confrontándola con un ferviente interés en la cuestión de los sentidos, un campo especialmente pertinente en las artes, tal y como ya se introdujo en el capítulo I de nuestra tesis. Las emociones y pasiones, en gran parte opuestas a la intelección, pero igualmente fundamentales para la comprensión del hombre, también requirieron ser contempladas en la Academia, tanto en la filosofía como en las artes, abriéndose así un camino indagatorio sobre la sensación en desarrollo hasta el siglo XVIII. En esta dirección surgen en toda Europa varios estudios como los de Condillac, Berkeley, Hume y Hobbes. Por ejemplo, situaciones como la narrada por el escritor y filósofo prerromántico avanzado a su tiempo, Denis Diderot, en una entrevista imaginaria

con Jean-Baptiste le Rond d'Alembert⁴⁵⁵, haría estallar la insuficiencia de la explicación mecanicista, esgrimiendo:

¿Ve usted este huevo?, pues con esto es como se derriban todas las escuelas de la teología y todos los templos de la tierra. ¿Qué es este todo?, una masa insensible antes que el germen se haya introducido... ¿Cómo pasará esta masa a otra organización, a la sensibilidad, a la vida? Por el calor. ¿Quién producirá el calor? ¿El movimiento? ¿Cuáles serán los efectos sucesivos de este movimiento? En lugar de responderme, siéntese y sigámoslo con la vista en todo momento. Primero, es un punto que oscila, una red que se extiende y colorea; carne que se forma, un pico, pequeñas alas, ojos, unas patas que aparecen: una materia amarillenta que se apelotona y produce intestinos; es un animal..., anda, vuela, se irrita, huye, se aproxima, se queja, sufre, ama, desea, goza; tiene todas vuestras acepciones; todas vuestras acciones, las hace. [...] Con una materia inerte, dispuesta de una cierta manera, impregnada de otra materia inerte, del calor y del movimiento, se obtiene sensibilidad, vida, memoria, conciencia, pasiones, pensamiento...; escuche y tendrá usted piedad de sí mismo, sentirá que, por no admitir una suposición simple que lo explica todo, la sensibilidad, propiedad general de la materia, el producto de la organización, renuncia usted al sentido común y se precipita en un abismo de misterios, de contradicciones, de absurdos⁴⁵⁶.

También en el siglo XVIII, Antoine Lavoisier, considerado el “padre de la química moderna”, explicaría la respiración como una forma específica de oxidación química, poniendo con ello de manifiesto la importancia de los procesos químicos en la explicación del funcionamiento de los organismos vivos, lo que incitaría al paulatino desuso de la simplista explicación mecanicista en ciencia.

A pesar de ello, el mecanicismo cartesiano seguiría imperando, considerando a los animales como máquinas, aunque ahora, sustentadas en complejos procesos químicos; en definitiva, algo más complejas que un mecanismo de relojería. Por lo que se diría de la Historia Natural que, en última instancia, siempre se podía reducir a la explicación Física y Química. Ejemplo de ello fue que, durante este período, salió a la luz pública el tratado de Julien de la Mettrie, “*El hombre máquina*”, que mantendría su fama hasta final de siglo XVIII, y seguiría generando controversia hasta casi el siglo XX.

Ahora bien, al final de este proceso, acabará apareciendo, pese a todo, la palabra “Biología”, y empezándose a considerar lo que tienen en común los seres vivos y lo que

⁴⁵⁵ Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783) fue un matemático, filósofo francés de la ilustración. Formó parte de la Academia de las Ciencias de París, y junto a su colega Denis Diderot creó *L'Encyclopédie*.

⁴⁵⁶ PRIGOGINE, I. *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza editorial, 1990, p. 114.

los diferencia de los no vivientes. A partir de este momento se clasificarán los objetos de este mundo en dos categorías: lo orgánico y lo inorgánico, de modo que lo orgánico corresponderá a lo viviente.

5.2.5. Primeras tentativas de la emergencia

También a finales de siglo XVII, mucho antes de salir a la luz la teoría de Darwin, el reciente interés hacia el dominio sensorial emergió especialmente en Inglaterra, lo que propició que en el siglo XVIII John Locke formulase una explicación empirista de la mente, donde las ideas complejas surgirían de forma espontánea y gradual a partir de la asociación de datos sensoriales adquiridos, por medio de la interacción con el mundo. Esta concepción atomista/materialista del conocimiento sería retomada un siglo y medio después por el abuelo de Darwin, y más tarde por Jean-Baptiste de Lamarck, quien intentó, de forma similar, explicar las combinaciones de partes, adaptativamente asociadas, constituyentes de los seres vivos.

A partir de este momento, como diría Gregory Baterson, se produciría la inversión de la “Gran Cadena del Ser”. Si antes la mente del Dios creador ostentaba el nivel más alto, y la mente humana, que apenas merecía atención se disponía en el lado opuesto, poco a poco pasaría a ser la única y más importante incógnita por descifrar. Ahora la propuesta evolutiva introducida por Darwin y Lamarck planteaba la posibilidad de que la mente fuera un producto final y no una causa inicial de la historia de la vida. En cierto modo la visión lamarkiana era emergentista, pues en su teoría evolutiva la mente surgía de forma progresiva a partir de procesos no mentales. Este mismo enfoque emergentista tomó algo más de cuerpo tras la publicación en 1859 de “El origen de las especies” de Charles Darwin, donde a pesar de no ser la mente y su origen el argumento principal, sí que supuso un decidido intento de abordar el problema de la teleología. A diferencia de Lamarck que proponía el papel activo de los organismos luchando por adaptarse al medio adquiriendo conocimiento con la experiencia, Darwin sugería una misma consecuencia derivada de la reproducción diferencial de variables espontáneas, sin necesidad de establecer un fin teleológico del organismo. A pesar de no tener conocimientos sobre los mecanismos de la herencia, con la simple observación de las consecuencias regulares de sus productos supo idear una teoría de la selección estadística natural, no exactamente

mecanicista, que diera lugar al diseño funcional de los organismos. La teleología podía ser reducible siempre y cuando fuera susceptible de evolucionar.

5.2.6. El movimiento romántico

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, representantes del mundo de la Filosofía, el Arte y la Literatura se opusieron al paradigma analítico dominante. Así, el poeta y pintor británico William Blake dijo: “Líbrenos Dios de la visión simplista y del sueño de Newton”⁴⁵⁷. Los poetas y filósofos románticos alemanes retomaron la tradición aristotélica centrada en la *forma orgánica*. Johann Wolfgang von Goethe, uno de los principales representantes de este movimiento, empleó la palabra “morfología” para designar el estudio de la forma biológica, desde el punto de vista del desarrollo y la dinámica. Concebía la forma como un patrón de relaciones dentro de un todo organizado, y admiraba el orden en movimiento de la naturaleza. Como él decía, “cada criatura [...] no es sino una gradación pautada de un gran y armonioso todo”⁴⁵⁸. A saber, tal y como afirma la profesora de Literatura comparada Laurence Dahan-Gaida al hablar de Goethe:

La práctica de Goethe es ante todo práctica de las ciencias de lo viviente, práctica de la anatomía y de la botánica, y también de la fisiología, ciencias que Goethe buscaba articular en un todo coherente al que significativamente denominaba “morfología”, por la cual entendía una teoría de la forma, de la formación y de la transformación de los cuerpos orgánicos. La morfología se sitúa dentro de la historia natural en cuanto estudio de las formas y de las partes de la naturaleza organizadas en relación con el conjunto de lo viviente. Aunque Goethe explota la explicación legal matematizable para verificar la descripción sensible, a menudo estetizante, que permite ver la esencia misma de las cosas, la esencia goetheana no es exactamente una estructura, sino un poder de estructuración: es un *Bidung* (la forma como actividad de formación) y no únicamente una *Gestalt* (la forma fija). Además, la forma y la formación que definen a lo viviente son también y sobre todo con-formación, es decir interconexión e interacción con el medio de vida⁴⁵⁹.

⁴⁵⁷ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 41.

⁴⁵⁸ *Ibidem*, p. 41.

⁴⁵⁹ DAHAN-GAIDA, L. “La forma en acto. Morfogénesis y ciencias de lo viviente en Paul Valéry”. *Arbor: Ciencia, Pensamiento y Cultura*, Vol. 194, N.º 790, 2018, p. 2.

Los artistas románticos centran su interés principalmente en la comprensión cualitativa de los patrones o pautas, por lo que ponían gran énfasis en explicar las propiedades básicas de lo viviente mediante formas visuales. También “la Historia Natural se ocupaba [...] del estudio de la estructura visible de los seres vivos”⁴⁶⁰. Goethe consideraba, en particular, la percepción visual como el principal camino para la comprensión de la forma orgánica.

La concepción de la naturaleza como “un gran todo armonioso” de Goethe instigó en muchos científicos coetáneos la búsqueda de la visión del planeta entero, percibiendo la tierra como un conjunto integrado, como un ser vivo. Sin embargo, esta idea provenía de una larga tradición. Si nos remontamos al Neolítico hasta la Edad del Bronce, en las primeras sociedades de la “Vieja Europa” se adoraban deidades femeninas como encarnaciones de la madre tierra; y más adelante, durante los albores de la Grecia prehelénica, a la diosa tierra se la denominaba “Gaia”.

La idea de la Tierra como un ser vivo y espiritual permaneció durante toda la Edad Media y el Renacimiento hasta que fue sustituida por la imagen cartesiana del mundo como máquina, resurgiendo poco a poco de nuevo en este período romántico. Como aportaciones destacadas en tal dirección, cabe mencionar en este apartado la visión holística del geólogo escocés James Hutton, quien mostrará en su tratado *Theory of the Earth* la mutua vinculación de los procesos geológicos y biológicos al comparar las aguas de la tierra con el sistema circulatorio de un animal. Su visión, aunque aún bastante próxima al mecanicismo orgánico de Alfred N. Whitehead, será una clara precursora de la gran aportación de Ludwing von Bertalanffy: su Teoría General de Sistemas, que explicaremos más extensamente cuando corresponda. También queremos destacar la visión del naturalista alemán Alexander von Humbolt, que, desde un enfoque mucho más general, siguiendo su “costumbre de ver el planeta como un todo”⁴⁶¹, identificará el clima con una fuerza global unificadora, y admitirá la *coevolución* de los organismos vivos, clima y corteza terrestre, lo que abarcará casi en su totalidad la presente denominada hipótesis Gaia, de la que hablaremos de nuevo más adelante.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, la proyección del movimiento romántico, poniendo el énfasis en la forma biológica y dejando la composición material en un segundo plano, continuó creando adeptos, sobre todo en los naturalistas de las

⁴⁶⁰ SENET-JOSA, J. “François Jacob. La lógica de lo viviente y la historia de la biología”. *Triunfo*, Vol. 37, N. ° 619, 1974, p. 31.

⁴⁶¹ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 42.

escuelas francesas de anatomía comparada o “morfología” lideradas por George Cuvier, quien crearía un sistema de categorización zoológica basado en las analogías de las relaciones estructurales.

5.2.7. Kant

Para Emmanuel Kant, considerado uno de los más grandes filósofos de todos los tiempos, también fue primordial la comprensión de la forma orgánica. Separaba el mundo de los fenómenos de “las cosas en sí mismas”. Y aunque creía que la ciencia sólo podría ofrecer explicaciones mecanicistas, sin embargo, consideraba que en las áreas en las que dicha explicación fuera insuficiente, esta debía de ser completada con el propósito de la naturaleza. Para Kant, de entre estas áreas, la más importante sería la comprensión de la vida. En su *Crítica de la razón Pura* Kant, al tratar la naturaleza de los organismos, argumentaría que, a diferencia de las máquinas, estos son “autorreguladores” y “autoorganizadores”. Según él, en una máquina, las partes son sólo unas para las otras apoyándose en un todo funcional, mientras que, en un organismo, las partes existen además por medio de las otras, en el sentido de producirse entre sí. “Debemos ver cada parte como un órgano”, decía Kant, “que produce las otras partes, (de modo que cada una produce recíprocamente las otras) [...]. Debido a esto, (el organismo) será a la vez organizado y organizador”⁴⁶². Kant será el primero en emplear el término “autoorganización” para definir la naturaleza de los organismos vivos. Incluso, adelantándose a su tiempo, ya denotará la necesidad de buscar un nuevo método de conocimiento, aseverando: “El maduro juicio de nuestra época no quiere seguir contentándose con un *saber aparente* y exige de la razón la más difícil de sus tareas, a saber: que de nuevo emprenda *su propio conocimiento*”⁴⁶³.

5.2.8. Discontinuidad de John Stuart Mill

También muchos otros filósofos comenzarían a replantearse la visión teleológica al considerar que los procesos actuales se estructuraban según posibilidades futuras, de

⁴⁶² CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 42.

⁴⁶³ MARTÍNEZ MIGUÉLEZ, M. “Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad” ..., p. 48.

modo que las propiedades entencionales, que no estaban ya prefiguradas en el mundo inorgánico, no podían derivarse únicamente de procesos no entencionales.

Una reconciliación auténtica precisaba reconocer tanto la unidad de los procesos materiales y vitales-mentales como la radical diferencia de su organización causal. Filósofos como John Stuart Mill, en su intento de aunar las metodologías de las ciencias nuevas con la química y la biología, se sorprenderá al observar la discontinuidad de las propiedades que podían generarse mediante interacciones combinatorias, como ocurre con las reacciones químicas. Por ejemplo, cuando se combinan dos sustancias tóxicas y peligrosas como son el cloro gaseoso y el sodio metálico, el producto da sal común (un compuesto generalizado y un nutriente esencial del mundo vivo). La reacción química que enlaza ambos elementos neutraliza sus naturalezas altamente reactivas, dando propiedades iónicas diferentes, de las que depende la vida. También Mill, al encontrar especialmente llamativa la discontinuidad que presentaban los principios que gobiernan las propiedades de las entidades de nivel superior con los de nivel inferior, argumentará:

Todos los cuerpos organizados están compuestos de partes similares a las que componen la naturaleza inorgánica, y que incluso han existido en un estado inorgánico ellas mismas; pero los fenómenos de la vida, que resultan de la yuxtaposición de cierta manera de esas partes, no tienen analogía alguna con ninguno de los efectos que se producirían por la acción de sustancias componentes consideradas como meros agentes físicos. Hasta donde podemos imaginar que nuestro conocimiento de las propiedades de diversos ingredientes de un cuerpo vivo se amplíe y perfeccione, es seguro que la mera adición de las acciones separadas de esos elementos nunca equivaldrá a la acción del cuerpo vivo mismo⁴⁶⁴.

Mill describió todo esto antes de la publicación del origen de las especies de Darwin, donde dejó abierta la posibilidad de que la evolución de funciones nuevas no se derivara de la mera combinación mecánica. Principalmente su enfoque permitió considerar la posibilidad de la evolución de dominios causales progresivamente más complejos, desde la Física simple hasta la Psicología Social.

⁴⁶⁴ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 162.

5.2.9. Mecanicismo del siglo XIX

No obstante, de nuevo el péndulo retornó al lado mecanicista. Con el perfeccionamiento del microscopio, la Biología alcanzó numerosos avances; se gestó el pensamiento evolucionista, dando lugar a la formulación de la teoría celular según la cual los seres vivos están formados por las mismas unidades básicas, las células. De nuevo los científicos volverán a centrar su atención en las interacciones de los componentes celulares, dejando de lado la concepción de los organismos como un todo. A finales de siglo surgirá la moderna Biología, donde germinarán los principios de la moderna Embriología, junto al descubrimiento de las leyes de la herencia Genética.

También serían destacables las investigaciones en Microbiología encabezadas por Louis Pasteur, que no sólo subrayarán el importante papel de las bacterias en la generación de diversas enfermedades, sino que sentarán las bases de la nueva ciencia Bioquímica. Así mismo esta teoría, eminentemente reduccionista, dejará en segundo plano la alternativa años antes enseñada por el fundador de la Medicina experimental, Claude Bérnard, consistente en subrayar la relación del organismo y su entorno interior constituido de órganos y tejidos, que permanece inalterable a pesar de producirse fluctuaciones del entorno exterior; alternativa que finalmente será desarrollada en 1939 por Walter Cannon, denominando *homeostasis* a la constancia del medio interior.

Todos estos descubrimientos fortalecerán los lazos de la Biología con la Física y la Química, provocando que en adelante los científicos buscasen explicaciones físico-químicas para la vida. *La concepción mecanicista de la vida* de Jacques Loeb reflejaría la influencia bioquímica en el pensamiento científico de la época.

5.2.10. El Vitalismo

Aunque la ciencia avanzaba enormemente en la comprensión de las estructuras y funciones celulares, permanecía ignorante de las verdaderas actividades organizadoras de la célula como “un todo”, y al intentar dar explicación a la diferenciación celular, consecuencia del desarrollo de los organismos superiores, una vez más el método reduccionista imperante resultaría ser insuficiente.

Un grupo de filósofos denominados vitalistas darían nuevos pasos en contra del mecanicismo, al considerar, junto con los holistas, que la Ciencia Natural no se debía

reducir a la Física y a la Química, ya que “el todo” no puede ser comprendido desde el estudio de “las partes”. Sin embargo, en el camino de la comprensión de la vida, mientras que para los primeros organicistas era necesario sumar a la estructura física y química del organismo el factor “forma” u “organización”, para los vitalistas la clave consistiría en la existencia de alguna fuerza o campo no físicos. A la vuelta del siglo, el vitalista y embriólogo Hans Driesch, con su experimento sobre la regeneración de huevos de erizo marino en las distintas fases del desarrollo celular, renegaría de cualquier relación mecanicista para explicar su experimento “autorregulador”, aludiendo a una causa formativa que denominó con el término aristotélico: *entelequia*.

Sin embargo, este proceso no perdería del todo su esencia cartesiana, ya que a diferencia del proceso de autorrealización aristotélico que unificaba materia y forma en un todo, la entelequia de Driesch actuaría aislada del sistema físico.

En la actualidad el bioquímico Rupert Sheldrake, en sus postulados sobre lo que denomina “campos mórficos” no físicos como generadores del desarrollo y mantenimiento de la forma biológica, ha reavivado la superada doctrina vitalista.

5.2.11. Aparición del concepto de “emergencia”

Los científicos no podían considerar las propiedades entencionales como primarias, ni tampoco negar su realidad. El concepto clave que se adoptará para describir dichos procesos será el de “emergencia”, pero no será implantado plenamente en ciencia hasta 1879, cuando el filósofo y crítico inglés George Henry Lewes lo introduzca en su libro *Problemas de la vida y de la mente*, definiendo así su teoría de la emergencia.

Efectivamente, sería a finales del siglo XIX y principios del XX cuando un grupo de filósofos conocidos como los “emergentistas británicos”, compuesto entre otros por Samuel Alexander, C. D. Broad y Conwy Lloyd Morgan, emprenderán esta vía de investigación alternativa a medio camino entre el reduccionismo y el vitalismo, influidos por las ideas de Lewes y Mill. A partir de ese momento, la ciencia del siglo XXI comenzará a centrar su interés no tanto en las propiedades componentes, sino en las dinámicas iterativas complejas. Como el mismo Stephen Hawking diría: “Pienso que el próximo siglo será el siglo de la complejidad”⁴⁶⁵.

⁴⁶⁵ *Ibidem*, p. 167.

Así, el psicólogo comparativo y evolucionista británico Conwy Lloyd Morgan tenderá un puente entre el evolucionismo y el emergentismo, codescubriendo un mecanismo evolutivo en la década de 1890 conocido como “efecto Baldwin”, mediante el cual la selección natural darwiniana podía generar efectos de cariz lamarkiano. Según esto, tanto las respuestas (comportamentales funcionales, u orientadas a un fin) a los retos del entorno como las aprendidas podían asimilarse genéticamente en adaptaciones heredadas, haciéndose incluso innatas en las siguientes generaciones. El linaje capaz de adquirir mediante la experiencia dicho comportamiento sería perdonado por la selección natural y por el azar, reemplazándose poco a poco las variantes menos eficientes por las que lo serán más. Finalmente, Morgan publicaría el libro *Emergent Evolution*, exponiendo la posibilidad de que se den transiciones no dependientes de mecanismos pasados sino totalmente novedosos, donde el proceso evolutivo produciría propiedades emergentes con regularidad y en consonancia, aun sin premeditarlo, con la línea argumental preconizada por Stuart Mill. No obstante, las transiciones evolutivas planteadas en los noventa sobre el origen de los organismos pluricelulares, aun hoy, siguen siendo objeto de debate.

A principios de siglo XX, las teorías emergentistas buscarán tender un puente explicativo entre las ciencias físicas y las denominadas ciencias especiales, del tipo de la psicología, las ciencias sociales y la biología. Así, entre el estudio de los procesos y las propiedades entencionales, las ciencias naturales deberán prescindir de las explicaciones entencionales, mientras que las ciencias especiales no podrán. Sin embargo, la biología, al situarse a medio camino entre ambas, pretendiendo excluir las propiedades entencionales, empero precisará de propiedades tales como la representación y la función.

5.2.12. La Biología Organicista

A finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, los biólogos organicistas ganaron posiciones frente al mecanicismo y el Vitalismo, al renovar muchas de las ideas preconizadas por Aristóteles, Goethe, Kant o Cuvier sobre el concepto de la forma.

El término “función” en fisiología, de claras connotaciones mecanicistas, fue sustituido poco a poco por el concepto de “organización”, que el biólogo Ross Harrison relacionó con la configuración de relaciones ordenadas, y que más adelante se identificaría como *patrón* o pauta. Además, el biólogo Joseph Woodger afirmaría que los

organismos pueden ser descritos por sus elementos químicos junto a sus “relaciones organizadoras”, sirviendo de influencia para que el bioquímico Joseph Needham escribiera en 1935: “Un análisis lógico del concepto de organismo, nos conduce a la búsqueda de relaciones organizadoras a todos los niveles, altos y bajos, bastos y sutiles, de la estructura viviente”⁴⁶⁶. Finalmente, estos biólogos destacarían la naturaleza jerárquica de la configuración y relación de los organismos vivos. Como Fritjof Capra⁴⁶⁷ en su libro *La trama de la vida* dice:

Efectivamente, una de las propiedades sobresalientes de toda manifestación de la vida es construir estructuras multinivel de sistemas dentro de sistemas. Cada una de ellas forma un todo respecto a sus partes, siendo al mismo tiempo parte de un todo superior. Así las células se combinan para formar tejidos, éstos para formar órganos y estos a su vez para formar organismos. Éstos a su vez existen en el seno de sistemas sociales y ecosistemas. A través de todo el mundo viviente nos encontramos con sistemas vivos anidando dentro de otros sistemas vivos⁴⁶⁸.

A partir de este momento, se comenzó a emplear el término “red”, en vez de “jerarquía”, para evitar las connotaciones rígidas de control humano que posee dicho término. Los primeros biólogos sistémicos, de los cuales hablaremos más tarde, introdujeron el concepto de “complejidad organizada” para referirse a los distintos niveles de complejidad que se pueden observar, gobernados por leyes diferentes, operando en cada sistema. Por ejemplo, como explicamos al inicio de este capítulo, el concepto esencial en termodinámica de temperatura carece de sentido en el nivel inferior de los átomos individuales, donde impera la teoría cuántica. A principios de los años veinte, a las propiedades que se daban en un nivel de complejidad, pero no en los inferiores se las empezó a denominar “propiedades emergentes”, término acuñado por el filósofo Charlie D. Broad. Adelantamos aquí las palabras del físico teórico R. B. Laughlin:

Las fases de la materia son fenómenos emergentes muy estudiados, y constituyen una prueba contundente de que en la naturaleza las escalas están bien separadas; las leyes microscópicas pueden ser verdaderas y al mismo tiempo irrelevantes a nivel macroscópico, bien porque lo que medimos es insensible, o bien porque es demasiado

⁴⁶⁶ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 47.

⁴⁶⁷ Capra Fritjof nacido en Viena en 1939, es un físico austriaco doctor en física teórica. Autor de diversas publicaciones, entre ellas *La trama de la vida*, *El Tao de la física*, *El punto crucial y sabiduría insólita*, etc. En la actualidad es director del Center for Ecoliteracy de Berkeley, California.

⁴⁶⁸ *Ibidem*, p. 47.

sensible a esas leyes. Por extraño que parezca, las dos situaciones pueden ocurrir simultáneamente⁴⁶⁹.

Desde una perspectiva práctica, no hay mucha diferencia entre una ley emergente y un milagro, pero desde el punto de vista filosófico, la diferencia es abismal. Una representa un mundo regido por una evolución jerárquica ordenada; la otra, un mundo gobernado por la magia. [...] El tema de las fases de la materia sienta un precedente, es la prueba de que al menos algunas de las maravillas del mundo, -quizá todas- dependen de la organización⁴⁷⁰.

Efectivamente, la emergencia resurgirá de nuevo de la mano de filósofos como Samuel Alexander y C. D. Broad. Samuel Alexander seguirá un camino más próximo a la visión de Mill al centrarse en la discontinuidad, y al acercarse a las teorías contemporáneas basadas en la noción de caos determinista focalizadas en rasgos no lineales, mientras que C. D. Broad será más proclive a la explicación de la novedad de Lewes. Durante las últimas décadas, dichas concepciones se han ido calificando de “ontológicas” (basadas en el supuesto de discontinuidad fundamental de las leyes físicas) y “epistemológicas” (basadas en la predictibilidad y representatividad), respectivamente, aunque han mantenido el criterio común de que los procesos mecánicos de bajo nivel pueden ser la base de las propiedades mecánicas emergentes de nivel superior.

5.2.13. La psicología Gestalt

Mientras los primeros biólogos organicistas entraban en debates sobre la importancia de la forma, los psicólogos alemanes la denominaban *gestalt*. A la vuelta de siglo, el filósofo Christian Von Ehrenfelds empleaba el término Gestalt denotando su sentido de pauta irreductible, donde el todo es más que la suma de las partes.

La corriente de psicología moderna Gestalt, cuyos exponentes más reconocidos fueron los psicólogos Max Wertheimer y Wolfgang Köhler, veían la existencia de “todos” irreductibles como un aspecto clave de la percepción. Los organismos vivos perciben no en términos de elementos aislados, sino de patrones o configuraciones (como las notas musicales que forman una composición) perceptuales integrados, conjuntos organizados dotados de significado, que exhiben cualidades ausentes en sus partes.

⁴⁶⁹ LAUGHLIN, R. *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia...*, p. 59.

⁴⁷⁰ *Ibidem*, p. 106.

Durante la República de Weimar en la Alemania de los años veinte, tanto la Biología organicista como la escuela Gestalt formaban parte de una corriente de pensamiento contraria al mecanicismo.

5.2.14. Física Cuántica

Los avances de la teoría cuántica tuvieron implicaciones científicas y filosóficas de largo alcance. En 1926 el eminente físico y humanista Erwin Schrödinger escribiría cuatro artículos que, junto con la obra de su contemporáneo el físico alemán Werner Heisenberg ⁴⁷¹, pondrían los cimientos matemáticos de la Mecánica Cuántica, y cambiarían el mundo de la Física. Con la mecánica cuántica descubrirán un *conjunto de relaciones* que rigen el mundo subatómico, análogo al que Newton descubrió para los grandes cuerpos, y afirmarán que la nueva física debe estudiar la naturaleza de un numeroso grupo de entes que son *inobservables*, ya que la realidad física ha tomado cualidades que están bastante distanciadas de la experiencia sensorial directa.

Así, mientras que la Mecánica Clásica defendía que las propiedades y el comportamiento de “las partes” determinaban las del conjunto, en la Mecánica Cuántica sucederá justo lo contrario: será “el todo” el que condicione el comportamiento de “las partes”. La idea de que las propiedades de “las partes” del sistema sólo se pueden comprender en el contexto de un conjunto superior, desde su “organización”, supuso el cambio revolucionario del pensamiento científico occidental del siglo XX, que durante tres siglos no había admitido ningún otro método que no fuera el analítico o reduccionista cartesiano.

Este cambio conceptual de “las partes” al “todo”, que la Física Cuántica puso a debate en los años veinte, dio un gran impulso a la escuela de la Biología organicista, que también lo defendería. El propio Heisenberg quiso destacarlo titulado su propia autobiografía *Der Teil und das Ganze (La parte del todo)*. En palabras de Henry Stapp: “Una partícula elemental no es una entidad no analizable con existencia independiente. Es, en esencia, un conjunto de relaciones que se extienden hacia otras cosas”⁴⁷². Las partículas elementales carecen de significación como entidades aisladas. Son

⁴⁷¹ Werner Karl Heisenberg (1901-1976). Físico alemán galardonado con el premio Nobel de física en 1932. Es conocido sobre todo por formular el principio de incertidumbre, una contribución fundamental en el desarrollo de la teoría cuántica. Este principio afirma que es imposible medir simultáneamente de forma precisa la posición y el momento lineal de una partícula.

⁴⁷² CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 50.

“interconexiones” entre distintos procesos de observación o medición. A nivel subatómico, la naturaleza se nos presenta como una compleja trama de relaciones entre las partes de un todo.

La obra de Schrödinger, Heisenberg, Bohr y otros sugerirá que, al menos para los observadores humanos, la naturaleza es irreduciblemente probabilística. Según como se observara, la luz actuaba a veces como una partícula, otras como una onda. La naturaleza parecía reflejar, como en un espejo mágico, la decisión del observador humano que estaba observando. Por objetivo que fuera, el observador humano era parte del sistema físico que percibía. En el paradigma científico cartesiano, las descripciones son consideradas “objetivas”, es decir independientes del observador humano y del proceso de conocimiento. El nuevo paradigma implicará que la Epistemología, -la comprensión del proceso de conocimiento-, entre en la ciencia de la mano de Heisenberg con su “principio de incertidumbre”, debiendo ser incluida explícitamente en la descripción de los fenómenos naturales donde el observador afecte y tenga la capacidad de cambiar la realidad que estudia, lo que finalmente se concretará en su principio de causalidad. Así, según el propio Heisenberg, “lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de observación”⁴⁷³.

En la nueva visión de la realidad física como una red de relaciones, intentar aislar un patrón dibujando una frontera aleatoria alrededor suyo y denominarlo “objeto” pierde todo sentido. Por ejemplo, si al pasear por un bosque fijamos nuestra atención en cada hoja, rama o tronco de lo que denominamos “árbol”, y posteriormente intentamos dibujarlo, probablemente no representemos más que su parte aérea. Sin embargo, la parte subterránea de sus raíces, al no verse, nos pasa desapercibida, y es mucho más extensa de lo que podamos imaginar, quedando incluso sus límites individuales desdibujados formando una red densa junto a las de los demás árboles de la floresta. Luego con este ejemplo pretendemos demostrar lo aleatoria que resulta nuestra percepción del mundo, dependiente de nuestro método, de nuestra observación y mediciones.

⁴⁷³ *Ibidem*, p. 60.

5.2.15. Ecología

Los antiguos filósofos griegos, como Hipócrates y Aristóteles, establecieron los cimientos de la Ecología en sus estudios sobre la Historia Natural. Las piedras angulares de la Ecología moderna se sustentaron en los conceptos evolutivos sobre la adaptación y la Selección Natural. La nueva ciencia de la Ecología surgirá durante el siglo XIX, cuando los biólogos organicistas centren sus estudios en las comunidades de organismos. La palabra ecología está compuesta por dos vocablos griegos: *oikos* (que significa “casa”, “residencia” u “hogar”) y *logos* (término traducido al castellano por “estudio”). Ecología es por tanto “el estudio del Hogar Tierra”. *Ökologie* es un concepto acuñado por el biólogo, filósofo y evolucionista alemán Ernst Haeckel⁴⁷⁴ a finales de la década de 1860, quién la definió como “la ciencia de las relaciones entre el organismo y el mundo exterior que le rodea”⁴⁷⁵. La palabra “entorno” fue empleada por primera vez por el biólogo y ecólogo pionero Jakob von Uexküll en 1909.

En los años veinte, el naturalista y zoólogo inglés Charles Elton, en su libro *Animal Ecology* introduciría los conceptos de cadenas y ciclos tróficos, designando las relaciones nutricionales como primer principio organizador en el seno de las comunidades biológicas. En un primer momento, los ecólogos emplearon el término organismo, y más adelante “superorganismo”, para definir las comunidades biológicas, hasta que pasados los años veinte se acuñó el término “ecosistema” para definir la comunidad de organismos, los flujos de energía y materiales que los atraviesan y su entorno físico.

Fue el geólogo Eduard Suess, en 1875, quien empleó el término “biosfera” por primera vez, pero el concepto ecológico de biosfera no fue desarrollado hasta unas décadas más tarde cuando el geoquímico ruso Vladimir Vernardski, en su libro pionero *Biosfera*, y partiendo de las ideas de Goethe y Suess, teorizará la vida como una “fuerza geológica”, creando y controlando el entorno planetario. De entre otras muchas teorías sobre la Tierra viviente, ésta será la que más se asemeje a la nueva teoría *Gaia* que se desarrollará en los años sesenta por los ya mencionados James Lovelock y Lynn Margulis.

⁴⁷⁴ Ernst Heinrich Philip August Haeckel (1834-1919) fue un naturalista y filósofo alemán que popularizó el trabajo de Charles Darwin en Alemania, amparando la idea de que la evolución llevaba implícita una complejización paulatina, situando al hombre en sus de sus estadios finales. Publicará varios libros entre los que destacan *Generelle Morfologie del Organismen* (Morfología general de los organismos) publicado en 1866 y *Kunstformen der Natur* (Formas artísticas en la Naturaleza) publicado en 1904. Así mismo, “sus numerosos estudios acerca de la biología marina le condujeron a comparar la simetría de los cristales con la de los animales más simples y a postular un origen inorgánico para los mismos. Haeckel buscaba una interpretación general de la naturaleza basándose en la teoría de la evolución, intentando integrar en ella incluso la historia de la cultura. Dividió la ciencia natural en Química, Morfología y Física, en correspondencia a las tres cualidades de la naturaleza: materia, forma y energía”. Cfr. FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 35.

⁴⁷⁵ CAPRA, F. *La trama de la vida*..., p. 52.

La ecología aportará al emergente pensamiento sistémico conceptos como comunidad y red, centrando la atención en los organismos que, ligados en un todo funcional por sus mutuas relaciones, crean comunidades como las de las abejas o las hormigas: pese a que sean incapaces de sobrevivir aisladamente, unidos en una especie de inteligencia colectiva aumentan sus capacidades de supervivencia y adaptación, aplicables en los distintos niveles sistémicos. Un ejemplo de este tipo de sistema es la “simbiosis”. De modo que podemos diferenciar tres clases de sistemas vivos: los organismos, partes de organismos y comunidades de organismos. Aunque constituyen totalidades integradas, sus propiedades esenciales emergen de las interacciones e interdependencia de sus partes.

Hoy sabemos que la mayoría de los organismos no son sólo miembros de comunidades ecológicas, sino que más bien se trata de complejos ecosistemas en sí mismos, conteniendo grupos de organismos más pequeños dotados de cierta autonomía, pero armoniosamente integrados en un todo funcional mayor.

Otro de los conceptos introducidos por la ecología fue el de “red de alimento”. Los flujos de materia y energía a través de los ecosistemas se perciben como la continuación de las vías metabólicas a través de los organismos. La visión jerárquica de los sistemas vivos como *redes* en distintos niveles no es más que una proyección humana. En realidad, sólo hay redes dentro de redes. Por ejemplo, podemos representar un ecosistema como una red en que cada organismo sea un nodo que, ampliado, sea otra red, y así sucesivamente. En la actualidad el concepto de “red” es clave en la comprensión científica, no sólo en ecología, sino en todo estudio sobre el conocimiento de la vida.

6. TEORÍA DE SISTEMAS

6.1. Pensamiento Sistémico Contextual

A partir de los años treinta, surgirá la corriente del Pensamiento Sistémico, fundamentado en muchas de las propuestas en torno a los sistemas vivos que anteriormente habían sido formuladas por los biólogos organicistas, los psicólogos gestaltistas, los ecólogos, y reforzadas por los descubrimientos revolucionarios de la Física Cuántica.

El pensamiento sistémico defiende que las propiedades de todo organismo o sistema emergen de las interrelaciones entre sus partes, siendo propiedades que ninguna

de las partes por separado posee, de modo que, de ser diseccionado el sistema, las propiedades desaparecerían. Otro criterio que ampara el pensamiento sistémico es que puede focalizar su interés en distintos niveles sistémicos, cada uno con un grado propio de complejidad. Observando el mundo viviente nos encontramos con sistemas anidando dentro de sistemas. Los fenómenos observados en cada nivel poseen características diferentes a los de los niveles inferiores. A las propiedades sistémicas, que son propias de un nivel concreto, se las denomina “emergentes”.

El cambio del paradigma cartesiano al sistémico trajo consigo el que en el estudio de los sistemas vivos la relación entre las partes y el todo quedase invertida. Es decir, al no ser intrínsecas las propiedades de las partes es inútil intentar comprender los sistemas desde el análisis de las mismas, sino que aquellos sólo pueden ser entendidos como conjuntos, relacionados como conjuntos mayores. De ahí que podamos decir que la corriente de pensamiento sistémico sea “contextual”, es decir, que tiene en consideración el entorno, y es por tanto medioambiental. Por otro lado, como la Física Cuántica demostró, no hay partes propiamente dichas, sino que lo que denominamos parte es más bien un patrón dentro de una red de relaciones, una red dinámica de conceptos y modelos interrelacionados que determinan la estructura de la red. Se pasa desde la contemplación del mundo, desde un punto de vista mecanicista, como una colección de objetos que se interrelacionan, a una visión sistémica, en la que los objetos están constituidos de redes inmersas en redes mayores, donde las interrelaciones son secundarias, y las fronteras entre patrones (“objetos”) se diluyen.

Así pues, el pensamiento sistémico surge como respuesta al vacío que se produce en estos momentos en la ciencia. Comporta un cambio de la ciencia objetiva a la ciencia epistémica; a un marco en el que la epistemología como “método de cuestionar” se convierte en elemento constituyente de las teorías científicas; y promulga la interconexión de los fenómenos en la que la identificación de patrones como “objetos” depende del observador humano y del proceso de conocimiento. Se trata de entender la realidad como una red de conceptos y modelos, ninguno de los cuales es más fundamental que otro. Esta nueva ciencia moderna nunca podrá facilitar una comprensión completa y definitiva, sino solo aproximada, de la realidad. Existe pues un conocimiento indeterminado donde, como Luis Pasteur bien expuso “la ciencia avanza a través de respuestas tentativas hacia una serie de cuestiones más y más sutiles, que alcanzan más y más profundidad en la esencia

de los fenómenos naturales”⁴⁷⁶.

6.2. Pensamiento Sistémico como Proceso

Por tanto, si hasta ahora habíamos hablado de lo que se podría incluir dentro de una rama de pensamiento sistémico “contextual”, a finales del siglo XX surge otra rama de pensamiento sistémico que es más bien “procesal”. Y es que, si tenemos en cuenta que en el marco mecanicista de la ciencia cartesiana, además de estructuras fundamentales, también hay fuerzas o mecanismos a través de los cuales aquellas interactúan dando lugar a procesos, del mismo modo, ya que en el pensamiento sistémico cada estructura es vista como la manifestación de procesos subyacentes, podemos decir que el pensamiento sistémico siempre será procesal. Esta visión procesal del pensamiento sistémico será enfatizada por primera vez en biología a finales de los años treinta por el biólogo austriaco Ludwing von Bertalanffy, y completada en los años cuarenta por los estudios en cibernética sobre los circuitos de retroalimentación y los flujos cíclicos de materia y energía a través de los ecosistemas.

Sin embargo, antecedentes del pensamiento procesal podemos encontrarlos ya en la Grecia antigua, donde el filósofo Heráclito de Éfeso al interpretar la naturaleza dijo: “Todo fluye, todo cambia, nada permanece”. En los albores del siglo XX el matemático y filósofo inglés Alfred North Whitehead formulará la escuela filosófica conocida como “Filosofía del Proceso”, asentada en aseveraciones como: “El proceso, más que la sustancia, es el constituyente fundamental de la naturaleza”⁴⁷⁷. Mientras, en el mismo período, el filósofo Walter Cannon desarrollará el concepto de *homeostasis* inspirándose en la noción de la constancia del medio interior ideada anteriormente por el biólogo y médico francés Claude Bérnard, como ya introdujimos. Se trataba del mecanismo autorregulador que poseen los organismos, y propicia el mantenimiento de su equilibrio dinámico interno compensando los cambios del entorno mediante el intercambio de materia y energía con el exterior. En consecuencia, este intercambio denominado *metabolismo*, consistente en el conjunto de reacciones bioquímicas y procesos fisicoquímicos que ocurren en las células vivas, se supuso tan complejo, dinámico y altamente organizado que no podía ya ser descrito por la ciencia mecanicista.

⁴⁷⁶ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 62.

⁴⁷⁷ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 210.

Todo ello condujo a crear en Bertalanffy la necesidad de idear una Teoría General de Sistemas, basada en una concepción totalizadora de la biología organicista, bajo la que se conceptualizará el organismo como un “sistema abierto”⁴⁷⁸, en constante intercambio con los sistemas circundantes por medio de complejas interacciones. En palabras del físico Jorge Wagensberg: “Bertalanffy sostenía, a mediados del siglo XX, que los sistemas se convertirían en el eje del quehacer científico. Pensaba que con los sistemas podrían darse respuestas más efectivas a los problemas naturales: biológicos, sociales y de conducta individual. Creía que serían la alternativa al ordenado mundo determinista, reduccionista y mecanicista que la ciencia generalmente aceptaba hasta entonces”⁴⁷⁹.

6.3. Tektología

En 1920, el médico, filósofo, físico y economista bielorruso Aleksándr Bogdánov queriendo unificar todas las ciencias sociales, cognitivas, biológicas y físicas, buscó los principios organizadores que subyacen a cualquier tipo de sistema vivo y no vivo, y consecuentemente formuló, bajo el nombre de “Tektología”, la primera propuesta original para una teoría general de sistemas, anticipándose veinte o treinta años a la publicación de la Teoría de Bertalanffy. Por fatalidad, la teoría de Bogdánov fue malentendida por sus contemporáneos por considerarla una nueva corriente filosófica que podía amenazar ideológicamente al materialismo dialéctico imperante en la época en la Unión Soviética, quedando sus obras prohibidas durante casi medio siglo.

Bogdánov en su objetivo de querer crear una “ciencia universal de la organización”, definiría la forma organizadora como “la totalidad de conexiones entre elementos sistémicos”, y sin quererlo se toparía con la definición contemporánea de patrón. Así mismo distinguiría tres clases de sistemas: complejos organizados, donde el todo es mayor que la suma de las partes; complejos desorganizados, donde el todo es menor que la suma de las partes; y complejos neutros, donde las actividades organizadoras y desorganizadoras se anulan mutuamente.

En cuanto a la estabilidad y desarrollo de todo sistema, su comprensión se fundaría en dos mecanismos de dinámica organizadora básicos: formación y regulación. Cuatro

⁴⁷⁸ Utiliza la concepción de sistema abierto como “esquema de interpretación” o de análisis para describir sistemas empíricos (organismos, máquinas, sociedades y organizaciones).

⁴⁷⁹ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo* ..., p. 40.

décadas más tarde, aunque en distinto lenguaje, estas mismas ideas claves serán seguidas por los biólogos organicistas y los cibernéticos Norbert Wiener y Ross Ashby. Así, en cuanto a la dinámica de formación de sistemas complejos, enfatizará la importancia de la tensión entre crisis y transformación. Demostrará cómo la crisis organizadora se manifiesta en tanto colapso del equilibrio sistémico existente, siendo a la par una transición organizadora hacia el nuevo estado de equilibrio. De este modo logrará adelantarse al trabajo en materia de termodinámica del físico Ilya Prigogine. Al mismo tiempo, al definir las distintas categorías de crisis, ya incluirá el término de “catástrofe”, concepto que se desarrollará en 1950 por el matemático francés Rene Thom, y será clave en la formulación de las actuales emergentes matemáticas de la complejidad.

En lo referente a la regulación, al igual que Bertalanffy, reconocerá los sistemas como “abiertos”, operando lejos del equilibrio. Denominará “birregulador” a los sistemas que se autorregulan (no precisan de regulación exterior), y también empleará el ejemplo del motor de vapor para definir el mecanismo de la “retroalimentación”, como varias décadas después lo harían los cibernéticos, demostrándose, una vez más, la universalidad de la teoría de Bogdánov, que no logrará su merecido reconocimiento hasta la década de 1970.

6.4. Teoría General de Sistemas

Aunque los términos “sistema” y “pensamiento sistémico” ya se venían empleando en el lenguaje científico, fueron las aportaciones de Bertalanffy sobre los sistemas abiertos y su teoría general de sistemas, junto a los últimos descubrimientos en cibernética, los que dieron al pensamiento sistémico y a la teoría de sistemas, el impulso necesario para ser empleados en múltiples aplicaciones y campos científicos.

Ludwing von Bertalanffy inició su carrera de biólogo en Viena a los veinte años. Estudió en el contexto del ya mencionado “Círculo de Viena”, conocido como el organismo científico y filosófico alemán promotor de una Filosofía de la Ciencia en base a las Matemáticas, la Lógica y la Física. Sus integrantes se hacían llamar “positivistas lógicos”, e insistían en que la única ciencia lícita era aquella cuyos objetivos de estudio eran visibles y comprensibles. Pero Bertalanffy, más orientado a la explicación de los fenómenos biológicos, trascendería los fundamentos mecanicistas imperantes, inclinándose por una visión más holista. Así centraría sus esfuerzos en establecer una

nueva teoría general de sistemas con una base fundamentalmente biológica: “La teoría general de sistemas es una ciencia general de “totalidad”, concepto que hasta ahora ha sido considerado vago, confuso y semimetafísico. En forma elaborada sería una disciplina matemática puramente formal en sí misma, pero aplicable a las demás ciencias empíricas. Para las ciencias relacionadas con “totalidades organizadas” tendría la misma significación que la teoría de probabilidades para las ciencias relacionadas con “sucesos aleatorios””⁴⁸⁰. Finalmente, Bertalanffy desafiaría a sus coetáneos a establecer una nueva teoría general de sistemas con base biológica dirigida hacia un nuevo conocimiento: el de “la complejidad”, partiendo de la idea de “evolución” que ya venía revolucionando el pensamiento científico con términos de cambio, crecimiento y desarrollo desde su primera aparición durante el siglo XIX.

7. LA LÓGICA DE LA MENTE

7.1. Cibernética

Mientras Ludwing von Bertalanffy trabajaba en su teoría general de sistemas, los intentos de idear máquinas autorreguladas abrían un campo de investigación totalmente nuevo, inspirando al matemático Norbert Wiener⁴⁸¹ a concebir la “cibernética” (palabra derivada del término que en griego designa “timonel”), ciencia que se iría desarrollando poco a poco con independencia de la biología organicista y de la teoría general de sistemas, y constituyéndose en un importante movimiento intelectual. Conceptos como la autorregulación, la retroalimentación y la autoorganización formarían parte de su discurso. El motivo central de su descripción, inspirado en la biología organicista y la psicología Gestalt, se centrará en los patrones de comunicación, redes y bucles cerrados característicos de la vida. Según Wiener “No somos materia perdurable, sino pautas que se perpetúan a sí mismas”⁴⁸².

El movimiento cibernético estaba constituido no por biólogos, sino por matemáticos, neurocientíficos, científicos sociales e ingenieros, de entre los que destacamos a Norbert Wiener, John von Neumann, Claude Shannon y Warren McCulloch

⁴⁸⁰ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 66.

⁴⁸¹ Norbert Wiener (1894-1964). Matemático estadounidense, conocido como el fundador de la cibernética.

⁴⁸² CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 71.

entre otros, todos ellos con intereses científicos comunes. Aunque su trabajo estaba ligado a fines militares y era financiado por el ejército, se propusieron descubrir los mecanismos neuronales del cerebro humano, de modo que mientras los biólogos organicistas se centraban en el lado material de la división cartesiana en contra del mecanicismo, explorando la constitución de la forma biológica, los cibernéticos se centraban en el lado mental, con la intención de crear una ciencia exacta de la mente.

El marco conceptual de la cibernética se gestó en los encuentros que tomaron el nombre de “Conferencias de Macy” en Nueva York a mediados de los cincuenta. Los participantes divididos en dos grupos, el de los cibernéticos originales citados anteriormente y el de los científicos de las humanidades como Gregory Bateson y Margaret Mead, se enzarzaban en intensos diálogos interdisciplinarios y fructuosos en ideas creativas y modos de pensar, orquestados principalmente por Wiener, quien además de matemático era un filósofo profundamente interesado en la biología, y por John von Neumann, matemático, autor de un tratado de teoría cuántica, e inventor de la teoría de juegos y del ordenador digital, el cual, fascinado por los procesos del cerebro humano, buscaba en su trabajo materializar lo que creía el poder de la lógica y la tecnología para dar con las estructuras universales del conocimiento científico. Ambos eran pioneros de la cibernética, pero con enfoques de la ciencia opuestos: Wiener centrado en la riqueza de los patrones naturales en busca de una síntesis conceptual, von Neumann en el control y el programa.

Durante las conferencias de Macy, Wiener y Bateson, más afines en ideas, buscaban patrones generales, abstracciones universales de corte interdisciplinar; en definitiva, descripciones extensivas y holísticas dentro de los límites científicos. Bateson, biólogo de formación, se adentraba libremente en los parámetros de la topología, la epistemología y la psiquiatría, en la exploración entusiasta de los patrones de organización comunes a esta diversidad, en la búsqueda, como él mismo definiría, del “patrón que conecta”. Por último, los principios cibernéticos le inspirarían a desarrollar un nuevo concepto de la mente que sería la pauta para la posterior comprensión de ésta como fenómeno sistémico, y a la superación de la división cartesiana entre cuerpo y alma en la ciencia.

Los avances cibernéticos se materializaron en los logrados modelos mecanicistas de los sistemas vivos, muy distintos a cualquier mecanismo cartesiano de relojería, fundamentalmente por su principio constituyente, el de “retroalimentación”, expresando un bucle consistente en la disposición circular de elementos casualmente conectados,

donde una causa inicial se propaga a través de los distintos eslabones del bucle, hasta que el último eslabón (“output”) retroalimenta al primero (“input”) en que el proceso comenzó, dando lugar a la autorregulación de todo el sistema. Demostración, según Wiener, del “control de una máquina en base a su comportamiento real, y no al esperado. [...] Traducido como el retorno de la información a su origen, a través del desarrollo de un proceso o actividad”⁴⁸³, como ocurriría con un timonel. De ahí la procedencia de su nombre. No obstante, las máquinas autorreguladas con bucles de retroalimentación ya existían mucho antes de que los cibernéticos actualizaran su uso, aunque sus inventores nunca sospecharon la pauta de circularidad que comportaban. Recordemos por ejemplo el regulador centrífugo ideado por James Watt a finales del siglo XVIII para los motores a vapor, o anteriormente los primeros termostatos.

Sus primeras aplicaciones se llevarían a cabo en el campo de la ingeniería, denominándose “máquinas cibernéticas”, hasta que en 1943 fuera publicado el artículo “Comportamiento, propósito y teleología”, en el que por primera vez se ilustraría la ampliación de su aplicación en el comportamiento de los organismos vivos. Bajo un argumento estrictamente conductista, se analizaban los patrones circulares de retroalimentación internos como un mecanismo intencionado por tener un objetivo que cumplir. Además, tanto Wiener como sus colegas reconocerán la “homeostasis” dentro de la retroalimentación, al ser un componente de la autorregulación que permite a los organismos vivos mantener su estado de equilibrio dinámico.

A día de hoy, y gracias a los cibernéticos, se considera a los bucles de retroalimentación una característica especial de los patrones no-lineales propios de los sistemas vivos. Los cibernéticos distinguían dos tipos de retroalimentación, como si de razones de proporción algebraicas se trataran: la autorreforzada o positiva, y la autoequilibrante o negativa. En el primer tipo se englobarían los que comúnmente se denominan círculos viciosos, en los que, a medida que se circula por el bucle, se va aumentando el efecto inicial. En la naturaleza es bastante extraordinario que se den casos de retroalimentación positiva. Generalmente son compensados con bucles de retroalimentación negativa, moderando su tendencia expansiva, como ocurre en el caso en que, en un ecosistema, las especies no sobrepueblan el medio por esos factores niveladores que lo equilibran.

⁴⁸³ *Ibidem*, p. 75.

Una de las principales aportaciones al pensamiento sistémico que el estudio de los patrones de organización supuso fue su condición de configuración abstracta en espiral y no circular, y por tanto distinta de su estructura.

7.2. Teoría de la información

Se trata de la parte de la cibernética ideada en los años cuarenta por Wiener junto a Claude Shannon, fundamentada no en el uso de la información como “significado”, como coloquialmente se emplea, sino basada en cómo recibir un mensaje codificado como una “señal” a través de un canal ruidoso. Wiener interpretó el mensaje codificado como un patrón de organización, y destacó la similitud entre los patrones de comunicación y las pautas de organización de los organismos vivos.

7.3. Cibernética del cerebro

En los años cincuenta y sesenta, el neurólogo Ross Ashby, ahora al frente del movimiento cibernético, ahondó mucho más en el estudio del sistema nervioso y en la producción de modelos cibernéticos de los procesos neuronales. Aunque retrocedió a una visión mucho más mecanicista y cartesiana de la cibernética que la que había tenido Norbert Wiener, empero obtuvo importantes avances en el estudio de la ciencia cognitiva, que concluyeron en la interpretación de los organismos vivos, según sus propias palabras, como energéticamente abiertos, aunque cerrados a la información y el control.

Durante décadas, los cibernéticos trabajaron afanosamente en descifrar la lógica de la mente y expresarla en el lenguaje matemático. El estudio del cerebro a nivel biológico, matemático, e ingenieril dio lugar a una representación del mismo a modo de circuito lógico constituido por neuronas, y a la invención tecnológica del primer ordenador por John von Neumann.

A partir de ese instante, se instauraría el modelo informático de la representación cerebral en la ciencia cognitiva, interpretando la actividad cerebral como un procesamiento de datos, y empleando de manera coloquial términos como “inteligencia”, “memoria” y “lenguaje”. No obstante, el modelo cibernético de considerar el cerebro como un ordenador fue muy fructífero en avances los primeros años de su investigación,

pero se instauraría como un dogma científico la restante década, sin tener ninguna progresión más, tal y como ocurriera con el modelo cartesiano basado en considerar el cuerpo como una máquina reloj durante todo el siglo XVII. Prueba de ello es que dicho modelo sigue vigente aún en nuestros días, y se conoce como “inteligencia artificial”.

Hoy sabemos, gracias a los últimos avances en ciencia cognitiva, que la inteligencia, la memoria y las decisiones humanas están condicionadas por las emociones, y por tanto no son únicamente racionales, ni pueden compararse con las de la inteligencia artificial de una máquina. Sin embargo, el gran prestigio que desde sus inicios tuvo la cibernética difundió de forma generalizada el uso de las “tecnologías de la información” en todos los ámbitos de la sociedad, incluida la educación. El empleo masivo por parte de la industria informática de eslóganes de venta en que los ordenadores se presentan como herramientas para “aprender” está desvirtuando el significado que se le da a la información como base del pensamiento, puesto que, en realidad, son las “ideas” con las que se piensa. Como bien expresa Theodore Roszak en su libro *The cult of information*, “Las ideas son patrones integradores que no derivan de la información, sino de la experiencia”⁴⁸⁴.

Por otra parte, si el conocimiento es considerado un valor libre constituido por datos abstractos, el conocimiento significativo, en cambio, necesita del contexto para darse, y se rige por convencionalismos culturales. Además, los cerebros humanos no son gobernados por reglas, no hay un procesador central lógico, y la información no se almacena localmente. Por el contrario, parecen operar sobre la base de una conectividad masiva, distribuyendo autoorganizativamente la información almacenada. A partir de los años setenta será precisamente este fenómeno, el de la autoorganización, el que en adelante inspire el avance del pensamiento sistémico.

8. REVITALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE SISTEMAS

8.1. Pensamiento sistémico aplicado

Durante los años cincuenta y sesenta se comenzaron a aplicar conceptos sistémicos y cibernéticos en la resolución de multitud de problemas prácticos surgidos en

⁴⁸⁴ *Ibidem*, p. 88.

campos como la ingeniería y la gestión de las empresas. El empleo, cada vez mayor, de las nuevas tecnologías en empresas con componentes, cada vez más cuantiosos, interactuando entre sí, precisaba de una gestión por parte de los ingenieros capaz de predecir las propiedades emergentes del sistema, y no sólo de cada uno de sus componentes. Así, lo que empezó siendo un método denominado de “análisis sistémico” para el planteamiento de operaciones militares durante la Segunda Guerra Mundial, pasaría, a partir de los años sesenta y setenta, a emplearse con la nueva denominación de “gestión sistémica orientada” para la resolución de problemas en el mundo de las empresas y los negocios. Por último, una década más tarde, Hans Ulrich idearía, con base en el mismo planteamiento, una visión de la organización empresarial como un sistema social vivo, incorporando matices de origen en campos como la biología, la ciencia cognitiva, la ecología y la teoría de la evolución, conociéndose en el entorno europeo empresarial como “modelo de St. Gallen”.

8.2. La aparición de la biología molecular

Si el modelo sistémico arraigó exitosamente en el mundo empresarial durante los años cincuenta y sesenta, en el campo de la biología molecular su influencia sería prácticamente inexistente, al ser eclipsada por el gran avance que en genética supondría el descubrimiento de la estructura física del ADN, inclinándose de nuevo la balanza del lado mecanicista.

Las nuevas investigaciones descubrieron que es en las moléculas, los componentes más básicos de los organismos, donde las características de todos ellos están codificadas en sus cromosomas con la misma sustancia química y con el mismo código.

Habían descubierto el alfabeto con el que está escrito el lenguaje de la vida, y desde ese momento la biología molecular, a pesar de ser una pequeña rama de las ciencias de la vida, impulsaría la tendencia a explicar todas las funciones biológicas en términos de estructuras moleculares y mecanismos reduccionistas.

8.3. Retroceso del pensamiento sistémico

El enfoque sistémico, por el contrario, sería vetado, entre otras razones, por carecer de una disciplina matemática capaz de describir la naturaleza altamente no-lineal observada tanto por Bogdánov, como por Bertalanffy en las configuraciones de las relaciones características de los sistemas vivos. Es decir, en la configuración de su patrón de organización.

Aunque el primer avance lo dieron los cibernéticos, que supieron describir fenómenos no-lineales como los bucles de retroalimentación, y redes neuronales, el principal progreso vendría en la década de los ochenta, con la fabricación de potentes ordenadores.

Finalmente, aunque los primeros planteamientos sistémicos nunca llegarían a materializarse en una teoría matemática formal, sí que darían como fruto importantes avances científicos, así como un nuevo lenguaje y clima intelectual que se conformaría en una serie de nuevos modelos sistémicos exitosos en los años ochenta.

8.4. La importancia del patrón

Los últimos avances en la comprensión de los sistemas vivos a finales de los años setenta se sustentaron en dos acontecimientos: el primero se cristalizará en la revelación de la nueva “matemática de la complejidad”, que expondremos más adelante; el segundo fue la generación del nuevo concepto de la “autoorganización”, que surgiría en el contexto de la cibernética, pero que no se desarrollaría plenamente hasta treinta años más tarde.

Para comprender el fenómeno de la autoorganización, previamente debemos entender la importancia del patrón de organización. La configuración de las relaciones características de un sistema, es decir, su patrón, se convirtió en el leitmotiv del pensamiento sistémico en cibernética.

Anteriormente, describimos la dicotomía suscitada a lo largo de la historia de la ciencia y de la filosofía entorno al estudio, bien de la substancia, de saber de qué están hechas las cosas y cuál es su estructura, bien del estudio de la forma, o de cómo es su patrón.

Una teoría completa de los sistemas vivos radicaría en la comprensión tanto de la substancia, y por tanto de sus cantidades, como del estudio del patrón, o de sus cualidades.

Sin embargo, teniendo en cuenta que lo que desaparece, cuando un sistema vivo se disecciona, es su patrón, aunque sus componentes permanezcan, al romperse la configuración que los relacionaba el organismo muere. Será principalmente el estudio del patrón el que resulte crucial para la comprensión de los seres vivos, ya que las propiedades sistémicas emergen de la configuración de relaciones ordenadas.

En la actualidad, los científicos reduccionistas consideran que los seres vivos están constituidos de la misma substancia, de los mismos átomos y moléculas que componen la materia inorgánica, por lo que las leyes biológicas pueden ser reducidas a la Física y a la Química. Pero los seres vivos no son sólo átomos y moléculas, están constituidos por algo más, algo inmaterial: el patrón de organización.

8.5. Redes: los patrones de la vida

En los años veinte los ecólogos empezaron a estudiar las redes de alimentación y reconocieron un patrón de organización común general a todos los seres vivos. La propiedad más característica de dicho patrón común era su disposición en forma de red. Seguidamente, los sistémicos comenzaron a generalizar los modelos en red para todos los sistemas de vida. Y más tarde los cibernéticos propusieron describir el cerebro como una red neuronal, ideando las técnicas matemáticas necesarias para describir su patrón. El cerebro está estructurado en una vasta red de células nerviosas (neuronas) interrelacionadas mediante un billón de conexiones (sinapsis). “Todo ello origina patrones intrincados de tramas interconectadas, redes anidando en el seno de redes mayores”⁴⁸⁵.

Toda red presenta la propiedad de no-linealidad, pues va en todas direcciones. Por lo que las relaciones de cualquier patrón en red también son no lineales. Concretamente, cualquier estímulo o mensaje puede viajar en un camino cíclico, pudiendo generar bucles de retroalimentación y regularse a sí mismo. Si en una red de comunicación activa se produce un error, para evitar que se vuelva al origen la comunidad podrá corregir dicho error mediante los bucles de retroalimentación, y organizarse mediante la autorregulación. En definitiva, podríamos argumentar que el patrón para la vida es un patrón autoorganizativo.

⁴⁸⁵ *Ibidem*, p. 100.

8.6. Aparición del concepto de autoorganización

Dicho concepto surge por primera vez cuando los científicos cibernéticos desarrollan modelos matemáticos simples de las redes que constituyen el sistema nervioso. En 1943, el neurocientífico Warren McCulloch y el matemático Walter Pitts publicaron un artículo que titularon “Un cálculo lógico de las ideas inmanentes en la actividad nerviosa”, donde se ponía de manifiesto que la lógica de cualquier proceso o comportamiento puede ser transformada en reglas para la construcción de una red. Mediante una representación de las neuronas simplificada a través de elementos conmutadores o nodos que pueden ser conectados en “marcha” y “paro”, dependiendo de la actividad previa de otros nodos, lograron una representación aproximada de las complejas redes del sistema nervioso.

Por último, en los años cincuenta se crearían los primeros modelos reales mediante la distribución de pequeñas bombillas en los nodos, que, si en un primer momento se encendían o apagaban de forma aleatoria, poco después derivarían en la emergencia de patrones ordenados en forma de ondas, de parpadeos fluyentes o de ciclos repetidos. A esta emergencia espontánea de orden se la denominó “autoorganización”.

Pronto, pensadores sistémicos como Ross Ashby emplearían dicho término para describir el funcionamiento del sistema nervioso. En un artículo publicado en 1947, “definiría un sistema autoorganizativo como aquel que reduce espontáneamente su entropía (que no tiene por qué ser entropía termodinámica) a base de reducir el número de sus estados potenciales. En otras palabras, Ashby identificaba la autoorganización con la simplificación”⁴⁸⁶. Incluso el físico y cibernético Heinz von Foerster encabezaría un grupo de investigación ajeno a la corriente reduccionista imperante, con base en el laboratorio de informática Biológica de la Universidad de Illinois, dedicado al estudio de la autoorganización. Foerster, interesado en buscar una medida de orden definitoria del aumento de orden implicado por la organización, se topó con el concepto de “redundancia”, que, según la teoría de la información de Claude Shannon, definía matemáticamente la cantidad de orden relativo de un sistema en relación al desorden posible del mismo. Así, Foerster desarrollaría su primer modelo reafirmando lo que en su día vaticinó Schrödinger acerca de los organismos vivos complejos, que un sistema vivo

⁴⁸⁶ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 254

autoorganizado no sólo absorbe orden del medio, sino que se alimenta de materia rica en energía integrándola en su propia estructura, aumentando así su orden interno.

En este punto introduciremos al físico Ilya Prigogine, quien trabajando en la generación de cambios redundantes en las condiciones físico-químicas de estos fenómenos, para mantenerlos lejos del equilibrio termodinámico, amplió el enfoque de Ashby, demostrando que la autoorganización es común a muchos procesos lejos del equilibrio a los que definió como estructuras disipativas (ya citadas en el capítulo II). Finalmente, durante los años sesenta y setenta, muchos científicos de diversas ramas redefinirían el concepto de autoorganización para aplicarlo a distintos sistemas. Entre ellos estarían: Hermann Haken y Manfred Eigen, James Lovelock, Linn Margulis, Humberto Maturana o Francisco Varela.

Los modelos derivados de la aplicación de los sistemas autoorganizadores poseerán características comunes básicas de la nueva y emergente teoría de sistemas, que aún se continúa redefiniendo a día de hoy:

- La primera característica estriba en que, a diferencia del concepto inicial de autoorganización ideado por Ashby en cibernética, donde los posibles cambios estructurales y de supervivencia del sistema dependían de un restringido fondo de variedad, en los nuevos modelos es propicia la creación de nuevas estructuras y modos de comportamiento en los procesos de desarrollo, aprendizaje y evolución.

- La segunda característica es que son sistemas abiertos al constante flujo de materia y energía, operando fuera del equilibrio.

- La tercera característica es la interconectividad no-lineal de los componentes del sistema. Esta pauta de no-linealidad se traduce físicamente en bucles de retroalimentación, y matemáticamente en ecuaciones no-lineales.

9. LAS MATEMÁTICAS DE LA COMPLEJIDAD

A pesar de venirse repitiendo a lo largo de la historia de la filosofía y de la ciencia la idea de los sistemas vivos como redes autoorganizadoras de componentes interconectados e interdependientes, sólo recientemente, a raíz del desarrollo de las matemáticas capaces de definir los modelos no-lineales de interconectividad de las redes, se han formulado detalladamente los sistemas autoorganizadores.

Se trata de una teoría no de fenómenos físicos, sino de una teoría matemática cuyos conceptos y técnicas han logrado descubrir un amplio espectro de fenómenos, de relaciones y patrones cualitativos, de los sistemas complejos.

Si contrastamos las nuevas matemáticas de la complejidad con las de la ciencia clásica apreciaremos mejor su novedad. La ciencia, como ahora la conocemos, empezó en el siglo XVI con Galileo Galilei, “considerado por sus seguidores como pitagórico”⁴⁸⁷, el cual formuló las leyes de la naturaleza en lo que se denominó la “filosofía natural”, mientras que cuando se refería a las matemáticas, en realidad quería decir “geometría”: “La filosofía, escribió, está escrita en el gran libro que permanece constantemente abierto ante nuestros ojos, pero no podemos comprenderlo si primero no aprendemos el lenguaje y los caracteres con los que está escrito. Este lenguaje es el de las matemáticas, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas”⁴⁸⁸.

Galileo seguiría el método heredado de los filósofos de la antigua Grecia consistente en geometrizar todos los problemas matemáticos. La leyenda cuenta que, sobre la entrada de la Academia de Platón de Atenas, principal escuela griega de ciencia y filosofía durante nueve siglos aparecía la siguiente inscripción: “No entre el que no esté familiarizado con la geometría”. E incluso, a día de hoy,

[...] prácticamente toda la ciencia actual se basa en las matemáticas, y no en vano el grado de madurez de una ciencia o civilización se mide a menudo en función del grado de “matematización” al que ha llegado. De este modo, la geometría fue una herramienta básica para la evolución tecnológica y científica de todas las civilizaciones, y al mismo tiempo puede afirmarse que las necesidades tecnológicas y científicas impulsaron el desarrollo de la geometría⁴⁸⁹.

Más adelante los filósofos islámicos en Persia desarrollarían un modo muy distinto de resolver los problemas matemáticos, aprendido de los matemáticos indios, denominado “álgebra” (derivación del árabe *al-yabr*, “reunión de partes”), que contiene ecuaciones en las letras tomadas del inicio del alfabeto que representan varios números constantes. Así, “el álgebra superior” comprenderá relaciones entre números “variables” representados por letras del final del alfabeto, llamadas “funciones”.

⁴⁸⁷ ALSINA, C. *La secta de los números. El teorema de Pitágoras*. Barcelona: RBA Coleccionables. 2011, p. 35.

⁴⁸⁸ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 130.

⁴⁸⁹ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 11.

La unificación de estos dos planteamientos de resolución de problemas provenientes de culturas distintas en la época de Galileo vendrá de la mano de René Descartes, también filósofo y matemático, pero una generación más joven que Galilei. Se le considerará el fundador de la filosofía moderna, y el creador del método de la geometría analítica mediante coordenadas que llevarán su nombre, “cartesianas”. Así, por ejemplo, según establece dicho método, si la relación de dos variables “x” e “y” de representación gráfica de coordenadas se corresponde con una línea recta, se dice que la ecuación es “lineal”, mientras que si se representan por una o varias variables elevadas a potencias, la línea será curva y la ecuación se denominará “no-lineal”.

9.1. Ecuaciones diferenciales

Aunque el nuevo método de Descartes permitía expresar las leyes de la mecánica de Galileo de forma algebraica y geométrica, no era aún posible describir la velocidad exacta de un cuerpo acelerado en un momento dado. Dos científicos, Isaac Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz desarrollarían teorías esencialmente barrocas en campos de investigación distintos, y, simultáneamente, darían con dicha fórmula. Se trataba del método conocido como cálculo, el cual se consideraría, a partir de ese momento, el umbral de “las altas matemáticas”. Dicho método permitiría calcular diferencias infinitamente pequeñas, adquiriendo el sobrenombre de “cálculo diferencial”. Su conocimiento abriría la posibilidad de análisis de innumerables fenómenos naturales, como el llevado a cabo por Isaac Newton, quien lograría describir mediante la aplicación de su cálculo los posibles movimientos de cuerpos sólidos en términos de una serie de importantes ecuaciones diferenciales conocidas como “ecuaciones newtonianas del movimiento”.

9.2. Enfrentándose a la complejidad

A lo largo de los siglos XVIII y XIX, las ecuaciones newtonianas del movimiento serán reformuladas por grandes matemáticos como Pierre Laplace, Leonhard Euler, Joseph Lagrange y William Hamilton, entre otros, sin modificar su contexto y permitiendo analizar un abanico enorme de fenómenos naturales que abarcará desde el

movimiento de los planetas, las mareas y los fluidos en general, hasta incluso la vibración de cuerdas, campanas y cuerpos elásticos, etc.

El éxito de la aplicación de las leyes newtonianas del movimiento sería tal que los científicos de principios de siglo XIX llegarían a pensar en el universo como un inmenso y predecible sistema mecánico. Sin embargo, poco a poco y en la práctica se verían las limitaciones que la aplicación exclusiva de este método mecanicista supondría en el intento de desentrañar la mayoría de los complejos fenómenos que en la naturaleza se dan.

Aunque los científicos habían observado el comportamiento regular de los gases, formulando sus leyes en simples relaciones matemáticas entre temperatura, volumen y presión, se preguntaban cómo desentrañar la complejidad del movimiento de cada una de sus partículas. Sería el físico James Clerk Maxwell quien propondría un método estadístico que, aun cuando no esclarecerá el comportamiento exacto e individual de las moléculas, si lo hará del comportamiento promedio causante de su regularidad observada. Para concluir, la combinación de los nuevos métodos estadísticos y de la mecánica newtoniana dará como fruto una nueva rama de la ciencia denominada “mecánica estadística”, que a su vez se convertiría en la base teórica de la teoría del calor o termodinámica.

9.3. No-linealidad

En el siglo XIX existían por tanto dos herramientas matemáticas para representar los distintos fenómenos naturales: las ecuaciones exactas y deterministas para el movimiento de sistemas sencillos, y las ecuaciones de la termodinámica basadas en el análisis estadístico de cantidades medias para los sistemas más complejos. Ambas técnicas se basaban en ecuaciones lineales, y aunque las ecuaciones newtonianas también servían para representar ecuaciones no-lineales, debido a la gran dificultad de resolución de las mismas se evitaría en la medida de lo posible estudiar fenómenos demasiado complejos, o se intentarían reemplazar por aproximaciones lineales. Por lo que, si durante el siglo XVIII el mundo era considerado una máquina de relojería, en el siglo XIX y XX la mayoría de los científicos lo considerarían lineal.

A lo largo de las últimas décadas, el descubrimiento de los fenómenos no-lineales ha supuesto un gran impacto para la ciencia, llegando a dominar mucho más el mundo

inanimado de lo que se creía en un principio, además de ser esenciales en la constitución de los patrones en red de los sistemas vivos.

Entre las nociones que ha habido que revisar están lo que entendemos por simplicidad y complejidad. Se creía erróneamente que, en el mundo de las ecuaciones lineales, sistemas descritos por ecuaciones simples se comportaban simplemente, mientras que los descritos por ecuaciones complicadas eran complicados. Sin embargo, en el mundo no-lineal, que incluye la mayor parte del mundo real, simples ecuaciones deterministas pueden describir insospechadas y variadas formas de comportamiento, mientras un comportamiento complejo y caótico puede dar lugar a estructuras ordenadas. Los sistemas caóticos ya no son meramente aleatorios, sino que muestran un nivel profundo de orden pautado. Otra noción que ha variado es la no predictibilidad de muchos sucesos, promovida por el nuevo énfasis en el análisis cualitativo en detrimento del cualitativo.

9.4. Retroalimentación e iteraciones

Otra propiedad a destacar de los sistemas no-lineales es la frecuencia con la que surgen los procesos de retroalimentación reforzada.

Si en los sistemas lineales pequeños cambios producen pequeñas consecuencias, y los grandes producen grandes efectos, o son resultado de muchos pequeños cambios, en los sistemas no-lineales, por el contrario, pequeños cambios pueden tener grandes efectos, debido a la propiedad de repetición aumentada por la retroalimentación autorreforzadora. Así un bucle de retroalimentación corresponde a una determinada clase de iteración (del latín *iterare*, “repetir”, “reiterar”), en la que una función opera sobre sí misma. Estos procesos altamente complejos e impredecibles se conocen técnicamente como caos.

9.5. Poincaré y las huellas del caos

La búsqueda de explicaciones matemáticas para aquellas manifestaciones de la naturaleza que están dotadas de cierto orden, de pautas, es imprescindible. ¿Qué hacemos, sin embargo, con aquello que no se somete a pautas? Según los divulgadores Ian Stewart y

Martin Golubitsky, el caos aporta nuevas pautas de regularidad a partir del desorden aparente. Pero, por mucho que demos vueltas a las definiciones, el caos en sentido literal no debería tener ningún tipo de pauta. Stewart y Golubitsky se están refiriendo, de hecho, a un tipo especial de caos, el concepto matemático que surgió en el marco de la llamada teoría de sistemas dinámicos. La idea de que el caos, entendido como ausencia radical de pautas, no existe, forma parte de nuestra creencia ancestral de que hay una teoría global que lo explica todo, ya sea la teogonía, la alquimia... o la ciencia⁴⁹⁰.

Así, aunque la teoría de los sistemas dinámicos y las matemáticas que han traído orden al caos se han desarrollado recientemente, ya a principios de siglo XX el matemático francés Jules Henri Poincaré estableció sus primeros principios.

A finales del siglo XIX, Poincaré se dio cuenta, estudiando la dinámica de los fluidos, de que algunos fenómenos impredecibles podían acontecer en sistemas en los que un pequeño cambio en el presente provocase otro mucho mayor en el futuro:

Una causa muy pequeña que escapa a nuestra atención determina un efecto considerable que no podemos dejar de observar, y entonces decimos que el efecto es debido al azar [...] Aun cuando se diese el caso de que las leyes de la naturaleza no tuviesen ningún secreto para nosotros, incluso así sólo podríamos conocer la situación inicial aproximadamente. Si esto nos permitiese predecir la situación siguiente con la misma aproximación, eso es todo lo que necesitaríamos, y diríamos que el fenómeno había sido predicho, y que está gobernado por leyes. Pero no siempre es así; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan otras grandes en el fenómeno final: un pequeño error en las primeras produciría un abultado error en las segundas: la predicción se hace imposible, y aparece el fenómeno fortuito⁴⁹¹.

Según la reflexión de Poincaré, cualquier efecto, por pequeño que sea, puede adquirir proporciones macroscópicas, siendo esta una de las principales propiedades del caos, precisando por tanto de un análisis matemático más pormenorizado y cualitativo. Su gran aportación a la ciencia consistió en devolver los patrones visuales a las matemáticas eminentemente analíticas que Laplace, con su “mecánica analítica”, había impuesto. Estas matemáticas visuales de patrones y relaciones de Poincaré en nada se asemejarán a la geometría de Euclides, y se conocerán como topología. La topología es

⁴⁹⁰ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 16.

⁴⁹¹ CRUTCHFIELD, J. P.; DOYNE FARMER, J.; PACKARD, N. H. y SHAW, R. “Caos”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, p. 8.

una geometría en la que todas las longitudes, ángulos y áreas pueden ser distorsionados a voluntad, tratando precisamente de las propiedades de las figuras geométricas que no cambian cuando la figura es transformada. Al analizar las características cualitativas de los problemas dinámicos complejos, Poincaré asentaría las bases de las matemáticas de la complejidad, que un siglo después emergerían. Aplicando su método topológico conseguiría resolver el hasta ese momento problema indescifrable del movimiento relativo de tres cuerpos sometidos a sus respectivas atracciones gravitatorias. Como el mismo Poincaré aseveraría: “Cuando uno trata de describir la figura formada por estas tres curvas y sus infinitas intersecciones, uno descubre que estas intersecciones forman una especie de red, trama o malla infinitamente espesa; ninguna de las curvas puede cruzarse a sí misma, pero se repliega de un modo muy complejo para pasar por los nudos en red un número infinito de veces. Uno queda sorprendido ante la complejidad de esta figura que no puedo siquiera intentar de dibujar”⁴⁹². Aquello que Poincaré intentaba visualizar es lo que se conoce como “atractor extraño”. Sin embargo, el pionero hallazgo de Poincaré quedaría relegado por los descubrimientos de dos de sus coetáneos: la Física Cuántica de Max Planck, y la Teoría de la Relatividad de Albert Einstein, no saliendo a la luz hasta los años sesenta, cuando los científicos retomen el estudio de las complejidades del caos.

El marco general del que emerge el caos es la llamada teoría de los sistemas dinámicos. Un sistema dinámico consta de dos partes: la noción de estado (información esencial sobre el sistema) y una dinámica (una regla que describe cómo evoluciona el estado en el tiempo). Su evolución puede representarse en el “espacio de configuraciones” o “espacio de estados”: un espacio abstracto cuyas coordenadas definen el estado. Dichas coordenadas varían según el contexto. Un buen ejemplo de sistema dinámico lo constituye el péndulo con rozamiento, que con el tiempo terminará por detenerse. Lo que significa que su órbita se aproximará a un punto concreto del espacio de configuraciones que no se mueve y que, por tanto, atraerá las órbitas próximas. Es lo que recibe el nombre de “atractor”. Luego un atractor es la región del espacio de estados que caracteriza un sistema a largo plazo, y, en consecuencia, la configuración a la que tiende el sistema con el paso del tiempo.

En las últimas tres décadas la aplicación del enfoque topológico de Poincaré, junto al desarrollo de potentes ordenadores, han permitido a los investigadores el

⁴⁹² CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 144.

descubrimiento de patrones ordenados en sistemas caóticos. Dichos ordenadores han sido programados para resolver las complejas ecuaciones no-lineales asociadas a los fenómenos caóticos, no ya en forma analítica o numérica, sino en forma de curva, en un gráfico, para así descubrir orden tras el aparente caos.

Tras explorar mediante esta técnica gran variedad de sistemas complejos, los científicos se sorprendieron al descubrir que existe un número muy reducido de atractores, cuyos tres modelos más básicos y predecibles facilitan pronosticar con exactitud el comportamiento del sistema:

- Atractores puntuales: correspondientes a sistemas dirigidos a un equilibrio estable. Este es el caso asociado a un péndulo con rozamiento, el cual llega siempre a la misma posición con independencia del modo en que comience a oscilar.

- Atractores periódicos: correspondientes a oscilaciones periódicas, forman un bucle en el espacio de configuraciones y describen oscilaciones estables, como el movimiento de un reloj de péndulo, o los latidos del corazón.

- Atractores cuasi-periódicos: con oscilaciones compuestas, correspondientes a un atractor en forma de toro, como los que hallamos en osciladores eléctricos.

Hasta los años sesenta los atractores conocidos eran totalmente predecibles. Sin embargo, en 1963, Edward Lorenz, del Instituto de Massachusetts, motivado por el deseo de entender la impredecibilidad del tiempo meteorológico, descubrió un sistema distinto de los hasta ese momento conocidos, al que denominó atractor de Lorenz. Se trataba del primer atractor extraño correspondiente a sistemas caóticos, donde los movimientos son impredecibles y adquieren formas geométricas más complejas. Usando un ordenador para simular su modelo, esclareció el mecanismo básico responsable del azar observado, en el que las perturbaciones microscópicas se amplificaban hasta afectar al comportamiento macroscópico. A gran escala, un atractor caótico no presenta una superficie suave, sino que se pliega sobre sí misma una y otra vez. “Un atractor caótico es, por tanto, un fractal: un objeto que siempre revela nuevos detalles a medida que lo amplificamos”⁴⁹³.

En resumen, podemos decir que los atractores extraños o caóticos se caracterizan por su extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, de ahí que sean muy difíciles de predecir en su totalidad. Así mismo, estas nuevas matemáticas representan el cambio de enfoque de la cantidad a la cualidad, el cual caracteriza el pensamiento sistémico en general. La teoría de sistemas dinámicos, a diferencia de las matemáticas convencionales

⁴⁹³ CRUTCHFIELD, J. P.; DOYNE FARMER, J.; PACKARD, N. H. y SHAW, R. “Caos” ..., p. 13.

centradas en la cantidad y en las fórmulas analíticas, se ocupa fundamentalmente de la cualidad y del patrón.

Cuando se llevan a cabo observaciones de un sistema físico, los inevitables errores de medición impiden la especificación de su estado con total exactitud. Los sistemas predecibles no son especialmente sensibles a los errores de medición. Por el contrario, “las operaciones de estirado y plegado de atractor caótico eliminan sistemáticamente la información inicial, y la sustituyen por otra nueva: los estirones amplían las incertidumbres en escalas pequeñas, mientras que los pliegues acercan trayectorias que estaban muy separadas y destruyen información en escalas muy grandes. De esta manera, los atractores caóticos actúan como multiplicadores que elevan las fluctuaciones microscópicas a una escala macroscópica [...] Con el tiempo, se pierde toda conexión causal entre el pasado y el futuro”⁴⁹⁴.

El caos supone un nuevo desafío para el punto de vista reduccionista que hasta hace poco ha venido prevaleciendo en ciencia, y que establece que cualquier sistema puede conocerse al descomponerle en sus partes constituyentes, estudiando cada una de ellas. Por el contrario, un sistema caótico puede exhibir un comportamiento complejo, que emerge de interacciones simples, pero no lineales, entre unos pocos componentes, y que, en general, no puede deducirse del análisis de sus componentes individuales.

Los puntos sensibles de inestabilidad que en un atractor pueden cambiar, haciendo que todo el sistema se encamine en una nueva dirección, apareciendo nuevas formas de orden, son lo que se denomina “puntos de bifurcación”. Como demostró Prigogine, tales inestabilidades sólo pueden producirse en sistemas abiertos, operando lejos del equilibrio. Al igual que de atractores, sólo existe un número reducido de tipos distintos de bifurcación. Uno de los primeros matemáticos que en los años sesenta se ocupó de la clasificación de las bifurcaciones fue René Thom, quien acuñó para ellas el nuevo término de “catástrofes”.

Por otra parte, el caos no sólo debe enfocarse desde el punto de vista de las limitaciones que impone, como por ejemplo la falta de predictibilidad. En ocasiones, la naturaleza puede emplear el caos de manera constructiva. Así, amplificando pequeñas fluctuaciones, se propicia que los sistemas naturales desarrollen comportamientos novedosos, necesarios para que se dé la evolución biológica. Es el caso, por ejemplo, que podría suponer el control caótico del vuelo como elemento sorpresa, que evitase a una

⁴⁹⁴ *Ibidem*, p. 14.

presa ser capturada por un predador. También hace tan sólo hace unos pocos años los fisiólogos y médicos han empezado a poner en entredicho principios sostenidos hasta hace poco al cuantificar las posibilidades de la dinámica caótica en sus investigaciones. Si anteriormente se consideraba al estrés el causante de muchos comportamientos erráticos y enfermedades, minimizando el “orden” del organismo, en la actualidad se ha conocido que el corazón y otros sistemas fisiológicos pueden tener, estando sanos y siendo jóvenes, un comportamiento sumamente errático, mientras que contrariamente a la lógica, son el envejecimiento y la enfermedad los que traen consigo una creciente regularidad. Así,

En el cuerpo humano abundan esas estructuras fractaliformes, ya que podemos observarlas tanto en las redes nerviosas como en los vasos sanguíneos y en otros conductos. Aunque estas estructuras tienen funciones en apariencia dispares, existen aspectos fisiológicos comunes. Las ramificaciones y repliegues fractales amplifican en gran medida la superficie de las áreas de absorción (por ejemplo, en el intestino), de distribución o recolección (de los vasos sanguíneos, de los conductos biliares o de los tubos bronquiales) y del procesamiento de la información (los nervios). Debido en parte a su redundancia e irregularidad, las estructuras fractales son robustas y resistentes a lesiones. El corazón, por ejemplo, puede continuar bombeando aun cuando el sistema que se encarga de conducir los impulsos eléctricos cardíacos haya sufrido grandes daños. Si se escuchan los latidos del corazón, el ritmo parece ser regular. En un individuo en reposo, la intensidad del pulso y el intervalo de los latidos se muestra sensiblemente constante. Un análisis más minucioso revela, en cambio, que los ritmos cardíacos de los individuos sanos fluctúan considerablemente, incluso en reposo. Cuando se los representa gráficamente a lo largo del día, la imagen de esta serie temporal aparece desagarrada, irregular y, a primera vista, completamente aleatoria. Por el contrario, si se representan a diferentes escalas temporales, emerge la autosemejanza. [...] En comparación, los individuos sanos presentan en todos los gráficos y para todas las mediciones un aspecto errático, con un amplio espectro de valores. Paradójicamente, son los sistemas sanos los que presentan comportamientos caóticos. ¿Por qué habrían de mostrar una dinámica caótica el ritmo cardíaco y otros sistemas controlados por el sistema nervioso? Tales dinámicas pueden ofrecer numerosas ventajas funcionales. Los sistemas caóticos son capaces de operar bajo una amplia gama de condiciones, y son, por consiguiente,

adaptables y flexibles. Esta plasticidad permite a los sistemas desafiar las exigencias de un ambiente cambiante e impredecible⁴⁹⁵.

Así mismo,

El mismo progreso intelectual se basa en la inyección de nuevas ideas y nuevos modos de conectar las viejas. La propia creatividad podría basarse en un proceso caótico que amplificase selectivamente pequeñas fluctuaciones, y las modelase hasta dar lugar a los estados mentales macroscópicos, que experimentamos en forma de pensamientos. En algunos casos, esos pensamientos pueden ser decisiones, o lo que experimentamos como un ejercicio de nuestra voluntad. Desde esta perspectiva, el caos proporciona un mecanismo que permite el libre albedrío en un mundo gobernado por las leyes deterministas⁴⁹⁶.

En definitiva, el caos puede proporcionar una forma de estructurar los cambios aleatorios, haciendo que esta variabilidad se encuentre bajo el control evolutivo.

9.6. Geometría fractal

Tras el descubrimiento de los atractores extraños, en los años sesenta y setenta surgirá una nueva geometría llamada “geometría fractal”, idónea para describir matemáticamente las minuciosas estructuras de los atractores caóticos. Su creador será el matemático francés Benoît Mandelbrot, quien, tras analizar una gran variedad de fenómenos naturales irregulares que en la naturaleza se producen, se dará cuenta de las características comunes que muestran estas formas geométricas a las que denominará “fractales”. La geometría fractal creada por Mandelbrot servirá para describir y analizar la complejidad del mundo natural que nos rodea, cuyos patrones característicos se encuentran repetidos en escalas descendentes, de modo que sus partes, en cualquier escala, son semejantes, en forma, al conjunto. Esta propiedad, denominada “auto semejanza”, se manifiesta en múltiples ejemplos de la naturaleza, desde las líneas costeras o las ramas de un árbol, hasta los vasos sanguíneos, un relámpago, el delta de un río, etc.

⁴⁹⁵ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, pp. 90-91.

⁴⁹⁶ CRUTCHFIELD, J. P.; DOYNE FARMER, J.; PACKARD, N. H. y SHAW, R. “Caos” ..., p. 17.

Lo que Mandelbrot no llegaría a sospechar son las enormes conexiones que entre la teoría fractal y la teoría del caos existen:

- Si se amplían fragmentos de la estructura, los atractores extraños revelarán una subestructura multinivel en la que los mismos patrones se repiten una y otra vez exhibiendo exquisitos ejemplos de fractales.

- Al igual que las nuevas matemáticas del caos representan el cambio de la cantidad a la cualidad, la geometría fractal no permite predecir con exactitud la longitud o el área exacta de una figura fractal, pero sí puede definir de modo cualitativo su grado de “mellado”. El grado variable del mismo se denomina “dimensión fractal”, siendo mayor cuanto más abrupto sea su perfil.

La forma más precisa adoptada para representar las manifestaciones fractales que se dan en la naturaleza se basa en la construcción de figuras geométricas que exhiben autosemejanza, denominadas “falsificaciones fractales”, y reproducidas mediante la técnica de la iteración. Una de las más conocidas figuras, que fue definida por primera vez por el matemático sueco Helge von Koch en 1904, es “la curva de Koch”, a la que también se la conoce como “el copo de nieve de Koch”, y que posteriormente Mandelbrot definió como “un tosco, pero vigoroso modelo de línea costera”⁴⁹⁷. Su construcción se inicia con un triángulo cuyos lados tienen longitud 1, sobre los que se añade un nuevo triángulo que mide un tercio del original, y así sucesivamente. La longitud límite es $3 \times \frac{4}{3} \times \frac{4}{3} \dots = \text{infinito}$. En definitiva,

Existen diferentes formas de clasificar los fractales de acuerdo con las propiedades que los describen. En función de su grado de autosemejanza, por ejemplo, los fractales pueden ser clasificados en cinco amplias categorías:

- Autosemejantes: este es el tipo más restrictivo, pues exige que el fractal aparezca idéntico a diferentes escalas. Lo encontramos en el conjunto de Cantor, el triángulo de Sierpinsky, la cuna de Peano, el copo de nieve de Von Koch, la curva dragón, la esponja de Menger, etcétera.
- Lineales: son aquellos que se construyen a partir de afinidades. Los fractales de este tipo contienen copias pequeñas transformadas por funciones lineales como, por ejemplo, la hoja de un helecho de Barnsley.
- Autosimilares: los fractales de este tipo contienen copias más pequeñas transformadas por funciones no lineales, como los conjuntos de Julia.

⁴⁹⁷ MANDELBROT, B. *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona: Tusquets, 1988, p. 35.

- Cuasiautosimilares: en ellos se exige que el fractal parezca más o menos idéntico a diferentes escalas. Los fractales por relaciones de recurrencia, como el conjunto de Mandelbrot o el fractal de Lyapunov, son normalmente de este tipo.
- Autosimilares estadísticamente: es el tipo más débil de autosimilitud, y requiere que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas que se preserven con el cambio de escala. Un ejemplo lo constituyen los fractales aleatorios, entre ellos el movimiento browniano, el vuelo de Lévy, los paisajes fractales o los árboles brownianos⁴⁹⁸.

9.7. Números complejos

Mandelbrot fue capaz de descubrir una estructura matemática que, a pesar de su gran complejidad, logró describir mediante un procedimiento iterativo muy simple, la denominada *serie fractal de Mandelbrot*. Los números complejos son la base de esta serie. Haciendo un breve repaso a la historia de las matemáticas, entenderemos mejor su importancia. Ya en la Edad Media los matemáticos encontraron que era complicado resolver mediante el método habitual de la línea numérica ciertas ecuaciones algebraicas, concretamente las constituidas de raíces cuadradas o números negativos. Este problema se prolongó hasta la época de Descartes, que denominó a dichas ecuaciones “imaginarias”, al considerar que no tenían solución. Tuvo que llegar el siglo XIX para que el gran matemático Karl Friederich Gauss ideara un sistema de “análisis complejo” de coordenadas basado en un par de ejes perpendiculares, “real” e “imaginario”, donde poder representar, ahora sí, dichas ecuaciones imaginarias y todas sus posibles combinaciones, recibiendo la denominación de “números complejos”.

Lo que Mandelbrot hizo para idear su serie fractal a finales de los años setenta fue, basándose en la serie concebida por el matemático francés Gaston Julia en la primera mitad del siglo, generarla matemáticamente por procesos iterativos en el plano complejo, mediante la utilización de potentes ordenadores de alta velocidad. Mediante este procedimiento, y como diría el matemático francés Adrien Douady, “Obtienes una increíble variedad de series Julia” [...] “Algunas parecen gordas nubes, otras ligeras malezas de zarzas, otras se asemejan a las chispas que flotan en el aire tras un fuego de artificio, alguna tiene un aspecto de un conejo, muchas tienen colas de hipocampo”⁴⁹⁹. Lo

⁴⁹⁸ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 127.

⁴⁹⁹ CAPRA, F. *La trama de la vida...*, p. 162.

más sorprendente ya no es la enorme variedad semejante a las formas vivas, sino que aumentando de escala cualquier fragmento aparece más y más el detalle fractal de la secuencia de patrones dentro de patrones idénticos.

Mandelbrot, tratando de clasificar la inmensa variedad de las series Julia, descubrió un modo muy sencillo de crear una sola imagen en el plano complejo, que sirviese de catálogo para todas las posibles series. Esta única imagen se ha convertido en el símbolo visual de las nuevas matemáticas de la complejidad, pasando a denominarse “la serie Mandelbrot”: “No es solo una fuente de patrones de infinito detalle y variedad; no solo es autosemejante, puesto que repite los mismos patrones una y otra vez incluyendo réplicas de la propia serie entera, sino que... ¡contiene también elementos de un número infinito de series de Julia! Es, pues, un superfractal, de inconcebible complejidad”⁵⁰⁰.

A diferencia de las matemáticas clásicas, donde fórmulas simples daban formas sencillas y fórmulas complejas, en la geometría fractal, al igual que en la teoría de caos, ocurre justo lo contrario, ecuaciones sencillas pueden dar lugar a atractores extraños de enorme complejidad, y reglas sencillas de iteración dar lugar a complicadas estructuras.

10. PRIMERA SÍNTESIS DE IDEAS PARA EL CONOCIMIENTO DE LA EMERGENTE TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD

10.1. Autopoiesis: la organización de lo vivo

Como primera síntesis de una posible teoría que sustente la organización de lo vivo introduciremos la obra de neurocientífico Humberto Maturana, que dedicó su vida, tanto en Inglaterra como en EE. UU., a la investigación en biología, colaborando en cibernética con el grupo de Warren McCulloch en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Regresó en 1960 a la Universidad de Santiago de Chile para especializarse en neurociencia, específicamente en el estudio de la percepción del color. Su doble formación le permitiría abordar los problemas sistémicos hasta ese momento en vigor entre los biólogos organicistas, explorando la organización de lo vivo, y los problemas cibernéticos, intentando comprender la naturaleza de la mente.

⁵⁰⁰ *Ibidem*, p. 167.

En 1986, invitado por Heinz von Foerster a participar en el grupo interdisciplinario de investigación de la Universidad de Illinois, tuvo oportunidad de exponer sus ideas sobre la cognición como fenómeno biológico en un simposio sobre cognición celebrado en Chicago unos meses más tarde. En una de sus exposiciones, Maturana dijo: “Mis investigaciones sobre la percepción del color me llevaron a un descubrimiento que resultó extraordinariamente importante para mí: el sistema nervioso opera como una red cerrada de interacciones, en la que cada cambio de las relaciones interactivas entre ciertos componentes resulta siempre en un cambio de las relaciones entre otros componentes”⁵⁰¹.

Dos son las conclusiones a las que llegó a raíz de esta idea:

- La organización básica de todos los organismos vivos es la “organización circular” del sistema nervioso: “Los sistemas vivos [...] están organizados en un proceso causal circular cerrado, que permite el cambio evolutivo, de modo que la circularidad sea mantenida, pero que no admite la pérdida de dicha circularidad”⁵⁰². Maturana argumenta que, puesto que todos los cambios en el sistema se desarrollan dentro de esta circularidad básica, los componentes que especifican la organización circular también serán producidos y mantenidos por ésta. Luego ese patrón de organización, en que la función de cada componente consiste en ayudar a producir otros componentes manteniendo al mismo tiempo la circularidad global de la red, sería el fundamental de la organización de lo vivo.

- En relación a la cognición, y puesto que el sistema nervioso no sólo es autoorganizador, sino también autorreferente, la percepción ya no puede ser contemplada como la representación de una realidad externa, sino que debe ser entendida como la creación continua de nuevas relaciones en el interior de la red neuronal: “Las actividades de las células nerviosas no reflejan un entorno independiente del organismo vivo y, por lo tanto, no permiten la construcción de un mundo existente de un modo absolutamente externo”⁵⁰³. De este modo, la percepción, y de modo más general la cognición, no representan una realidad externa, sino que la especifican a través de los procesos del sistema nervioso de organización circular. “Los sistemas vivos son sistemas cognitivos, y el proceso de vivir es un proceso cognitivo. Esta afirmación es válida para los organismos que tengan o no sistema nervioso”⁵⁰⁴.

⁵⁰¹ *Ibidem*, p. 113.

⁵⁰² *Ibidem*, p. 113.

⁵⁰³ *Ibidem*, p. 114.

⁵⁰⁴ *Ibidem*, p. 114.

En 1970 Maturana publicaría sus ideas y, junto a su exalumno Francisco Varela, comenzaría a trabajar en el desarrollo de una descripción verbal y matemática de su pensamiento, al que acabarían denominando *autopoiesis*, donde *Auto* significa “sí mismo”, en referencia a la autonomía de los sistemas autoorganizadores, y *poiesis*, “creación”. A pesar de defender primigeniamente un enfoque mecanicista cartesiano, especificarían su compromiso sistémico diciendo: “Nuestro objetivo de estudio es la organización de la vida y, por tanto, nuestro interés no se centrará en las propiedades de los componentes, sino en los procesos y relaciones entre los procesos realizados entre los componentes” ⁵⁰⁵. En todo momento, Maturana y Varela enfatizarán la importante distinción entre “organización” y “estructura”, que si hacemos memoria sólo se comenzaría a tener en cuenta dentro del pensamiento sistémico a partir del desarrollo de la cibernética. Y explicarán que, si bien la organización en un sistema vivo es un conjunto de relaciones entre sus componentes que caracteriza al sistema como perteneciente a una clase determinada, siendo esta descripción organizativa totalmente abstracta, centrada en sus relaciones sin identificar a los componentes, en cambio la estructura de un sistema estará constituida precisamente por las propias relaciones entre los componentes físicos. Según Maturana y Varela, la autopoiesis es un patrón general de organización común a todos los sistemas vivos, cualquiera que sea la naturaleza de sus componentes. Por tanto, su objetivo es la organización, no así la estructura de los sistemas vivos. Se trata de una red de procesos de producción, en la que la función de cada componente es que otros se produzcan y transformen, por lo que la red se hace a sí misma continuamente. A su vez, especifican que la organización autopoiesis de los sistemas vivos incluye la creación de un perímetro que especifica el territorio de las operaciones de la red, y define el sistema como unidad, por lo que los sistemas catalíticos en particular no se pueden considerar vivos, dado que sus fronteras están determinadas por factores ajenos al proceso, como puede ser el recipiente físico donde tienen lugar.

En este punto, teniendo ya la caracterización de los modelos autoorganizativos orientados a la organización de los sistemas vivos como los empleados por Eigen y Maturana y Varela por un lado, y los modelos autoorganizativos orientados a la estructura como los utilizados por Prigogine y Haken; y habiendo sido formulados los modelos y teorías matemáticas detalladas de los sistemas organizadores de características comunes, como el flujo continuo de materia y energía a través del sistema, el estado

⁵⁰⁵ *Ibidem*, p. 114.

estable lejos del equilibrio, la aparición de nuevos patrones de orden, el papel central de los bucles de retroalimentación, y la descripción matemática en términos de ecuaciones no-lineales, ya estamos en situación de poder sintetizar una teoría coherente de los sistemas entencionales vivos.

10.2. Nuevos estudios sobre la consciencia

También el neurólogo Roger Sperry⁵⁰⁶ actualizaría los argumentos emergentistas aplicados, ahora, al estudio de la consciencia. En un artículo publicado en 1980, Sperry argumentaba que, si bien la Física básica no variaba con la evolución de la consciencia, las propiedades del sistema entero de moléculas interactuantes en el cerebro, que constituyen lo que llamamos “consciencia”, eran totalmente distintas a las que esas mismas moléculas exhibirían organizadas de otra forma, o fuera del cerebro. Por tanto, la pertenencia de dichas moléculas a una totalidad inducía una aparición de respuestas que, de adoptar otra disposición, no existirían; luego, en ese sentido, son nuevas.

Empleando como ejemplo ilustrativo una rueda, expondrá que, aunque las partículas, átomos y moléculas más elementales constitutivas de la sustancia de la misma no varían individual ni iterativamente, por la circunstancia de formar la rueda, en virtud de las restricciones de su movilidad relativa mutua, tienen la propiedad colectiva de poder desplazarse de una manera determinada por su forma. La capacidad de rodar sólo aparece como propiedad colectiva de desplazamiento, que es producto de una configuración macroscópica, a pesar de lo cual tiene consecuencias para las partes componentes: les permite desplazarse en el espacio. Pertenecer a este colectivo les proporciona nuevas posibilidades, a base de restringir otras.

Otro de los temas recurrentes que se pone de manifiesto aquí, en relación con la emergencia, es el concepto de “causación descendente” que afecta a sus partes, nacida de su forma. De no formar parte de la rueda, sería muy improbable que los átomos individuales se movieran en espiral en el plano en una misma dirección. El efecto configurativo del todo sobre las partes es lo que más adelante denominaremos como “ligadura”. “El factor clave es que la restricción de movimiento está influida además por

⁵⁰⁶ Roger Wolcott Sperry (1913-1994). Biólogo, neurocientífico y psicólogo estadounidense, premio Nobel de Fisiología en 1981 por sus trabajos acerca de los hemisferios cerebrales.

la estructura geométrica del todo”⁵⁰⁷. La causalidad descendente del todo a las partes es una alteración de las probabilidades causales. La ligadura por pertenecer a una rueda hace que la movilidad de cualquiera de sus átomos dependa más de propiedades formales (geométricas) del todo, y menos de las peculiaridades individuales (por ejemplo, si la rueda se rompiera y las partes se disgregaran). En definitiva, el movimiento rotacional, perteneciendo las partes a la rueda, será el más probable.

La noción de causación descendente ha sufrido tantas interpretaciones como teorías de emergencia hay. Sin embargo, esta forma de causación no es esencial para definir la emergencia. El filósofo Paul Humphreys⁵⁰⁸ ofrece otra visión de la relación entre las partes y el todo. En vez de centrarse en las propiedades que se generan por la interacción de las partes de un todo emergente, o las que se heredan por pertenecer al todo, o las que son exhibidas por imposición a la configuración del todo, Humphreys centra la atención en la transformación que en muchos casos sufren las partes al integrarse en una configuración mayor, cambiando con frecuencia incluso su propia constitución. A esta modificación se la ha denominado “fusión”. Así desaparece la posibilidad reduccionista de distinguir las partes del todo, puesto que, como resultado de su implicación mutua sistémica, dejan de existir individualmente.

La visión de Humphreys se enraíza en la Física Cuántica, de modo que la fusión lleva como consecuencia la pérdida de algunas de las propiedades constituyentes al pasar las partes a formar una configuración de mayor escala.

Estas dos versiones acerca de las propiedades de orden superior de Sperry y Humphreys pueden aplicarse al análisis de parte/todo en los organismos. Al producirse paulatina y recíprocamente los componentes de los organismos como las macromoléculas, su determinación sólo puede llevarse a cabo respecto del organismo entero. Las propiedades específicas se van creando mutuamente en esta simbiosis sistémica de orden superior. Así, con el cese de la vida del organismo, el deterioro de sus componentes sucede muy rápido. A pesar de darse las propiedades de cada uno de los átomos constituyentes, desde el momento en el que estos forman parte del organismo funcional sus posibilidades de interactuar y combinarse se coartarán enormemente, siguiendo la dinámica sistémica impuesta.

⁵⁰⁷ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 175.

⁵⁰⁸ Paul Humphrey. Filósofo especializado en filosofía de la ciencia, metafísica y epistemología, contribuyente significativo a la filosofía de las propiedades emergentes.

En la comparativa emergente de Sperry y Humphreys, tanto en la rueda como en el organismo hay un cambio en las ligaduras que afectará a las propiedades específicas; en el ejemplo de Sperry el efecto de la configuración geométrica del todo afecta la movilidad independiente de los átomos constituyentes, no así a las propiedades locales como la masa o la carga; por el contrario, en el ejemplo del organismo de Humphrey, las propiedades de las moléculas son resultado de su incorporación al sistema. Esta diferencia ejemplifica el contraste jerárquico expresado en dos órdenes diferentes de transición emergente. El del organismo presupone la emergencia de la organización entencional, el de la rueda no. El ejemplo de la rueda puede someterse al reduccionismo, y, como consecuencia, si se diseccionara, fácilmente podría recomponerse. En el caso del organismo, su disección equivaldría a su destrucción. La relación emergente de las partes en la rueda es sincrónica, mientras que, en el organismo, aunque se puede analizar desde el punto de vista sincrónico, las propiedades fundamentales que constituyen sus partes se definen por la dinámica de procesos sintéticos recíprocos intrínsecamente diacrónicos. Cítese el metabolismo como el ejemplo de la diacronía más amplia del proceso evolutivo. Luego en las formas de emergencia de orden superior, la distinción parte/todo y la distinción sincronía y diacronía se solapan.

En definitiva, la mayor parte de las propiedades de orden superior consideradas emergentes no siempre han existido en el universo, ni en los contextos locales donde ahora se manifiestan. En el caso de la vida y la mente, sus características emergentes son fenómenos relativamente novedosos en la historia del universo, de nuestra galaxia y del sistema solar. Estos fenómenos emergentes y propiedades entencionales surgieron a medida que evolucionaron nuevas formas de organización de procesos fisicoquímicos de entre los átomos existentes y sus interacciones energéticas, apareciendo con ellos a su vez nuevas clases de componentes y fuentes de potencia causal diferentes. Las concepciones filosóficas estáticas, pasadas, de las partes y el todo, sirvieron de base para dar con las nuevas concepciones emergentes de totalidades dinámicas, donde las partes se encuentran en constante flujo de síntesis, transformación y reemplazamiento, mientras que el todo persiste.

10.3. Complejidad y caos

A finales del siglo XX, el concepto de emergencia comenzó a adquirir un nuevo significado. Hubo avances, logrados en torno, por un lado, a la variedad de fenómenos inorgánicos con cambios discontinuos en el comportamiento de agregados debidos a dinámicas de bajo nivel, concretamente, los llamados procesos de “autoorganización”; y, por otro, a las técnicas de simulación por ordenador capaces de modelar complejos iterativos y dinámicas altamente no lineales, que facilitarían el estudio de esta clase de fenómenos que, de haberse llevado a cabo únicamente por la observación natural, no hubieran merecido la atención que suscitan a día de hoy. Tales simulaciones, aun con operaciones simples iteradas miles o millones de veces, a menudo daban sorprendentes y complejos resultados difíciles de predecir. Emanaban en ocasiones cuasi-regularidades en procesos caóticos, imposibles de detectar mediante técnicas analíticas, percibiéndose directamente de forma gráfica el proceso en acción. Estas ideas encajan con lo que conocemos de los organismos vivos, ya que existen en cuanto que procesos, porque en el momento en que dejan de cambiar, la vida se extingue.

Esta lógica de generación de regularidades globales complejas y de “entidades” identificables a partir de operaciones simples iteradas se convirtió en el nuevo modelo para los procesos emergentes, que surgen espontáneamente a partir de condiciones distribuidas aleatoriamente. La relevancia que dichos estudios suponen para la comprensión de muchos procesos físicos naturales que implican iteraciones locales, como las iteraciones de las células, etc., conducirán a un nuevo paradigma para la comprensión de los procesos físicos, tal y como promueve Stephen Wolfram en su libro *A New Kind of Science*.

Como ya hemos expuesto anteriormente en este trabajo, los matemáticos también han realizado estudios sobre el comportamiento de los sistemas termodinámicos de no equilibrio empleando ecuaciones no lineales para representar dichos procesos físicos complejos. Se trata de representar trayectorias iteradas que tienden a “orbitar” por zonas del espacio gráfico secuencial. Y dado que describen un bucle o curva compleja, aunque ninguna trayectoria coincida exactamente con ella (sólo a nivel estadístico), se los denomina, como hemos dicho “atractores”. El atractor mejor conocido es el que recuerda la forma geométrica de una mariposa en 3D, descubierto por el meteorólogo norteamericano Edward Lorenz en 1963 mientras visualizaba la ecuación gráfica que

representaba el flujo del aire en la atmósfera, siendo el más representativo de la teoría llamada caos determinista.

Todas estas líneas de investigación en torno a los procesos iterativos complejos dieron lugar en los años ochenta a las denominadas “matemáticas de la complejidad”, “teorías de la complejidad”, “dinámica sistémica”, “caos”, “sinérgica”, o, simplemente “teorías de los sistemas complejos”, entre otros nombres. Como resultado de los procesos dinámicos complejos descritos, se ha logrado trazar las principales características de los fenómenos emergentes:

- Las regularidades observadas a un nivel superior se derivan de iteraciones dinámicas de los componentes de nivel inferior, desorganizadas.
- Dichas regularidades no son simples adiciones o superposiciones de las propiedades de bajo nivel, y son impredecibles.
- Aunque estos procesos físicos y computacionales no muestran ninguna organización orientada a un fin, su estructura de atractor puede compararse vagamente con la finalidad. Es teleonómica: “Solo nominalmente, esta definición terminológica denotaría un territorio intermedio entre el mero mecanismo y el propósito, el comportamiento previsiblemente orientado a un estado meta particular, incluso en sistemas donde no haya una representación explícita de dicho estado, ni intención de alcanzarlo”⁵⁰⁹.

Estos procesos físicos y computacionales, aunque no dan una plena respuesta acerca de las propiedades entencionales buscadas por los primeros emergentistas, sí que han supuesto una justificación no metafísica para la emergencia, entendida como proceso entre el mecanismo y la teleología, no como parte/todo.

10.4. Procesos y partes

Los fenómenos que nos interesan explicar son a la vez históricos y dinámicos. Estar vivo es sinónimo de cambio. No sólo nos interesará conocer los componentes (las células, las moléculas, etc.) y las reacciones químicas que constituyen un ser vivo, también será necesario ahondar en el conocimiento del proceso vital, de su organización. Volvemos a la disyuntiva descrita en capítulos anteriores entre la estructura y la forma.

⁵⁰⁹ *Ibidem*, p. 562.

Si las decenas de miles de moléculas integrantes de un ser vivo se hallan integradas en extensas redes iterativas que se sintetizan y organizan mutuamente, serán partes del organismo de las que depende el proceso vital jerárquicamente complejo. Lo mismo ocurrirá con la mente.

En este punto debemos destacar que muchos rasgos específicos emergentes del mundo no siempre han estado ahí. Es muy probable que, en el transcurso de la evolución, hubiera modificaciones esenciales en cada componente molecular, debidas a cambios en procesos sintéticos, que a su vez se debieron a cambios en las moléculas partícipes, que a su vez se debieron a modificaciones en los procesos sintéticos, y así sucesivamente. Aunque las biomoléculas se sinteticen *de novo* en cada organismo, los procesos sintéticos de los que surgieron fueron objeto de la selección natural en el pasado. Se debe concebir una teoría de procesos emergentes que articule la alternancia de regímenes dinámicos en niveles jerárquicos distintos. Los procesos dinámicos de orden superior están “anidados”, como casos especiales, en los de nivel inferior.

En resumen, el paso a una perspectiva dinámica permite la explicación de la generación espontánea de organización, a pesar de contradecir la segunda ley termodinámica. Todos los fenómenos entencionales se definen en función del orden, por lo que se dan en presencia de procesos organizados. Puede que la emergencia de regularidades dinámicas en el contexto de la termodinámica de no equilibrio sirva de puente para la emergencia de los procesos entencionales, y como prototipo de la razón de las transiciones emergentes en general.

10. 5. Ligadura

Ligadura es, según la define Deacon, una

restricción o confinamiento dentro de límites prescritos. Las ligaduras son lo que no está, pero podría haber estado. El concepto de ligadura es, en efecto, complementario de los conceptos de orden, hábito y organización, por qué lo que está ordenado u organizado está restringido en su rango y/o dimensiones de variación, y en consecuencia tiende a exhibir rasgos o regularidades redundantes. Un sistema dinámico está constreñido en la medida en que tiene restringidos sus grados de libertad de cambio y exhibe tendencias atractoras.

Las ligaduras pueden tener un origen intrínseco o extrínseco al sistema constreñido por ellas⁵¹⁰.

10.5.1. Hábitos

¿Qué es lo que emerge? Aun a pesar de la disparidad de opiniones que esta pregunta suscita, existe cierto consenso en afirmar que toda transición emergente conlleva alguna reorganización, radical o virtual, de la pauta causal de los procesos físicos. Dos de las transiciones en que más nos centraremos, la del paso del mundo inorgánico al orgánico y del orgánico sensible a la mente, comportan una inversión de la pauta causal de las cosas. Una pauta causal no supone un cambio individual sino más bien general, en multitud de sucesos. En termodinámica, como sucede con la segunda de sus leyes, una tendencia al cambio asimétrica puede ser general, aunque no sea universal. Luego una transición emergente puede definirse como una variación de las condiciones de la simetría global de la tendencia causal general, sin variar la materia e involucrando las mismas leyes físicas.

Pero, ¿acaso se puede considerar una tendencia general como una ley? Durante el siglo XIX, el filósofo Charles Sanders Peirce adujo que las cosas tienden a caer en hábitos o regularidades de comportamiento tanto en el mundo inorgánico como en el orgánico. No logró verificar el porqué de que sucesos inconexos debieran tender a ordenarse hasta ser habituales, pero sí reivindicó la existencia de un hábito universal de formación de hábitos fundamental para la naturaleza de las cosas. Incluso llegó a sugerir que lo que observamos como leyes físicas podrían haber evolucionado ellas mismas de tendencias al cambio menos regulares, o habituales, aseverando que “los hábitos tienden a engendrar hábitos”⁵¹¹.

El significado del concepto “hábito” que nosotros emplearemos aquí tiene que ver más con una predisposición comportamental, que puede o no expresarse abiertamente pero que siempre es una tendencia, que, el concepto empleado por Peirce, de índole más estadístico y fundamento de su defensa iconoclasta del realismo metafísico. Profundizar en este apartado nos llevará al problema filosófico de finales del medievo, introducido al

⁵¹⁰ *Ibidem*, p. 561.

⁵¹¹ *Ibidem*, p. 196.

inicio de este trabajo, acerca de si los universales tenían existencia en sí mismos o no. Así surgirían corrientes de pensamiento como:

- El realismo: acepta la existencia de los universales, y se divide en dos: el realismo platónico, que defiende la existencia de formas y propiedades ideales; para él, el realismo existe en una realidad paralela; y el realismo moderado, encabezado por Aristóteles, que argumentaba el vínculo entre la materia y sus propiedades formales. De este modo las formas, las tendencias regulares y las propiedades generales siempre tenían una encarnación material específica, e incluso las tendencias orientadas a un fin (causas finales) de los organismos vivos estaban literalmente encarnadas en su constitución material. Así su *entelequia* (entendida como un objetivo en la que algo trabaja de forma activa en sí mismo para lograr un fin que le es intrínseco, lo completa, y su consecución implica el desarrollo de todas sus potencialidades) promulga que los universales existen, pero no de forma separada de los objetos o sustancias.

- El Nominalismo: defendido por Guillermo de Ockham, niega la existencia de los universales. Según el principio de la navaja que lleva su nombre: si los universales existieran, los habríamos visto. Como su argumentación describe, deberían eliminarse las hipótesis redundantes en favor de las más simples.

- En cuanto a la tendencia del pensamiento científico moderno, paradójicamente aun siendo de corte eminentemente reduccionista, y considerando anatema la idea del realismo, curiosamente acepta las leyes físicas generales y su capacidad de causa final real, con independencia de los sucesos físicos que las manifiesten.

En resumen y de manera simplificada, hablar del debate entre el realismo y el nominalismo es hablar de si las propiedades generales, las leyes, los modelos representados y las disposiciones físicas a cambiar de esta o aquella manera, son reales, o si se trata de simples generalizaciones a partir de convenientes similitudes descriptivas de los únicos objetos de la existencia real: los objetos individuales y los demás epifenómenos.

La cuestión es, como dijo Peirce: “si las leyes y los tipos generales son quimeras de la mente o son reales”⁵¹². Puesto que el concepto de emergencia suscribe la posibilidad de que nuevos tipos de propiedades generales, nuevos hábitos causales de la naturaleza surjan, defendemos que para que una visión emergentista del mundo físico exista, se requiere alguna forma de realismo.

⁵¹² *Ibidem*, p. 198.

10.5.2. Redundancia

Los hábitos y pautas serán pues tratados como expresiones de la “redundancia” de Foerster que, anteriormente, al introducir la autoorganización, describimos. Y es que, tal y como lo expresa el propio Deacon, “la redundancia es un atributo característico de la organización dinámica, como el enrollamiento en espiral de las galaxias, las simetrías que definen formas geométricas tales como polígonos, y las regularidades globales de los procesos físicos tal y como se formulan en la segunda ley termodinámica. Cada uno de estos ejemplos es una forma de organización donde algún proceso u objeto viene caracterizado por la repetición de atributos similares”⁵¹³. No obstante, esta caracterización de la organización en términos de similitud nos lleva al antiguo debate filosófico entre la realidad y las apariencias. Por ello aclaramos que evaluamos la similitud sabiendo que no hay dos casos idénticos de una categoría general de organización dinámica, desestimando las diferencias de cierto nivel de detalle y de escala, y, por tanto, pretendiendo describir estos fenómenos dinámicos como ejemplos de un mismo tipo general de fenómenos desde un nivel de abstracción muy elevado.

Sin embargo, atribuir regularidad simétrica espiraliforme a una serie de fenómenos que percibimos, ¿es algo que sólo pasa en nuestra mente, y/o es realmente una descripción observacional de una dinámica causal? Es decir, ¿se trata de abstracciones mentales, o son rasgos causales físicamente relevantes en el mundo? Ciertamente una descripción no es un atributo físico. La comparación con algún tipo ideal de objeto geométrico como una espiral regular es algo que sólo pasa en la mente. Cuando atribuimos alguna propiedad o regularidad general como el movimiento en espiral a algún fenómeno natural, estamos haciendo una reflexión basándonos en nuestra experiencia. Las regularidades en las que nos fijamos para distinguir distintos tipos de cosas, efectivamente, están basadas en construcciones de nuestro aparato cognitivo y perceptivo. Y es que, en realidad, somos capaces de seleccionar muy pocas características físicas y solo prestamos atención a una mínima parte de los detalles que observamos. Pero además debemos recalcar que la abstracción mental también es consecuencia de procesos físicos, luego la clave está en que, para percibir alguna regularidad o pauta, nuestro acto de observación debe estar asentado en una regularidad, tendencia general o hábito mental previo respecto del cual se evalúa la regularidad física.

⁵¹³ *Ibidem*, p. 201.

Ahora bien, puesto que la abstracción y comparación no son procesos físicos, para dar sentido físico a los fenómenos entencionales, y siguiendo la propuesta de Deacon al respecto, no habrá que buscar, como lo hacen otros autores, leyes físicas nuevas para explicar lo que existe, sino que se deberá postular la aparición, en los procesos de organización dinámicos, de nuevas formas de causalidad basadas en la restricción de lo posible. Por tanto, debemos trasladar nuestra atención a lo que es similar o regular en cuanto a los atributos no expresados y a aquellos estados no realizados. Se tratará de seleccionar elementos por lo que no tienen en común. Así si reducimos las diferencias, incrementamos la similitud. No es necesaria una comparación de diferencias específicamente representadas, sólo es necesario que haya alguna reducción. Se trata de una determinación puramente cuantitativa y no cualitativa (de propiedades impuestas desde fuera por observación, descripción o comparación con algún arquetipo ideal), y de ese modo eliminamos cualquier aspecto formal y estético de la concepción ordinaria de similitud. Estaríamos hablando de orden que se origina en una restricción de libertad.

Tal y como afirmarí el cibernético W. Ross Ashby: “mientras que en el pasado los biólogos han tendido a pensar en la organización como algo extra, como algo añadido a las variables elementales, la teoría moderna, basada en la lógica de la comunicación, contempla la organización como una restricción o ligadura”⁵¹⁴. El concepto de ligadura puede, junto al de orden, organización y hábito, determinar una clase de similitud, pero esta vez de modo negativo, por exclusión.

Las ligaduras de las que hablamos son intrínsecas, no debidas a epifenómenos o a algo impuesto extrínsecamente. Esto invita a atribuir la responsabilidad de eso que está ausente a la potencia causal de la organización y a las dinámicas asimétricas de un proceso físico o vital.

Hablar de ligadura supondrá menor variedad y mayor redundancia de atributos. En un contexto de teoría de caos, decir que una pauta es caótica implicará que hay muy poca redundancia de atributos que permita simplificar la descripción. Es una manera de caracterizar el desorden. Se trata de orden que emana en medio del desorden aparente, por eso ahora a la teoría de caos se la denomina teoría de la complejidad. Luego la ligadura entendida como restricción de libertad, supondrá una simplificación. En cierto modo esto es lo mismo que identificar psicológicamente la similitud, y, por ende, caracterizar el orden.

⁵¹⁴ *Ibidem*, p. 201.

El concepto de hábito de Peirce como ligadura está implícito en su doctrina del “tiquismo” (supuesto metafísico de que, en la base, el cambio es espontáneo y singular, y por lo tanto intrínsecamente correlacionado)⁵¹⁵. Así, según su criterio, la ley no es más que un hábito de la naturaleza que evoluciona en algún sentido, y una ley natural debería describirse como una tendencia invariante cuyo carácter no tiquista requiere explicación. En definitiva, lo que existe son procesos de cambio, ligaduras exhibidas por estos procesos, el alisamiento estadístico y los atractores (regularidades dinámicas derivadas de procesos de autoorganización) que encarnan las opciones que dejan las ligaduras.

10.5.3. Abstracción concreta

Actualizando las preguntas que anteriormente nos formulamos: ¿son las ligaduras algo que sólo pasa en nuestra mente, y/o son realmente una descripción observacional de una dinámica causal? Es decir, ¿se trata de abstracciones mentales, o son rasgos causales físicamente relevantes en el mundo? Para darles respuesta, debemos cerciorarnos de si las interacciones causales en el mundo físico también tienden a abstraer ciertos detalles durante las interacciones físicas. Si así fuera, se confirmaría que nuestra caracterización negativa de la regularidad y el hábito no sólo son representaciones más precisas de la física profunda, sino el principio causal último. Además, si se confirma que ciertas interacciones físicas también tienden a prescindir selectivamente de los detalles, también se daría un análogo puramente físico del proceso de abstracción. Recordemos que la ligadura es la eliminación de ciertos detalles que podrían haber estado presentes; es la ausencia de ciertos estados potenciales. En virtud de esta restricción o ligadura de liberación de energía, es lo que propiciará que un sistema pueda forzar un cambio de estado sobre otro. Y, por ende, la naturaleza de la ligadura determinará qué variaciones no pueden ser fuente de influencia causal, y, por otra parte, siempre que se organicen nuevas ligaduras, se generará una capacidad de trabajo específica.

De modo que en sistemas dinámicos con un inmenso número de componentes que interaccionan linealmente, como ocurre en sistemas termodinámicos simples cerca del equilibrio, las fluctuaciones microscópicas de baja probabilidad tenderán a limpiarse estadísticamente al aumentar la escala, teniendo escasa influencia macroscópica. La

⁵¹⁵ *Ibidem*, p. 563.

capacidad del sistema para realizar trabajo que altere otro sistema vendrá determinada por esta ligadura. Igualmente, en sistemas dinámicos con muchos componentes con posibilidad de interacciones no lineales extensivas, como ocurre en sistemas lejos del equilibrio termodinámico, las ligaduras pueden amplificarse y emerger a escala macroscópica, e incluso generar nuevas formas de trabajo.

El aumento de escala es fundamental. Puesto que la velocidad a la que suceden las microinteracciones componentes es mucho mayor que la de las macro, las microfluctuaciones más detalladas de los procesos subyacentes tienden a cancelarse tras las propiedades subyacentes de orden superior; o, lo que es lo mismo, los detalles de lo que ocurre a nivel inferior se difuminan, propiciando que solo los rasgos más redundantes se manifiesten en el nivel superior. Este acontecimiento se relaciona con el concepto de fusión de Humphreys sobre la pérdida de las propiedades a medida que se aumenta la escala. También lo observamos en la descripción que hacía Mill al intentar caracterizar la emergencia con el ejemplo de la sal común.

Como los efectos de las dinámicas detalladas partícula a partícula apenas se manifiestan en niveles superiores, mientras los valores “medios” de dichas interacciones dinámicas son los que están plenamente expresados, esto supone un límite de causalidad ascendente. También pone de manifiesto la ineficacia de cualquier análisis reduccionista, siendo más eficaz el que caracterice con precisión las ligaduras como valores medios a los que confluyen las dinámicas de bajo nivel.

En el lenguaje peirceano, si no todos los estados posibles de un proceso se realizan, o si hay un sesgo de probabilidad, tendremos un hábito. Según esto habrá cierto grado de redundancia al no sucederse más que una pequeña fracción del espacio de posibilidades, y los extremos serán escasos. Por lo que un hábito se puede describir como expresión de una ligadura, siendo una disposición atractora de tipo dinámico o estadístico, no relativa a una evaluación mental externa o representación alguna. Puesto que los hábitos se determinan según hábitos, y las ligaduras se realizan según otras ligaduras, igualmente las propiedades generales mediante las que evaluamos las similitudes y diferencias entre los diversos sucesos de nuestra experiencia (como la pauta y el orden) son producto de la interacción de nuestros hábitos cerebrales con los hábitos del mundo. La eficiencia causal de las propiedades redundantes del mundo se presupone en la noción misma de la categoría mental superior.

Si, como para Peirce, los hábitos son la sede causal última, y los hábitos que engendran hábitos pueden traducirse como “propagación de ligaduras”, entonces

podemos enunciar que la reducción de opciones de cambio en un proceso puede provocar la reducción aun mayor en otro proceso que dependa de él. Según la “ley de los hábitos” de Peirce, las propiedades emergentes no serán algo añadido, sino un reflejo a escala aumentada de algo reducido, restringido y propagado por las ligaduras desde los procesos dinámicos de bajo nivel.

En definitiva, aunque en ocasiones sea posible predecir la emergencia de ligaduras dinámicas de orden superior, quizá no sea posible proceder al revés. Puesto que los sistemas dinámicos complejos pueden converger hacia atractores a partir de condiciones iniciales muy diversas, dicha convergencia es irreductible. Además, si la ligadura es la no realización de estados posibles, lo que no se realiza no es susceptible de descomposición analítica. Es más, en sistemas de ligaduras de alto nivel que son extrapolaciones lineales de las de bajo nivel (como sucede en la termodinámica de equilibrio), el análisis reductor no supone ninguna pérdida de información. Sin embargo, en sistemas de ligaduras no lineales (como sucede en la termodinámica lejos del equilibrio), la propagación a escalas aumentadas, y la doble protección de los atractores de orden superior de las fluctuaciones de bajo nivel, provocan que la descomposición tanto física como analítica elimine la fuente de la ligadura, y, por tanto, la fuente de potencia causal. Estos serán casos paradigmáticos de las transiciones emergentes.

De este modo, la emergencia basada en la noción de ligaduras, que permite la emergencia de emergencias, con propagación de ligaduras y creación de otras nuevas (como resultado de procesos no lineales donde las fluctuaciones de nivel inferior desaparecen, alisadas por la suma de resultados estadísticos probables), hace imposible explicar la causalidad recurriendo a las partes. Siendo producto de procesos físicos, su configuración geométrica, sin embargo, irá variando en un camino ascendente, creando nuevas formas de organización, cada vez más complejas, capaces en algún caso incluso de hacer predicciones de lo que aún no existe (como es el ejemplo de idear proyectos y sueños).

Para concluir, expondremos brevemente tres niveles distintos de causación dinámica, siguiendo el modelo propuesto por Deacon. Y explicaremos en la parte práctica de nuestra tesis algunos de los ejemplos más significativos. Así, a la planta baja del edificio emergente, Deacon lo llama homeodinámica. Se trata del nivel en el que las ligaduras se producen espontáneamente, en el que las formas tienden a suceder, como ocurre con el segundo principio de la termodinámica, a consecuencia de haber superado la selección fundamental. En este nivel podríamos incluir los ciclos de los que ya

hablamos en el segundo capítulo de nuestra tesis. Cuando dos sistemas homeodinámicos, con tendencias intrínsecas diferentes, se enfrentan e influyen entre sí, en ocasiones se puede dar lugar a un nivel superior, que Deacon denomina morfodinámico, al caracterizar la organización dinámica de fenómenos que tienden a organizarse espontáneamente, debido a una perturbación constante, pero sin una intervención extrínseca de influencias específicas que impongan esa regularidad. En realidad, este término no es nuevo. Y es que dicho término ya aparece en el artículo “Morphodynamik”, del año 1926, escrito por el biólogo Paul Weiss junto a Ludwing von Bertalanffy para tratar lo que describieron como campos morfogenéticos o detalles morfológicos animales, resultado emergente de las regularidades de interacciones moleculares sin ninguna influencia genética. En otro artículo profético, titulado “ $1+1 \neq 2$ ”, publicado en 1967, Weiss describiría numerosos ejemplos de pautas moleculares y celulares emergiendo espontáneamente, cuando las biomoléculas se sometían a ciertas condiciones globales.

También hoy en día se emplea el término morfodinámica para describir las propiedades geométricas que tienen que ver con la formación de estructuras regulares, tejidos y planes corporales. En definitiva, los procesos morfodinámicos son típicos de sistemas o colecciones interactuantes en número astronómico, como sucede en las moléculas, aunque éste no sea un rasgo definitorio necesario. E incluso pueden tener lugar en sistemas artificiales si se dan las condiciones necesarias, como los modelos sistémicos abstractos generados por ordenador, de los que hemos hablado anteriormente, y gracias a los cuales tenemos a día de hoy conocimiento de la mayoría de los procesos naturales más complejos de autoorganización espontánea. Además, por lo general la gran mayoría de los procesos que se describen como autoorganizativos son también morfodinámicos. Por lo tanto, la autoorganización, como proceso espontáneo, podría describirse metafóricamente como una caída hacia una regularidad, y no como un cambio forzado, igual que una transición hacia el equilibrio en condiciones termodinámicas más simples. De hecho, la organización morfodinámica emerge por la interacción de un trabajo constante yuxtapuesto, en oposición a un proceso homeodinámico que espontáneamente tendería al equilibrio.

Lo que los distingue de otros procesos regulares, y lo que justifica su prefijo *morfo-* (“forma”), es que generan regularidades espontáneamente en virtud de otras previas, amplificadas internamente a través de dinámicas iterativas bajo la influencia de perturbaciones externas mantenidas, y no en respuesta a una imposición extrínseca de

regularidad, ni a ninguna plantilla o forma arquetípica intrínseca (codificada directamente en el genoma, por ejemplo).

El ejemplo paradigmático dentro de este nivel es el de los sistemas convectivos de Bénard; también lo es el de los cristales de hielo o los huracanes, y muchos procesos vitales de los que hablaremos con más detenimiento en el cuarto capítulo de nuestra tesis. De modo que muchos investigadores consideran la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio el comienzo de la vida. Siendo los seres vivos sistemas dinámicos nacidos de la tendencia a la maximización de los procesos disipativos, si la naturaleza aborrece los gradientes, la vida sería la forma más eficiente de acabar con ellos, para de esta manera llevar a cabo sus dinámicas, y construir sus cuerpos, produciendo entropía en dicho proceso.

No obstante, según Deacon, este nivel emergente no bastará para describir la vida, ya que, una vez terminado el gradiente, estas estructuras desaparecen; luego se precisa de la colisión de dos sistemas morfodinámicos que provoquen la emergencia de un nivel superior que propicie el mantenimiento y reproducción del propio sistema. A este nuevo nivel lo denominará teleodinámico, encontrándose situado dentro del ámbito entencional, donde el mantenimiento del mismo forma parte de su definición. A partir de la frontera de lo teleodinámico, la selección natural y la ley del efecto pueden desarrollar toda su potencialidad generadora. De modo que, resumidamente, la teleodinámica emerge de la morfodinámica, y esta, a su vez, de la termodinámica. Disponemos, así, del andamiaje para poder construir una metodología emergente dirigida al estudio de los fenómenos organizados por su consecuencia, como el metabolismo o la representación mental. Este procedimiento, además de poder explicar la contribución ligada de la autoorganización y de la selección natural darwiniana a la evolución filogenética, también podría dar explicación a la interacción entre otros procesos biológicos y no biológicos, como la epigénesis, el procesamiento de señales neuronales o la evolución del lenguaje. Los procesos autoorganizativos pueden surgir en muchos sistemas dinámicos, y estar constituidos por muchos sustratos: la relación de dependencia de éstos y los procesos evolutivos no sólo se ciñe a los procesos moleculares. La dinámica evolutiva debería de emerger espontáneamente en cualquier dominio donde se den condiciones de autoorganización recíproca.

El propio Ernst Popper “conjeturó que la vida, y más tarde la mente, ha evolucionado o emergido en un universo que fue, hasta cierto tiempo, sin vida y sin mente. La vida, o la materia viviente, emergió de algún modo desde la materia no

viviente”⁵¹⁶. En definitiva, los primeros sistemas de transición emergente teleodinámicos emergieron, luego no evolucionaron. Emergieron de patrones específicos de interdependencia que, a su vez, surgieron de procesos morfodinámicos.

11. FENÓMENOS EMERGENTES

11.1. Criticalidad autoorganizada

En el pasado, los grandes sistemas iterativos, a falta de una teoría mejor, se analizaban del mismo modo que los sistemas pequeños y ordenados, desmenuzándolos en sus elementos individuales, y analizando sus mecanismos microscópicos. Hoy se han desarrollado nuevas teorías, como la de la criticalidad autoorganizada, adecuadas para analizar sistemas complicados (formados por un gran número de constituyentes) y caóticos, como los movimientos sísmicos, la dinámica de fluidos, o los ecosistemas entre otros, caracterizados por evolucionar de manera espontánea hacia un estado crítico, donde un acontecimiento banal puede llegar a provocar reacciones en cadena, e incluso catástrofes.

“La criticalidad autoorganizada es una teoría holística: características globales, como el número de sucesos grandes y pequeños, no dependen de mecanismos microscópicos. Resulta imposible, pues, comprender las características globales del sistema analizando por separado partes que lo componen. [...] La criticalidad autoorganizada es el único modelo o descripción matemática que ha dado pie a una teoría holística de los sistemas dinámicos”⁵¹⁷.

Puesto que los sistemas compuestos pueden estar constituidos de un gran número de elementos, y gobernados por multitud de interacciones, no es posible construir modelos matemáticos manejables y reales de ellos. De ahí que los investigadores empleen modelos simplificados e idealizados, que se ciñan a las características más básicas de éstos. Por ejemplo, el estudio del modelo sencillo de las pilas de arena, empleado en mecánica estadística del equilibrio, ha permitido comprender fenómenos universales en sistemas con muchos grados de libertad, como el de la investigación de la dinámica de los aludes. Cuando el montón de arena deja de crecer y se compensa con la que cae por

⁵¹⁶ POPPER, K. R. “Selección natural y la emergencia de la mente” ..., p. 208.

⁵¹⁷ BAK, P. y CHEN, K. “Criticalidad autoorganizada”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, p. 18.

el borde, se dice que el sistema ha alcanzado una pendiente en estado crítico, de modo que, si añadiéramos un solo grano de arena más, podría desencadenarse un alud de cualquier tamaño, incluso uno catastrófico. Sin embargo, casi nunca ese grano producirá avalanchas o lo que constituye un tipo de reacción en cadena, o “proceso de ramificación”. Si se dibujara el flujo de granos que se desliza por el montón al cabo del tiempo, observaríamos un patrón muy errático y variado. A estas señales se las denomina “ruido de parpadeo” o “ruido” sin más. Los científicos sospechan que este tipo de señal indica que el sistema depende de los acontecimientos pasados. No obstante, si la señal es aleatoria se la denomina “ruido blanco”, lo que indica que la dinámica presente no tiene relación con la pasada. El ruido de parpadeo es asombrosamente común en la Naturaleza observándose en la actividad del Sol, en la luz de las galaxias, o en el fluir del agua de un río. Según la interpretación general que la teoría de la criticalidad autoorganizada sugiere, el ruido de parpadeo consta de una superposición de señales de todos los tamaños y duraciones, producidas por las reacciones en cadena que el sistema dinámico genera en estado crítico.

Los investigadores de la criticalidad autoorganizada han descubierto que la distribución espacial de montañas, nubes y hasta de galaxias, o los vórtices de un flujo turbulento, pueden describirse mediante leyes de potencias, y que tales distribuciones suelen ser fractales. Y aunque estos suelen ser ubicuos en la naturaleza, su dinámica no ha empezado a entenderse hasta hace poco. “En nuestra opinión, los fractales pueden entenderse como “instantáneas” de procesos críticos autoorganizados. Las estructuras fractales y el ruido de parpadeo vendrían a ser, respectivamente, la huella espacial y la huella temporal de la criticalidad autoorganizada”⁵¹⁸.

11.2. Autómatas y vida

Los apilamientos de arena y los terremotos tienen en común que su número de constituyentes se mantiene con el tiempo. Estas leyes de conservación son las mismas en los sistemas que espontáneamente evolucionan a un estado crítico, pero la teoría de la criticalidad autoorganizada no sólo se limita a ellos.

⁵¹⁸ *Ibidem*, p. 23.

En 1970, el matemático John H Conway concibió el famoso y ya mencionado sistema conocido como “juego de la vida”. Se trata de un autómata que plagia la evolución de una colonia de organismos, y simula la generación y evolución de complejidad en la naturaleza a partir de reglas sencillas. En un principio, la colonia evolucionará a un estado estable, y poco a poco irá tendiendo hacia un estado nuevo. Según los estudios realizados por Michael Creutz del laboratorio Nacional de Brookhaven para ver si el juego de la vida de Conway evolucionaba de manera similar a los aludes de arena, efectivamente la nueva distribución obedecía a una ley de potencias, indicativa de que el sistema se había organizado en un estado crítico, y que la distribución de las ubicaciones vivas correspondía a un fractal. Finalmente se concluyó que estos modelos podrían tener importantes ramificaciones en la vida real, siendo el juego de la vida como un modelo simplificado de un sistema coevolutivo (proceso caracterizado por llevar un estado inicial arbitrario hasta otro crítico, altamente organizado y dotado de configuraciones complejas). De ser así, “la evolución opera al borde del caos. La extinción de los dinosaurios, por ejemplo, puede considerarse análoga a una avalancha en la dinámica de la evolución, sin que para ello sea necesaria la intervención de agentes externos como meteoritos y volcanes. [...] la criticalidad autoorganizada podría incluso explicar cómo se propaga la información a través de las redes neuronales del cerebro. En tal caso no sería ninguna sorpresa que las tormentas de ideas pudieran desencadenarse a partir de acontecimientos banales”⁵¹⁹.

11.3. Redes sin escala

“El cerebro es una red de células nerviosas conectadas por axones, las propias células son redes de moléculas conectadas con reacciones químicas. Las sociedades humanas son redes de individuos vinculados por relaciones afectivas y lazos familiares o profesionales. A escala mayor, cabe representar mediante redes los ecosistemas y las cadenas tróficas. Y aparecen por doquier en la tecnología: por ejemplo, Internet. [...] Incluso el idioma [...] es una red compuesta por palabras enlazadas entre sí por relaciones sintácticas”⁵²⁰. Pero a pesar de su presencia, la estructura y propiedades de las redes no

⁵¹⁹ *Ibidem*, pp. 24-25.

⁵²⁰ BARABÁSI, A-L. y BONABEAU, E. “Redes sin escala”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, p. 26.

se han estudiado en profundidad hasta hace poco. En los últimos tiempos se ha descubierto que redes como la de internet, o hasta el metabolismo celular, están dominadas por un reducido número de nodos centrales, conectados entre sí. A este tipo de redes se las denomina “libres de escala”, de modo que algunos nodos parecen tener un número ilimitado de enlaces, y ningún nodo es representante típico de los demás.

En las últimas décadas se habían venido considerando las redes complejas como puramente aleatorias, tal y como demostraron en 1959 los trabajos de los matemáticos húngaros Paul Erdős y Alfred Rényi, lo que posibilitó el surgimiento de la especialidad matemática centrada en el estudio de las redes aleatorias, o exponenciales. En 1998, científicos como los autores de este artículo, junto a otros como Hawoong Jeong y Réka Albert, de la Universidad de Notre Dame, embarcados en el proyecto de cartografiar la World Wide Web esperando encontrar una distribución democrática de enlaces propia de una red aleatoria, descubrieron, sin embargo, que ésta se regía por una distribución de leyes de potencias, en las que unos pocos nodos dominan la red, lo que les indujo a denominarla con la expresión de “redes sin escala”. Pocos años después, se descubrieron redes sin escala en multitud de sistemas como las redes sociales o empresariales, e incluso en el reino de la biología.

En colaboración con Zoltán Oltvai, de la Universidad Noroccidental de EE. UU, hemos encontrado estructuras sin escala en las redes del metabolismo celular de 43 organismos tomados de los tres reinos de la vida: entre ellos, *Archaeoglobus fulgidus* (una arquea), *Escherichia coli* (una bacteria) y *Caenorhabditis elegans* (un organismo eucariota). En estas redes, las células se nutren descomponiendo moléculas que generan, en el proceso, energía. Cada nodo es una molécula, mientras que los enlaces corresponden a las reacciones bioquímicas en las que participa. [...] Asimismo, hemos descubierto que la red de interacciones proteicas celulares también carece de escala”⁵²¹. Las últimas investigaciones de Erdős y Rényi revelan que tanto el crecimiento como el enlazamiento preferencial explican la existencia de nodos hiperconectados. “En colaboración con Réka Albert, hemos desarrollado simulaciones por ordenador que demuestran que una red en crecimiento en la que exista un mecanismo de enlazamiento preferencial se convertirá en una red sin escala, en la que la distribución de los nodos seguirá una ley de potencias. [...] En sistemas biológicos, se ha descubierto, por ejemplo, que las moléculas más conectadas de la red metabólica E. Coli tienden a tener una historia evolutiva muy antigua: se cree que algunas de ellas son remanentes del llamado “mundo ARN” (el

⁵²¹ *Ibidem*, pp. 29-30.

estadio evolutivo previo a la aparición del ADN), y que otras participan en algunas vías metabólicas más antiguas⁵²².

11.4. Leyes Universales

Gracias a la matemática moderna se ha logrado modelizar múltiples fenómenos naturales y artificiales. Pero, aunque dichos modelos pueden aplicarse a sistemas muy complejos, integrados por múltiples componentes en interacción mutua, sin embargo, en la práctica sólo es posible resolver casos simples de dos o tres componentes. No obstante, se ha observado en contextos muy diversos que, cuando el número de agentes es muy grande, las propiedades colectivas se tornan predecibles, y quedan gobernadas por leyes naturales simples. Aquí, las leyes macroscópicas resultan ser independientes de las que dirigen las interacciones microscópicas de sus componentes, por lo que, a pesar de que estos puedan ser remplazados, el comportamiento a gran escala no varía. A este suceso se le denomina ley macroscópica “universal”. Dos buenos ejemplos de leyes universales son la ley de los grandes números y el teorema del límite central. Ambas leyes describen comportamientos de magnitudes estadísticas individuales. Sin embargo, existen otras leyes universales que van más allá de la estadística numérica, por ejemplo, las que gobiernan las transiciones de fase en Física y Química. Y es que si observamos el punto crítico que separa el estado (sólido, líquido o gaseoso) de un material cuando se modifica su temperatura o su presión, este se caracterizará por dividirse en bellas geometrías fractales, cada una de las cuales se encontrará en una de las dos fases.

Tanto los físicos como los químicos han ideado múltiples modelos para describir las distintas sustancias y sus transiciones de fase continuas, siendo diferentes todos ellos a nivel microscópico. Pero si los examinamos “desde lejos”, las diferencias desaparecen. Sus distintas regiones conexas adoptan formas y tamaños dispares, pero su estructura es casi siempre fractal: si se amplía cualquiera de esas zonas, su aspecto resultará similar a la región completa.

Estas leyes universales se han descubierto en áreas que van desde los sistemas dinámicos hasta la teoría cuántica de campos. Muchas leyes macroscópicas de la Física, como las empleadas en termodinámica o en dinámica de fluidos, son universales.

⁵²² *Ibidem*, p. 31.

Luego las teorías de los sistemas complejos nunca pueden ser ni totalmente correctas en sentido cuantitativo, ni en sentido cualitativo. Según dicta el artículo que el físico y premio nobel Philip W. Anderson publicó en 1972 bajo el título de “More is different”, existe una gran diferencia conceptual entre las propiedades de los elementos que constituyen un sistema y las características emergentes que exhibe el agregado. Por ello, los estándares usados hasta el momento para juzgar las teorías microscópicas deben ser adaptados para juzgar el propósito de las nuevas teorías de la complejidad: los fenómenos esenciales y emergentes.

11.5. Lenguaje, redes y evolución

En los últimos años, el estudio de la lingüística se ha empezado a relacionar con programas interdisciplinarios asociados a las matemáticas, con la Teoría de Redes, la Física de Sistemas Complejos y la Teoría de la Información. El estudio del lenguaje desde esta perspectiva sistémica ha permitido observar cómo las distintas lenguas del mundo, a pesar de exhibir su propio léxico y gramática, se rigen por patrones de organización universales, y por las mismas leyes estadísticas.

La teoría de redes es, en la actualidad, uno de los enfoques más novedosos llevados a cabo sobre el estudio cuantitativo de las propiedades emergentes de la arquitectura del lenguaje, y ha permitido explicar fenómenos como la presencia de módulos organizados en categorías semánticas, que hacen las veces de nodos puente de interconexión. También la existencia universal de ambigüedades en todas las lenguas, como las palabras sinónimas y las polisémicas, que confieren una gran conexión en la red semántica, facilitando las transiciones y asociaciones locales entre conceptos. Luego la red semántica es del tipo de red libre de escala, donde los superconectores, como las palabras polisémicas, agilizan tanto la navegación como la asociación local entre conceptos.

“Uno de los atributos esenciales del lenguaje humano reside en su poder combinatorio. A partir de elementos simples y unas reglas básicas para conocerlos, generamos otros más complejos: unimos fonemas para construir sílabas y agregamos

estas para formar palabras, en una progresión que explota de manera exponencial cuando alcanzamos el nivel de las frases”⁵²³.

Recientemente se están llevando a cabo investigaciones sobre el origen del lenguaje en torno a la emergencia de la sintaxis en el niño, o sobre su capacidad informativa. En los niños, la etapa de los dos años supone un cambio cualitativo en la manera de generar frases. Se introducen las partículas funcionales (artículos y preposiciones, fundamentalmente), que, unida a una mayor riqueza morfológica, dan lugar a nuevas construcciones sintácticas, basadas en el anidamiento infinito de subestructuras. A esta facultad de anidamiento se la conoce como recursividad. Su empleo supone no sólo poseer la capacidad de interpretar las producciones, sino su contexto. “La interpretación de una frase compleja supera la “suma” de los significados de las palabras que la componen”⁵²⁴.

Se cree que el lenguaje crece en complejidad a medida que evoluciona, y esto se debe al equilibrio entre “combinar precisión (múltiples palabras poco probables y de uso específico) y ambigüedad (pocas palabras muy frecuentes y de uso genérico), de acuerdo con una ley muy bien definida”⁵²⁵.

Siguiendo la huella de su principal precursor, el lingüista Jim Hurford, autores como Simon Kirby han llevado a cabo experimentos donde se muestran reglas de ordenación de palabras que surgen de manera “espontánea”, como resultado de la evolución. Kirby, y otros investigadores como Terrence Deacon, sospechan que el lenguaje ha evolucionado para sobrevivir en un ambiente definido por la naturaleza del cerebro humano. El lenguaje actuaría como un “virus” que, infectando la mente del niño, operaría al modo de una entidad simbiótica: el hombre se vale del lenguaje para prosperar e incluso sobrevivir, y el lenguaje utiliza al hombre para reproducirse y evolucionar.

12. SEGUNDA SÍNTESIS DE IDEAS PARA EL CONOCIMIENTO DE LA EMERGENTE TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD

A pesar de que la bibliografía que aborda esta cuestión es muy limitada, hemos pretendido, a través de la descripción de los apartados anteriores, construir una suerte de

⁵²³ SOLÉ, R. V., COROMINAS MURTRA, B. y FORTUNY, J. “Lenguaje, redes y evolución”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 1er trimestre 2019, N.º 95, p. 83.

⁵²⁴ *Ibidem*, p. 85.

⁵²⁵ *Ibidem*, p. 86.

vehículo orientador que nos permitiera tener una noción de cómo ha logrado ir desarrollándose la nueva teoría de la complejidad, a la que tanto le ha costado emerger.

Y es que el propósito que caracterizó la ciencia desde la época moderna del siglo XVII estaba centrado en superar la explicación aristotélica del mundo material, por considerarla totalmente contraria a la descripción física, es decir, a la combinación entre la instrumentalización de la experiencia y la teoría matemática universalizable. La ciencia moderna desconfiaba totalmente de la causa formal aristotélica, que pretendía ser más explicativa que los elementos analíticos y matematizables de los fenómenos físicos, por ser la guía esencial de lo que un objeto es y puede llegar a ser; y, también, por ser el periplo con el que deducir los orígenes de un fenómeno. Por ello encontró un nuevo principio de inteligibilidad en la descripción de la naturaleza, basada en un conjunto de partes en interacción en función de causalidades externas mecánicas, y en la universalización de la matematización de las realidades físicas. Más tarde, la racionalidad moderna dio paso a una nueva perspectiva de jerarquización epistemológica, fundamentada en la clasificación causal, siendo inútil cualquier referencia a conocimientos pasados, no experimentados, como la causa formal. De modo que, conociendo las partes y sus reglas de interacción, la causa no tendría posibilidad de ser ninguna espontaneidad.

Por último, el nuevo criterio epistemológico sustituía la forma aristotélica por el análisis de las partes de un fenómeno, y la síntesis operaría como criterio unificador de dichas partes. En resumen, el todo no sería más que la suma de las partes.

12.1. La racionalidad compleja

Sin embargo, en la actualidad la nueva epistemología de la ciencia, que considera la naturaleza como un sistema complejo evolutivo y adaptativo, ha vuelto a investigar el problema, que ya se planteó en la época griega, de encontrar el origen de todo lo múltiple en la raíz de la emergencia de la unidad, como resultado de la interacción coordinada de las partes. Se trata, por tanto, de una epistemología que apuesta por enfoques que actualizan de algún modo la formalidad aristotélica, asentándose en términos como estructura, organización, irreversibilidad, memoria, emergencia, contexto, información, holismo y autopoyesis, entre otros, y que enfatiza la insuficiencia de la explicación jerarquizante de la realidad, planteada por la ciencia moderna.

Como dijo el físico David Bohm: “Las leyes físicas primarias jamás serán descubiertas por una ciencia que intenta fragmentar el mundo en sus constituyentes”⁵²⁶. En esta línea, los teóricos de la complejidad contemporánea distinguirán entre la complicación, como simple adición de elementos en interacción, y la complejidad, como resultado de la interacción para formar un todo. Y es que, aunque la complicación es necesaria para que se dé la complejidad, como asevera el filósofo Edgar Morin, “la complejidad es mucho más una noción lógica que una noción cuantitativa. Posee desde luego soportes y caracteres cuantitativos que desafían efectivamente los modos de cálculo; pero es una noción de otro tipo. Es una noción a explorar, a definir. La complejidad nos aparece, ante todo, efectivamente, como irracionalidad, como incertidumbre, como angustia, como desorden”⁵²⁷.

Se ha producido un cambio de paradigma: de un pensamiento científico-lógico de inspiración cartesiana, concentrado en acceder desde lo complejo a lo simple, hemos pasado a enfrentar la apariencia compleja de la realidad sin pretender aislar a priori elementos simples en ella. Es la interconexión y la mutua dependencia de los elementos la que permite acceder, se piensa en la actualidad, a las leyes universales que la ciencia busca.

La complejidad nos ha mostrado que, cuanto más aumenta, menos útil es la idea de ley. Y es que, como dice Edgar Morin:

El orden y el desorden tienen una relación de complementariedad y complejidad. [...] Tomemos el ejemplo, que frecuentemente cito, de un fenómeno que presenta, bajo una perspectiva, un carácter aleatorio sorprendente, y, bajo otra perspectiva, un carácter de necesidad; ese fenómeno es la constitución del átomo de carbono en las calderas solares. Para que ese átomo se constituya, es necesario que se produzca el encuentro, exactamente en el mismo momento, de tres núcleos de helio, lo que es un acontecimiento completamente aleatorio e improbable. Sin embargo, desde que ese encuentro se produce, una ley entra en acción; una regla, una determinación muy estricta interviene; el átomo de carbono se crea. Así pues, el fenómeno tiene un aspecto aleatorio y un aspecto de determinación. Además, el número de interacciones entre núcleos de helio es enorme en el seno del sol; y además ha habido muchas generaciones de soles en nuestro sistema solar; finalmente, con el tiempo, se crea una cantidad considerable de átomos de carbono, se crea en todo caso una amplia reserva necesaria para la creación y el desarrollo de la

⁵²⁶ MORIN, E. “La epistemología de la complejidad” ..., p. 2.

⁵²⁷ SOLANA RUIZ, J. L. *Con Edgar Morin, por un pensamiento complejo: implicaciones interdisciplinarias*. Madrid. Universidad Internacional de Andalucía: Akal, 2005, p. 30.

vida. Vemos cómo un fenómeno que parece ser extremadamente improbable por su carácter aleatorio finalmente es cuantitativamente bastante importante y puede entrar en una categoría estadística. Todo lo cual depende, pues, de la perspectiva desde la cual se mire, y diría sobre todo que es interesante -es necesario- reunir todas esas perspectivas. [...] Desde que consideramos un fenómeno organizado, desde el átomo hasta los seres humanos pasando por los astros, es necesario hacer intervenir de modo específico principios de orden, principios de desorden y principios de organización. Los principios de orden pueden incluso crecer al mismo tiempo que los de desorden, al mismo tiempo que se desarrolla la organización. [...] He aquí un orden que tiene necesidad de autoproducirse mediante la organización, y ese orden es bastante particular puesto que tolera una parte importante de desorden, incluso hasta colabora con el desorden, como von Neumann lo vio acertadamente en su teoría de los autómatas. [...] Es en esa dialéctica de complementariedad y antagonismo donde se encuentra la complejidad⁵²⁸.

También se ha pasado de una ciencia cuyas leyes físicas estaban concebidas en un tiempo reversible a una ciencia que, de manera profunda, va a ligar lo estructural y organizacional con lo histórico y evolutivo. Así pues, desde el momento en que surge el evolucionismo darwiniano en complejidad ascendente, y el segundo principio de la termodinámica como generador de desorden y desorganización, la flecha del tiempo se bifurca, y se torna irreversible y reiterativa. Surge así el pensamiento complejo, dando explicación al proceso en desarrollo que rige el universo emergente, en convivencia entre la irreversibilidad de un flujo energético y la posibilidad de organización estable por regulación y autoproducción. Como un torbellino que se genera del encuentro de un flujo irreversible de energía con un obstáculo, creándose una especie de sistema estacionario que es al mismo tiempo móvil, al ser incorporada cada molécula de agua una y otra vez al flujo, y estable en su organización.

Los seres vivos estamos constituidos de células que no son elementos unos al lado de otros, sino que interactúan al ritmo del flujo irreversible que dirige el movimiento regular de nuestro corazón, en un entramado de sistemas en distintos niveles de emergencia, que forman parte de conjuntos organizados, cuyas cualidades emergentes no existían en sus elementos constitutivos. Y es que este torbellino de interacciones no sólo rige el funcionamiento de nuestro organismo, sino incluso el de nuestro pensamiento, de nuestras ideas y de nuestras decisiones. Como dice Edgar Morin: “En el origen está el

⁵²⁸ *Ibidem*, pp. 35-36.

principio de la emergencia, es decir que las cualidades y propiedades que nacen de la organización del conjunto retro-actúan sobre ese conjunto”⁵²⁹.

En cuanto al conocimiento de un conjunto, Morin cita a Pascal cuando dice: “Tengo por imposible concebir las partes al margen del conocimiento del todo, tanto como conocer el todo sin conocer particularmente las partes”⁵³⁰. El conocimiento alude, pues, a un movimiento en espiral ininterrumpido. El mismo Wagensberg lo corrobora al describir así el conocimiento científico: “El círculo es vicioso cuando el punto de llegada coincide exactamente con el de partida, cuando la definición ensayada no logra enriquecerse en ningún sentido: se trata entonces de un movimiento circular perfecto y por ello condenado a la eterna y boba rotación trivial. Un círculo virtuoso, en cambio, no se cierra: el punto de llegada es el principio de otro círculo ligeramente desplazado. Se forma una espiral, hay precisión, hay virtud”⁵³¹. En esta misma dirección, Morin compara el conocimiento con un holograma producido por un láser, donde cada parte contiene la información del todo, aunque no totalmente, sino de un modo atenuado. Y nos remite a Thom: “La vieja imagen del hombre microcosmos, reflejo del macrocosmos, mantiene todo su valor; quien conozca al hombre conocerá el universo”⁵³². Morin aclara que “en la organización biológica de los seres multicelulares, cada célula contiene la información del todo, contiene potencialmente al todo. Y en este sentido, es un modo hologramático de organización. [...] En el lenguaje, el discurso toma sentido en relación a la palabra, pero la palabra sólo fija su sentido en relación con los discursos en los que se encuentra encadenada.”⁵³³.

12.2. Autoorganización, evolución y naturaleza

Por otra parte, actualmente también se concibe un principio de causalidad nueva no lineal, el cual fue introducido por primera vez en la retroacción cibernética, donde el efecto hace bucle con la causa que lo produce. El ejemplo más sencillo para ilustrar este fenómeno lo tenemos en un sistema de calefacción regulado por un termostato. De modo que no sólo el termostato genera el bucle térmico, sino que el frío exterior provoca el

⁵²⁹ *Ibidem*, p. 38.

⁵³⁰ *Ibidem*, p. 38.

⁵³¹ WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo...*, p. 14.

⁵³² *Ibidem*, p. 38.

⁵³³ *Ibidem*, p. 38.

calor interior al activarse el termostato. Este mismo sistema complejo es el que rige lo que es viviente y lo humano.

La visión compleja de la naturaleza revaloriza la causalidad reticular del entramado de unos fenómenos con otros. De este modo, el cosmos se revela mutable y evolutivo. La epistemología de la complejidad asume que el surgimiento de toda novedad natural se incorpora al entramado causal reticular. Y es aquí donde cobra protagonismo la autoorganización, que representa la capacidad de la naturaleza para mantener y renovar los patrones de los que surge, haciéndolos solidarios con los que habrán de aparecer. De ahí que ligue, como introducimos antes, lo organizativo con lo evolutivo, y que reúna en una reiteración la estabilidad en las estructuras naturales y una cierta direccionalidad que restringe el despliegue futuro, contrastándolo con el entorno en el que surge. Como dice Héctor Velázquez:

Mantiene una verdadera combinación entre lo que se es y lo que se puede llegar a ser a partir de lo que ya se es. Si nada permaneciera en la sucesión temporal del desarrollo de cada uno de los momentos de la naturaleza, ésta se autocrearía a cada fracción de tiempo que transcurriera en el sistema, porque no existiría antecedente suyo alguno. Pero, paradójicamente, si no hay verdadera actualización de potencia a acto -pues la potencia no sería antecedente del acto ante esta absoluta novedad-, entonces el movimiento o cambio en el universo sería una simple modificación accidental, no direccional [...] pues el estado logrado después de la transformación sería resultado del acaso. Un sistema en tales condiciones hace también imposible la noción de evolución: como decir que las nuevas configuraciones son evolución de las anteriores; en efecto, son cualitativamente tan caóticas como las que le dieron origen⁵³⁴.

De modo que, en caso de que no existiera la autoorganización, no se podría pensar en la evolución del universo. Sus variables estarían en constante mezcla caótica y errática, presentando una configuración que sería nueva en cada momento. Todo esto lleva a pensar que, de no ser autoorganizado, no cabría la posibilidad de que existiera un mundo inteligible como el nuestro, ya que no podríamos relacionar un momento con el anterior. Por ello, conviene hacer “una lectura que permita identificar unas características

⁵³⁴ VELÁZQUEZ FERNÁNDEZ, H. “Autoorganización, complejidad y naturaleza: hacia una revaloración de la forma aristotélica”. *Eikasia: revista de filosofía*, N.º 43, 2012, pp. 204-205.

constantes que aglutinen la realidad como un todo estable, aunque no fijista, tal y como sugiere la forma aristotélica”⁵³⁵.

⁵³⁵ *Ibidem*, p. 205.

SEGUNDA PARTE

Capítulo IV

La segunda parte de esta tesis supone la presentación de algunas de las formas frecuentes que, por su función, emergen en el mundo natural y artificial.

La selección natural y culta que dichas formas superan otorga a las mismas tiempo en su existir, perseverando en la realidad mudable. La selección culta, mediante la percepción y sus mecanismos anteriormente descritos, traza una imagen mental simple al abstraer matemáticamente su forma, y las dota de inteligibilidad y belleza, propiciando con ello su posterior transformación al integrarlas en sus arquitecturas, ejemplos fehacientes de funcionalidad y estética, fruto de la creatividad humana. Según dijo Alberti al referirse a la arquitectura: “Aquello que nos gusta en las cosas más bellas y exquisitas proviene bien de una inspiración racional del espíritu o de la mano del artista o bien la naturaleza lo produce con sus propios materiales. La tarea de la inteligencia consiste en elegir, dividir y ordenar esta clase de cosas que confieren a la obra su dignidad. La labor manual del artista consiste en la reunión, el ensamblaje, el corte, el recorte, el pulido, el trabajo delicado y otros cometidos parecidos que dan a la obra su gracia particular”⁵³⁶.

Como colofón de esta tesis, se mostrará una clasificación de las obras arquitectónicas que, atendiendo a lo expuesto, hemos seleccionado para este fin, como manifestación culta.

13. FORMAS NATURALES MATEMÁTICAS FRECUENTES POR SU FUNCIÓN Y FENÓMENOS EMERGENTES QUE LAS DESARROLLAN

“Una vez que comprendamos qué ventajas obtiene el hombre racional de la aplicación del principio de la simplicidad, de su preferencia por las líneas rectas y las formas geométricas estandarizadas, tal vez estemos en mejores condiciones para estudiar la aparición de una conducta análoga a lo largo de toda la escala evolutiva. Ya no nos asusta utilizar en estas cuestiones argumentos teleológicos ni preguntar por qué nuestra constitución mental favorece la simplicidad, tanto en la percepción como en la

⁵³⁶ BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600...*, p. 27.

elaboración. Si estas tendencias no tuviesen un fuerte valor de supervivencia, no habrían llegado a formar parte de nuestra herencia orgánica”⁵³⁷.

13.1. LA ESFERA PROTEGE

La definición geométrica de la circunferencia es que ésta es el perímetro más corto que encierra una superficie plana. La esfera es la superficie tridimensional de la circunferencia. Y, por tanto, se define como la menor superficie que encierra un volumen dado.

En el mundo inerte la esfera emerge por selección fundamental, al ser la forma más estable en entornos homogéneos, isotrópicos o simétricos. “En la naturaleza surge el orden cuando las leyes de la física pueden actuar en sistemas aislados y sin mutuos estorbos”⁵³⁸.



Fig. 2. Visión parcial del espacio astronómico. Fuente: SANDOVAL, A. G. *Observar. Interpretar. Expresar*. Santander: Sandoval, 2002, p. 44.

Así, de simetría por omisión, donde ninguna dirección prevalece sobre otra, se manifiesta en forma de planetas en el espacio ingrávido (Fig. 2), en una gota de agua a punto de caer, o en una burbuja bajo el mar. De simetría por acción, donde la forma esférica sigue siendo la más probable, tenemos un buen ejemplo en la desembocadura de los ríos, donde el resultado del paso del tiempo origina diminutos granos de arena que reposan resultantes del desgaste de los cantos rodados al chocar unos con otros en todas las direcciones. O también, por depósito químico alrededor de núcleos de cristalización que se encuentran parcial o totalmente sumergidos en agua tenemos las pisolitas⁵³⁹, comúnmente conocidas como “perlas de las cavernas” (Fig. 3).

⁵³⁷ GOMBRICH, E. H. *El sentido del orden...*, vol. IX, p. 7.

⁵³⁸ *Ibidem*, p. 5.

⁵³⁹ Las pisolitas o “perlas de las cavernas” son espeleotemas que se desarrollan en el interior de las grutas o cavernas, al igual que las estalactitas y estalagmitas, pudiendo tener formas muy diversas, esféricas, cilíndricas, irregulares, etc. No se aglutinan por efecto de las vibraciones, por ejemplo, del goteo del agua, sino que se generan por depositación química alrededor de núcleos de cristalización de materiales que se encuentran parcial o totalmente sumergidos en agua con algún movimiento de agitación como para que las partículas que sirven de núcleos de cristalización se muevan independientemente unas de otras. De ese modo el depósito se produce igual en todas las direcciones, envolviendo a cada partícula individualmente.

Por otra parte, según explicó D'Arcy Thompson, hay muchas formas gobernadas únicamente por la tensión superficial o capilaridad, como ocurre con las porciones pequeñas de líquido, los organismos pequeños o diminutos, o los elementos celulares de los organismos mayores. Por ejemplo, “las gotas de lluvia deben ser esféricas, o no originarían el arco iris; y el hecho de que la parte superior del arco sea la más brillante y más nítida, prueba que las gotas más altas son las más exactamente esféricas, así como menores que las inferiores. Del mismo modo, se observa que las más pequeñas gotas de rocío son más irisadas que las grandes, mostrando que también son más exactamente esféricas. [...] El mercurio tiene una alta tensión superficial, y sus glóbulos son prácticamente esféricos”⁵⁴⁰. Esto también ocurre con las superficies celulares y las particiones celulares, donde la gravedad es especialmente contrarrestada por el líquido de densidad semejante en que se sumergen.



Fig. 3. Pisolitas o “perlas de las cavernas”. Fuente: facebook_1619691477199_6793478441583224974.jpg

También son casos notables de mención, en relación a la propiedad de la capilaridad citada antes, los que suceden al extender una superficie jabonosa por un alambre curvado. “Mas si nos limitamos nosotros a las superficies de revolución (es decir,

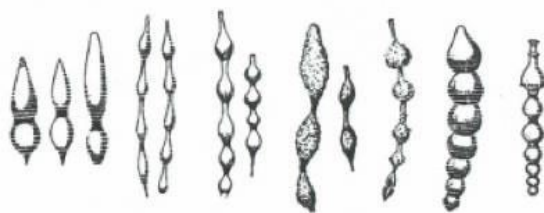


Fig. 4. Ejemplos de onduloideos en varias especies de Nodosaria, Rheophax y Sagrina. Fuente: THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 94.

a superficies simétricas alrededor de un eje), hallamos, como Plateau⁵⁴¹ fue primero en mostrar, que aquellas propias del caso son pocas en número. En total, son seis, a saber: el plano, la esfera, el cilindro, el catenoide, el onduloide (Fig. 4), y una curiosa superficie que Plateau denominó nodoide”⁵⁴².

Todas estas superficies están estrechamente relacionadas, y el paso de una a otra es por lo general fácil. Su interrelación matemática se expresa por el hecho [...] de que las curvas planas por cuya revolución se generan a sí mismas, son así mismo generadas como “ruletas” de las secciones

⁵⁴⁰ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 62.

⁵⁴¹ Joseph-Antoine Ferdinand Plateau (1801-1883) fue un físico belga que definió en 1829 el principio de persistencia de la visión. En 1832 inventó el fenaquistoscopio, uno de los precursores del cinematógrafo. Llevó a cabo investigaciones sobre la capilaridad entre láminas delgadas líquidas, y en 1861 demostró que las superficies resultantes son mínimas. La generalización de estos resultados la enunció mediante las leyes de Plateau. También resolverá matemáticamente el problema obtener la superficie que contiene a una curva cerrada dada en el espacio, de forma que su área sea de superficie mínima.

⁵⁴² *Ibidem*, p. 65.



Fig. 5. Alga *Valonia Ventricose*.

Fuente:
https://www.abc.es/ciencia/abci-esta-extrana-criatura-forma-globo-ocular-201911042045_noticia.html

cónicas”⁵⁴³, de las que hablaremos más adelante. Del mismo modo son “esferas, cilindros y onduloideas los casos más comunes entre las formas de pequeños organismos unicelulares o de células individuales en agregados simples; y que en los procesos de crecimiento, reproducción y desarrollo son frecuentes las transiciones de una de estas formas a la otra es obvio para el naturalista”⁵⁴⁴.

Así, la *Valonia ventricose*, coloquialmente denominada “ojos de mariner” o “algas burbuja”, es una especie común de alga, con forma de burbuja, que habita en los fondos marinos de zonas tropicales y subtropicales (Fig. 5). Se trata del organismo unicelular más grande del mundo, y puede alcanzar hasta los 5 cm. de diámetro. En realidad, este organismo está constituido por varios dominios citoplasmáticos, cada uno con su propio núcleo y cloroplastos, de ahí que logre alcanzar esas dimensiones. Al carecer sus poros de agua son muy impermeables, y además el agua marina potencia también sus notables propiedades eléctricas. Por otra parte, pueden suponer una plaga en los acuarios, ya que al ser muy duras no tienen muchos predadores, y cualquier aplastamiento provoca que liberen las células de su interior llegando a colonizar rápidamente el entorno en que habitan.



Fig. 6. Odoníferos, ninfas recién salidas del huevo.
 Fuente: PFEFFER. *Los continentes. Asia...*, p. 249.



Fig. 7. Ooteca de araña
 Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos*. Barcelona. Gustavo Gili, 2003.

Por todo lo dicho anteriormente, también es frecuente que en el mundo vivo la esfera prolifere como resultado de la selección natural: en semillas, frutos y huevos como los de las ninfas de la chinche de la familia de los odoníferos, *Pentatomidae* de campo (Fig. 6), la ooteca de la araña tigre *Argiopebruennichii* (Fig. 7), o las huevas esféricas de los *opistognácidos* (Fig. 8). Animales como las medusas o los erizos son también buenos ejemplos de ello (Fig. 9). Pero la función de la esfera en el mundo vivo ya no es la estabilidad. En una superficie frontera mínima como es la esfera, el tránsito de materia, energía o información es

⁵⁴³ *Ibidem*, p. 65.

⁵⁴⁴ *Ibidem*, p. 67.

menor que en cualquier otra superficie. Así, el ojo de los animales tiende a ser esférico para captar la mayor cantidad de información (Fig. 10). En parajes de luz isótropa la copa de los árboles se torna esférica, mientras que, si la luz es muy oblicua, como ocurre en zonas próximas a los polos, la forma esférica se transforma en un cono (en geometría, el cono recto de revolución es el que se genera al girar una generatriz apoyada en el eje de simetría en torno a la directriz o circunferencia del mismo). Por igual, en un entorno isotrópico como es el agua, los animales fijos a un lugar o que vagan a la deriva topándose con el alimento tienden a la simetría circular.



Fig. 8. Huevas esféricas. Fuente: FERRARI. *Océanos secretos*. Madrid: Espasa Calpe, 2006. p. 189.



Fig. 9. Medusas. Acuario de Gijón (Asturias, España). Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo

Y es que, al evolucionar, los seres vivos son dotados de movilidad, pudiendo ir en busca del alimento, ganando independencia. Surge así la simetría tendente a una dirección: la simetría bilateral, de modo que los animales muestran la boca en posición opuesta al ano. Moverse en el aire o en el agua genera formas aerodinámicas o fluidos dinámicos que se adaptan al medio.

La forma esférica también dificulta un ataque a mordiscos por las fauces de un predador. Algunos animales, como los erizos terrestres, recogen esféricamente su cuerpo con ese fin.

Los primeros huevos se dieron en el agua. Sin embargo, en el medio terrestre los huevos esféricos salen peor del vientre materno, y tienden a rodar con facilidad. La selección natural ha favorecido nuevas variaciones de la forma esférica para combatir mejor la nueva incertidumbre, surgiendo así el ovoide. La gallina, cuando incuba, hace de manta, es decir, evita que el huevo se enfríe; pero no lo calienta. El calor fluye poco a poco del huevo a la gallina, o sea, es el huevo el que calienta a la gallina.



Fig. 10. Ojo de insecto. Fuente: <http://www.IGraffcaracas.es>

El mínimo tránsito de materiales a través de la forma esférica provoca que ciertas especies vegetales como los cactus, que habitan zonas desérticas, adopten esta forma. Incluso, en ocasiones, los cactus no esféricos se reúnen en conjuntos que sí lo son,

formando colonias con la finalidad de no perder agua al protegerse del calor. Dicha agrupación se da también en algunos frutos como las frambuesas o las moras. Por tanto, la función de las esferas vivas es la de proteger contra el enfriamiento y la depredación, por citar sólo algunos casos.



Fig. 11. Nido del verdecillo.
Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos...*, p. 72.

La arquitectura animal está repleta de manifestaciones de simetría circular. Sólo tenemos que observar la mayoría de los nidos y las madrigueras, así como sus entradas y salidas. A partir de cierto tamaño, las construcciones esféricas dejan de ser funcionales y pasan a tener forma de cúpula, como el nido en forma de cúpula invertida del verdecillo (Fig. 11). También encontramos viviendas con forma de bóveda. Una bóveda es un arco repetido que forma una estructura en tres dimensiones. La

bóveda cubre un espacio en forma de techo, y está formada por elementos que se apoyan mutuamente y ejercen una presión exterior soportada por paredes o pilares. La fuerza de la gravedad y las fuerzas laterales que llegan a la bóveda se desvían siguiendo la forma de la envolvente hasta llegar al suelo o al apoyo. Un ejemplo lo encontramos en la bóveda que el cangrejo *Mictyris* (Fig. 12) se construye con la arena húmeda de la playa que contiene el aire que necesita; de esta forma se sepulta para protegerse del oleaje y los depredadores.

En el mundo culto, la esfera, la circunferencia y el círculo, en definitiva, la simetría circular, también triunfan. En este caso no es tan importante la función de protección, sino otras más simbólicas como la de perfección, la eternidad, o lo divino. El hombre, desde el principio de su existencia, advirtió la sucesión de la vida y la muerte, del día y la noche, del cambio de las estaciones de modo cíclico, y la importancia que tenían los cielos para predecir los cambios. Seguimos la trayectoria de una circunferencia, volvemos una y otra vez al mismo punto. Por eso ya el primer hombre, de forma intuitiva o lógica, asocia la forma circular y lo cíclico al concepto de eternidad. Hoy para nosotros eternidad es sinónimo de inmortalidad, permanencia, inmutabilidad. ¿Y qué otra cosa ansía el hombre que no sea permanecer, perdurar, etc.? Pero, ¿acaso el hombre es eterno?

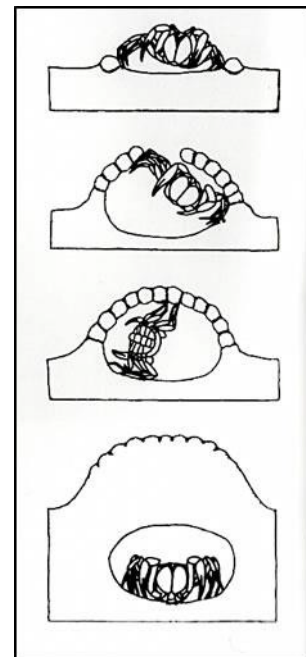


Fig. 12. Proceso de construcción de una bóveda por el cangrejo *Mictyris longicarpus*. Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos...* p. 76.

El hombre necesita creer que existe algún ser superior inmortal, y le llamará Dios. De modo que lo divino se simbolizará con la forma circular perfecta, homogénea, equilibrada, ideal y de absoluta unidad. La circunferencia es la forma geométrica asociada al número uno, a la unidad primigenia, a lo universal. También lo son su superficie plana, el círculo, así como tridimensional, la esfera.

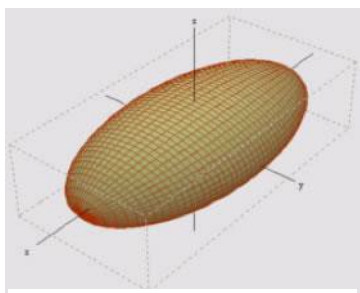


Fig. 13. Elipsoide de revolución y sus ejes ortogonales. Fuente: <http://www.wikipedia.org>

“La simetría circular inteligente triunfa por rotación generando superficies de revolución”⁵⁴⁵. La figura tridimensional que se obtiene de deformar la esfera es el elipsoide (Fig. 13). El elipsoide es un sólido en que todas las secciones planas son elipses (curvas cónicas que se definen geoméricamente como lugar geométrico de los puntos del plano, cuya suma de distancias a dos puntos fijos, llamados focos, es constante). Al rotar un elipsoide

alrededor de uno de sus dos ejes se obtiene el elipsoide de revolución o esferoide.

Esta figura de revolución será empleada, por ejemplo, por Gaudí, quien, guiado por su intuición espacial excepcional, creará cuerpos tridimensionales complejos al intersecar diversas formas geométricas. “De la maclación de esas formas surgen geniales soluciones arquitectónicas u

objetos escultóricos que, convenientemente decorados, tienen capacidades evocadoras naturales, simbólicas y religiosas”⁵⁴⁶. Así, en *La Sagrada Familia* de Barcelona Gaudí empleará la maclación de elipsoides entre sí, como solución arquitectónica para resolver los capiteles o nudos

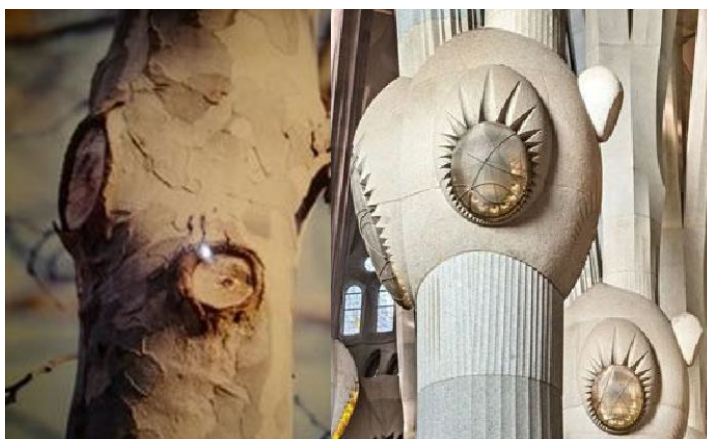


Fig. 14. Detalle nudo árbol y elipsoide columnas de La Sagrada Familia de Gaudí. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 172.

(Fig. 14), a partir de los cuales se subdividen las columnas en ramales simbolizando árboles. También hay que destacar los excepcionales pináculos que Gaudí proyectó para los campanarios de la Sagrada Familia, y que el historiador George R. Collins (1960) describió diciendo: “[...] encontramos: cuadriláteros de esquinas redondeadas rodeados

⁵⁴⁵ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 174.

⁵⁴⁶ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 119.

de esferas de tamaño variable que se apartan unas de otras, pirámides truncadas al lado de las cuales se proyectan otras, poliedros pseudorregulares formados al cortarse las esquinas de cubos y octaedros, pirámides triangulares que desarrollan otras hexagonales las cuales, a su vez, descansan sobre otras que se proyectan hacia abajo [...]”⁵⁴⁷. Gaudí consideraba que, en la naturaleza, no era muy habitual la aparición de los poliedros, por eso no les prestó mucha atención. Sin embargo, estudió algunas formaciones minerales como las de la galena y la fluorita, así como los brillantes de joyería que resultaban de despuntar con mucha precisión octaedros. En los pináculos de los campanarios, tanto en la fachada del Nacimiento como en la de la Pasión,

[...] encontramos un interesante ejercicio de truncamiento de octaedros y la coexistencia del poliedro obtenido y una esfera con el mismo centro y casquetes esféricos que medio sobresalen por las caras o dejan algunos agujeros. [...] Hay que señalar que los agujeros de los poliedros son funcionales, ya que de ellos saldrá luz que ilumine la cruz central, a 170 m de altura, y el entorno del campanario correspondiente. Gaudí lo dejó dicho muy claramente: “Arriba del todo estarán los focos luminosos; como la luz natural, que también viene del cielo. Esos focos [...] darán en las noches de solemnidades religiosas vida y suntuosidad al templo, y al mismo tiempo, construirán el mejor ornamento de la ciudad»”⁵⁴⁸ (Fig. 15).



Fig. 15. Macla sucesiva de un cubo, de un octaedro y de un cilindro, presente en el pináculo de San Bernabé del templo de la Sagrada Familia. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 118 y p. 39.

Es más, al primer hombre que habitó la tierra ya le causó fascinación que astros como el sol y la luna, los cuales flanqueaban el cielo y determinaban los ciclos del tiempo de un modo eterno, tuvieran una forma idéntica circular. En definitiva, a lo largo de la historia, la selección cultural ha favorecido la emergencia de la forma circular y

⁵⁴⁷ *Ibidem...*, p. 119.
⁵⁴⁸ *Ibidem...*, p. 119.

esférica en las diferentes manifestaciones tecnológicas, bien atendiendo a su función protectora, bien a su función simbólica asociada. Un ejemplo claro lo tenemos en la arquitectura. Los cromlech prehistóricos (Fig. 16), los iglús de las tribus esquimales, las pallozas y castros celtas (Fig. 17), y los tholos romanos son algunos de los ejemplos arquitectónicos en que prevalecerá una u otra función, y donde los cerramientos se basarán en la construcción de “falsas cúpulas”, al tratarse de estructuras adinteladas sin esfuerzos horizontales notorios. Sin embargo, la evolución



Fig. 16. Cromlech de Stonehenge, monumental observatorio astronómico del tercer milenio a. C. Inglaterra. Fuente: NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico*. Madrid: Akal, 2008, p. 24.



Fig. 17. Castro celta. Fuente: <http://www.minube.com>

desde este punto dio origen a uno de los métodos de cubierta más complejos, que resolvería la compensación de esfuerzos de tracción y compresión de los muros. Surgirían así las auténticas “cúpulas”⁵⁴⁹, siendo uno de los ejemplos más notables en su ejecución el Panteón romano de Agripa (Fig. 18). Por otra parte, la selección cultural ha ido evolucionando a lo largo del tiempo hasta nuestros días, permitiendo que las formas geométricas derivadas de la circunferencia y la esfera dieran lugar a los distintos polígonos y poliedros (sobre los que volveremos a hablar). Expresiones de estos últimos serán las denominadas cúpulas geodésicas, una de cuyas aplicaciones veremos más adelante.

Finalmente añadimos, como ejemplo ancestral del simbolismo de la esfera asociado a la perfección, e incluso a la divinidad, algunos fragmentos del ensayo *La esfera de Pascal* contenido en *Otras Inquisiciones* (1952), donde Borges trata de justificar sus diferencias hacia el pensamiento de éste:

Seis siglos antes de la era cristiana, el rapsoda Jenófanes de Colofón, hartado de los versos homéricos que recitaba de ciudad en ciudad, fustigó a los poetas que atribuyeron rasgos antropomórficos a los dioses y propuso a los griegos un solo Dios, que era una esfera

⁵⁴⁹ Cúpula: (*Del it. cupola*). Según FATÁS, G. Y BORRÁS, M. G. *Diccionario de términos de arte y elementos de arqueología, heráldica y numismática...*, p. 76: “Bóveda semiesférica. Generalmente cubre un espacio cuadrado cuyo paso a *planta circular u octogonal se da por medio de *trompas o *pechinas. Cuando se desea conseguir una mayor elevación de la cúpula, se hace a ésta reposar no sobre las trompas o pechinas directamente sino sobre un ancho anillo o *tambor, a modo de cuerpo cilíndrico u octogonal. Cuando la iluminación no se hace mediante *vanos en el tambor o quiere reforzarse ésta, se agrega a la parte superior de la cúpula una pieza llamada *linterna que es un segundo cuerpo cilíndrico o poligonal cubierto, a través de cuyos vanos, practicados en derredor, entra la luz: no debe confundirse con el *duomo o domo, que a veces se recubre exteriormente. Los gallones o gajos: la que recuerda o imita el aspecto de los gajos de una naranja. **Falsa cúpula: La obtenida por aproximación sucesiva de hiladas”.

eterna. En el *Timeo*, de Platón, se lee que la esfera es la figura más perfecta y más uniforme, porque todos los puntos de la superficie equidistan del centro; Olof Gigon (*Ursprung der griechischen Phi-losophie*, 183) entiende que Jenófanes habló analógicamente; el Dios era esferoide, porque esa forma es la mejor, o la menos mala, para representar la divinidad. Parménides, cuarenta años después, repitió la imagen (“el Ser es semejante a la masa de una esfera bien redondeada, cuya fuerza es constante desde el centro en cualquier dirección”); Calogero y Mondolfo razonan que intuyó una esfera infinita, o infinitamente creciente, y que las palabras que acabo de transcribir tienen un sentido dinámico (Albertelli: *Gli Eleati*, 148). Parménides enseñó en Italia; a pocos años de su muerte, el siciliano Empédocles de Agrigento urdió una laboriosa cosmogonía: hay una etapa en que las partículas de tierra, de agua, de aire y de fuego, integran una esfera sin fin, el *Sphairos* redondo, que exulta en su soledad circular. [...]

Un Aristóteles no fue sino los escombros de Adán, y Atenas, los rudimentos del Paraíso. En aquel siglo desanimado, el espacio absoluto que inspiró los hexámetros de Lucrecio, el espacio absoluto que había sido una liberación para Bruno fue un laberinto y un abismo para Pascal. Este aborrecía el universo y hubiera querido adorar a Dios, pero Dios, para él, era menos real que el aborrecido universo. Deploró que no hablara el firmamento, comparó nuestra vida con la de náufragos en una isla desierta. Sintió el peso incesante del mundo físico, sintió vértigo, miedo y soledad, y los puso en otras palabras: “La naturaleza es una esfera infinita, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna”. Así publica Brunschvicg el texto, pero la edición crítica de Tourneur (París 1941), que reproduce las tachaduras y vacilaciones del manuscrito, revela que Pascal empezó a escribir *effroyable*: “Una esfera espantosa, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna”⁵⁵⁰.

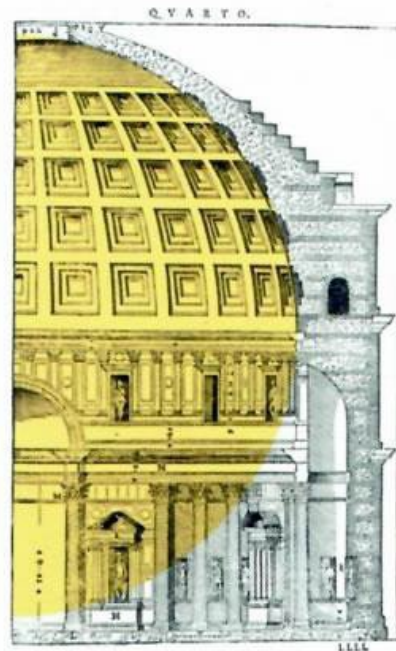


Fig. 18. La esfera como protagonista en el Panteón de Roma, reconstruido por el emperador Adriano, 118-125 d. C. La cúpula es una semiesfera; la otra mitad de la esfera está alojada en el semicubo inferior Fuente: NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico...*, p. 137.

⁵⁵⁰ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 177.

13.2. EL HEXÁGONO CUBRE

La simetría circular, como ya se ha dicho, emerge en ambientes isotrópicos. Pero si una gran cantidad de círculos se ciñe a un espacio, éstos adoptan la forma hexagonal. Si la isotropía generaba el círculo, ahora, la presión isotrópica dará lugar al hexágono.

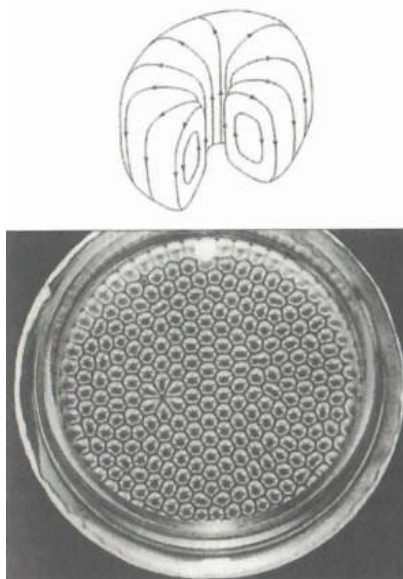


Fig. 19. Células de Bénard. Fuente: SCHNEIDER, E y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 153.

En el mundo inerte la configuración pavimentadora hexagonal se da con relativa frecuencia. Una de las manifestaciones más sorprendentes en que el hexágono emerge por selección fundamental es, sin duda, la denominada convección de Bénard, que ya introdujimos en el capítulo segundo de nuestra tesis. En 1897, Henri Bénard, un estudiante de la Universidad de París, se enteró de las extrañas estructuras convectivas ordenadas que aparecían en el líquido revelador utilizado por los fotógrafos en ese momento. Tras investigar la convección, puso en marcha su experimento. Calentando un recipiente de latón abierto en contacto directo aire con vapor hasta 100°C, sobre el que previamente había vertido una capa fina de esperma

de ballena a temperatura ambiente de 20° C, Bénard calculó que, debido a que el aire también estaba a temperatura ambiente, se produciría un gradiente térmico de aproximadamente 80° C. Fascinado, observó la formación de un patrón regular de células en la capa superficial del líquido, a medida que se calentaba uniformemente desde abajo, estableciendo un flujo de calor constante (gradiente) desde el fondo hacia la superficie, de modo que mientras el líquido permanecía en reposo, el calor se transmitía por conducción. Sin embargo, cuando la diferencia de temperatura por encima y por debajo había alcanzado un cierto valor crítico, y según una combinación de factores como la profundidad de la capa de líquido, la gravedad específica, la viscosidad y el gradiente de temperatura, se producía tal inestabilidad que el flujo de calor era reemplazado por una convección térmica, en la que las interacciones moleculares desorganizadas (sin ligadura y normalmente distribuidas) pasaban a adoptar una pauta de movimiento coherente de grandes cantidades de moléculas desempeñando el trabajo de disipación del calor, y adoptando entonces un patrón regular de pequeñas columnas hexagonales en dicho

proceso (Fig. 19). Este experimento pasará a ser, en los años sesenta, el caso estrella de los procesos de autoorganización inerte de la termodinámica de no equilibrio.

Otra vívida demostración tridimensional de este hecho la encontramos en la formación rocosa de la denominada “Calzada de los Gigantes”, en el condado de Antrim, en Irlanda del Norte (Fig. 20). Se trata de una importante cristalización, de unas 40.000 columnas de basalto en forma de prismas hexagonales, que debió acontecer hace aproximadamente 60.000 millones de años. Al enfriarse relativamente rápido la lava de una caldera volcánica, se produjo una contracción que empujó la lava hacia arriba, y ésta cristalizó formando las columnas. En este caso el gran tamaño de los hexágonos, en comparación con el de las células de



Fig. 20. “Calzada de los Gigantes”. Irlanda del Norte. Fuente: <http://www.dublin.es>

Bénard, se debe en parte a las propiedades muy diferentes que tiene la lava como fluido.

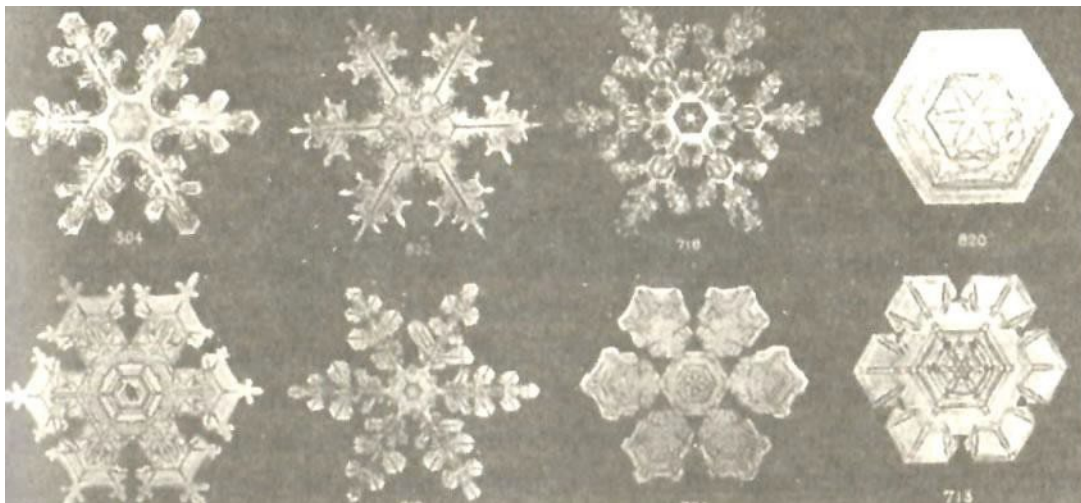


Fig. 21. Simetría hexagonal de los cristales de hielo. Fuente: DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta...*, p. 269.

Por otra parte, los suelos poligonales se producen de maneras diversas relacionadas con la expansión y contracción de partículas de hielo, o de forma alterna, por el secado y contracción del lodo. Por ejemplo, el crecimiento de los cristales de hielo dependerá de una combinación determinada de temperatura, humedad y presión del aire circundante, de modo que, dependiendo de la historia de los cambios atmosféricos que se produzcan mientras el copo cae, se determinará el modo de crecimiento de la estructura de la red cristalina. La autosimplificación de los cristales de hielo en exquisitas simetrías

que se forman espontáneamente es también consecuencia de dinámicas persistentes de no equilibrio, al igual que las células de Bénard. En este caso, la inestabilidad termodinámica se mantiene con la acreción constante de nuevas moléculas que liberan calor al integrarse en la red, el cual es disipado a través de la red geométrica y constreñida del cristal, siendo, por tanto, resultado de la amplificación y propagación de ligaduras geométricas durante el desarrollo de su crecimiento. Aquí la forma final es un fractal, pero lo es sobre una simetría hexagonal que minimiza la energía (Fig. 21).

La forma hexagonal también emerge en la cristalización de algunos minerales, o en la estructuración de algunos corales marinos. La selección fundamental permite la emergencia de la forma hexagonal por ser la más estable, puesto que, a diferencia de las aglomeraciones esféricas o circulares, no deja huecos a la hora de cubrir el espacio; es decir, lo pavimenta. De modo que, según aseveró Ghyka Matila:

Los estados de equilibrio y configuraciones de todo sistema material físico químico inorgánico (es decir, que no contiene organismos vivos) están rigurosamente regidos por el principio de la mínima acción o de Hamilton⁵⁵¹ que hace evolucionar el sistema desde los estados menos probables hacia los estados más probables (Boltzmann) [...] cuando los estados finales de equilibrio convergen en configuraciones, en esquemas geométricos regulares (como las formaciones cristalinas), las simetrías resultantes son siempre de tipo cúbico (redes cuadradas, conjuntos cúbicos en el espacio) o (aun con más frecuencia) hexagonal (redes planas triangulares o hexagonales), conjuntos cubo octaédricos en el espacio⁵⁵².

Por otra parte, si volvemos a retomar la componente de la tensión superficial en los agregados celulares para estudiar los tejidos complejos, en el mundo vivo también se suceden multitud de ejemplos en los que el crecimiento de las construcciones animales se realiza por agregados de estructuras modulares, mediante la repetición de un mismo elemento. Uno de ellos lo constituyen los panales de las abejas y otros himenópteros, que

⁵⁵¹ “Se trata aquí del principio de mínima acción en física matemática o principio de Hamilton (llamado también principio de acción estacionaria), tendencia al desgaste, al derroche de las energías potenciales existentes a la nivelación, que predetermina y gobierna rigurosamente la evolución de todo sistema; es físico-químico cerrado (es decir, incidentalmente desprovisto de vida, pues la vida actúa en física como una fuerza exterior). Se trata algunas veces, en esta obra, de una ley psicológica cuya denominación se presta a confusiones: es el principio hedonístico del mínimo esfuerzo que, en vez de ser una tendencia al desgaste, es un principio de economía de las energías mentales o nerviosas. Los estetas alemanes lo invocan para explicar la preferencia acordada por el organismo a ciertos colores y ciertas formas (el rectángulo de la sección áurea, por ejemplo), y el porqué de la sensación agradable, armoniosa, correspondiente. Con este principio hedonístico del mínimo esfuerzo se emparenta el de economía de los conceptos (*entia non sunt multiplicanda...*), la *Ockham's Razor* de los lógicos ingleses, instrumento de regulación, de *taylorización* del razonamiento, que nos ha permitido establecer a priori la sección áurea”. Cfr. GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos*. Barcelona: Poseidón, 1978, pp. 54-55.

⁵⁵² GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, pp. 50-54.



Fig. 22. Cilindros en nido de papel de *Polystes gallicus*. Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos...*, p. 76.

pretendiendo aprovechar el espacio con el menor gasto de material, construyen celdas en sus nidos, donde depositarán sus huevos o almacenarán el alimento. Por ejemplo, los *polistes* o avispas papeleras construyen sus panales mediante cilindros apretados, mezclando celulosa de vegetales con sus secreciones salivales (Fig. 22). También las abejas de la miel hacen crecer sus panales agregando cera con la que forman celdas, consiguiendo aprovechar al máximo el espacio (Fig. 23).

Como en el basalto o el coral, se trata de cilindros iguales entre sí, de sección circular, comprimidos en prismas hexagonales regulares; pero en este caso, tenemos dos capas de esos cilindros o prismas, uno mirando en una dirección y otro en otra, y surge un nuevo problema en conexión con sus extremos internos. Podemos suponer que los cilindros originales tienen extremos esféricos, lo que constituye su forma normal y simétrica de terminación; así pues, para un empaquetamiento más compacto, es obvio que el extremo de cualquier cilindro de una capa tocará, y encajará entre, los extremos de tres cilindros en la otra.



Fig. 23. Panal de abejas de la miel, *Apis mellifera*. Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos...*, p. 82.

Es exactamente igual a cuando apilamos balas de cañón en un montón; empezamos con tres, una cuarta encaja entre las otras tres, y la cuarta forma una “tétrada”, o disposición tetragonal regular⁵⁵³.

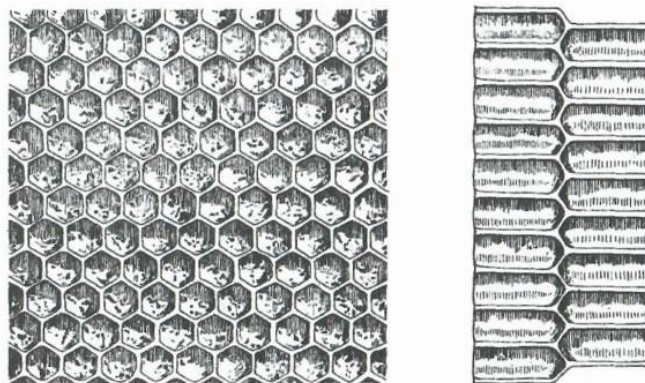


Fig. 24. Porción de un panal. Tomado de T. Rayment, A cluster of Bees (The Bulletin, Sydney). Fuente: THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 116.

⁵⁵³ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 114.

Sin embargo, en el caso de que el experimento lo hiciéramos con esferas⁵⁵⁴, por ejemplo de miga de pan, cada una (como las semillas de las granadas de Kepler) será presionada uniformemente por otras doce (seis en el propio plano, tres por abajo y tres por encima), desarrollándose doce superficies planas que llenarán completamente todo el espacio, lo que dará lugar a un dodecaedro rómbico (sólo en el caso de que se humedecieran, al poder resbalar y deslizarse de modo similar a como ocurre idealmente con las burbujas de jabón, podrían empaquetarse en una forma de tetracaidecaédrica más apretada). Por lo que, en el caso de las celdillas de las abejas, al ser media esfera su terminación, lo que se desarrollará será medio rombododecaedro (Fig. 24). Además, esta forma compleja de construcción ha atraído la atención de los matemáticos desde muy antiguo. Así, por ejemplo, Pappus el Alejandrino concluyó al respecto que “las abejas están provistas de una “cierta previsión geométrica”. “Habiendo, pues, tres figuras que por sí mismas pueden llenar el espacio alrededor de un punto, verbigracia, el triángulo, el cuadrado y el hexágono, las abejas han seleccionado sabiamente la estructura que contenía más ángulos, sospechando que en realidad podría contener más miel que cualquiera de las otras dos”⁵⁵⁵. También destacamos, entre otras muchas, la aserción de Thomas Brown en el *Jardín de Ciro*: “Y los propios panales tan regularmente logrados que sus intersecciones mutuas forman tres rombos en el fondo de cada celdilla; que mirados por separado constituyen tres filas de netas figuras romboidales, conectadas a los ángulos, y así continúan tras diversas cadenas por todo el panal”⁵⁵⁶. Y, por último, añadimos la declaración de Darwin, “la selección natural no podría llevar más allá de este estado de perfección en arquitectura; ya que el panal de la colmena, hasta donde podemos ver, es absolutamente perfecto en lo que se refiere a economizar trabajo y cera”⁵⁵⁷.

⁵⁵⁴ “Lo mismo que el sistema isotrópico ideal de puntos en el plano está dado por los centros de agrupación compacta de circunferencias iguales y tangentes (cada una a las seis que la rodean, equivaliendo la red así obtenida a la de los vértices de la equiparación triangular, los vértices y los centros a la equiparación hexagonal del plano), así también en el espacio la red ideal de puntos isotrópos está dada por los centros de agrupación compacta de esferas iguales y tangentes (cada una a las doce que la rodean, siendo los 12 puntos de contacto los vértices de un cubooctaedro inscrito en la esfera central). Este sistema isotrópico de puntos deriva también en el espacio de la simetría hexagonal, de la cual es su ampliación en tres dimensiones. Recordemos que el cubooctaedro (poliedro semirregular arquimediano de 12 vértices, 8 caras triangulares, 6 caras cuadradas, 24 aristas iguales) tiene sus aristas iguales al radio de la esfera circunscrita: este poliedro y el prisma hexagonal regular constituyen la ampliación en el espacio del hexágono”. Cfr. GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, p. 54.

⁵⁵⁵ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 115.

⁵⁵⁶ *Ibidem*, p. 116.

⁵⁵⁷ *Ibidem*, p. 120.

El ojo facetado o compuesto de los insectos también sigue el mismo patrón hexagonal descrito, al constituirse por un aglomerado de cilindros comprimidos en el espacio ocular, cuya función es seleccionar los rayos de luz que le llegan, para construir una imagen lo más nítida posible, y así poder defenderse mejor de los depredadores y encontrar el alimento con facilidad (Fig. 25). Dentro de los sistemas tegumentarios de los animales encontramos, por ejemplo, que el caparazón de la mayoría de las tortugas constituye un escudo de hexágonos sin intersticios donde puedan penetrar los colmillos de un posible depredador (Fig. 26). Del mismo modo, muchas especies de reptiles y peces tienen el cuerpo cubierto

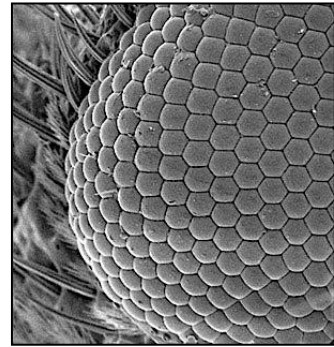


Fig. 25. Ojo facetado de insecto. Fuente: <http://www.neofronteras.com/especiales/>



Fig. 26. Tortuga caguama. Acuario de Gijón (Asturias, España). Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo

de escamas con forma hexagonal, como “el pez cofre”, *Ostracidae Tretraodontiforme*, cuyo cuerpo está protegido por un receptáculo acorazado rígido. Concretamente, la especie *Tetrosomus gibbosus* tiene la piel pavimentada de hexágonos divididos en triángulos. La corteza de muchos frutos presenta también esta configuración como, por ejemplo, la del ananás (Fig. 27).

Por tanto, siguiendo el estudio iniciado con los panales de las abejas, acerca de la partición del espacio de la manera más eficiente:

La tendencia a la nivelación, al equilibrio, a la equiparación de la energía, conduce a la simetría, a la equiparación del plano o del espacio. Las simetrías cuadradas y hexagonales se imponen por el hecho de que los únicos polígonos regulares que pueden llenar el plano (sin intersticios) son el cuadrado, el triángulo equilátero y el hexágono. El único poliedro regular que puede llenar el espacio (por su repetición) es el cubo. Dos poliedros semirregulares permiten también la equiparación del espacio: el prisma regular hexagonal y el



Fig. 27. Piel de ananás. Fuente: <https://membranaparametrica.com/biomimetica/>

semipoliedro (arquimediano) de Lord Kelvin⁵⁵⁸ (8 caras hexagonales, 6 caras cuadradas, 24 vértices, 36 aristas regulares)⁵⁵⁹.

Será pues Lord Kelvin quien, en 1887, al preguntarse cómo podía subdividirse el espacio tridimensional con una superficie de área mínima determine que, a diferencia del rombododecaedro que surge de forma natural en unas condiciones muy particulares, el tetracaidecaedro es el que más llena el espacio y se divide de manera más homogénea. “Kelvin describió primero el tetracaidecaedro de cara plana; más tarde demostró cómo esa figura debe de tener sus caras pandeadas y los bordes curvados para cumplir todas las condiciones del área mínima y adecuarse a las leyes de Plateau”⁵⁶⁰. “En su caso más simple, con todas sus caras planas y equilaterales, se trata del ortotetracaidecaedro” de Kelvin (Fig. 28); y también (aunque Kelvin no lo sabía) uno de los trece poliedros semirregulares e isogónicos, o sólidos arquimedianos”⁵⁶¹.

La conjetura de Kelvin fue aceptada y no se rebatió durante más de cien años, hasta que fue descubierta la estructura de Weaire-Phelan⁵⁶².

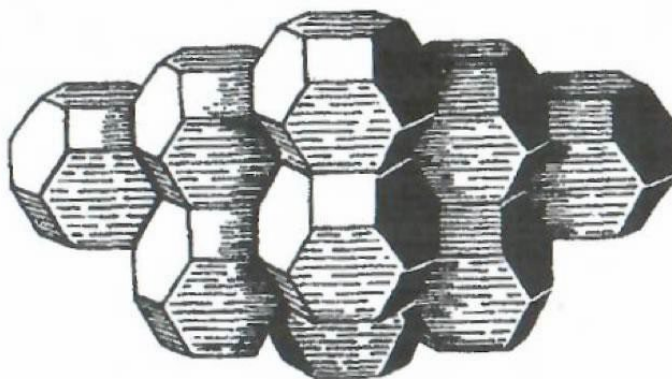


Fig. 28. Un conjunto de ortotetracaidecaedros 14-edro, mostrando el empaquetado compacto. Según F.T. Lewis. Fuente: THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 126.

⁵⁵⁸ William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907) fue un físico y matemático británico que obtuvo diversos títulos por los logros alcanzados a lo largo de su carrera como el de Barón y el de la Orden del Mérito del Reino Unido. También fue miembro de la Royal Society y creador de la escala de temperatura Kelvin. Lord Kelvin destacó por sus importantes trabajos en el campo de la termodinámica y la electricidad, gracias a sus profundos conocimientos en el análisis matemático. Fue uno de los científicos que más contribuyó a modernizar la física.

⁵⁵⁹ GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, p. 54.

⁵⁶⁰ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 125.

⁵⁶¹ “Los poliedros arquimedianos o poliedros semirregulares son poliedros convexos cuyas caras son polígonos regulares idénticos de dos o tres tipos diferentes y en los que cada vértice recibe el mismo número de aristas. Es decir, son una extensión de los regulares al admitir más de un tipo de cara regular, pero mantienen la exigencia de iguales incidencias en los vértices”, en ALSINA, C. *Las mil caras de la belleza geométrica. Los poliedros*. Madrid: RBA Coleccionables, 2010, p. 59. La mayoría de ellos se obtienen por truncamiento de los sólidos platónicos. Arquímedes describió extensamente estos cuerpos en trabajos que se fueron perdiendo, y que en el Renacimiento fueron redescubiertos por artistas y matemáticos. Son siete de los trece los que se pueden obtener truncando los sólidos platónicos: el tetraedro truncado, el cuboctaedro, el cubo truncado, el octaedro truncado o poliedro de Kelvin, el icosidodecaedro, el dodecaedro truncado y el icosaedro truncado. *Ibidem*, pp. 125-126.

⁵⁶² La estructura de Weaire-Phelan es una estructura compleja que fue descubierta por los físicos del Trinity College (Dublín) Denis Weaire y Robert Phelan en 1993. Buscando simulaciones informáticas de la espuma de jabón, encontraron una solución mejor a la conjetura de Lord Kelvin: la estructura de Weaire-Phelan, que se forma de dos compartimentos de igual volumen: un dodecaedro pentagonal irregular y un tetracaidecaedro con dos hexágonos y doce pentágonos, de nuevo con caras curvadas. El área de superficie es 0,3% menor que la de Lord Kelvin (una diferencia considerable en este contexto). El 25% del volumen de esta espuma lo ocupan los dodecaedros y el 75% restante la forma tetracaidecaédrica.

Destacamos, también, la construcción de los radiolarios, que son un grupo de protistas ameboides, con intrincados esqueletos, los cuales están compuestos de sílice como el de tantas esponjas. Estos, y sobre todo su porción exterior, que el naturalista y filósofo alemán Ernst Haeckel llamó “calima”, “está compuesta de una masa de “vesículas” formando una especie de espuma rígida, y equivalente en el sentido físico,

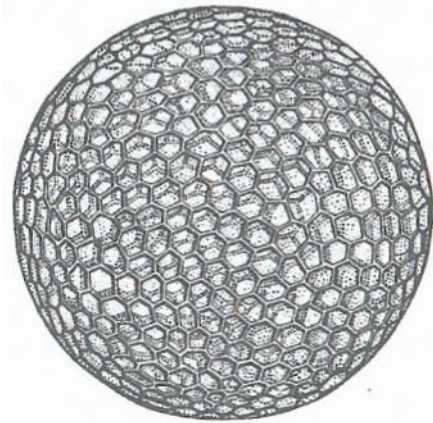


Fig. 29. Amonite *Aulonia hexagona*. Fuente: THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 155.

aunque no necesariamente en lo biológico, a las “células”, por cuanto que las pequeñas vesículas tienen sus propios límites definidos, y sus propios fenómenos superficiales”⁵⁶³. “Sabemos que sus tensiones mutuas *tenderán* a conformarlas a modo de un panel, o red regular de hexágonos, y que el extremo libre de cada prisma hexagonal será un pequeño casquete esférico”⁵⁶⁴ (Fig. 29). Sin embargo, “ningún sistema de hexágonos puede cerrar el espacio; ya sean iguales o desiguales, regulares o irregulares los hexágonos, es

matemáticamente imposible bajo todas las circunstancias. Así, aprendimos con Euler que la disposición de los hexágonos puede ser extendida tanto como se desee, y sobre una superficie plana o curva, pero nunca se cierra. [...] Haeckel afirma en realidad, en su breve descripción de su *Aulonia hexagona*, que tienen que encontrarse unas pocas caras cuadradas o pentagonales entre los hexágonos”⁵⁶⁵. Lo que confirma lo expuesto anteriormente.

En este sentido, cabe reseñar, en tanto ejemplo de lo dicho en el nivel microscópico, la anatomía molecular de sustancias químicas como la molécula que más frecuentemente podemos hallar en la naturaleza, la molécula de carbono puro (C60) también denominada *Fullereno* (Fig. 30) en honor a Buckminster Fuller, inventor de la cúpula geodésica, cuya forma se asemeja a esta molécula (sobre el que hablaremos más extensamente en el capítulo V), y que, junto al grafito y



Fig. 30. Estructura del Fullereno.
Fuente:
https://es.wikipedia.org/wiki/Qu%C3%ADmica_de_fullerenos

⁵⁶³ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 154.

⁵⁶⁴ *Ibidem*, p. 156.

⁵⁶⁵ *Ibidem*, pp. 156-157.

el diamante, constituyen las tres formas alotrópicas del carbono. Así, el *Fullereno* es una molécula hueca de unos 3,55 Å de radio con 60 átomos de carbono, distribuidos en 12 pentágonos y 20 hexágonos con un átomo de carbono en los vértices, siguiendo la simetría del icosaedro truncado, como un balón de fútbol clásico.

También a nivel molecular, destacamos el autoensamblaje de las proteínas, donde de nuevo la esfera está presente por su función protectora. Así, “el empleo de una o unas pocas subunidades (proteicas) para construir estructuras de gran tamaño presenta algunas ventajas: la repetición permite reducir la cantidad de información genética necesaria para definir la forma, la asociación a través de múltiples enlaces facilita tanto el ensamblaje como la disgregación de los componentes, y se minimizan los posibles errores en la síntesis de la estructura”⁵⁶⁶.

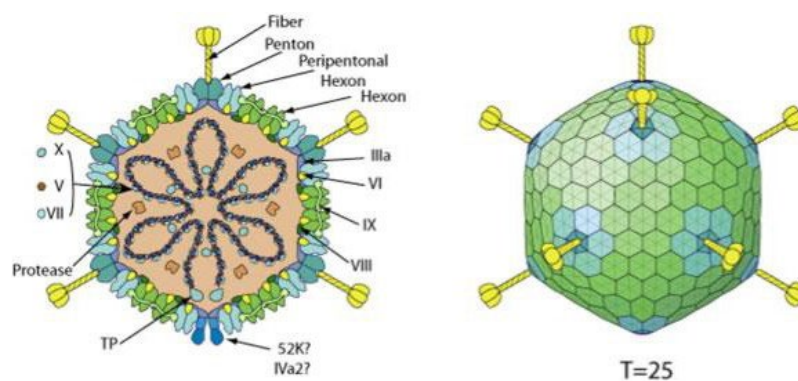


Fig. 31. Estructura de adenovirus. Fuente: <https://ayudahispano-3000.blogspot.com/2015/03/biologia-biologia-sistemica.html>

Especies moleculares simples, suelen formar superficies con propiedades distintas, como por ejemplo la formación de las cápsulas de los virus que toman la forma de una esfera hueca a modo de caparazón, formada por cientos de subunidades proteicas semejantes. Su constitución se asemeja más al crecimiento de los cristales que al de las capas lipídicas, pero con frecuencia da como resultado la formación de estructuras poliédricas regulares. Su configuración geométrica simétrica tridimensional es la más estable, ya que reduce el gasto energético y aumenta su resistencia. Suelen ser cápsulas proteínicas constituidas de moléculas individuales o multímeros plegados, en formas que tienden a unirse debido a simetrías estructurales. Los prismas poliédricos se agregan espontáneamente en capas teseladas y suelen encerrar un núcleo de ADN o ARN. Por ejemplo, los adenovirus (Fig. 31) están constituidos de hasta 1500 unidades de proteínas

⁵⁶⁶ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 42.

dispuestas (en fibras, hexámeros y pentámeros) alrededor de un cuerpo con simetría cúbica como es el icosaedro. Tras invadir una célula huésped, su encapsulamiento regular espontáneo convierte a los virus en sistemas replicativos simples, pero también muy eficaces.

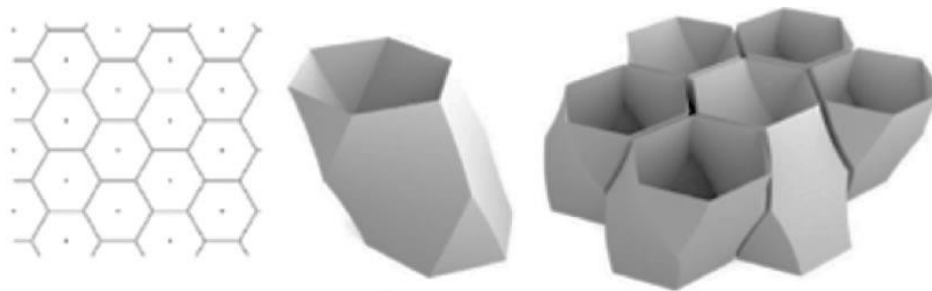


Fig. 32. Empaquetamiento escutoide. Fuente: <https://francis.naukas.com/2019/07/18/escutoides-para-rellenar-el-espacio-delaunay-lofts/>

En cuanto a la organización de los tejidos epiteliales, investigaciones recientes llevadas a cabo por parte de un grupo de científicos del instituto de biomedicina de Sevilla para tratar de explicar la forma que tienen sus células, ha dado como fruto el hallazgo de una forma geométrica que jamás antes fue vista. Según el testimonio de uno de dichos investigadores:

Estábamos intentando entender cómo se organizan los tejidos epiteliales [...] que tenemos en montones de órganos como el hígado, el páncreas y el tubo digestivo. Estos tejidos epiteliales son células que se empaquetan, que están ordenadas muy juntas y, por dificultades técnicas, es difícil saber exactamente como están empaquetadas en tres dimensiones. [...] Entonces lo que hicimos en mi laboratorio fue diseñar un modelo computacional. [...] El modelo computacional predijo una forma geométrica que no estaba descrita, y a esa forma geométrica le pusimos el nombre de “escutoide”. [...] Es como un prisma en el que hay un vértice en el medio. [...] Los prismas no tienen superficies curvas, y eso es lo que hace diferente al escutoide. En el escutoide las caras laterales pueden ser cóncavas o convexas y, así, los escutoides van encajando y no dejan ningún espacio entre ellos”⁵⁶⁷. “Es un asunto de biología, física y matemáticas. El cuerpo animal se desarrolla a partir de una sola célula, el óvulo fecundado, que se va multiplicando y luego forma capas que darán origen a los distintos tejidos y órganos del cuerpo. [...] En realidad, conforme las células de un epitelio crecen, van ocupando más espacio, pero están limitadas por sus vecinas. Por eso, el escutoide es la forma geométrica que les permite ocupar de la manera más eficiente todo el espacio disponible, sin dejar huecos -requisito indispensable para que el epitelio pueda cumplir su función de barrera-

⁵⁶⁷ <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45019575>. (Consulta: 12 agosto 2018).

y al mismo tiempo poder formar tejidos curvos y flexibles (cosa que no sería posible sólo con prismas o pirámides truncadas, y menos con esferitas). En última instancia, se trata de un problema de la física: el escutoide es la forma que reduce al mínimo la superficie celular y por tanto la energía que necesitan las células para formar el epitelio⁵⁶⁸ (Fig. 32).

Así pues, el hexágono también pavimenta las superficies curvas en el mundo culto, mediante redes o mallas de estructura hexagonal o triangular equilátera (polígono que surge de la división en partes iguales de un hexágono regular). Las cúpulas geodésicas, tan empleadas hoy en arquitectura, son superficies que surgen de las sucesivas triangulaciones del icosaedro (poliedro cuyas veinte caras son triángulos equiláteros), que se proyectan en la esfera envolvente. Pero como ya hemos introducido



Fig. 33. Mosaico hexagonal gaudiano. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 32.

anteriormente, la forma más adecuada para cubrir superficies esféricas se consigue mediante una red de hexágonos y pentágonos, dando así lugar a una figura poliédrica



Fig. 34. Diseño hexagonal para pavimento hidráulico Casa Milá. Fuente: TRIADO, J. R. *Gaudí. Genios del Arte*. Madrid: Susaeta, 2000, p. 87.

truncada, el icosaedro arquimediano. Aplicaciones de esta figura la encontramos, como ya se dijo, en los balones de fútbol reglamentario.

También vemos creativas composiciones gaudianas del hexágono en dos pavimentos de la Casa Milá, uno para el diseño del parquet, basado en un original mosaico en madera bicolor de hexágonos formados por doce triángulos rectángulos (Fig. 33), y otro en mosaico hexagonal hidráulico producido por la casa *Escofet*, reproduciendo un diseño gaudiano que evoca la delicadeza de las formas naturalistas marinas en color verde suave mar (Fig. 34).

⁵⁶⁸ <https://www.milenio.com/opinion/martin-bonfil-olivera/la-ciencia-por-gusto/escutoides-el-dia-que-los-biologos-sorprendieron-a-los-fisicos>. (Consulta: 12 agosto 2018).

13.3. LA ESPIRAL EMPAQUETA

La espiral deriva, al igual que el hexágono, de la simetría circular. “Es una curva que, empezando desde un punto de origen, disminuye continuamente su curvatura al alejarse de ese punto; o, en otras palabras, cuyo radio crece sin cesar”⁵⁶⁹. Es decir, se trata de una forma matemática simple que se genera con el desplazamiento progresivo de un punto al girar en torno al centro de una circunferencia.

En el mundo inerte la selección fundamental favorece la emergencia homeodinámica de espirales a escalas sobre todo cósmicas por su estabilidad, por ejemplo, en la generación de las galaxias (Fig. 35). “Éstas son conjuntos de cientos de miles de millones de estrellas interactuando a través de fuerzas gravitatorias. Son quizás los mayores conjuntos de materia con cierta independencia del resto del universo”⁵⁷⁰. La forma en espiral de una galaxia supone un problema teórico aún por desentrañar. Las estrellas del interior giran más rápido que las del extrarradio; los brazos espirales no se enrollan, pero son fundamentales para comprender la estabilidad del disco galáctico.



Fig. 35. Galaxias. Fuente: <http://www.freepik.es>

También mencionaremos aquí, siguiendo el argumento ya planteado en el apartado de la esfera, el suceso que se produce al desplazar una superficie jabonosa por un alambre curvado, “por muy fantásticamente que el alambre se doble, vemos que no tiene fin el número de superficies de área mínima que se pueden construir o imaginar. Mientras algunas de estas son por supuesto muy complicadas, otras, tales como un tornillo en espiral o helicoidal, son relativamente simples”⁵⁷¹.

Si ahora centramos nuestra atención en otro disco, esta vez más próximo a nuestro nivel de observación, como puede ser el disco de una placa de Petri típica en laboratorios químicos y microbiológicos, podremos apreciar el célebre caso de los denominados “relojes químicos” o reacciones BZ (Fig. 36) en honor a sus descubridores, Beloúsov y Zhabotinsky, donde vistosos patrones espirales emergen de forma espontánea fruto de la oxidación catalítica de un compuesto orgánico soluble como el ácido malónico. Esta reacción autocatalítica, que ya introdujimos en el capítulo II de nuestra tesis, dentro de

⁵⁶⁹ *Ibidem*, p. 171.

⁵⁷⁰ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 196.

⁵⁷¹ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 171.



Fig. 36. Reacción de Belousov y Zhabotinsky. Fuente: SCHNEIDER, E y SAGAN, D. *La termodinámica de la vida...*, p. 137.

los fenómenos cíclicos termodinámicos, puede seguir vías alternativas. Por ejemplo, cuando las sustancias químicas permanecen un tiempo relativamente largo en el reactor sometido a una agitación continuada, el sistema se comporta como un sistema abierto cercano al equilibrio, alcanzando un estado estacionario. Pero si el tiempo de residencia en el reactor se acorta, el sistema se comporta como un sistema lejos del equilibrio en que se producen oscilaciones químicas periódicas en sus moléculas, pudiendo cambiar súbitamente de color, por ejemplo, del amarillo al incoloro sucesivamente, en intervalos regulares. En ellos, el sistema químico actúa, en puntos críticos de inestabilidad lejos del equilibrio, como un todo, produciendo un alto nivel de orden a través de la actividad coherente espontánea de millones de moléculas. Esta transición, de un estado aparentemente estable a otro opuesto, es propia de los sistemas químicos de no equilibrio. La coexistencia de dos o más estados estables bajo las mismas ligaduras o condiciones de contorno, se conoce como “biestabilidad”. Por tanto, los nuevos estados dependerán de las condiciones experimentales concretas, y de la historia de reacciones pasadas.

Si en vez de producir condiciones de cebado y agitación continua de reactantes que den como solución reacciones BZ la reacción se realiza sobre una capa fina, se producirán patrones espaciales, llegando a proliferar espectaculares frentes de onda, que adoptarán la forma de círculos concéntricos y espirales dextrógiras (en el sentido horario) y levógiras (contra-horario). Se trata de frentes de onda a simple vista observables, donde miles de moléculas se coordinan en el espacio y el tiempo como en una coreografía, produciéndose una telecomunicación miniaturizada.

El Universo está como comprimido por una fuerza activa que da a la materia un movimiento curvilíneo o turbulento, según una curva sin tangente en el límite: y la división infinita de la materia hace que la fuerza compresiva relacione cualquier porción de la materia con los ambientes, con las partes circundantes que bañan y penetran al cuerpo considerado, y determinan en él la curva. Al dividirse sin cesar, las partes de la materia forman pequeños torbellinos en un torbellino, y en éstos otros todavía más pequeños, y otros todavía en los intervalos cóncavos de los torbellinos que se tocan⁵⁷².

⁵⁷² DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco...*, p. 13.

Así mismo, la selección natural y culta propician la abundancia de espirales, sobre todo en el nivel mesoscópico, ya no tanto por su estabilidad sino por su adaptabilidad y creatividad. Así, en el mundo vivo la espiral que emerge morfodinámicamente supera la selección natural al crecer para ahorrar espacio (empaquetamiento), y también para garantizar la movilidad. Un ejemplo de ello se presenta en la forma hermosa de las conchas de los moluscos (Fig. 37) -como dijo Plinio, “magna ludentis Natura evarietas (jugáis con la gran variedad de la naturaleza)”⁵⁷³, y en los caparazones de muchos invertebrados. Un dato curioso es que las que más abundan, dentro de su improbabilidad, son las dextrógiras frente a las levógiras, lo que nos lleva a creer que la selección natural actuó una sola vez en favor del sentido derecho de giro. Moluscos cefalópodos extintos como los ortoceras y amonites, cuyos fósiles podemos apreciar en los museos de ciencias, lo demuestran. También se hallan en los cuernos de los rumiantes, entre los que distinguimos distintos grados de inteligibilidad al apreciar lo común entre lo diverso, desde la forma más o menos recta de los cuernos de los rebecos hasta la espiral casi perfecta de los muflones. En definitiva, la espiral en los caparazones y cuernos se produce por incrementos sucesivos, a lo largo del tiempo, de materia antigua sobre nueva, conformando un todo. Y es que, como vamos viendo en esta tesis, el paso del tiempo cambia todo. Es sólo una cuestión de tiempo.



Fig. 37. Sección de una concha de Nautilus.
Fuente: PEARSON, D. *Arquitectura orgánica moderna. Un nuevo camino para el diseño urbano rural*. Barcelona: Art Blume, 2002 ..., p. 64.

De igual forma, encontramos espirales en el mundo vegetal. Por ejemplo, en la formación de los verticilios espirales de muchas plantas, como ocurre con los flósculos de un girasol, o en lo que se conoce como *filotaxis*⁵⁷⁴ espiral. En ella la distribución de vástagos, pétalos y semillas crecen según una pauta que se ajusta estrechamente a la serie de Fibonacci (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55...), donde cada número se genera sumando los dos que lo preceden. Y, como veremos, “las relaciones entre la sección áurea⁵⁷⁵ y la

⁵⁷³ *Ibidem...*, p. 171.

⁵⁷⁴ “La *filotaxis* es una palabra de origen griego, compuesta por *phyllon*, que significa “hoja”, y *taxis*, que quiere decir “orden”, con la que se define la disciplina de la botánica que estudia la disposición de las hojas sobre el tallo, la cual, como veremos, sigue pautas geométricas y numéricas. Esta disciplina permite descubrir algunas de las manifestaciones naturales más asombrosas por la inteligencia de su diseño, a menudo expresable en términos matemáticos increíblemente precisos”. Cfr. CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 127.

⁵⁷⁵ “La proporción más conocida, la más extendida en la naturaleza y la más usada por el hombre, ya haya sido de manera consciente o no, es la *sección áurea* o divina proporción. Probablemente por herencia de Babilonia a través de Egipto, Pitágoras y su escuela consideraron el interés de esta proporción, perfectamente clara en el pentagrama o pentalfa, símbolo de dicha escuela, así

sucesión de Fibonacci (Fig. 38) son múltiples e insospechadas [...] basta apuntar en esta introducción las asombrosas correspondencias entre el reino abstracto de los números y

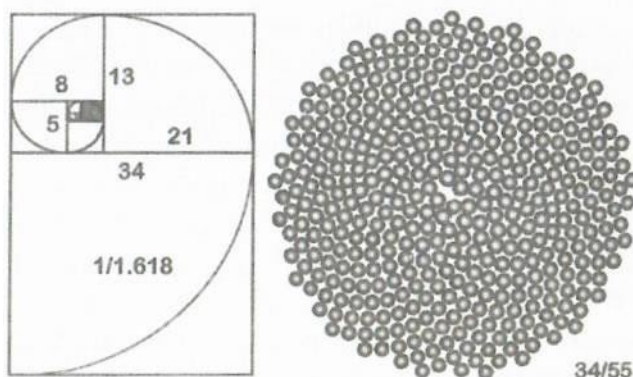


Fig. 38. Dos expresiones de la serie y razón de Fibonacci. Izq.: Rectángulo Áureo. Dcha.: Pauta de máximo empaquetamiento espiral. Fuente: DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta...*, p. 253.

la realidad palpable, el sueño pitagórico convertido en realidad en un escenario de excepción”⁵⁷⁶. Así nos lo ilustra el propio neopitagórico Nicómaco de Gerasa, en su obra compilación de elementos tomados de la brillante escuela de Alejandría, “Introducción a la Aritmética”.

“Los antiguos, que bajo la dirección espiritual de Pitágoras fueron los primeros en dar a la ciencia una forma sistemática, han definido a la filosofía como el amor al conocimiento: las cosas incorpóreas como las cualidades, las configuraciones, la igualdad...las relaciones, las disposiciones..., los lugares, los tiempos... son por esencia inmutables e intercambiables, pero pueden participar accidentalmente de las vicisitudes de los cuerpos a los que son afectados. “Y si accidentalmente el Conocimiento se ocupa también de los cuerpos, soportes materiales de las cosas incorpóreas, es sin embargo a éstas a las que se aplicará de un modo más especial. Pues estas cosas inmateriales, eternas, constituyen la verdadera realidad. Pero lo que está sujeto a formación y destrucción (la materia de los cuerpos) no es actualmente real por esencia. “Todo lo que la naturaleza ha dispuesto sistemáticamente en el Universo parece haber sido, tanto en sus partes como en el conjunto, determinado y puesto en orden de acuerdo con el Número, por la previsión y el pensamiento de Aquel que creó toda las cosas; pues el modelo estaba fijado, como un bosquejo preliminar, por la dominación del Número preexistente en el espíritu de Dios creador del mundo, numero-idea, puramente inmaterial en todos los aspectos y, al mismo tiempo, la verdadera y eterna esencia, de manera que de acuerdo con el Número, como de

como en el pentágono regular. Comprobaron que segmentos en que cada lado del pentagrama divide a los demás se relacionan mediante una proporción tal que el total del lado es a la parte mayor como ésta es a la menor. Encontraron el valor de esta proporción equivalente a 1,61803...Es también un número inconmensurable (como la diagonal del cuadrado de lado 1), pero con unas características muy particulares, pues su inverso es 0,618... y su cuadrado es 2,618... En total, el pentagrama contiene 200 secciones áureas. Por eso los pitagóricos la consideraron un número sagrado. Euclides, más científicamente, la denominó “división de un segmento en media y extrema razón” y Vitruvio la enunció mediante la proyección de un pentágono regular sobre una recta paralela al diámetro de la circunferencia circunscrita. Luca Pacioli la llama “proporción divina”, Leonardo “sección áurea” (de aquí sección áurea o número de oro) y Kepler “sección divina”. Éste fue el primero en mencionar su importancia en botánica. [...] La denominación Φ (phi) para este número la puso Theodor Cook en honor a Fidias (quizás porque la P de Policeto ya se había empleado para el número π (pi), también inconmensurable). Existen dos trazados gráficos para la determinación de la sección áurea, uno a partir del segmento que queremos dividir y el otro a partir de la parte mayor del segmento total”. Cfr. NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico...*, p. 113-115.

⁵⁷⁶ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 17.

conformidad, en un plano artístico, fueron creadas todas las cosas, y el Tiempo, el movimiento, los cielos, los astros y todos los ciclos de todas las cosas⁵⁷⁷.

Así, la sucesión de Fibonacci corresponde al décimo y último tipo de las proporciones enumeradas por Nicómaco de Gerasa.

Los pensadores de la Grecia clásica ya advirtieron algunas de estas propiedades, pero sería Leonardo el primero en desentrañar las claves de la disposición. El genio se dio cuenta de que las hojas se colocaban siguiendo espirales a lo largo del tallo en grupos de cinco, lo que indica que el ángulo de giro de las hojas tiene que ver con múltiplos de 1/5. Un poco más tarde, Kepler observó que el pentágono tenía una presencia importante en las flores, que a menudo tienen cinco pétalos, o en las frutas, cuyas semillas a menudo se distribuyen formando un pentágono estrellado, como la manzana.

La filotaxis y las matemáticas comienzan a aproximarse en el siglo XIX, de manos del naturalista alemán Karl Schimper (1803-1867) y del cristalógrafo francés Auguste Bravais (1811-1863). Ambos advirtieron la presencia de números consecutivos de la sucesión de Fibonacci en las piñas. En sus estudios desarrollaron la regla general de los factores de la filotaxis, que podían ser expresados como cocientes de los números de Fibonacci. A partir de entonces, la sucesión de Fibonacci y la botánica quedaron unidas⁵⁷⁸ [Por ejemplo] las hojas de la mayoría de las plantas de tallo alto parten de este último siguiendo una espiral, y cumplen la ley de divergencia, que establece que, para cada especie de planta, el ángulo que forman dos hojas consecutivas es constante y se llama ángulo de divergencia. Este ángulo se expresa en grados, como una fracción en la que el numerador es el número de vueltas alrededor del tallo desde una hoja a la siguiente, y el denominador, el número de hojas que se encuentran en ese recorrido.

La serie de Schimper-Braun, formada por los cocientes entre uno de los términos de Fibonacci y el de dos lugares más adelante: a_n/a_{n+2} , nos da una clasificación de muchas especies según su ángulo de divergencia. Si recordamos que el cociente entre dos términos consecutivos, a_{n+1}/a_n , tiende a Φ , tendremos que la serie anterior tenderá a $1/\Phi^2$. El razonamiento matemático sería más o menos así:

$$\frac{a_n}{a_{n+2}} = \frac{a_n}{a_{n+1}} \cdot \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} \rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} \cdot \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} = \frac{1}{\Phi} \cdot \frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\Phi^2}$$

⁵⁷⁷ GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos ...*, p. 24.

⁵⁷⁸ *Ibidem*, p. 129.

[...] Las hojas que crecen primero y están más abajo tienden a estar más alejadas del tallo de forma radial cuando se ve la planta desde arriba, porque allí el tallo es más grueso. Bravais descubrió que las nuevas hojas

$$360^\circ \cdot \frac{1}{\Phi^2} = \frac{360^\circ}{\Phi^2}$$

avanzaban rotando el mismo ángulo aproximadamente $137^\circ,5$. Si calculamos:

(los 360° que corresponden a una vuelta completa por el límite al que converge la sucesión anterior), se obtiene justamente $137^\circ,5$, que a veces se llama *ángulo áureo*⁵⁷⁹. (Fig. 39).

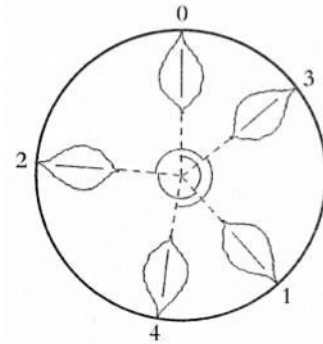


Fig. 39. Las hojas adyacentes del tallo de un girasol se disponen con una distancia angular aproximadamente $137,5^\circ$ entre sí, es decir, cada una rota $137,5^\circ$ con respecto a la anterior. Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 131.

De igual forma, también “el profesor Wiener encontró en 1875 que el ángulo $137^\circ 30' 28''$ denunciado a menudo en filotaxia en la separación angular (helicoidal) constante de las ramas o los tallos, satisface la ecuación $\alpha = \pi/\Phi^2$ ”⁵⁸⁰. Y es que, “los objetos esféricos distribuidos en torno a un punto central según una pauta de máximo empaquetamiento también forman un patrón autosemejante a cualquier escala. Cada vez que se añade un objeto, el siguiente se encuentra a $137^\circ,5$ del anterior. Dependiendo del tamaño de los componentes, una matriz autosemejante de esta clase mostrará espirales opuestas entrecruzadas, tales que el número de espirales en cada sentido se corresponde con los números de Fibonacci adyacentes”⁵⁸¹.

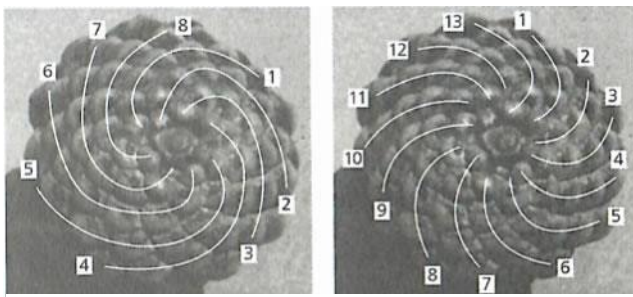


Fig. 40. El número de espirales (8, 13) en cada uno de los sentidos de giro de esta piña son términos contiguos de la sucesión de Fibonacci. Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 130.

Así, en una piña de pino, por ejemplo, podemos encontrar que sus facetas se disponen en espirales de ocho brazos dextrógiros y trece brazos en sentido levógiro (Fig. 40).

Análogamente, “el número de pétalos de muchas flores suele ser también alguno de los términos de la

sucesión de Fibonacci, como en el caso de la lila (3), el ranúnculo (5), la espuela (8), la

⁵⁷⁹ *Ibidem*, pp. 130-131.

⁵⁸⁰ Cfr. GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, pp. 61-62.

⁵⁸¹ DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia ...*, p. 253.

caléndula (13) o el aster (21). Los diferentes tipos de margaritas tienen distintos números de pétalos, pero siempre son números de Fibonacci (21, 34, 55, 89)”⁵⁸². Y, “como ocurre en la arquitectura, a veces la presencia de la proporción áurea en las formas y dimensiones vegetales puede parecer más forzada que natural, pero los casos rigurosamente documentados no sólo son sorprendentes, sino muy sugerentes y hermosos.”⁵⁸³ (Fig. 41).

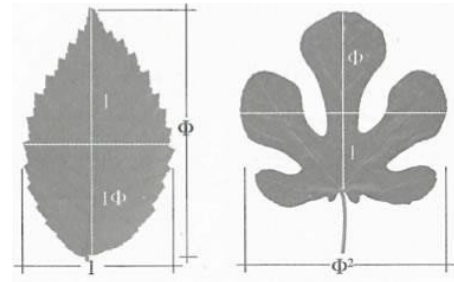


Fig. 41. Proporciones áureas de las hojas del olmo de montaña (*Ulmus glabra*) y al lado la frecuente higuera (*Ficus carica*). Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 134.

También las ramas y hojas de los árboles nacen en espiral. Aunque a lo largo del tiempo un árbol va creciendo, su forma exterior no varía, ya que las proporciones entre su altura y la de sus ramas y demás formas relativas se mantiene (Fig. 42).

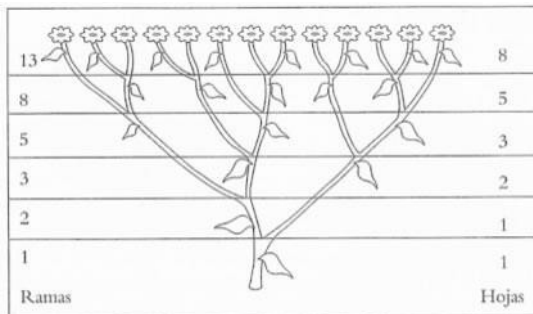


Fig. 42. El botón de plata (*Achillea ptarmica*) es una de las muchas plantas cuya disposición de ramas y hojas sigue una pauta de sucesión de Fibonacci. CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 133.

En definitiva, esta distribución Fibonacci en espirales de las ramas y hojas en estructuras vegetales resulta ser muy ventajosa, a la hora de minimizar la interferencia mutua para captar la luz solar, los nutrientes, etc. Según los modelos matemáticos desarrollados hace tiempo, se ha demostrado que tal pauta de crecimiento refleja procesos de desarrollo en los que las

unidades estructurales se van sumando del centro a la periferia, dependiendo de las unidades añadidas anteriormente. En el ápice de una planta en crecimiento esto se regula mediante señales emitidas por las yemas previamente formadas, las cuales inhiben el crecimiento de nuevas yemas. Ya que la concentración de estas moléculas es menor con la distancia y con la maduración de cada yema ya presente, solo crecerán nuevas yemas allí donde estas influencias inhibitorias, que convergen desde las yemas brotadas anteriormente, son más tenues. La pauta de crecimiento de la serie de Fibonacci se genera no conforme a ninguna plantilla o forma arquetípica, sino a la emergencia inducida por la interacción de efectos de difusión, la geometría de crecimiento y el umbral de las señales para la generación del nuevo tejido vegetal.

⁵⁸² CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 134.

⁵⁸³ *Ibidem*, p. 134.

Se ha verificado recientemente que este patrón de crecimiento también emerge espontáneamente en procesos inorgánicos. Por ejemplo, científicos chinos han reportado el crecimiento espontáneo en forma de conos, según una pauta de espirales entrecruzadas de 5x8, 8x13 o 13x21 brazos de nódulos minerales sobre una superficie metálica, consecuencia de efectos electroquímicos. La emergencia de esta pauta de crecimiento no sólo en el contexto vital, sino también en el inorgánico, demuestra que no es únicamente una expresión de su carácter funcional.

Y, por último, “Trabajando en sentido inverso, desde las matemáticas hacia la botánica, un equipo de científicos liderado por N. Rivier descubrió en 1984 que, utilizando un algoritmo matemático con un ángulo de crecimiento igual al ángulo áureo, se obtienen estructuras similares a girasoles reales. Su conclusión fue interesante: son los propios requerimientos de homogeneidad y autosimilitud los que limitan de manera drástica las estructuras posibles, lo que podría explicar la frecuente aparición de los números de Fibonacci y de la razón áurea en la filotaxis”⁵⁸⁴.

La espiral más básica es la conocida como espiral de Arquímedes (Fig. 43): “Si una línea recta gira uniformemente sobre su extremo, un punto que se desplace asimismo uniformemente sobre ésta describirá la espiral uniforme”⁵⁸⁵, de modo que la distancia al eje central es proporcional al ángulo girado.

La espiral equiangular o *áurea* da forma a los caracoles, y quizás su ejemplo más extraordinario es el nautilus, o nautilo (*Nautilus pompilius*). La estructura de su interior se construye añadiendo cámaras de mayor tamaño cada vez, pero siempre conservando su forma. Sobre cada parte de la concha que permanece se añade otra nueva, exactamente igual, pero más grande. En la estructura espiral del nautilo influyen también movimientos de turbulencia con velocidad de expansión creciente, que podemos observar

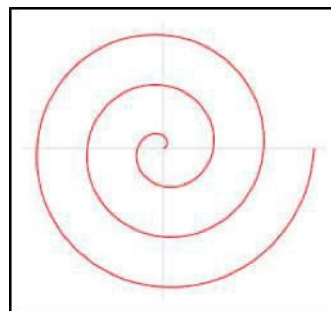


Fig. 43. Espiral de Arquímedes.
Fuente: <http://www.wikipedia.org>

en los remolinos de los ríos o en un líquido que se va por el desagüe. A gran escala, ésa es la disposición de las galaxias”⁵⁸⁶, “y, de regreso a la naturaleza en tierra firme, a la elegancia sin par de la disposición de los pétalos de una rosa”⁵⁸⁷.

⁵⁸⁴ *Ibidem*, pp. 131-132.

⁵⁸⁵ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 174.

⁵⁸⁶ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 135.

⁵⁸⁷ *Ibidem*, p. 16.

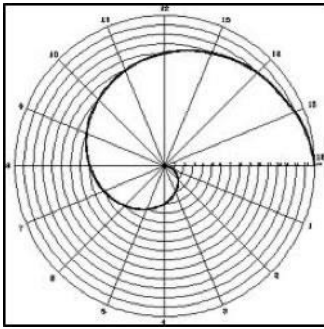


Fig. 44. Espiral logarítmica.
Fuente:
<http://www.espilon.es>

Por lo que, esta forma pertenece al tipo de curva que fue descubierta por Descartes. Sobre ella dijo D'Arcy Thompson: "Esta notable propiedad de aumentar por crecimiento terminal sin modificación de la forma total es característica de la espiral logarítmica y de ninguna otra curva matemática... Toda curva plana que parte de un punto fijo, y de tal naturaleza que el área polar de un sector sea siempre gnomon⁵⁸⁸ respecto del área precedente obtenida, es una

espiral logarítmica"⁵⁸⁹. Luego "si, en lugar de desplazarse con una velocidad uniforme, nuestro punto se mueve a lo largo del radio vector con una velocidad que se incrementa conforme aumenta su distancia del polo, entonces el camino descrito se denomina espiral equiangular"⁵⁹⁰ logarítmica o logística (Fig. 44). Por ello, "los insectos trazan una espiral áurea cuando se acercan a un punto de luz.

Si en vez de alejarnos de un punto determinado, queremos acercarnos a él conservando el ángulo de giro, sólo podemos hacerlo así. Las aves de presa mantienen esa trayectoria cuando se lanzan a cazar. Es la única manera en la que pueden mantener la cabeza recta y variarla de posición con lo que siempre tienen control visual sobre las presas y maximizan la velocidad"⁵⁹¹.

Por otra parte, una representación geométrica de la serie de Fibonacci es la del Rectángulo áureo (Fig. 45), en el que sus lados son también proporcionales a la razón $\Phi = 1,618033\dots$, e igualmente este se puede dividir en una serie infinita anidada de

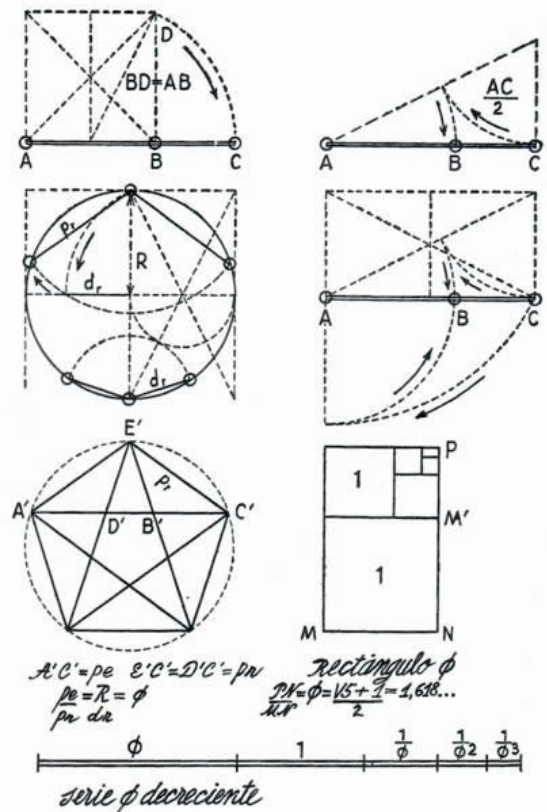


Fig. 45. Sección Áurea. Pentágono. Pentagrama.
Rectángulo Φ . Fuente: GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, p. 48.

⁵⁸⁸ "D'Arcy Thompson reintroduce aquí el término gnomon en la acepción que tenía en la teoría pitagórica de los números figurados: es un número (o una figura) que agregado a un número (o una figura) no cambia la forma de éste. Los números figurados de una misma sucesión son todos semejantes, y las diferencias sucesivas son gnómones, "Si una estructura creciente está compuesta de partes sucesivas homotéticas (semejantes) y semejantemente dispuestas, podemos trazar siempre por los puntos correspondientes una serie de espirales logarítmicas". Cfr. GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, p. 55.

⁵⁸⁹ *Ibidem*, pp. 55-59.

⁵⁹⁰ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 175.

⁵⁹¹ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 126.

rectángulos cada vez más pequeños. Dichos rectángulos serán autosemejantes, pudiéndose trazar en su interior la espiral aurea inscrita (que es una espiral logarítmica), siendo esta también autosemejante, a cualquier escala. Se trata pues de un crecimiento homotético que es a la vez aditivo y geométrico; en definitiva, su razón es la característica de las simetrías y crecimientos pentagonales.

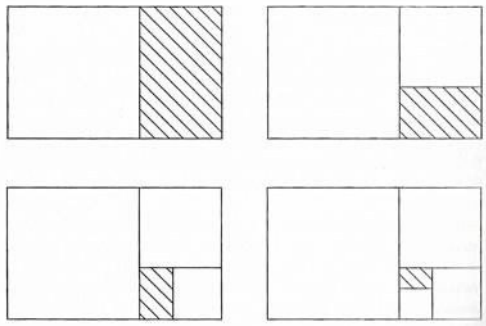


Fig. 46. Sección Áurea. Pentágono. Pentagrama. Rectángulo Φ . Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 62.

Y es que, si sobre un rectángulo áureo vamos restando cuadrados (Fig. 46), iremos obteniendo en los espacios sobrantes rectángulos áureos semejantes (figuras rayadas). Y si en cada uno de dichos cuadrados vamos trazando arcos de circunferencia, de radio el lado de dicho cuadrado y de centro su vértice (puntos 1, 2, 3, 4 y 5) (Fig. 47), obtendremos inscrita al rectángulo de forma indefinida una espiral logarítmica o áurea.

En resumen, como aseveró Ghyka Matila,

en los sistemas que contienen materia organizada - vida-, y que pueden derogar el principio de mínima acción, encontramos a menudo formas fundadas sobre la simetría pentagonal, es decir, sobre el tema asimétrico de la sección áurea (flores, organismos marinos, cuerpo humano)". [...] El fenómeno causal de la asimetría es, en este caso, el crecimiento de los seres vivos, crecimiento que actúa de dentro hacia afuera, como por *inhibición*,

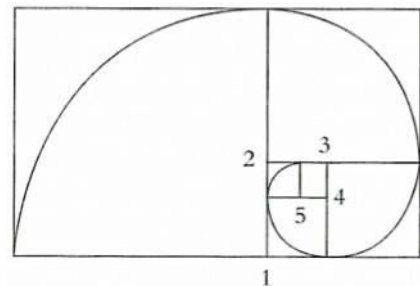


Fig. 47. Trazado de espiral Logarítmica. Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 63.

turgencia, y no por *aglutinación*, como los cristales, y este crecimiento vivo tiende a producir formas sucesivas homotéticas, es decir semejantes a sí mismas. Aquí se manifiesta de nuevo la diferencia esencial entre simetría hexagonal que corresponde perfectamente al equilibrio inerte (cuyos cauces ideales son: relleno del plano o del espacio, isotropismo, periodicidad estática, yuxtaposición del mismo motivo intercambiable, sin dirección favorecida), y la simetría pentagonal que introduce tanto en el plano (prolongación de las líneas del pentágono que engendra pentagramas cuyas dimensiones aumentan en progresión geométrica) como en el espacio (generación, abultamiento de los poliedros estrellados alternados a partir de un núcleo dodecaedro),

una pulsación en progresión geométrica, una periodicidad dinámica verdaderamente ritmada, que no sólo corresponde a un crecimiento cualquiera, sino al crecimiento perfectamente homotético, por el hecho de que toda pulsación en razón geométrica se puede considerar como la huella esquemática de una espiral logarítmica, curva ideal de crecimiento homotética, analógica⁵⁹².

En otro orden de cosas, en los últimos tiempos también se han englobado, dentro de los ejemplos autoorganizativos, la formación de pautas regulares de bandas y manchas característicos de la coloración críptica y aposemática adaptativa en animales, como las bandas regulares de tigres y cebras, las complejas líneas y manchas espirales de las conchas de ciertos caracoles, las manchas de leopardos y jirafas, y los bellos patrones de color iridiscentes de las alas de las mariposas, entre otros. Tanto su estudio bajo el prisma de la simulación como los análisis de los mecanismos moleculares y celulares implicados



Fig. 48. Trompa de elefante.
Fuente: <http://www.taringa.net>

en su desarrollo han demostrado que se trata de procesos dinámicos análogos a los que intervienen en la formación de las espirales de Fibonacci en las plantas. Se trata de procesos generadores de patrones mediante dinámicas de difusión molecular local, que crean la regularidad y ruptura de simetrías empleando interacciones moleculares y celulares, distintas en cada caso.

También, la función empaquetadora espiral supone la solución convergente natural perfecta ante el conflicto de tratar de defender el todo, al que pertenece una parte de un individuo vivo, en detrimento de la movilidad de dicho todo. Los ejemplos de estos apéndices discurren entre casos como cuernos, lenguas, colas, trompas, etc. Así de forma transitoria observamos espirales en “el enroscamiento de la trompa de un elefante (Fig. 48), en las espiras envolventes de una serpiente, en los enrollamientos del brazo de una sepia, en las colas de un mono, de un caballito de mar, de un camaleón”⁵⁹³, o en la trompa de algunas mariposas (Fig. 49) que, una vez desplegada, puede facilitarle llegar a flores en sitios recónditos, distantes hasta veinte veces la longitud de su



Fig. 49. Trompa de mariposa.
Fuente:
<http://www.esmaloal.wordpress.com>

⁵⁹² GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, p. 54.
⁵⁹³ THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 171.

cuerpo, y que tras haber libado vuelve a enrollarse, pudiendo regresar libremente sin que esta comprometa la estabilidad de su vuelo.



Fig. 50. Hoja de helecho al abrirse. Fuente: PEARSON, D. *Arquitectura orgánica moderna...*, p. 52

Puesto que la movilidad sólo es posible en forma de semilla, también nos encontramos muchos casos en botánica de empaquetamiento espiral donde el ahorro de espacio es fundamental. Es el caso de una hoja cordiforme como la de los helechos (Fig. 50), que, al habitar en entornos definidos por la competencia de la luz y el agua, ya se encuentra totalmente formada antes de desplegarse la planta, casi completa en masa y volumen, empaquetada en espirales primarias y secundarias.

También la espiral es una forma muy redundante en el mundo culto, empaquetando por selección cultural. La espiral inunda nuestros hogares en las proyecciones sobre el plano de tornillos, tuercas, casetes de radio, cintas de celofán, discos compactos, matasuegras, etc. De igual forma la selección culta premia la proliferación de la espiral, ya no con la función empaquetadora sino con la subfunción del símbolo: “La espiral es un signo omnipresente en la historia de casi todas las culturas humanas y casi siempre con el mismo significado de símbolo solar, de eternidad, fecundidad o feminidad”⁵⁹⁴. Uno de los primeros ejemplos simbólicos de la espiral lo tenemos en un grabado Neolítico en roca, hallado en el desierto de Aït Pवासik, en Marruecos (Fig. 51). Se trata de un claro ejemplo de símbolo con un alto nivel de abstracción; se cree que tuvo el significado mágico de propiciar la caza y la salud. De modo que, en palabras de Wagensberg, “aquellos humanos no sólo miraban, vigilaban y deseaban a los animales. Intentaban conocerlos. Conocerlos para anticipar su incertidumbre. [...] El dibujo no representa un individuo vivo, ni parte de él, sino una forma matemática, un símbolo puro, una espiral, la mejor forma para representar la continuidad, la que tarda más en agotar el tiempo o el espacio. [...] la espiral empaqueta, guarda, simboliza continuidad y, según cómo, también agarra un poco... Todo eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la espiral”⁵⁹⁵.

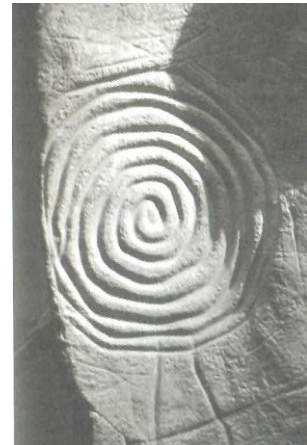


Fig. 51. Espiral Neolítica originaria del norte de África. Fuente: WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 205.

⁵⁹⁴ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 206.

⁵⁹⁵ *Ibidem*, pp. 205-206.

Por otra parte, en el mundo culto la espiral también ha sido un recurso arquitectónico, entre la función y el símbolo. Citaremos aquí como ejemplo distintivo el remate en espiral de la bóveda de la antesacristía de Murcia (Fig. 52), aunque más adelante desarrollaremos en profundidad otros ejemplos. En este caso, como dice Bonet correa:

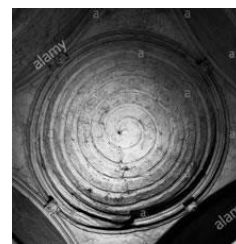


Fig. 52. Espiral bóveda Catedral de Murcia. Fuente: [http:// www.alarmy.es](http://www.alarmy.es)

En la antesacristía, a la que se llega de la girola, tras haber pasado la portada muy a lo Andrea Sansovino, hay una cúpula en forma de espiral. Este nervio, de línea continua, no tiene función estructural. Su perfil abultado y redondeado resulta muy primitivo y sin antecedentes formales en lo clásico. Quizá sea excesivo pensar que Jacobo Florentín quiso simbolizar en ella la evolución del universo y la rotación de la Tierra, ya que la espiral desde lo antiguo estuvo identificada con un signo macrocósmico de tipo positivo o negativo, según su utilización. De todas formas, por su línea envolvente, que se acaba en círculo, y por el movimiento y su desarrollo en la bóveda, produce un efecto de potente creación que sobrepasa lo decorativo⁵⁹⁶.

Volviendo a la simbología implícita en el pentagrama, y a su relación con la espiral áurea:

Hemos visto que los pitagóricos habían escogido el pentagrama, símbolo de la armonía viva y de la salud, como su santo y seña. Lo encontraremos en los cabalistas, alquimistas, magos de la Edad Media y del Renacimiento, como símbolo de microcosmos, es decir, del hombre tanto físico como astral, para emplear el término moderno que interpreta bastante bien las ideas de los ocultistas de todas las épocas sobre el aurea flúidica, intermedio según ellos, entre la esencia espiritual, el *Noüs*, y el cuerpo. La más conocida de estas representaciones del hombre-microcosmos, piernas y brazos separados en forma de figura con la cima de la cabeza los cinco puntos del pentagrama, es la de Agripa de Nettesheim en su tratado *De Occulta Philosophia*. Por lo demás, en el siglo XVIII Villard de Honnecourt, en el famoso álbum de croquis que se conserva en la Biblioteca Nacional de París, se sirve a veces del pentagrama como trazado director tanto como lo hará más tarde da Vinci para los esquemas de flores.

⁵⁹⁶ CORREA, A. *Figuras, modelos e imágenes en los tratadistas españoles...*, p. 28.

Las ideas de los antiguos y de sus herederos espirituales con respecto a las correlaciones entre el cuerpo humano y el pentagrama encuentran una curiosa confirmación, en el orden no ya estático sino dinámico, en las experiencias de Rudolf von Laban, director de uno de los más célebres institutos alemanes de coreografía rítmica. Von Laban observa que todos los movimientos del cuerpo del bailarín (en las tres dimensiones) dan desplazamientos angulares extremos de 72° , y que las diferentes direcciones en el espacio que corresponden a estos desplazamientos se pueden representar por los radios de un icosaedro circunscrito $72^\circ=360/5$ (es el ángulo del centro del pentágono)⁵⁹⁷ (Fig. 53).



Fig. 53. Bailarina con un icosaedro ejercicio de danza en la escuela Laban. Fuente: NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico...*, p. 31.

Por otra parte,

De diversos pasajes de Vitrubio se desprende claramente que los pintores y escultores griegos habían estudiado cuidadosamente las proporciones del cuerpo y que lo mismo que los arquitectos [...] habían establecido: 1º. Un canon aritmético práctico de coeficientes aritméticos enteros o fraccionados, cuyos elementos encontramos en Vitruvio y que es transmitido hasta nuestros días por Pacioli, Leonardo da Vinci y los pintores-geómetras del primer Renacimiento. 2º Un canon geométrico ideal, basado en la sección áurea, como el que se ha reconstruido según el Doríforo de Policleto. 3º Un método gráfico que permite modular variantes del canon ideal sirviéndose probablemente de procedimientos idénticos o análogos a Jay Hambridge para la composición o descomposición de las superficies y los volúmenes⁵⁹⁸.

En definitiva, podríamos añadir aquí todos los múltiples ejemplos en que la selección culta ha empleado preferentemente la proporción áurea, y sus cualidades asociadas a la espiral logarítmica, en sus manifestaciones tecnológicas y artísticas, quizás debido, como ya dijimos al explicar el principio de mínima acción de Hamilton, a que se equipara a una ley psicológica, cuya denominación se presta a un principio de economía de las energías mentales o nerviosas, invocada por los estetas alemanes para explicar que

⁵⁹⁷ Cfr. GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos...*, pp. 64-65.

⁵⁹⁸ *Ibidem*, pp. 74-79.

el organismo la prefiera en tanto sensación agradable y armoniosa, lo que ha condicionado activamente toda la estética del pasado y del presente.



Fig. 54. Dragón-serpiente de la puerta de la Finca Güell. El conjunto del acceso es una evocación de *La Antártida* de Jacinto Verdaguer. Fuente: TRIADO, J. R. *Gaudí. Genios del Arte...*, p. 75.

Por último, queremos añadir el papel fundamentalmente decorativo que cumple la espiral en algunos espacios de la obra de Gaudí, como el balcón de La casa Vicens, el dragón de la Finca Güell (Fig. 54), el techo de la casa Milá (Fig. 55), o el Templo de la Sagrada Familia, entre otros. Concretamente, el fabuloso dragón de la Finca Güell, que se ubica en la puerta a las Caballerizas “con las alas de tela metálica, las patas escamosas y el cuello y la cola hechos de espiral de hierro, el dragón sujetado con

cadena presenta una boca amenazadora; unas bolas con puntas sugieren la disposición de las estrellas en la constelación del Dragón. La policromía, actualmente perdida, y un mecanismo que daba movilidad a las garras del monstruo, debían de conseguir un efecto total aun más impresionante⁵⁹⁹, llegando a ser “el más espectacular de toda la historia del arte, uniendo todas las tradiciones posibles. Por su puntiagudo trazado se aproxima al dragón de la mitología griega. Por su ubicación geográfica se corresponde con el dragón de la leyenda catalana. Y desde el cristianismo y la Edad Media es símbolo del mal, valores todos ellos que Gaudí sintetiza⁶⁰⁰; “[...] siempre en clave arquitectónica, lo que después desarrollarían especialmente los artistas más nihilistas del expresionismo, sobre todo el incluso llamado expresionismo demoníaco de por ejemplo Alfred Kubin⁶⁰¹. Supone un ejemplo del dominio del hierro que tenía Gaudí desde su paso por el taller de calderero de su padre, permitiéndole desarrollar su “capacidad de imaginar las tres dimensiones, al contemplar las superficies alabeadas que iban adquiriendo las calderas (en este caso de cobre) en el proceso de su fabricación⁶⁰². De modo que tuvo la voluntad de hacer del jardín una



Fig. 55. Ornamentación espiral escultórica techos de la Casa Milá. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 35.

⁵⁹⁹ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 13.
⁶⁰⁰ Cfr. ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones, 2001, p. 20.
⁶⁰¹ *Ibidem*, p. 75.
⁶⁰² *Ibidem*, p. 74.

metáfora bajo el transfondo simbólico del de las Hespérides, donde, según el relato de los trabajos de Hércules de la mitología griega (que mucho apreciaba el conde Güell), había unos naranjos de oro guardados por un dragón temible. De hecho todo este contenido literario está presente en el poema *L'Atlántida* de Jacint Verdaguer, escritor admirado por Gaudí y, también, relacionado con las familias Güell y Comillas. “Fue Verdaguer quien bautizó el lugar con el nombre de Torre Satalia. El mito era particularmente adecuado tanto para Eusebi Güell, industrial textil y cementero, banquero, erudito clasicista, melómano, catalanista, católico militante, como para su suegro, Antonio López, marqués de Comillas, ya que las respectivas fortunas se habían forjado gracias al mar con el comercio de todo tipo de productos con las colonias españolas de América [...] Con toda esta excusa literaria llega definitivamente a la obra gaudiana la figura del dragón”⁶⁰³.

Y es que, en suma, la espiral, empaqueta, bien para ahorrar espacio, bien para mejorar la movilidad. Esta función ha ido en progreso a lo largo de la evolución. En todos los ejemplos citados la naturaleza exhibe, al menos como dijo Plinio, “un reflejo de las rigurosas formas que estudia la geometría”⁶⁰⁴. Todos son manifestaciones de la conocida espiral equiangular o logarítmica.

13.4. LA HÉLICE AGARRA

La definición que dimos antes para la curva espiral excluye un tipo de curva tridimensional que emerge de la anterior, y que comúnmente solemos confundir con la espiral verdadera. Se trata de la hélice, una curva manifestación de la simetría circular. Esta puede entenderse como la versión tridimensional de las espirales, y se origina por el

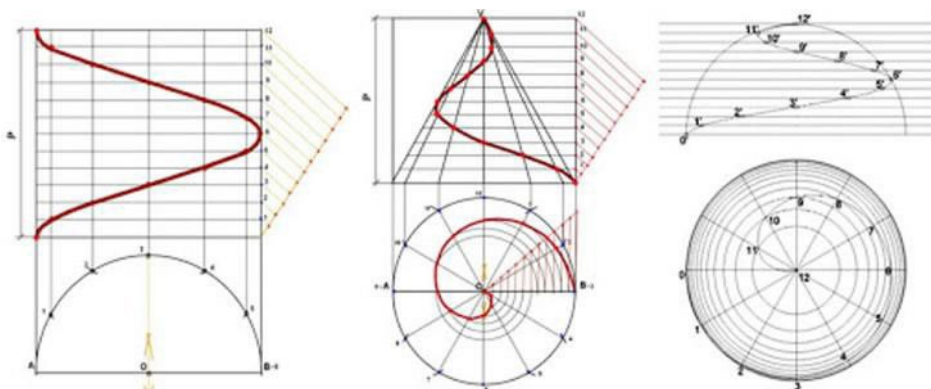


Fig. 56. Hélices técnicas: cilíndrica, cónica y esférica. Fuente: <http://educale.com>

⁶⁰³ *Ibidem*, p. 22.

⁶⁰⁴ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 173.

movimiento simultáneo de rotación y traslación de un punto en torno a un eje. Existen diversos tipos de hélice, dependiendo del movimiento con el que se generen. Las más comunes son la cilíndrica y la cónica (Fig. 56). La hélice cilíndrica es aquella que corta con un ángulo constante a las generatrices de un cilindro recto, mientras que la hélice cónica, situada sobre un cono, sigue la forma paralela del eje longitudinal de éste. Una peculiaridad de las hélices cilíndricas, que las demás no poseen, es que se trata de una curva geodésica, es decir, que es el camino más corto entre dos puntos de la superficie cilíndrica, de modo que, al desarrollar dicha superficie, se transforman en una línea recta.

En el mundo inerte los planetas que giran sobre sí mismos, trasladándose en torno a una estrella, determinan hélices que emergen por selección fundamental. También podemos observar hélices en los vórtices de Taylor, así como en los remolinos, tornados y huracanes que ya explicamos en el capítulo II. La hélice generada en estos casos debe su estabilidad al acoplamiento del movimiento en rotación con las fuerzas de fricción.

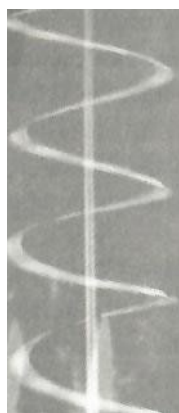


Fig. 57.
Trayectoria en
hélice de una
semilla.
Fuente:
WAGENSBER
G, J. *La
rebelión de las
formas...*, p.
211.

Como dijo D'Arcy Thomson al hablar de las hélices: “su curva nunca comienza desde el origen definido, ni cambia su curvatura en el avance. El engrosamiento espiral de las células vegetales leñosas, la fibra espiral dentro del tubo traqueal de los insectos o la contorsión y enrollamiento de espirales de los troncos trepadores no son, matemáticamente hablando, del todo espirales, sino que son roscas o hélices”⁶⁰⁵.

Decíamos anteriormente que la espiral se empaqueta sobre sí misma, pero en el caso de la hélice generalmente lo hace en torno a otro cuerpo. La hélice empaqueta y, sobre todo, agarra. Le ocurre, por ejemplo, a algunas semillas que, al caer, describen una sorprendente trayectoria helicoidal (Fig. 57). Las semillas se agarran al aire y la selección natural ha favorecido en ellas la forma que propicie esa función para que, al tardar más tiempo en caer, tengan más posibilidades de conquistar otros territorios donde germinar, donde sobrevivir, donde perseverar. Luego la hélice, con su función de agarre, dota a las plantas, en su búsqueda incansable de la luz, de movilidad. Pero, por lo



Fig. 58. Zarcillo helicoidal de parra.
Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo

⁶⁰⁵ THOMSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 171.

general, las hélices en el mundo de las plantas sirven para agarrarse unas a otras mediante lianas y zarcillos (Fig. 58). No hay más que adentrarse en una selva tropical para observarlo.

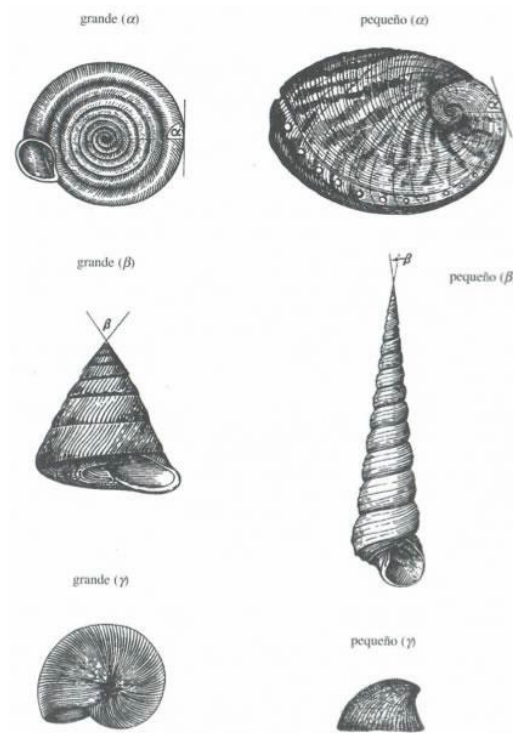


Fig. 59. Varios gasterópodos muestra de espiral equiangular. Fuente: THOMSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 189.

Dentro del mundo animal también nos encontramos con esta contingencia.

La superficie de cualquier concha, sea discoidal o turbinada, puede imaginarse que se genera por la revolución de una curva cerrada alrededor de un eje fijo, la cual, permaneciendo siempre geoméricamente semejante a sí misma, aumenta sus dimensiones continuamente: y, puesto que la escala de la figura aumenta en progresión geométrica mientras que el ángulo de rotación aumenta en progresión aritmética, y el centro de semejanza permanece fijo, la curva trazada en el espacio por los puntos homólogos de la curva generatriz es, en todos los casos, una espiral equiangular. En las conchas discoidales, la figura generatriz gira en un plano perpendicular al eje, como en el Nautilo, el Argonauta y el Amonites. En las conchas turbinadas, sigue un camino oblicuo respecto al eje de revolución, y la curva generada en el espacio por cualquier punto dado mantiene un ángulo constante con el eje del cono envolvente, y por esta razón participa del carácter de una hélice, así como de una espiral logarítmica; puede denominarse

estrictamente helico-espiral. Tales conchas turbinadas o helio-espirales incluyen las del caracol, la litorina y las de todos los gastrópodos típicos comunes⁶⁰⁶ (Fig. 59).



Fig. 60. Trompa de elefante en forma de hélice.
Fuente: <http://www.Casualidaddiseño.blogspot.com>

También muchas colas y trompas (Fig. 60) se agarran a una rama u otro material describiendo una hélice; incluso ciertos insectos, como la araña *Achaearaneaglobispira* sudafricana, construyen su nido de seda en forma de burbuja cubierto de arena de unos 13 mm de largo, de modo que la estructura interna adquiere la forma de una hélice cónica que cuelga de un solo hilo (Fig. 61).

Así mismo, las proteínas son estructuras compuestas de cadenas de aminoácidos, que pueden jerarquizarse hasta en cuatro niveles, creciendo en complejidad, de modo que cada uno se constituye a partir del anterior, por lo que su forma reflejará su función en el todo (dotándolo a su vez de propiedades que cada una de sus partes no posee por separado). Las estructuras formadas de proteínas son capaces de soportar grandes tensiones, como la

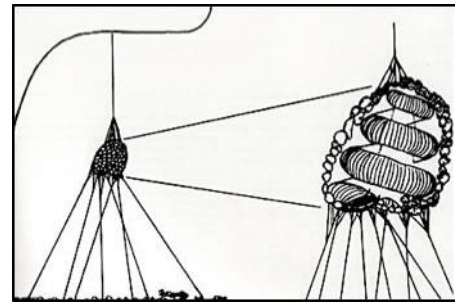


Fig. 61. Refugio hélice de la araña sudafricana. Fuente: INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos...*, p. 101.

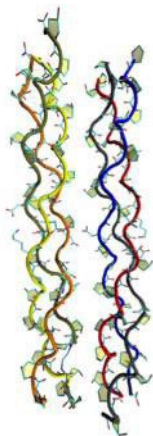


Fig. 62. Triple hélice aminoácido tendón. Fuente: <https://wikimedia.org/>

queratina, presente en las capas externas de la dermis en los vertebrados (pelo, uñas, cuernos, plumas, pezuñas, etc.), constituida de microfibrillas a modo de cuerda; o el colágeno, cuya estructura helicoidal compleja lo dota de propiedades de resistencia a la tracción y de alta flexibilidad, lo que le convierte en uno de los elementos estructurales más importantes en la piel, las fascias, los tendones y huesos de los seres vivos. Por ejemplo, los tendones siguen en última instancia esta configuración ya que, además de ser tremendamente funcionales por su elasticidad, están constituidos de multitud de fibrillas distribuidas jerárquicamente en haces compuestos microscópicamente por manojos de cadenas de hélices triples de aminoácidos enrolladas (Fig. 62). Además, las subunidades proteicas poseen la capacidad de autoensamblarse, mediante su repetición y

⁶⁰⁶ *Ibidem*, p. 187.

asociación, para constituir estructuras mayores, siguiendo patrones hexagonales, tubos, anillos, o esferas. Por ejemplo, los virus simples adoptan forma de esfera hueca, a modo de caparazón, tal y como introdujimos en el apartado anterior de la esfera.

No dejaremos de citar, igualmente, la doble hélice del ADN, que quizás sigue esta configuración con la finalidad de asegurar mejor su función.



Fig. 63. Maroma encontrada en la bajocubierta de la catedral vieja de Salamanca. Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo

La hélice también agarra en el mundo culto. Es el caso de los tornillos y las cuerdas, éstas últimas constituidas por tejido que se trenza sobre sí mismo, confiriéndoles una gran consistencia (Fig. 63). Los tornillos basan su capacidad tractora debido a las múltiples y largas longitudes de fricción a distintos niveles.

También son las superficies helicoidales un bello y tradicional ejemplo de conoide (superficie de la que hablaremos en el siguiente apartado), soporte de las escaleras de caracol, como la realizada en piedra por Gaudí en la Sagrada Familia (Fig. 64). “En la helicoides, las rectas se apoyan perpendicularmente en el eje del cilindro y en una hélice determinada en la superficie de ese mismo cilindro (hay que recordar que un tramo de hélice procede de una recta en el desarrollo plano del cilindro, y por eso las hélices tienen una pendiente constante)”⁶⁰⁷.



Fig. 64. Escalera de caracol en una torre del templo de la Sagrada Familia y Modelo geométrico de escalera de caracol. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 95.

⁶⁰⁷ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 89.

“Conviene tener presente, sin embargo, que Gaudí siempre pensó en ese conoide de forma dinámica, generado por una recta que se mueve perpendicularmente al eje y que combina al mismo tiempo la traslación y la rotación, el famoso “movimiento helicoidal”, que también fue un instrumento clave en la creación gaudiana de las columnas”⁶⁰⁸. Pretendía que la nueva arquitectura que le inspiraba la contemplación de la Naturaleza debía de tener las propiedades de la vida mostradas en el color y el movimiento. Quería aunar la síntesis entre estructura y forma, así como la continuidad que observaba en las figuras arborescentes y el cuerpo humano. En su búsqueda por conseguir el movimiento “en el sistema de elementos de soporte, sólo la columna salomónica había mostrado un camino en ese sentido”⁶⁰⁹. Luego podemos considerar la columna salomónica como uno de los mejores ejemplos de aplicación helicoidal en el mundo culto. Para conocer un poco mejor su finalidad en el arte, debemos acudir a los tratados: “En un principio el tratado abarcaba todo lo referente a la arquitectura y la edificación. Pero muy pronto, hacia finales del siglo XVI, los tratados se especializaron”⁶¹⁰. Así,

Fray Juan Ricci, Juan Caramuel y Guarino Guarini pueden ser considerados como los “tratadistas del orden salomónico”. [...] Los tres parten del elemento tectónico que es considerado como el soporte salomónico por excelencia, esto es, la columna helicoidal, la cual se consideraba que había pertenecido al Templo diseñado por Dios y construido por el rey Salomón. La historia de las columnas helicoidales, llamadas salomónicas y su empleo en la arquitectura occidental, se encuentra tejida por una serie de leyendas que comienzan con el conjunto de doce columnas torcidas que se fueron reuniendo en Roma y que hoy se conservan en la Basílica de San Pedro, en el Vaticano. Más aun, entre ellas, una ha recibido el apelativo de Columna Santa, pues de acuerdo con otras leyendas, en ella se apoyaba Jesús cuando predicaba en el Templo. Esas columnas proceden del Imperio Romano de Oriente, de acuerdo con John Ward Perkins, datan de los siglos II y III de nuestra era, pero la creencia popular las situó en el siglo VIII antes de Cristo, precisamente entre el año 966 y el año 959, cuando el rey Salomón levantó el Templo para adorar a Yahvé. Miden 4,75 metros de altura y fueron ejecutadas en bloques de mármol griego “de grano fino y traslúcido”, y fueron decantadas de una sola pieza. Su fuste se desenvuelve en cinco vueltas o espiras en las que se distribuyen cuatro secciones doradas de manera alterna por estrías helicoidales y amorcillos con roleos de vid. El

⁶⁰⁸ *Ibidem*, p. 89.

⁶⁰⁹ *Ibidem*, p. 105.

⁶¹⁰ BONET CORREA, A. *Figuras, modelos e imágenes en los tratadistas españoles...*, p. 24.

imoscapo se encuentra cubierto por medio de hojas de parra⁶¹¹.

“En España, donde no se publicó hasta muy tarde un tratado de perspectiva, abundaron en cambio los distintos tratados que se ocupaban de la construcción práctica”⁶¹². La bibliografía de arquitectura en España que trata del Templo de Salomón y la Columna salomónica (Fig. 65) es esencial para, debido a su vinculación con la religiosidad hispana, poder comprender la idiosincrasia arquitectónica desde el siglo XVI hasta el XVIII, principalmente del barroco. Según palabras de Bonet Correa:

La necesidad sentida de establecer una homologación entre el acto de la arquitectura y el originario divino, la necesidad de tender el puente analógico entre la *civitas terrena* y la *civitas celeste*, el juntar a la idea de la arquitectura la exégesis bíblica para demostrar la absoluta racionalidad de la obra divina y aun más, la fiabilidad de las Sagradas Escrituras frente a aquellos que pensaban que sus descripciones encerraban un cúmulo de engaños, lleva a los autores españoles a fijar su atención en la construcción ideal de la forma y las medidas del Templo de Salomón, y a fundamentar el orden de sus columnas en lo sagrado. En casi ningún tratado español clásico, aun en los de carácter más práctico, están ausentes las referencias bíblicas. El Templo de Salomón y el Arca de Noé son considerados por ellos como los prototipos de la iglesia cristiana. *Trazado manu Domini*, por la mano de Dios, el Templo de Jerusalén era en sus ojos el edificio más perfecto. Sus columnas eran la concreción del orden más armónico y virtuoso, clave del mundo. De ahí que Fray Rizi propusiese el “orden salomónico completo”. Desde el sefardita Jacob Judah (León Hebreo) y los jesuitas padres Villalpando y de Prado, pasando por el padre Caramuel, hasta su influencia en el austríaco Fischer von Erlach, España contó con toda una literatura y tratadística salomónica. El anhelo contrarreformista de conciliar Platón con el Antiguo Testamento, de manera que las proporciones del cuerpo humano, modeladas a imagen de



Fig. 65. Columnas Salomónicas en orden gigante con fustes dorados y cubiertas con los tradicionales símbolos eucarísticos de uvas y hojas de vid del Retablo Mayor la Clerecía de Salamanca, talla y ensamblaje de Juan Fernández en 1673. Fuente: ALVAREZ VILLAR, J. *La Clerecía de Salamanca*. Salamanca: Gruposa, 1999, p. 47.

⁶¹¹ FERNÁNDEZ, M. “Los tratados del orden Salomónico. Juan Ricci, Juan Caramuel y Guarino Guarini en la arquitectura novohispana”. Vol. 7, N. °7, 2008, pp. 13-43.

⁶¹² *Ibidem*, p. 24.

Dios, se integrasen en un sistema universal con microcosmos y macrocosmos fundido, primando lo cristiano sobre lo gentil, hizo que la tradición bíblica impregnase todos los actos y el sentido histórico de una sociedad que como la española estuviese inmersa completamente en lo sacro. En el libro arquitectónico se hace patente esta voluntad de hacer real la ciudad celeste en la Tierra”⁶¹³ [En todas estas obras] “se conjugan lo serio, lo útil y lo bello”⁶¹⁴.

Sin embargo, a Gaudí el sistema de la columna salomónica no acabaría de convencerle, y tras varios años de hacer pruebas en la rampa helicoidal de la Casa Milá, las columnas del Parque Güell o el helicoide cónico del pabellón de entrada al parque, entre otras, consiguió una columna nueva en la que el movimiento sería la fuente de su generación. “Los astros van y vienen en sus órbitas, giran sobre sí mismos siguiéndolas en un movimiento helicoidal. Así, a partir de un mismo polígono estrellado como base, dos superficies helicoidales se elevan y giran helicoidalmente en direcciones opuestas, la una hacia la derecha y la otra hacia la izquierda, y cuando se cortan generan aristas que se multiplican hasta llegar a conformar una circunferencia”⁶¹⁵.



Fig. 66. Tronco y ramas de un árbol, 2. Columnas arboladas del templo de la Sagrada Familia. 3. Esquemas geométricos de la columna rectangular de la nave del templo de la Sagrada Familia. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. Gaudí. *La búsqueda de la forma...*, p. 105.

“Las columnas de la Sagrada Familia nacen de un juego geométrico finísimo en el que se mueven polígonos y se intersecan volúmenes, y representan sin duda la culminación del meditado y profundo itinerario geométrico de Gaudí”⁶¹⁶. La forma de llegar a la solución con que Gaudí había generado las columnas no fue nada fácil, “el jefe

⁶¹³ *Ibidem*, p. 25.

⁶¹⁴ *Ibidem*, p. 26.

⁶¹⁵ GIRALT-MIRACLE, D. Gaudí. *La búsqueda de la forma...*, p. 105.

⁶¹⁶ *Ibidem*, p. 34.

de los modernistas de la obra, Jordi Cusó, y, más adelante, los ordenadores facilitaron no solamente la solución de lo que había resuelto matemáticamente Gaudí, sino también la de aquellos elementos que pedía la estructura arboriforme del resto de la columna y que, muy posiblemente, tan sólo era capaz de imaginar, gracias a la visión que tenía del volumen y del espacio”⁶¹⁷ (Fig. 66).

13.5. LA ONDA COMUNICA

Desde el mismo nacimiento del universo la selección fundamental ha favorecido el transporte de la energía mediante ondas. La radiación solar es la onda fundamental encargada de trasladar la energía que posibilita la vida y promueve la incertidumbre de su entorno. Ninguna perturbación existe sin la intervención de un movimiento ondulatorio (Fig. 67).



Fig. 67. Onda expansiva de gota al caer en el agua. Fuente: SANDOVAL, A. G. *Observar...*, p. 44.

Aunque la constitución del mundo inerte no les es muy favorable, pues no parece haber muchas ondas en la realidad fundamental, las que hay logran propagarse prolíficamente en todas las direcciones. Como dijo Deleuze: “Pliegues de los vientos, de las aguas, del fuego y de la tierra, y pliegues subterráneos de los filones de la mina. Los



Fig. 68. Ondas dejadas por el mar en la playa de San Lorenzo, Gijón (Asturias, España). Agosto 2018. Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo.

plegamientos sólidos de la “geografía natural” remiten en primer lugar a la acción del fuego, luego a la de las aguas y los vientos sobre la tierra, en un sistema de interacciones complejas”⁶¹⁸. Luego podemos ver ondas en las huellas que el desplazamiento del viento o del agua deja sobre la arena en el desierto, en las playas, o en el fondo marino (Fig. 68). Las ondas sísmicas que generan el desplazamiento de una masa sobre otra se propagan por toda la superficie de la esfera planetaria. La energía solar genera gradientes de temperatura provocando vientos que mueven los mares dejando

⁶¹⁷ *Ibidem*, p. 110.

⁶¹⁸ DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco* ..., p. 15.

huellas en el fondo oceánico, algunas antiquísimas ya fosilizadas, o en las costas al bajar la marea. El sonido es consecuencia vibratoria de la propagación por el aire del golpe de un cuerpo sobre otro, pudiendo posteriormente ser percibido por un dispositivo natural o artificial. El sonido se propaga mediante ondas longitudinales, mientras que la luz lo hace mediante ondas transversales a la dirección del plano de propagación.

En el mundo inerte, la energía lumínica, sonora e incluso la materia se desplazan mediante ondas. Las reacciones BZ, que ya explicamos en el apartado de la espiral y también introdujimos en el Capítulo II, son un caso sorprendente de desplazamiento de la materia inerte. No se trata de un desplazamiento de moléculas al uso, sino la variación de concentración de una sustancia en un punto de espacio: debido a su difusión (ha llegado o ha emigrado), o a que se ha generado o consumido en un proceso químico. Constituyen un ejemplo de procesos de termodinámica de no equilibrio, un sistema caótico con ciertas condiciones iniciales y de contorno, que mediante fluctuaciones espontáneas desordenadas de ondas químicas puede entrar en otro de coherente orden. En definitiva, emerge una armonía, una especie de coherencia entre las partes de un todo. Se produce un estado estacionario, del que puede surgir una nueva individualidad, fruto de la selección fundamental, en que puntos distantes en el espacio se comunican mediante una onda química que se desplaza hacia la estabilidad del sistema.

Y es que, como diría D'Arcy Thompson:

Las olas del mar, las pequeñas ondulaciones en las riberas, la curva que se desvanece entre las arenas de una bahía y las dunas, el perfil de las colinas, la forma de las nubes, todo ello son enigmas de la forma, problemas de morfología y todos ellos son, en mayor o menor grado, estudiadas y resueltas por los físicos... y no es diferente con las formas materiales de los seres vivos. Tejido y célula, concha y hueso, hoja y flor, también son materia y, obedeciendo a las leyes de la física, sus partes se mueven, se moldean, se ajustan... Los problemas de cómo se genera la forma son, en primera instancia, problemas matemáticos; los de su crecimiento, problemas físicos, y el morfólogo es *ipso facto*, un estudioso de las ciencias físicas⁶¹⁹.

Sin dejar de lado esta argumentación, si en el mundo inerte la emergencia de ondas químicas es un hecho bastante improbable, no ocurre lo mismo en el mundo vivo. Un

⁶¹⁹ SÁNCHEZ GARDUÑO, F. "Sobre la teoría morfogenética de Turing". En: https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2.955e3700e06db01f.353630352e706466.pdf, p. 78.

caso llamativo es el del microorganismo *Dictyostelium discoideum*, que se agrega, por ejemplo, en una placa de Petri, siguiendo una geometría plana y simétrica, formando espirales parecidas a las de los sistemas catalíticos de reacción-difusión BZ ya descritos. Las mismas pautas, a mayor escala, se dan en la comunicación de amebas mediante una sustancia AMP cíclica, generando un agregado que no es una simple acumulación de células, sino una estructura biológica jerárquicamente superior. Quizás sea este un camino mediante el cual escalar la complejidad orgánica. La selección natural favorece la comunicación interior de una nueva individualidad mediante ondas químicas, como es el caso del metabolismo microbiano de la glucólisis. Las bacterias emplean su propio metabolismo para, en situaciones ambientales desfavorables, comunicarse mediante ondas, logrando sincronizarse rítmicamente y constituir una estructura más evolucionada.

Así mismo, uno de los científicos que investigó sobre el tema, que ya mencionamos en el apartado de la espiral, de la formación “autoorganizativa” de manchas y patrones regulares de bandas en la piel de los animales (Fig. 69), así como los dibujos de las alas de las mariposas y los motivos coloreados de los peces tropicales, relacionándolos con lo que hoy se conoce como modelo de reacción-difusión, fue el matemático, informático teórico, criptógrafo y filósofo inglés, Alan Turing, quien escribió en 1952 un libro titulado *The chemical basis of morphogenesis* (Las bases químicas de la morfogénesis). El motivo por el cual este matemático se sintió atraído por tales cuestiones fue porque, de la misma manera que ocurre con los números de Fibonacci y muchos vegetales, las manchas de los animales se relacionan estrechamente con las matemáticas. Turing ideó el primer modelo matemático (mediante una serie de ecuaciones diferenciales) de morfogénesis (uno de los tres aspectos fundamentales de la biología del desarrollo, junto con el control del crecimiento y de la diferenciación celular), basado en la forma en que se desarrollan los embriones y la manera en que dos sustancias se difunden unas en otras a lo largo del tiempo. Finalmente, tuvo que pasar mucho tiempo para que los biólogos comenzaran a investigar que el crecimiento del pelo de los mamíferos y de las plumas de las aves obedece a mecanismos semejantes al descrito por Turing.



Fig. 69. Bandas bicolors del pelo de cebra. Cabárceno (Cantabria, España). Junio 2010. Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo



Fig. 70. Ondas laterales de un pez nadando. Fuente: WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 230.

Por otra parte, en el mundo vivo es frecuente observar cómo muchos animales se desplazan moviendo su cuerpo. Los peces mediante ondas transversales laterales (Fig. 70), al igual que los reptiles cuando reptan. Los mamíferos mueven partes de su cuerpo (generalmente, la cola) al nadar, desplazándose mediante ondas transversales, mientras que, los gusanos contraen y dilatan sus cuerpos logrando desplazamientos longitudinales. Algunos organismos vivos, como los trilobites ya extintos, gusanos y otras especies marinas, dejaron grabadas la huella de sus desplazamientos ondulantes fosilizados en la roca cuarcita del fondo marino, hace cuatrocientos cincuenta

millones de años. Estas formaciones se conocen como *Cruzianas*, y podemos descubrirlos en la población castellanoleonesa de Monsagro, en la provincia de Salamanca.

También la selección natural favorece ganar independencia frente a la incertidumbre de los seres vivos mediante la percepción. La mayoría de los sentidos detectan ondulaciones que transmiten información al percibir ondas de presión, vibraciones y ondas electromagnéticas. Los murciélagos disponen de un sonar de ultrasonidos; los mamíferos marinos detectan una alta gama de frecuencias; las serpientes, de infrarrojos; los pájaros comedores de fruta, del espectro cromático; y las arañas, de vibraciones. En definitiva, la comunicación es una función evolutiva en la selección natural y cultural.

Los cantos rodados, que, sometidos a la selección fundamental, adoptaban formas posteriormente seleccionadas por el hombre primitivo como las más idóneas para fabricar sus útiles domésticos, a base de tallarlas aplicando impactos en ondas de percusión con otra piedra, también constituyen un ejemplo en que la onda es frecuente en el mundo culto.

Así mismo, las líneas curvas redondeadas topológicamente, equivalentes a la deformación continua de un círculo, también proliferan en el mundo culto, de manera notable, como sello característico del estilo modernista. Por ejemplo, las encontramos en múltiples elementos de la decoración gaudiana en puertas, muebles, fachadas, ventanas, escaleras, etc. También podemos encontrarnos las formas sinusoidales de los movimientos serpenteantes de las olas del mar o de las sombras de las hélices espaciales, por ejemplo, en el muro de la Casa Miralles de Gaudí.

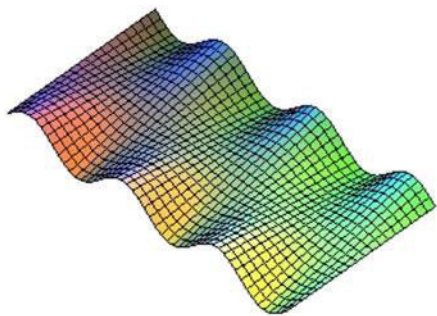


Fig. 71. Conoide Sinusoide. Fuente: <http://www.Apuntesdearquitecturadigital.com>

Una superficie reglada sinuosa geométrica sobre la que ya hemos hablado anteriormente es el conoide que se genera cuando una recta se mueve apoyada en una curva y una recta dadas manteniéndose paralela al plano (Fig. 71). Esta forma ondulada reglada será empleada también por primera vez por Gaudí como cubierta provisional de las Escuelas para los hijos de los trabajadores del Templo de

La Sagrada Familia de Barcelona, tal y como describiremos en detalle, más adelante.

También la selección culta favorece la frecuencia de otras ondas como las de radio, de televisión, telefónicas, el ruido, etc.

En resumen, “la onda mueve. Mueve la materia, mueve la energía y mueve la información. Por lo tanto, la onda también emite, recibe, comunica, etc. Eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la onda”⁶²⁰.

13.6. LA PARÁBOLA RECIBE Y EMITE

Una parábola es una curva plana resultado de la sección producida por un plano que corta las generatrices de un cono recto. Dependiendo de la inclinación del plano que secciona, se obtendrá como resultado otras curvas cónicas como la circunferencia, la elipse o, en el caso de que el cono sea doble, la hipérbola (Fig. 72).

En el mundo inerte, como dijo Deleuze: “los filones mineros son semejantes a las curvaturas cónicas, unas veces se terminan en círculo o en elipse, otras se prolongan en hipérbola o parábola”⁶²¹.

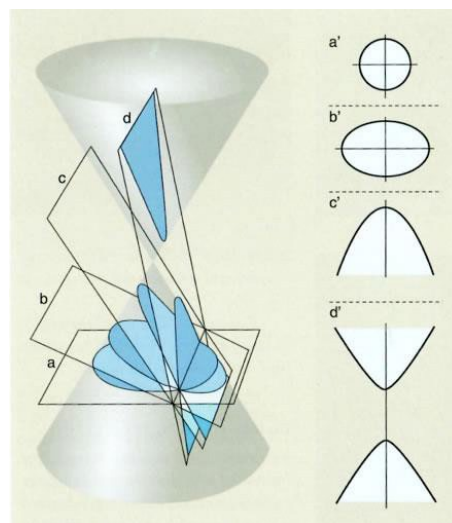


Fig. 72. Las tres secciones cónicas: un plano oblicuo al eje del cono da una elipse, (si es ortogonal da una circunferencia); si es paralelo a una generatriz da una parábola; y si es paralelo a dos generatrices da una hipérbola. Fuente: NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico...*, p. 143.

⁶²⁰ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 238.

⁶²¹ DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco* ..., p. 15.



Fig. 73. Parábola de luz focal.
Fuente:
<http://www.centros5.pntc.es>

Galileo (1564-1642) descubrió en 1602 la trayectoria parabólica de un proyectil lanzado al aire, pero también podemos obtener fácilmente una curva parabólica al dirigir de forma oblicua un foco de luz sobre una superficie plana, como una pared (Fig. 73). La parábola también se define como el lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo llamado foco, y de una recta fija llamada directriz. Una de las propiedades de la parábola, relacionada con esta definición, supone que cualquier recta o rayo

procedente del infinito y paralelo a su eje de simetría, que incida sobre la curva, se reflejará pasando por su foco (Fig. 74). Del mismo modo, un emisor situado en su foco enviará un haz de rectas o rayos paralelos a su eje hacia el infinito.

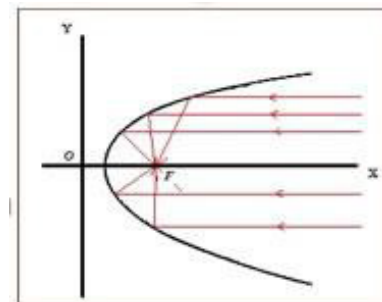


Fig. 74. Principio reflejo parabólico.
Fuente: <http://www.conicaspárbola.blogspot.com>

En el mundo vivo encontramos que la forma parabólica se da con profusión en los pabellones auditivos de muchos mamíferos, como los conejos, los murciélagos, incluso los humanos, etc.

En el mundo culto las superficies conoidales y sus variantes tridimensionales emergen a la par que la tecnología. Fue también el arquitecto Antonio Gaudí uno de los primeros en seleccionar esta curva por su función y belleza, incorporándola en sus obras, incluso cuando “las formas más complejas utilizadas hasta entonces eran variaciones en torno al arco y la bóveda, Gaudí incorporó figuras geométricas mucho más complejas, y con esas definió la novedad de sus espacios”⁶²². Así, partiendo de las formas naturales y como fruto de su capacidad intuitiva y de análisis, empleó por primera vez las superficies regladas (las cuales, como su nombre indica, son superficies que se pueden generar mediante el movimiento de una recta que sigue un recorrido determinado).

Concretamente serán, tal y como dice Claudi Alsina, superficies conoidales las que “están formadas por todas las rectas que se apoyan ordenadamente en la recta dada y los puntos correspondientes de la curva fijada, y todas las rectas paralelas al plano dado”; y que, podríamos considerar (de ahí su nombre), “extienden el caso de los conos, ya que

⁶²² GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 48.

sus rectas generatrices no pasan por un vértice, sino por toda una recta directriz”; por sus “propiedades geométricas adecuadas a sus finalidades utilitarias, ornamentales y constructivas”⁶²³, serán las que más emplee Gaudí en su obra. Y es que las superficies conoidales también son fruto de la selección natural: “Están presentes en la naturaleza vegetal, especialmente en las hojas y en las flores, en las que la materia fibrosa tiende a adoptar la forma de una superficie conoidal entre los tallos rectos centrales y las curvas que delimitan los perfiles externos”⁶²⁴ (Fig. 75).



Fig. 75. Conoide empalme entre el tallo y la rama vegetales. Fuente: <https://pxhere.com/es/photo/1595785>

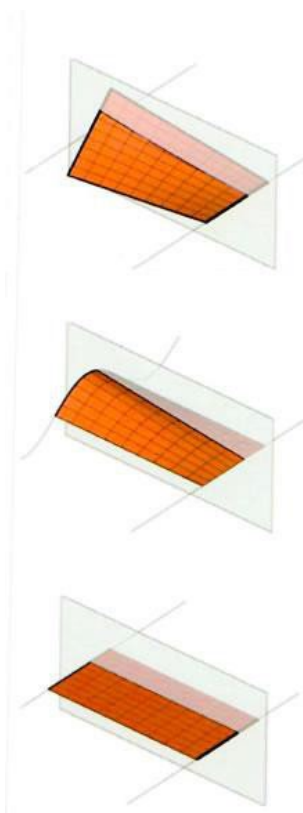


Fig. 76. Modelos geométricos de paraboloides hiperbólico, conoide sinusoidal y plano. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. Gaudí. *La búsqueda de la forma...*, p. 95.

“Entre los casos más conocidos de superficies conoidales tenemos un plano (cuando la curva de apoyo es una recta paralela a la dada), un helicoides (cuando la curva de apoyo es una hélice cilíndrica) y un paraboloides hiperbólico (cuando la curva de apoyo es una recta que se cruza con la de partida)”⁶²⁵ y el conoide sinusoidal (Fig.76).

También destacan superficies regladas derivadas de la parábola, como el paraboloides elíptico de revolución (superficie resultante de girar una parábola en torno a su eje de simetría), que hoy en día se emplea en el diseño de las antenas parabólicas (Fig. 77), el paraboloides hiperbólico (que también es un conoide), (“superficie reglada formada por una recta generatriz que avanza, siempre paralela al plano, sobre dos rectas directrices situadas en planos diferentes”⁶²⁶) (Fig. 78), y el hiperboloides de revolución (“superficie reglada formada por la rotación de una recta generatriz alrededor de otra directriz que no corta y que es paralela a ella”⁶²⁷), derivado esta vez de la hipérbola (Fig. 79).

⁶²³ Cfr. *Ibidem*, p. 89.
⁶²⁴ *Ibidem*, p. 89.
⁶²⁵ *Ibidem*, p. 89.
⁶²⁶ *Ibidem*, p. 86.
⁶²⁷ *Ibidem*, p. 114.

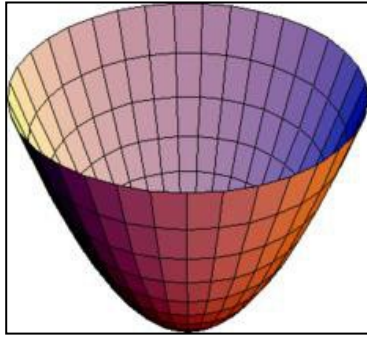


Fig. 77. Paraboloide elíptico de revolución. Fuente: <http://www.es.wikipedia.org>

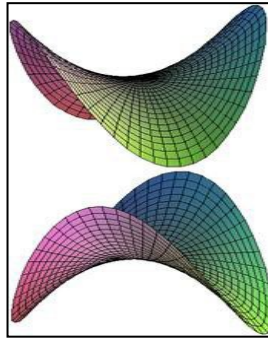


Fig. 78. Paraboloide hiperbólico. Fuente: <http://www.es.wikiarquitectura.com>

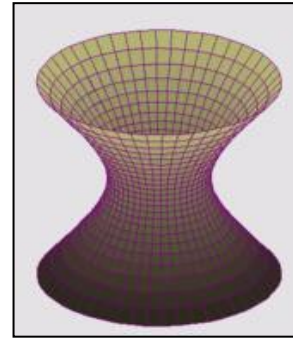


Fig. 79. Hiperboloide de revolución. Fuente: <http://www.es.wikipedia.org>

Gaudí descubrió estas superficies regladas alabeadas (hiperboloides, paraboloides, helicoides y conoides) por primera vez en su época de estudiante, especialmente a partir de los estudios de geometría descriptiva del tratado de C.F.A. Leroy de 1855, aunque fue a raíz de su redescubrimiento experimental como fue empleándolas en sus arquitecturas. Pronto apreciaría en ellas sus cualidades expresivas y plásticas; pero, sobre todo, el que, debido a su doble curvatura a menudo inversa, proporcionarían una elevada rigidez y una gran capacidad de transmisión de las acciones mecánicas hacia los puntos límite o de apoyo.

13.7. LA CATENARIA RESISTE

La catenaria surge por selección natural en el mundo vivo en el modo en que las abejas construyen sus colmenas: “Un grupo de obreras, enganchadas por las patas, forman una cadena que, suspendida en el aire, define un arco catenario inicial. El panal se edifica de arriba abajo, tomando como base formas funiculares”⁶²⁸ (Fig. 80). Como fruto de la selección cultural, ya en el siglo XVIII el

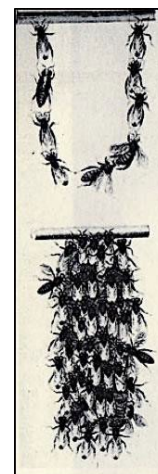


Fig. 80. Catenaria de abejas. Fuente: RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 47.

⁶²⁸ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena: de Gaudí a Le Corbusier*. Madrid: Ediciones Siruela, 1998, p. 47.

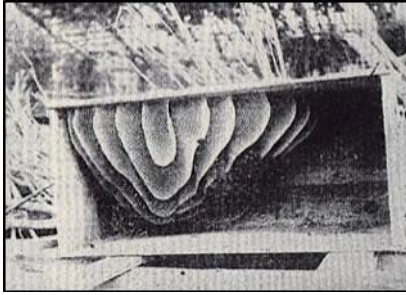


Fig. 81. Panales naturales que conservan la forma de las catenarias. Fuente: RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 47.

naturista François Huber ⁶²⁹ observó: “El trabajo arquitectónico está siempre escondido a nuestra mirada por un grupo de abejas de varias pulgadas de espesor. Es esta masa, y en medio de las tinieblas, como se construyen los panales; éstos están fijados, desde su origen, a las bóvedas de las colmenas, y se prolongan más o menos hacia la base de ésta según la época de su formación, y su diámetro aumenta proporcionalmente a su longitud”⁶³⁰ (Fig. 81). Hoy en día la catenaria prolifera en el mundo culto en el diseño de hilos, cuerdas, cables y tendidos de alta tensión. Y es que, si fijamos una cadena por dos puntos, ésta se combará bajo su propio peso por selección fundamental, al someterse a la fuerza de gravedad. “La catenaria es por tanto la curva en la que todas las fuerzas que actúan sobre un punto (su peso y las tensiones debidas a los dos puntos contiguos anterior y posterior) se anulan entre sí [...] Es la situación de máximo descanso, de mínima rigidez”⁶³¹. De modo que podemos afirmar que la función de la catenaria es resistir.

La inteligibilidad y belleza de la catenaria pronto captaron la atención del genial arquitecto Antonio Gaudí, para quien “la belleza es el resplandor de la verdad; como el arte es belleza, sin verdad no hay arte. Para encontrar la verdad se deben conocer bien los seres de la creación”⁶³². Pronto seleccionaría la catenaria como elemento indispensable en sus obras, tal y como exponemos en el próximo capítulo.

13.8. LOS FRACTALES COLONIZAN

El término fractal fue tomado en 1975 por el matemático Benoît Mandelbrot⁶³³ (del que ya hemos hablado en el capítulo III, al desarrollar las matemáticas de la complejidad) del adjetivo latino *fractus*, que proviene del verbo *frangere*, que significa

⁶²⁹ François Huber (1750-1831). Naturista suizo considerado como uno de los padres de la ciencia apícola. A pesar de ser ciego, ayudado por su criado François Burnens, dedicó su vida al estudio de las abejas y construyó las primeras colmenas racionales o de cuadros móviles. En 1814 publicó la primera edición de su libro *Nouvelles observations sur les abeilles*.

⁶³⁰ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, pp. 47-48.

⁶³¹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 244.

⁶³² RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 46.

⁶³³ Benoît Mandelbrot (1924-2010) nació en Varsovia, y desde muy joven mostró dotes para el estudio matemático y la intuición geométrica. Se interesó por cuestiones como la rugosidad de las superficies y de las grietas que se dan en la naturaleza. Sostuvo que muchos patrones de la naturaleza son tan fragmentarios e irregulares que resultan demasiado complejos de analizar mediante la geometría euclidiana. A esta familia de formas la denominó fractales. La geometría capaz de describir los fractales que Mandelbrot desarrolló es la Geometría Fractal.

romper, crear fragmentos irregulares. Según su propia definición, se trata de un objeto geométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas. Una característica que presentan los fractales es la autosimilitud. “Se dice que un objeto es autosemejante cuando sus partes tienen la misma forma que el todo, pudiendo darse a diferentes escalas y ligeramente deformadas”⁶³⁴. “Son figuras fractales, figuras con un motivo que se propaga a escalas progresivamente reducidas [...] iterando un patrón cierto número de veces en escenarios cada vez más pequeños”⁶³⁵. Sin duda, la naturaleza crea formas complejas resultado de la combinación y repetición de elementos muy simples. Por tanto, “una forma fractal no es entonces propiamente una forma, sino más bien una familia, una clase de formas”⁶³⁶. Todo fractal tiene partes que se repiten si las observamos a la escala adecuada.

En el mundo inerte, vivo y culto, los fractales se manifiestan profusamente, aumentando con ello su inteligibilidad. Así, por ejemplo, “al observar el perfil geológico del litoral que marca una frontera natural entre tierra firme y el océano, o en un paisaje esculpido por corrientes de agua, si acercamos el zoom veremos que en muchos casos las fracturas de materiales generan grietas fractales, y muchos procesos de agregación de partículas que se adhieren unas a otras desarrollan asimismo formas fractales”⁶³⁷.



Fig. 82. Fractal de un copo de nieve.
Fuente:
<http://www.lasupergalaxia.wordpress.com>

También la descarga eléctrica en forma de relámpago adquiere la disposición fractal; cualquier trocito de relámpago, debidamente ampliado, se parece al relámpago entero. Igualmente ocurre con un copo de nieve (Fig. 82). Como ya dijimos al exponer la forma hexagonal, se trata de un fractal ordenado que presenta una simetría perfecta adoptando un esquema hexagonal perfecto, puesto que, tal y como también señalamos, éste (el hexágono) es la forma de empaquetar que menos huecos deja, la más

compacta, la más adecuada para ahorrar espacio y material; es como decir que el hexágono pavimenta. Por eso, cuando vemos un paisaje nevado vemos, en realidad, un pavimento nevado. Microscópicamente esta conclusión es irrefutable. Cada copo de nieve, a pesar de ser un fractal, es distinto. “Es un proceso caleidoscópico. La unidad que

⁶³⁴ MANDELBROT, B. *La geometría fractal en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, 2000, p. 54.

⁶³⁵ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 250.

⁶³⁶ *Ibidem*, p. 250.

⁶³⁷ *Ibidem*, p. 253.

se repite es incierta, pero la globalidad conserva su exquisita simetría”⁶³⁸. Todos estos ejemplos son seleccionados en el mundo inerte por ser una manera estable de crecer y resistir la incertidumbre ambiental.



Fig. 83. Hoja de helecho. Fuente: <http://www.dreamstime.com>

La selección natural favorece la emergencia de múltiples casos de fractalidad. Ya que, como venimos diciendo a lo largo de este capítulo, “los códigos genéticos de las plantas y otros seres vivos se basan en *el principio de mínima acción*, es decir, se busca la mayor economía a la hora de generar instrucciones de crecimiento. Por esa razón es tan abundante la autosimilitud en su morfogénesis, y la mayoría tienen estructura fractal”⁶³⁹. Por ejemplo, en mayor o menor medida cualquier árbol presenta una forma fractal (como expondremos a continuación). También tenemos un caso de gran exactitud en plantas como los helechos (Fig. 83), o la coliflor romanesco (Fig. 84), que “es el más hermoso ejemplo fractal natural, porque su estructura se ve con claridad, sin necesidad de cálculos ni fórmulas matemáticas. Si cortamos un trozo cualquiera, su forma es siempre la misma que el total. Certificamos su relación Φ al contar las espirales que lo forman en cualquiera de los dos sentidos. Veremos que son dos términos consecutivos de la sucesión de Fibonacci: las espirales hacia la derecha son 8 y hacia la izquierda son 13”⁶⁴⁰.



Fig. 84. Coliflor. Fuente: <http://www.todointeresante.com>

Y es que en el mundo vivo la fractalidad coloniza, es una forma de crecer. Favoreciendo esta tendencia expansiva uniforme, aumentan las posibilidades de intercambio de energía y materiales dentro y fuera del individuo. Aumenta su probabilidad de supervivencia. En el mundo animal la fractalidad externa se da en contados casos, como en algunas medusas y algunas estrellas. Normalmente la fractalidad animal es interior, procurando facilitar el transporte de energía, materia, e información a cualquier punto de ese volumen interior, invirtiendo la menor cantidad de energía en el proceso, y manteniendo al individuo vivo. Si bien la forma esférica tal vez sea la opuesta

⁶³⁸ *Ibidem*, p. 257.

⁶³⁹ BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, pp. 96-97.

⁶⁴⁰ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 141.

a la fractal, ambas pueden darse en situaciones en que varíe la escala de observación (tal y como hemos venido exponiendo a lo largo de esta tesis). Por ejemplo, en los árboles observados desde un punto de vista alejado, macroscópico, la simetría circular con su función protectora es la que prevalece; no obstante, si nos acercamos, a menor escala sus ramas y raíces se extienden fractalmente con el objetivo de expandir su interior, para acceder más fácilmente y de manera continua al máximo de puntos del exterior. Por lo que,

[...] Las pautas de crecimiento de sus ramas pueden modelizarse mediante fractales con asombrosa exactitud. Hay muchos modelos fractales de árboles que se van ramificando en cada nudo siempre en un determinado ángulo, para formar ramas cuya longitud sea la de una rama anterior multiplicada por un factor f . Según el valor de ese factor, las ramas pueden llegar a solaparse, es decir, situarse unas encima de otras. Ése es el problema que hay que resolver, si queremos construir sistemas eficientes o modelos de la realidad. Para evitarlo, es conveniente saber cuál es el límite del factor f . Los estudios demuestran que tiene que ver con Φ , porque debe cumplirse que $f = 1/\Phi$.

Si en vez de iniciar el árbol con rectas, lo hacemos a partir de una figura, un triángulo equilátero, por ejemplo, al que le colocamos en cada vértice otro triángulo equilátero cuyo lado sea igual al original, multiplicado por un factor f (en la figura, $f=1/2$), para que no se solape, sino que sólo se toquen las ramas, el valor máximo también es $f=1/\Phi$ ⁶⁴¹ (Fig. 85).

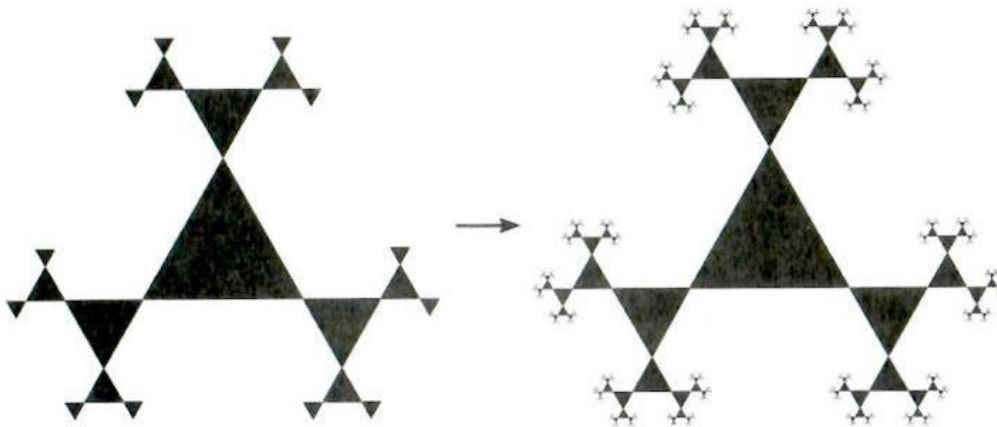


Fig. 85. Modelo de crecimiento fractal de las ramas de los árboles. Fuente: CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 141.

⁶⁴¹ *Ibidem*, pp. 140-141.

Luego, sea como fuere, ambas formas, la esférica y la fractal, son muy frecuentes. Pero, ¿por qué los animales, a diferencia de las plantas, no son fractales también en el exterior? Los animales, para empezar, disponen de orificios con los que comunicarse con el exterior. Por otra parte los animales, para combatir la incertidumbre ambiental, normalmente, como ya explicamos, se aíslan, bien con ropas y pieles o adoptando formas

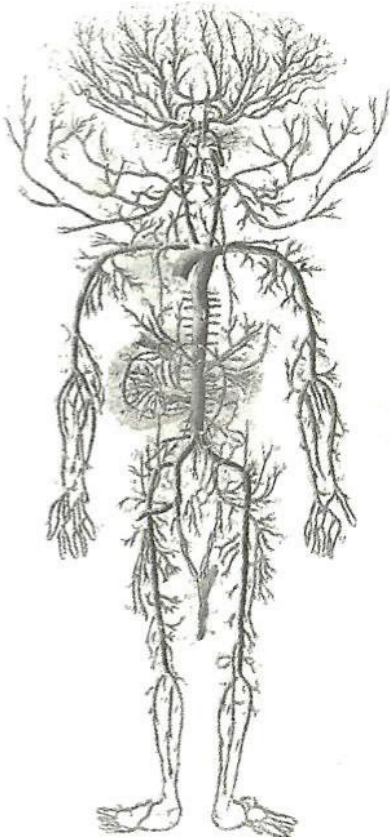


Fig. 86. Sistema circulatorio según la Enciclopedia de Diderot y D'Alembert. Fuente: WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 265.

lo más semejantes posible a la esfera, acurrucándose o creando arquitecturas en las que guarecerse. Luego, aunque los animales normalmente no son fractales por fuera, sí lo son por dentro. Sus sistemas circulatorio (Fig. 86), nervioso e incluso respiratorio se asemejan a las ramas y raíces fractales de las plantas y árboles. Su forma fractal es la manera más ventajosa de llenar el espacio interior, llegando, en el transporte de nutrientes, energía e información en los seres pluricelulares, a todos sus puntos, incluso a sus individualidades más microscópicas como son por ejemplo las células. También podríamos considerar fractal la forma de un cabello. Observando microscópicamente la morfología de la queratina en dirección ascendente, ésta se presenta en protofibrillas que se agrupan en fibras mayores, y éstas a su vez constituyen macrofibras que, finalmente, dan lugar a las fibras del cabello.

En síntesis, en el mundo culto, al observar una forma fractal, se experimenta gozo mental. Sentimos gozo mental ante lo inteligible y ante lo bello. Y puesto que, como asevera Nassim Taleb en su obra *El cisne negro*, “la madre naturaleza no asistió a clases de geometría en el instituto ni leyó los libros de Euclides de Alejandría. Su geometría es irregular, pero tiene una lógica propia y fácil de comprender”⁶⁴²; y que, como anteriormente se dijo, la repetición en el espacio es la armonía, y el ritmo es la repetición en el tiempo, entonces algo que define a una forma fractal es la repetición armónica y rítmica de sus partes. Podemos entonces concluir que percibir fractalidad en ciencia y en arte es una manera de percibir inteligibilidad y belleza, es una manera de experimentar

⁶⁴² BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal...*, p. 95.

gozo mental y, por tanto, de sentir placer estético. En el arte de la arquitectura el gozo por lo fractal, como ya tratamos de exponer en el capítulo primero de nuestra tesis, está en un punto intermedio entre la máxima fractalidad (por ejemplo, Gaudí) y la mínima, (tal vez, Mies van der Rohe). Quizá por eso al observar formas autosimilares homólogas en los tabiques en crecimiento del interior al exterior de un amonite fósil (Fig. 87), en el interior cavernoso de una célula vegetal (Fig. 88), y en el interior tallado de formas geométricas de la cúpula de *San Carlino alle Quattro Fontane* de Francesco Borromini (Fig. 89), podemos relacionarlas en una forma fractal convergente experimentando en ese proceso la sensación placentera de haberlo comprendido.

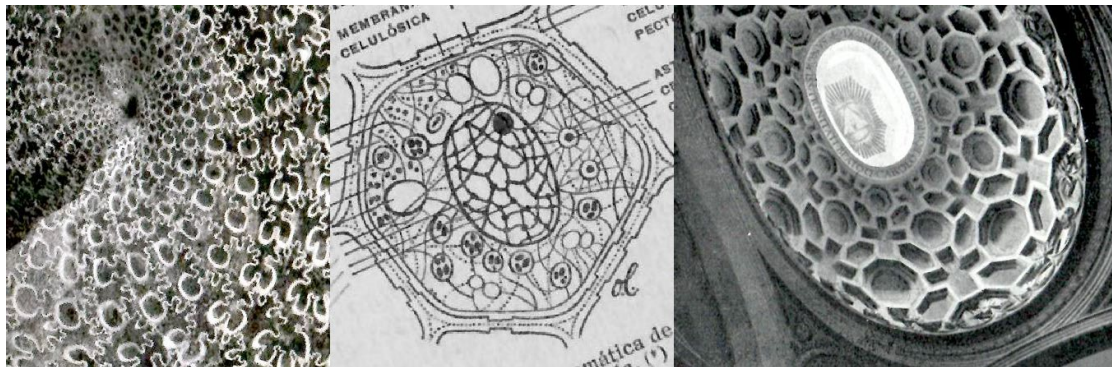


Fig. 87. Forma fractal tabiques interiores de amonite fósil. Fuente: WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 249.

Fig. 88. Representación esquemática de una célula vegetal. Fuente: CENDERERO, C. O. *Geología. Curso Elemental de Historia Natural*. Talleres Tipográficos J. Martínez. Santander: 1916, p. 16.

Fig. 89. Cúpula *San Carlino alle Quattro Fontane* de Francisco Borromini. Fuente: GIEDION, S. *El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial, 1981, p. 115.

Al describir la cúpula de San Carlino, Giedion dice:

El interior [...] está casi en completa oscuridad; por tal motivo, la luz que allí irrumpe a través de la linterna es de un grandioso efecto. La claridad resplandece sobre la curiosa combinación de formas geométricas talladas en la parte inferior de la cúpula: en el modo cómo Borromini las combina, tales formas confieren a la cúpula un aspecto que nos sugiere la imagen de la estructura celular de una planta⁶⁴³. [...] La materia presenta, pues, una textura infinitamente porosa, esponjosa o cavernosa sin vacío, siempre hay una caverna en la caverna: cada cuerpo, por pequeño que sea, contiene un mundo, en la medida en que está agujereado por pasadizos irregulares, rodeado y penetrado por un fluido cada vez más sutil, el conjunto del universo era semejante a “un estanque de materia en el que hay diferentes flujos y ondas. [...] La división del continuo no debe ser considerada como la de la arena en granos, sino como la de una hoja de papel o la de una túnica de pliegues, de tal manera que puede haber en ella una infinidad de pliegues, unos más pequeños que

⁶⁴³ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 114.

otros, sin que el cuerpo se disocie nunca en puntos o mínimos. [...] Por eso las partes de la materia son masas o agregados, como correlato de una fuerza elástica compresiva⁶⁴⁴.

Capítulo V

14. FORMAS NATURALES MATEMÁTICAS FRECUENTES POR SU FUNCIÓN APLICADAS EN LA ARQUITECTURA

“Los artistas, los diseñadores y los arquitectos consideran que la forma sigue a la función. Esta teoría aplicada al medio natural y al medio humano conduce a creer que existe un resultado final, cuando de hecho el proceso mismo es el final, y el objeto de este proceso, la forma en evolución puede estar cambiando siempre, confiando atrapar la evasiva forma de una perfecta obediencia”⁶⁴⁵. La arquitectura, como tecnología que modifica el medio minimizando el impacto ambiental, propicia el bienestar de sus moradores para asegurar que la especie sobreviva y evolucione.

14.1. LA ESFERA EN:

- LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI
- LA OBRA DE LOS ARQUITECTOS ÉTIENNE-LOUIS BOULLÉE Y JOHN SOANE
- EL PALACIO DE DEPORTES DE ROMA DEL INGENIERO PIER LUIGI NERVI
- EL MUSEO DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA

⁶⁴⁴ DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco* ..., pp. 13-14.

⁶⁴⁵ WILLIAMS, C. *Los orígenes de la forma*..., p. 76.

14.1.1. LA ESFERA EN LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI

Francesco Castelli (1599-1667), como la mayor parte de los grandes artistas barrocos, provenía del lejano norte de Italia. Al poco de iniciar su carrera en la cantería de su padre, se mudó a Milán para estudiar. En 1619 se trasladó a Roma cambiando su apellido por el de Borromini, y empezó a trabajar como peón de albañil en las obras de San Pedro.

La orden de los Trinitarios Descalzos encargó a Borromini el que sería su primer proyecto como arquitecto independiente, la construcción del monasterio e iglesia de San Carlos de las Cuatro Fuentes (Fig. 90), en un pequeño solar que adquirieron en 1611-12.

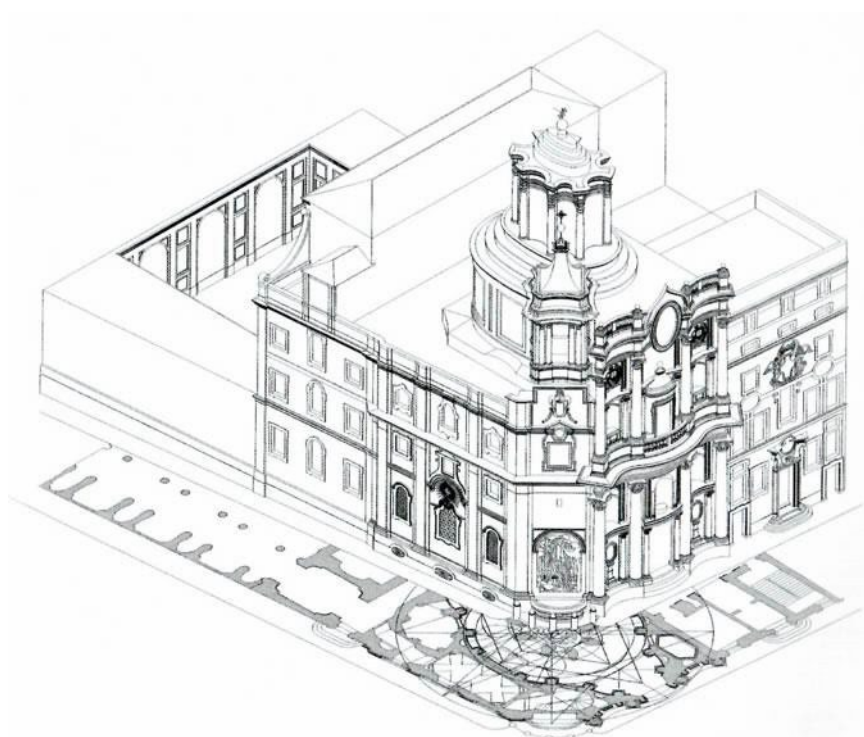


Fig. 90. Representación axonométrica de San Carlino. Autor: Eusebio Alonso García. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini*. Valladolid: Universidad de Valladolid, 2003, p. 343.

Situado en la esquina suroeste en la strada Pia y la strada Felice, trazadas por Pío IV y Sixto V, respectivamente; llevaba la primera, llamada hoy vía del Quirinal, desde el Quirinal hasta la Porta Pía, y la segunda, que es la actual vía de las Cuatro Fuentes, desde la Trinitá dei Monti hasta Santa María la Mayor. En la intersección había dispuesto Sixto V las cuatro fuentes que dan nombre al lugar. Los monjes recibieron al principio cierto apoyo económico del cardenal Francesco Barberini, cuyo palacio está situado en la

diagonal al otro lado de la fuente adyacente a San Carlino, pero después el prelado perdió interés en el asunto y la terminación de las obras llevó más de cuarenta años⁶⁴⁶.

En 1635 Borromini inició los trabajos del claustro que no terminaría hasta 1641. En 1638 empezó la iglesia, concluyéndose la estructura al año siguiente, y el interior cuatro años más tarde. Por falta de recursos no se iniciaron hasta 1665 los trabajos de la fachada principal de la iglesia, de la que Borromini sólo pudo ver terminado el piso inferior antes de su fallecimiento en 1667. Finalmente sería su sobrino Bernardo Castelli quien en 1682 terminase la fachada. A pesar de que para algunos el conjunto arquitectónico se constituía de una composición fragmentaria y diferenciada de elementos, residencia, iglesia y claustro, no obstante, para Borromini su compleja idea de unidad “surge de la común vibración de los distintos fragmentos, significándose en la sintonía que establece la conjunción de aquellas partes más plásticas del edificio: fachada principal, campanario, tímpano mixtilíneo y linterna, cuya expresividad sobresaliente sobre el conjunto encadena una unidad polimórfica en la que se encabalgan las piezas más importantes”⁶⁴⁷. San Carlino será el primer proyecto en que Borromini enfrente “las contradicciones derivadas del manierismo entre “teoría y práctica” arquitectónica”⁶⁴⁸; para Borromini, la idea de unidad y de organismo introducido por Alberti no se explicitan metafóricamente, sino que, fruto de una profunda reflexión crítica, “sus edificios están siempre pensados en relación a una situación urbana. Al lado de la arquitectura, y frecuentemente sobre el mismo plano de valores, existe una edificación borrominiana: sus edificios no están nunca pensados como una forma cerrada, o como “monumentos” que exigen zonas de respeto o imponentes y escenográficas orquestaciones. Por el contrario, se adaptan con espontánea flexibilidad al trazado urbano; sus superficies se plasman en relación a las objetivas condiciones del espacio; la misma materia de la construcción no se diferencia de la de los edificios comunes de vivienda”⁶⁴⁹. No obstante, su personal e imaginativa concepción proyectual, reflejo de su actitud crítica y pragmática frente a la tradición, a pesar de encontrar el beneplácito de sus comitentes por la bondad técnica y funcional de sus edificaciones, no recibirá acorde valoración por parte de sus compañeros de profesión. “Más bien al contrario, su arquitectura fue denostada y, así, las aceradas críticas de Bernini fueron aplaudidas desde Roma a París. Para Bernini, el artista romano

⁶⁴⁶ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 267.

⁶⁴⁷ *Ibidem*, p. 272.

⁶⁴⁸ *Ibidem*, p. 28.

⁶⁴⁹ ARGAN, G. C. *Borromini*. Xarait, Madrid, 1987, p. 161.

por excelencia del siglo XVII, la arquitectura de Borromini era herética, fruto de la locura ocupada en perseguir quimeras”⁶⁵⁰.

El problema tipológico de Borromini

En este apartado de la esfera vamos a estudiar, de entre los edificios que componen el conjunto de San Carlos de las Cuatro Fuentes, el edificio de la Iglesia de San Carlino.

Una de las causas por las que la iglesia de San Carlino, y sobre todo el resto de sus posteriores proyectos, no fueron comprendidos, fue principalmente debido a la dificultad de establecer una explicación tipológica clara con la que describir su compleja realidad objetiva en relación a la tradición. Y es que, si recapitulamos, durante el siglo XV en Italia el progresivo abandono de la funcional planta de cruz latina fue dando paso al ideal de belleza ejemplificado en las nuevas iglesias de planta centralizada, cuyo soporte teórico se fundamentaba en los tratados de Vitrubio y, posteriormente, en los tratados renacentistas de arquitectura como el *De re aedificatoria* de Alberti, el cual al abordar la forma circular, “–evitando cualquier referencia metafísica- dice de ella que es “prevaliente”. Se trata de un reclamo a la permanencia, a la estabilidad, a la constancia”; y, entre los ejemplos de circularidad natural, León Battista enumera – junto al globo terráqueo, a los astros y los árboles- a los animales, “*eurumque nidificaciones*”⁶⁵¹.

También Francesco di Giorgio afirmará, en su tratado, que los tipos múltiples de iglesias existentes se resumen en tres: “redondos, angulares (es decir, poligonales) y compuestos de los anteriores”⁶⁵². Por otra parte,

los arquitectos del siglo XVI habían basado sus principios en el estudio de Vitrubio y de ciertos ejemplos, cuidadosamente seleccionados, de la arquitectura romana. Vitrubio era notoriamente conservador, hasta el extremo de aceptar sólo los órdenes griegos y de excluir el toscano y el compuesto, que añadieron los romanos, y el principal punto de partida del estilo de Bramante y sus seguidores había sido el estudio de los edificios más clásicos de la Roma antigua -como el Panteón, el Templo de la Fortuna Virilis y los llamados Templos de Vesta- o de sus grandes logros estructurales- como las Termas o la Basílica de Majencio, que ellos llamaban el Templo de la Paz⁶⁵³.

⁶⁵⁰ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 28.

⁶⁵¹ TAFURI, M. *Sobre el renacimiento: principios, ciudades, arquitectos ...*, p. 68.

⁶⁵² ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 33.

⁶⁵³ BLUNT, A. *Borromini*. Madrid: Alianza Forma, 1982.1987, p. 40.

Los arquitectos barrocos poco a poco se fueron liberando de las contradictorias soluciones centrales y longitudinales renacentistas y manieristas, declinando el prototipo centralizado puro, sin perder los valores intrínsecos a éste como la unidad y la continuidad espaciales, adoptando combinaciones y desarrollando nuevos tipos de los ya existentes. Así, en el caso concreto de San Carlino, “el mito de la centralidad es desplazado por la búsqueda del organismo tridimensional”⁶⁵⁴ (Fig. 91). De modo que,

el método de Borromini, recorriendo el proceso proyectual que va desde la contaminación de tipologías heredadas hasta lograr su síntesis orgánica, inaugura una investigación sobre la búsqueda del espacio unitario y continuo que, desde Guarini a Vitto, pasando por la arquitectura barroca centroeuropea, dará como resultado, durante el largo período de casi un siglo, una de las experiencias más fructíferas y diversas sobre la idea del espacio como hecho constitutivo en la arquitectura. En todas ellas, la asunción de la contradicción entre las necesidades funcionales de la tipología eclesial y la aspiración a una determinada idea del espacio llevó a explorar cualidades plásticas de la forma arquitectónica y su comunicabilidad a través de inherentes valores sociológicos⁶⁵⁵.

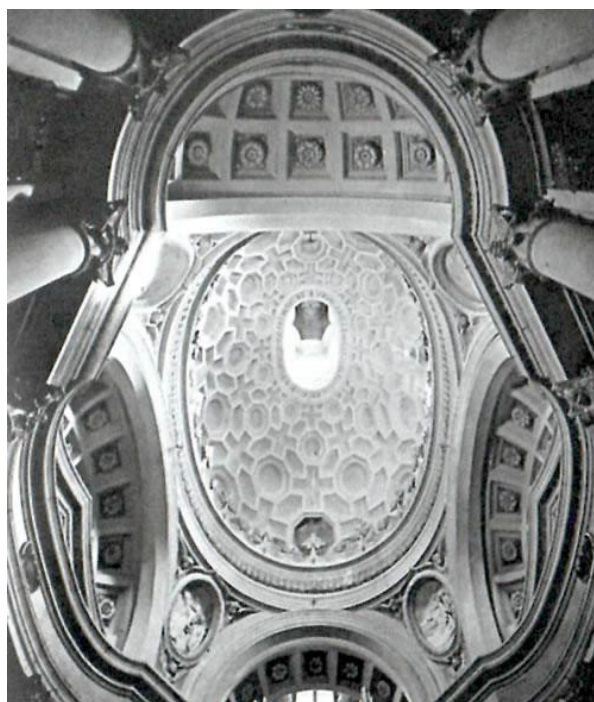


Fig. 91. Encabalgamiento de cúpulas y delineación del sistema de baldaquino. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 139.

En otro orden de cosas, según Rudolf Wittkower “Borromini reconcilió en esta iglesia tres tipos diferentes de estructuras: la cúpula ovalada, la zona intermedia de pechinas, que deriva de las plantas de cruz griega, y la ondulante zona más baja”⁶⁵⁶, por lo que podemos decir en primer lugar que en San Carlino se opera la aplicación culta del

⁶⁵⁴ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini ...*, p. 33.

⁶⁵⁵ *Ibidem*, p. 40.

⁶⁵⁶ *Ibidem*, pp. 32-33.

óvalo, que se obtiene como adaptación de la circunferencia considerada la sección de la esfera, y que suele confundirse con la elipse. Y es que ya “Nicolás Copérnico (1473-1543) publicó en 1543 su teoría heliocéntrica *“De las revoluciones de los cuerpos celestes”*, inscrita en el índice de los libros prohibidos en 1616. La tierra había dejado de ser el centro del universo y, más tarde, Kepler (1571-1630) despojó a la circunferencia del derecho a ser la única órbita de los cuerpos celestes; a partir de los datos astronómicos acumulados por Tycho Brahe, describió las órbitas elípticas de los planetas en su *“Armonía del Mundo”* (1619)”⁶⁵⁷. De cualquier forma, “considerar como sinónimos los términos óvalo y elipse, aunque resulte erróneo en razón de su diferente condición geométrica, sigue siendo frecuente y es una incorrección en la que incurrieron entre otros Descartes, Durero y, más recientemente, Panofsky”⁶⁵⁸.

Concretamente, el empleo del óvalo en arquitectura se inició con su inclusión en los tratados a partir del siglo XVI. Las plantas ovales serán una evolución manierista de las plantas centrales renacentistas. A diferencia del Renacimiento, en el que el círculo será el emblema, símbolo de que todos los hombres son iguales ante Dios, en el Barroco su símbolo pasará a ser el óvalo, significando que “no son todos iguales. La tensión y el conflicto se superan si se acepta esta condición. La fuerza ya no reside en el hombre sino en aquel hombre que tenga poder”⁶⁵⁹.

Un óvalo es una curva cerrada que se obtiene de la tangencia de arcos de circunferencia hallando previamente sus centros, y su aplicación fue ampliamente desarrollada por los constructores medievales, que vieron la ventaja de la adaptación de su trazado a formas de múltiples dimensiones frente a la circunferencia. Se puede considerar que un caso límite de construcción del óvalo es el de infinitos centros, conocido como elipse. De esta curva se tenía noticia, como ya hemos dicho, desde la antigüedad, y fue muy estudiada en el siglo XVI. A diferencia del óvalo, la elipse es una curva cónica que también se define como lugar geométrico de los puntos del plano cuya suma de distancias a dos puntos fijos llamados focos es constante; y aunque su construcción resulta muy ventajosa si se conocen las dimensiones de sus ejes, a diferencia del óvalo, no permite construir

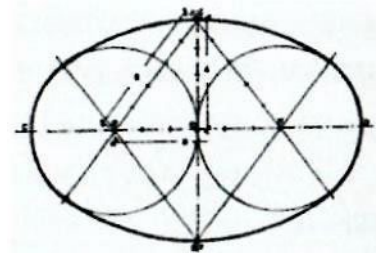


Fig. 92. Óvalo sesquiáltero de Vignola.
Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 234.

⁶⁵⁷ *Ibidem*, p. 251.

⁶⁵⁸ *Ibidem*, p. 235.

⁶⁵⁹ CRAVINO, A. “Renacimiento, Manierismo, Barroco”. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, N.º 37, 2011, p. 102.

curvas concéntricas. Fue Serlio quien, en el *II Primo Libro della Archittetura*, expuso cuatro modos distintos de dibujar el óvalo, pero la inconmensurabilidad de sus medidas no se ajustará al método racional renacentista. Finalmente, Vignola conseguirá solventar este conflicto ideando el óvalo de proporción sesquiáltera (Fig. 92). “Según Ghyka Matila los arquitectos Arquímedes y Sasánidas se servían de este tipo de óvalos sesquiálteros para trazar sus cúpulas”⁶⁶⁰.

En definitiva, en relación al caso que nos ocupa de San Carlino,

el interés de Borromini por el óvalo no reside ni en una opción tipológica ni en su cualidad de forma cerrada y completa, sino en su condición de figura policéntrica, y como tal, susceptible de definir con precisión las anamorfosis deseadas, asumiendo dos características implícitas en la propia definición del óvalo y relacionadas entre ellas: la desvinculación de unas proporciones armónicas y racionales y la libertad de elegir la posición de los centros de curvatura y el número de estos, con la exclusiva ligazón entre ellos que impone la geometría oval para satisfacer la precisa tangencia entre las diferentes curvas que componen el trazado. Esta es la razón de que los trazados ovales de Borromini sean diversos y diferentes de los comúnmente utilizados en los siglos XVI y XVII y difundidos a partir de Serlio. En los diseños de San Carlino, Borromini dibuja un óvalo, cuyos centros de trazado se definen a partir de la trama geométrica del triángulo equilátero y cuyas dos circunferencias menores son tangentes en el centro”⁶⁶¹ [...] La “incompletud” de tales trazados y su “superposición” a diferentes niveles con otros trazados diversos, bien ovales o circulares [...] hacen inviable la identificación de la forma arquitectónica como una única y determinada figura geométrica y, a su vez, eliden la individualización de entidades espaciales autónomas⁶⁶².

Sin duda alguna, estos aspectos diferenciarán claramente a Borromini de sus coetáneos y barrocos posteriores como Guarini.

⁶⁶⁰ Cfr. GHYKA, M. *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes* ..., p. 65, apud ALONSO GARCÍA, A. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini* ..., p. 233.

⁶⁶¹ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini* ..., p. 239.

⁶⁶² *Ibidem*, p. 240.

La geometría como máquina

“El siglo XVII posee una actitud verdaderamente científica hacia el mundo y la naturaleza”, llegándose a afirmar, a partir de 1620, que “la Naturaleza es una máquina y que la ciencia es la técnica de la explotación de esta máquina”⁶⁶³.

Leonardo y Bramante desarrollaron la concepción del edificio como máquina, como un mecanismo tridimensional cuya estructura orgánica también guarda relación con los problemas técnicos de la construcción. Los dibujos anatómicos de Leonardo tendían a poner plenamente en evidencia las estructuras del cuerpo humano como máquina orgánica, como conjunto de miembros en correspondencia mecánica y funcional. Sus arquitecturas se materializan en organismos, en máquinas tridimensionales de espacios y estructuras; el edificio interior y volumen exterior. Borromini, añade, al concepto de organismo, la noción de plasticidad y el edificio, por ello, no se resuelve en términos compositivos, sino que ha de determinarse a través de la geometría que genera mecanismos complejos de producción formal, trasladando la concepción maquinista del edificio a la propia geometría. Al contrario que Leonardo y Bramante, la solución puntual, el detalle, adquieren mayor importancia⁶⁶⁴.

Metamorfosis geométrica

La constante referencia hacia la Naturaleza, por parte de los arquitectos y teóricos renacentistas, es renovada por Borromini evolucionando al máximo su complejidad. Como “máquina productora de la forma”, “la complejidad de San Carlino reside en la aplicación de un todavía incipiente método topológico sobre un organismo cuyo sistema espacial surge de una implantación tipológica tradicional, la planta cruciforme cupulada, que, forzando la presencia de elementos habituales de su sistema constructivo, cúpula, arcos torales y pechinas, constriñe el desarrollo de la sección de su envoltura muraria, entendida ésta como una piel continua e inarticulada”⁶⁶⁵. Así, se puede apreciar en los bocetos de Borromini el mecanismo de la “planta transparente”, donde aparecen en una misma planta superpuestos elementos situados en cotas diferentes que van añadiendo

⁶⁶³ *Ibidem*, p. 251.

⁶⁶⁴ *Ibidem*, p. 217.

⁶⁶⁵ *Ibidem*, pp. 229-230.

complejidad en un *sistema abierto*, susceptible de evolución en permanente transformación ascendente, pero que, a través de homomorfismos y *autosemejanzas*, consigue ajustarse a la tipología tradicional.

Es decir, “la planta ya no es para Borromini la generatriz de su arquitectura, sino que a partir de aquella la envoltura muraria experimenta un *proceso* metamórfico, cuya evolución queda regulada por un sabio y complejo dispositivo geométrico que, lejos de la elocuencia que la geometría dispondrá en las obras de Guarini, e, influenciado por éste, el Barroco posterior, Borromini renuncia a contar, adquiriendo una condición *subyacente* que ni siquiera es revelada en el diseño de los pavimentos”⁶⁶⁶. Y, como consecuencia,

esta especificidad de la geometría borrominiana no será del todo comprendida por las generaciones posteriores. Guarini y, a través de él, las generaciones tardobarrocas ahondan en las posibilidades plásticas de la forma arquitectónica y, apoyándose en meritorios alardes técnicos y en el desarrollo de la geometría descriptiva, profundizan en la creación de organismos complejos. El rigor científico de Guarini le lleva a un proceso de sistematización que, a pesar de la apariencia formal típicamente barroca, resulta más heredero de la metodología del Renacimiento que de Borromini. La analogía con la composición por crujías, típica del Renacimiento, es muy estrecha; la diferencia estriba en que las series de subunidades sumadas para obtener la unidad de conjunto ya no se hacen por simple adición, sino basándose en el método de la compenetración y entrelazado de las células espaciales. A pesar de la intensa fricción generada, no sólo las distintas subunidades espaciales son reconocibles, sino también la sintaxis que las articula⁶⁶⁷.

Según Portoghesi,

estas células no se compenetrán casualmente, sino siguiendo reglas precisas que determinan un producto unitario. Las reglas se asemejan a las que regulan el montaje de los órdenes en la tradición teórica renacentista. Piénsese, por poner un ejemplo, en la visión que ofrece Vignola en su tratado de la síntesis de orden arcada típica del Coliseo; mientras en el prototipo romano entre el arco y el cornisamento del orden queda un cierto espacio neutro, en la traducción sistemática de Vignola todos los elementos se enlazan por tangencia, de modo que una vez fijada la dimensión de un elemento todos los demás resultan unívocamente definidos. Guarini adopta un procedimiento análogo para unir en

⁶⁶⁶ *Ibidem*, p. 217.

⁶⁶⁷ *Ibidem*, p. 221.

planta las matrices geométricas de las células espaciales. [...] Substancialmente Guarini extiende a la escala del organismo espacial las posibilidades de la composición de los polígonos regulares que caracteriza ya en el Renacimiento las particiones de los techos en lagunares y las decoraciones de carácter geométrico. En esto sigue a Leonardo, a Peruzzi y a Serlio, pero se lanza mucho más allá de sus resultados, puesto que la posibilidad de componer no está, para él, basada en la yuxtaposición de elementos autónomos, sino en la compenetración y en el entrelazamiento de las células espaciales⁶⁶⁸.

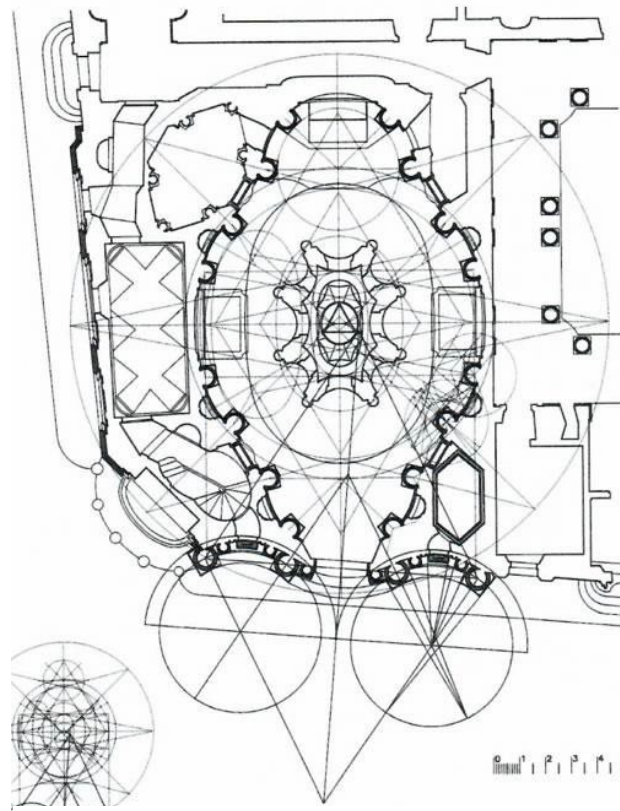


Fig. 93. Síntesis de la geometría en distintos niveles del organismo que se autotransforma para evolucionar simultáneamente con la metamorfosis del edificio. Autor: Eusebio Alonso García. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 224.

De modo que en San Carlino no es posible aplicar el método de compenetración de células de Guarini, ya que la permanente metamorfosis evolutiva a la que se halla sometido el espacio interior genera la máquina geométrica de carácter telescópico en cada estadio de la forma envolvente.

A través de la superposición de los diversos dispositivos geométricos que permiten dibujar en cada nivel la forma que adopta la envoltura muraria, el inicial trazado mixtilíneo

⁶⁶⁸ PORTOGHESI, P. *El ángel de la historia. Teorías y lenguajes de la arquitectura* ..., pp. 194-196.

alcanza la idea de la pura centralidad en la cúspide, afirmando ésta en la pequeña bóveda de la linterna que contiene la figura triangular inscrita en un óvalo de forma casi circular. [...] La idea de continuidad, aunque de modo sincopado, se enuncia a través de las semejanzas que se establecen entre las diversas fases, mediante la sucesión de formas concéntricas y homólogas. La geometría borrominiana no constituye por ello un mecanismo de composición, sino un método de regulación del crecimiento formal. [...] A Borromini no le interesa exponer la elocuencia de su geometría, sino resolver con sutileza y finura la pura transformación. [...] La geometría borrominiana se orienta, sobre todo, a la determinación de las diversas variaciones que experimenta el organismo y a precisar sus *interrelaciones*. Borromini enuncia su máquina geométrica como una ley matemática de las variaciones necesarias que han de conformar la imagen de la metamorfosis deseada; una ley que genera a su vez sus propios *cambios*⁶⁶⁹ (Fig. 93).

No obstante, la metamorfosis siempre tuvo un gran protagonismo en la cultura occidental. José Jiménez nos lo ha recordado con la frase que Goethe pone en labios de Fausto: “¡Cómo todo en el todo se entreteje, / y lo uno en lo otro actúa y vive!”⁶⁷⁰. Por otra parte,

la síntesis geométrica de estas tres figuras, círculo, cuadrado y triángulo está presente en numerosos motivos ornamentales de San Carlino y en toda la obra borrominiana, cuadrado y triángulo equilátero aparecían combinados de modo heterodoxo en la determinación del centro de curvatura del ábaco de los capiteles interiores de la iglesia trinitaria. En el diseño Alb⁶⁷¹. 416 v, donde aparecen detalles y apuntes decorativos para San Juan de Letrán, una leyenda del propio Borromini explica el manejo de estas referencias iconológicas: “Un globo que representa el mundo unirá lo espiritual y lo temporal”. Por sí sólo, el triángulo equilátero simbolizaba la Santísima trinidad, su inclusión en San Carlino era pertinente y obligada, por estar la iglesia promovida por la orden de los Trinitarios. Al doblarlo daba lugar a su alusión salomónica, mientras que en forma cuádruple representaba el orden y la armonía del universo, habiendo sido

⁶⁶⁹ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, pp. 222-223.

⁶⁷⁰ JIMÉNEZ, J. *Cuerpo y Tiempo. La imagen de la Metamorfosis*, Barcelona: Destino, 1993, p. 154.

⁶⁷¹ La Albertina es la colección nacional austríaca de dibujos y tiene su sede en Viena. Los diseños borrominianos que posee son más de 400, y representan la mayor parte de los diseños autógrafos que conocemos y que se salvaron de la destrucción emprendida por el propio Borromini en el verano de 1667, poco antes de la trágica noche del 2 de agosto. Junto a otros de las escuelas italianas de los siglos XVII y XVIII, constituyen el núcleo más antiguo de los cerca de cuarenta mil diseños, un patrimonio que hace de la Albertina la colección gráfica más importante. El origen de la colección se debe al diplomático genovés Giacomo Durazzo (1717-1777), quien la inició para el duque Alberto de Sassonia-Teschen. Fue el barón Philipp von Storsch, humanista y coleccionista, quien durante su segunda estancia romana (1721-1731) compró los diseños de Borromini a los herederos del maestro. Muerto el barón Storsch, y a pesar de los intereses de Catalina II de Rusia, la colección fue adquirida en Berlín en 1769 por la corte imperial de Viena para *Hofbibliothek*, por 12.500 florines. En 1919, después de la fusión de las colecciones gráficas de la *Hofbibliothek* con la Albertina, la colección Storsch pasó a formar parte del inventario de la última.

sancionado por Vitruvio en su libro V, como verificación de la armonía musical del teatro romano⁶⁷².

Por consiguiente, “la geometría borrominiana no es ya un mero mecanismo de control de proporciones anamórficas, sino que anuncia una ley genérica que rige la evolución formal de cada parte, define sus curvaturas, establece relaciones formales y geométricas entre ellas. Orienta la forma y disposición de los elementos del orden, hallando en la génesis del edificio la razón de su diversidad. Esta geometría define matemáticamente la metamorfosis del organismo y sus formas”⁶⁷³. Luego “toda metamorfosis es un proceso. Un itinerario. Entre una forma que muere y otra que nace. Entre la vida y la muerte. O, de otro modo, la metamorfosis nos da una visión fluida, transitiva, del vivir y del morir”⁶⁷⁴. Del mismo modo, “La máquina geométrica de San Carlino desarrolla matemáticamente las diferentes transformaciones que experimentan sus figuras, concretando sobre el tablero de diseño lo que a nivel intuitivo y plástico el arquitecto modela en sus maquetas realizadas con la materia blanda de la cera y el yeso. Es esta opción topológica, en la que Borromini conforma sus edificios aplicando geometrías cambiantes que recuerdan los mecanismos de crecimiento de los organismos vivos, la que le distancia de la tradición”⁶⁷⁵.

Disociación entre forma y figura

El empleo por Borromini en San Carlino del mecanismo de “planta transparente”, explicado más arriba, producto de la disociación entre la forma arquitectónica y la figura geométrica, genera un carácter impredecible e incluso “hermético”, que no sólo se manifiesta en el proceso del proyecto, sino que se mantiene en la percepción del espacio construido.

Efectivamente, “el carácter simbólico de la perspectiva renacentista, que traducía la concepción espacial de infinitud teleológica en la de que todos los elementos fugan hacia un único punto, resultó eficaz mientras el espacio arquitectónico fue concebido

⁶⁷² Cfr. TAYLOR, R. *Arquitectura y magia: consideraciones sobre la idea de El Escorial*. Madrid: Siruela, D.L. 1992, *apud* ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, pp. 223-224.

⁶⁷³ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 230.

⁶⁷⁴ Cfr. JIMÉNEZ J. *Cuerpo y Tiempo. La imagen de la Metamorfosis ...*, p. 16, *apud* ALONSO GARCÍA, A. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 231.

⁶⁷⁵ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 232.

como un “espacio representado”. Esta condición, que suponía que el espectador se situaba fuera del plano de cuadro, contemplando el espacio desde el exterior, impone dos características a la génesis arquitectónica que hasta Bramante resultan incontestadas. El carácter bidimensional de la composición y su condición mensurable, siendo ambas inherentes al propio mecanismo de la perspectiva y sus razones geométricas, tal y como se aprecian enunciadas en los textos renacentistas”⁶⁷⁶.

En cambio, en San Carlino el espectador se ve entregado a múltiples puntos de vista. Este hecho se pone de manifiesto “en la contracción espacial que implica la duplicación simétrica de los machones diagonales; como anteriormente se había hecho en el claustro, aparece subrayada en la condición policéntrica de la pared, y es confirmada en las transformaciones que ésta adopta en su desarrollo ascendente”⁶⁷⁷. Verbigracia,

la cualidad tridimensional del espacio constituye una de las categorías de la arquitectura barroca a partir de la cual el hombre ya no contempla desde fuera el espacio representado, sino que convive en él con el resto de los objetos que lo definen y, por tanto, su percepción espacial resulta posible desde diversos puntos de vista. Frente a la asistemática disposición de elementos homogéneos en la configuración espacial iniciada por Brunelleschi, el enfoque visual sorprendente y la atención prestada al fragmento adquieren mayor protagonismo desde los inicios del siglo XVII. La sobriedad renacentista es desplazada por la tensión vitalista del Barroco, que en la pintura anticipa con claridad Caravaggio y en la escultura resuelve Bernini. En contraposición con la visión sosegada del David de Miguel Ángel, cuya orgullosa serenidad transmite el victorioso desenlace de su combate con Goliath, Bernini representa al personaje en el instante preciso de haber lanzado la honda, congelando la tensión muscular de todo el cuerpo que el autor subraya con el diferente pulido entre el anverso y el reverso de la escultura, siguiendo la técnica miguelangelesca del “*non finito*”⁶⁷⁸.

Ya que, “en el pensamiento griego referirse a la infinitud quería decir emplear un término de significado en absoluto idéntico al que encierra nuestro “*infinito*”, el término que lo designaba, *apeiron*, quiere decir literalmente “sin límites” y, por lo tanto, “ilimitado””⁶⁷⁹. “La transgresión del límite y la aspiración al prodigio se hallan siempre a punto de confundirse con la pura y simple disolución de la forma”⁶⁸⁰. “Proclo reconoció,

⁶⁷⁶ *Ibidem*, p. 242.

⁶⁷⁷ *Ibidem*, p. 242.

⁶⁷⁸ *Ibidem*, p. 242.

⁶⁷⁹ ZELLINI, P. *Breve historia del infinito*. Madrid: Sinuela, 1991, p. 12.

⁶⁸⁰ *Ibidem*, p. 18.

al parecer, en el Comentario a Euclides I, que toda geometría es articulable entre el límite y lo ilimitado, ejemplificable en la bipolaridad de lo recto y lo curvo; verdad que recorrería toda la especulación matemática del Renacimiento hasta Leibniz, el cual reduciría una vez más la composición de cualquier figura geométrica a lo recto y lo circular”⁶⁸¹.

Así mismo, la representación de la acción donde se aglutinan movimiento y gesto es llevada a cabo por Borromini mediante la sucesión de orquestadas variaciones, desde el método de proyectación hasta su plasmación formal concreta del edificio, dejando patente el proceso temporal en que se desarrolla la metamorfosis y, a su vez, condicionando los límites del espacio. Así, la acción inconclusa representada en el momento de máxima tensión en el David de Bernini es adoptada por Borromini en cada fragmento de la fase metamórfica que, en un proceso de autotransformación permanente, se enuncia en la fase siguiente, adoptando diversas figuras de contornos volubles, mediante constreñidas relaciones geométricas y formales entre ellas.

La sucesión de curvaturas variables que acontece en San Carlino, el continuo plegarse y desplegarse de sus superficies, es la respuesta borrominiana a la sublimación del infinito que caracterizará las construcciones colosales del barroco; pero San Carlino, y la mayoría de las obras de Borromini, son edificaciones de reducidas dimensiones, en las cuales la traslación de la idea de un espacio homogéneo, continuo e infinito, como formuló Descartes, contemporáneamente a la construcción de la iglesia, en su definición del mundo como *res extensa*, resulta más complejo. Borromini sortea el desafío desplazando el problema a los límites del espacio⁶⁸².

Y teniendo en cuenta que, a propósito de la escultura, Wölfflin señaló la negación del contorno utilizada en el Barroco:

En un sentido literal, la plástica, como arte de masas físicas, no reconoce la línea; pero existe, sin embargo, el contraste de plástica lineal y plástica pictórica y el efecto de ambas clases de estilo es poco menos diferente que en la pintura. La escultura clásica se atiene a los límites, no admite ninguna forma que no se exprese dentro de un motivo lineal determinado, ni ninguna figura de la que no se pueda decir con qué orientación fue concebida. El barroco niega el contorno, no en el sentido de que sean excluidos en

⁶⁸¹ *Ibidem*, p. 21.

⁶⁸² ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 244.

absoluto los efectos de la silueta, pero sí de evitar que la figura se fije en la silueta determinada. [...] Desde ningún punto de vista se presentará la forma en su integridad⁶⁸³.

Si la idea de un espacio ilimitado es la de un área que no podemos abarcar, Borromini, mediante el *fluctuante* desdibujado de los contornos, las anamorfosis absidiales, el empleo variable de las curvaturas de las paredes, la cúpula, la linterna y la fachada, representará la capacidad de dilatarse y contraerse de la materia, desplazando la concepción cartesiana del espacio homogéneo, por la homogénea y unitaria plasticidad de la materia que conforma los límites de aquel.

Por otra parte, a la idea de movimiento fluctuante de la envoltura muraria explicada hay que añadir la noción de fuerza. De modo que Borromini se aleja de la interpretación extensa del mundo, y abraza la refutación acerca del movimiento de Newton y Leibniz:

En la tercera parte de los *Principios de Filosofía* (1640), Descartes (1596-1650), refutando la idea, hasta entonces aceptada, de que los planetas se movían en el vacío, propuso que el infinito universo debía de estar lleno de materia de un tipo especial, a la que llamó *plenum*, pensando que debía estar compuesta por partículas extremadamente finas, todas en movimiento. Cada partícula debía impartir su movimiento a las contiguas, formando *vórtices* con los cambios de posición. Así los planetas serían transportados por los *vórtices* a través del *plenum*.

La teoría de la atracción gravitatoria entre los cuerpos en el espacio de Newton (1642-1727), fue la que definitivamente descartó la teoría de Descartes sobre los *vórtices* y el *plenum*. Leibniz (1640-1716) mantiene una discusión puntual con Descartes en su “*Discurso de metafísica*”, obra escrita en 1684 pero que no fue publicada hasta 1846, en la que opone su interpretación del mundo desde la noción de fuerza a la cartesiana fundada simplemente en la extensión. Según Julián Marías, “...Descartes elimina de su física la noción de fuerza, porque no le parece clara y distinta, y sólo admite la extensión y el movimiento, entendido como mero desplazamiento de un cuerpo en el espacio; Leibniz hace ver que esto no basta, y que es menester introducir la noción de fuerza en el centro mismo de la física”⁶⁸⁴.

⁶⁸³ WÖLFFLIN, H. *Conceptos fundamentales de la Historia del Arte*. Madrid: Espasa Calpe. 1961, pp. 94-95.

⁶⁸⁴ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 245.

Así, la tensión característica del espacio borrominiano no sólo se ve explícita en la extensión cartesiana en los ábsides, sino que se contrarresta con la torsión de los arcos torales, la deformación experimentada por el artesonado de la cúpula y la amplitud del anillo oval que está reafirmado sucesivamente en el óculo cenital.

San Carlino, en definitiva, es un ensayo altamente complejo de esta asombrosa metodología entre los mecanismos tradicionales y su nuevo método, donde mediante geometrías diversas superpuestas y en constante evolución define la metamorfosis de sus organismos constructivos. Así, mediante la proyección de una planta fluctuante, corrección tras corrección, se superponen progresivas modificaciones sutiles dando lugar a soluciones impredecibles y singulares, que a través de la evolución metamórfica de la envoltura muraria llegan a una solución formal de mayor equilibrio en la cúspide. Según Eusebio Alonso García, entre los elementos singulares que determinan este proceso se

halla el desplazamiento rotacional simétrico entre las columnas torales de los transeptos, que, junto a la torsión de los arcos torales, “cuyas arquivoltas describen un desarrollo rotatorio que evoluciona en tres dimensiones [...] y que tiene su continuación en el artesonado de la cúpula”⁶⁸⁵, define lo que se ha dado en llamar “variación de la entropía”, que será *disipada* en la cúspide. Y es que, si tenemos en cuenta que, según René Thom,

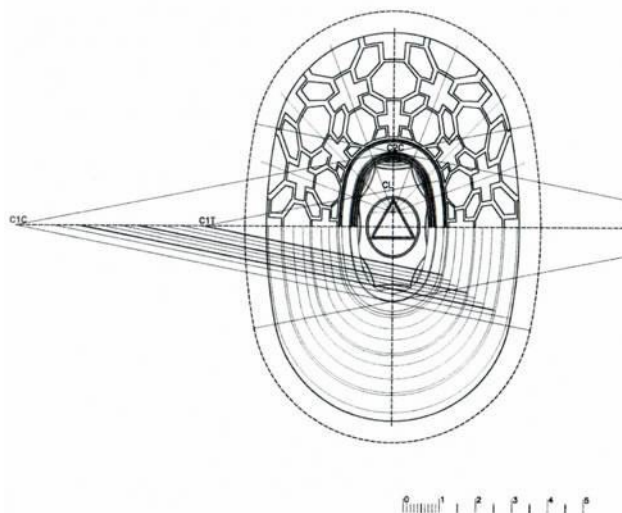


Fig. 94. Composición del artesonado, según óvalos con centros sucesivamente desplazados y dispuestos en el anillo oval de la cúpula. Autor: Eusebio Alonso García. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 253.

hoy se acepta con más facilidad la idea de que ciertos medios inanimados generan forma casi obligatoria, de forma extremadamente estable, morfologías extremadamente complejas... Obviamente va contra las viejas creencias de la termodinámica, cuyo segundo principio nos dice que los sistemas van siempre de un estado ordenado a uno caótico. En realidad, si se considera de cerca la demostración del segundo principio de la termodinámica, no hay nada en absoluto que permita afirmar que la variación de la entropía esté necesariamente vinculada a una evolución hacia un estado caótico. La

⁶⁸⁵ *Ibidem*, p. 260.

evolución de un sistema hacia un estado más estable podría estar relacionada con la aparición de un orden⁶⁸⁶.

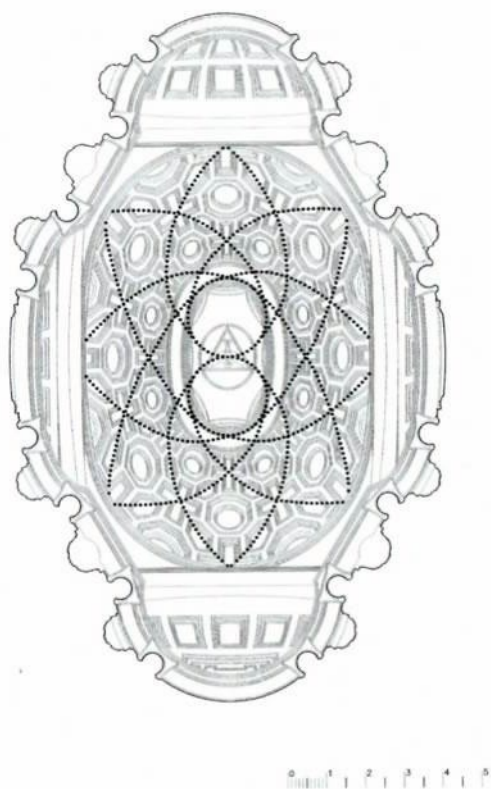


Fig. 95. La suma de espirales levógiras y dextrógiras, enunciadas a partir de la secuencia de los artesones hexagonales, recomponen la figura de la rosa de los vientos de la cúpula oval. Autor: Eusebio Alonso García. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 264.

De modo que, “la forma de la elevación de la cúpula responde a la rotación del anillo oval de su arranque respecto al eje longitudinal, mientras que en el cupulino de la linterna la rotación se efectúa sobre su eje transversal. La decoración se resuelve con la alternancia de cruces y octógonos, organizados en cuatro niveles, y unos hexágonos que, rellenando los intersticios entre aquellos, van a enunciar líneas de tensión diversas”⁶⁸⁷. El desplazamiento del óvalo del óculo cenital respecto al anillo oval de arranque de la cúpula, junto a la deformación de las figuras del artesonado, se resuelve mediante una sucesión de óvalos con centros progresivamente desplazados (Fig. 94), y sirve de plantilla para el diseño del artesonado (Fig. 95). Miguel Ángel había empleado este método de óvalos sucesivos no concéntricos

para delinear la rosa de los vientos del pavimento de la plaza de Campidoglio de Roma, y también Borromini hará uso de este mecanismo en San Ivo para enlazar el tambor escalonado con la linterna. Finalmente,

la figura de la rosa de los vientos, que Borromini dibujó expresamente en algunos diseños de las bóvedas (Alb. 218) o pavimentos (Alb. 422), puede reconstruirse en la cúpula de San Carlino a partir, fundamentalmente, de las figuras hexagonales del artesonado que, como jalones silentes, enuncian los movimientos helicoidales que concluyen en torno a sendos círculos tangentes e inscritos en el óvalo del óculo cenital. Su convergencia hacia la linterna, único foco de luz claramente perceptible subraya su condición de *atractor* del

⁶⁸⁶ THOM, R. *Parábolas y catástrofes. Entrevista sobre matemática, ciencia y filosofía*. Barcelona: Tusquets, 1993, p. 45.

⁶⁸⁷ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 260.

espacio interior, cuyo efecto de succión se acentúa en la mixtilínea convexidad del intradós de la linterna⁶⁸⁸.

14.1.2. LA ESFERA EN LA OBRA DE LOS ARQUITECTOS ÉTIENNE-LOUIS BOULLÉE Y JOHN SOANE

“La esfera en el mundo culto protege, rueda, genera, simboliza la perfección, etc.”⁶⁸⁹. En el mundo culto encontramos multitud de ejemplos arquitectónicos en que se aprecia la selección de la simetría circular, y de los atributos que con anterioridad se han citado. En este caso empezaremos analizando algunas de las obras de dos arquitectos, uno de finales del siglo XVIII y el otro del primer tercio del XIX.

Étienne-Louis Boullée (1728-1799) nació en París, donde estudió pintura, si bien más tarde siguió los pasos de su padre, arquitecto de profesión. Representó, junto a Claude Nicolás Ledoux y Jean Jacques Lequeu, el grupo de los llamados arquitectos “visionarios”, a caballo entre el Neoclasicismo y el Romanticismo. “Representantes de la arquitectura revolucionaria francesa. [...] Boullée encarna la lucha por las nuevas formas; Ledoux, la búsqueda del nuevo orden de los componentes y Lequeu, la última etapa trágica [...], la desesperación, la resignación y la vuelta al pasado”⁶⁹⁰. Encontraremos reminiscencias de la influencia que supusieron para Boullée las enseñanzas de quienes fueron sus profesores. Así, para uno de ellos, Jacques-François Blondel, “la concatenación y la integración eran tan importantes como la graduación. Abogó por la unidad de las partes, la cual podía ser obtenida por medio de la simetría (Una de las principales bellezas de la arquitectura)”⁶⁹¹. “También promulgaba que, aunque el principiante debe seguir a los antiguos, el arquitecto maduro tiene que adaptar sus formas a las exigencias modernas y a los materiales disponibles. La arquitectura es creatividad, genio, el arte del gusto”⁶⁹². Por su parte, otro de sus maestros, Germain Boffrand, “arremetía contra la confusión de líneas y rectas, y elogiaba la noble simplicidad y la calma. [...] Sentía que una estructura debía tener significado y tenía que expresarlo. [...] Este era el nuevo programa de “la arquitectura parlante” (arquitectura narrativa), una arquitectura que, más que apelar al ojo del espectador, hablara a su mente. [...] Pasó a

⁶⁸⁸ *Ibidem*, pp. 261-262.

⁶⁸⁹ WAGENSBERG, J. *La rebelión de las formas...*, p. 182.

⁶⁹⁰ KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu*. Barcelona: Gustavo Gili, 1980, p. 58.

⁶⁹¹ *Ibidem*, p. 63.

⁶⁹² *Ibidem*, p. 72.

aplicar tanto la unidad de la forma como la unidad de carácter”⁶⁹³. Los escritos de Marc-Antoine Laugier, a pesar de no ser arquitecto, también aflorarán notablemente en la obra de los jóvenes arquitectos revolucionarios, entre ellos Boullée. Promulgaba que la arquitectura debía ser considerada susceptible de contener emociones. Para ello, el nuevo arquitecto debía trabajar con formas geométricas simples. Finalmente citaremos al profesor Jean-Laurent Le Geay, con quien, se dice, “empezó el renacimiento del gusto”⁶⁹⁴, y cuyos grabados sirvieron de base también a Giambattista Piranesi⁶⁹⁵.

“Los planes visionarios de Boullée perseguían establecer una nueva arquitectura que simbolizara los derechos del hombre”⁶⁹⁶. Tras la Revolución Francesa, influenciado por el pensamiento de Montesquieu, Voltaire y Rousseau, en su tratado *Ensayo sobre el arte* y en sus múltiples proyectos hizo poesía de la arquitectura. “El arquitecto debería tender a lo sublime”^{697,698}. Así, encontramos en Boullée una mente culta que busca en la naturaleza y sus formas el sentido de su arquitectura. Como él mismo dijo: “He demostrado que los principios constitutivos de la arquitectura provienen de la regularidad. [...] Sobre la base de observar la naturaleza, mis miras acerca de mi arte se han extendido. [...] El hombre no puede elevarse en su arte más que por medio del estudio de la naturaleza; es por ella por la que se adquiere la poesía de la arquitectura; es ella la que verdaderamente constituye el arte, y es la única manera de poder llegar a excitar en nosotros diversas sensaciones al conceder a los monumentos el carácter que les es propio”⁶⁹⁹. “La arquitectura debe producir el efecto de sus imágenes y domar nuestros sentidos [...] lo cual proviene de los efectos de los cuerpos y es lo que constituye la poesía”⁷⁰⁰. “La composición de masas arquitectónicas es lo importante para él, en otras

⁶⁹³ *Ibidem*, p. 77.

⁶⁹⁴ *Ibidem*, p. 81.

⁶⁹⁵ Giambattista Piranesi (1720-1778), arquitecto y grabador italiano, que tanto trabajó en Venecia como posteriormente en Roma, ambos lugares parada obligada del *Gran Tour*, del viaje cultural que hacen los artistas de esta época, motivo por el que estará en contacto directo con el prolífico intercambio de ideas a nivel arquitectónico y arqueológico suscitado. En su obra incorporará como formas de representación la *veduta*, vista topográfica, y el *capriccio*, o fantasía, todo ello combinando elementos ligados a la tradición con los nacidos en la contemporaneidad. Su temática fundamentalmente arquitectónica tenderá a la simplicidad, a la falta de decoración y a la claridad de volúmenes característica del Panteón, de proporciones grandiosas, valorando las masas, las texturas y los contrastes lumínicos. Representará en sus grabados utopías arquitectónicas donde a través de las ruinas arqueológicas romanas definirá una actitud de defensa de la autonomía itálica frente a la helénica. Determinará la arquitectura como un arte intelectual y comercializará su arte de forma independiente de cualquier comitente.

⁶⁹⁶ HARTT, F. *Arte. Historia de la pintura, escultura y arquitectura*. Madrid: Akal, 1985, p. 917.

⁶⁹⁷ “La palabra “sublime” en sí misma, originalmente utilizada para designar un estilo oratorio, fue aplicada por Longinus a otros tipos de literatura y revivió a finales del siglo XVII para desplazarse en el siglo XVIII hacia las artes visuales y los fenómenos de la naturaleza. En general significa una emoción de temor reverente, que bordea el terror, inspirada en los fenómenos naturales. Pero también se aplicaba a las obras artísticas que expresaban una grandeza sobrehumana, si bien cargando más el acento siempre en lo noble y excelso que en lo turbulento o sobrenatural. La copiosa literatura en torno a esta cuestión nace del deseo típicamente neoclásico de deducir reglas de lo que está por encima de las reglas, de definir lo indefinible”. En: HONOUR, H. *Neoclasicismo*. Madrid: Xarait, 1982, p. 28.

⁶⁹⁸ HONOUR, H. *Neoclasicismo ...*, p. 175.

⁶⁹⁹ BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte*. Introducción de Carlos Sambricio. Barcelona: Gustavo Gili, 1985, p. 143.

⁷⁰⁰ *Ibidem*, p.30.

palabras, la forma arquitectónica”⁷⁰¹. En su ensayo, asevera: “La simetría gusta –nos dice Montesquieu- porque presenta la evidencia y porque el alma, que busca sin cesar concebir, abraza y consigue sin esfuerzo el total de los objetos que representa. Yo añado que nos gusta porque es la imagen del orden y de la perfección”⁷⁰². “La forma de la esfera perfecta, por su magnífica belleza, refleja las convicciones básicas del artista. [...] Encontró posibilidades nuevas en todos los sólidos regulares, [...] pues cautivaban por su simplicidad, por su regularidad, y por su reiteración. [...] La geometría elemental como base del proyecto arquitectónico halló en él su paladín”⁷⁰³. Boullée considera las formas matemáticas en su arquitectura como un medio para experimentar el gozo mental. “La variedad nos agrada. [...] De todas formas, los objetos se reproducen bajo distintas apariencias por medio de la variedad. De aquí se deduce que este medio sirve para reanimar el alma ofreciéndole nuevos placeres”⁷⁰⁴. Buscó no sólo nuevas formas, sino

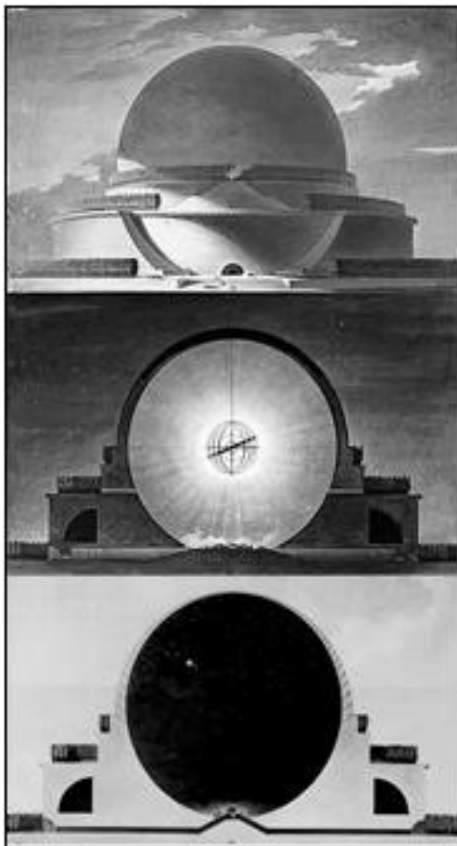


Fig. 96. Cenotafio a Newton. Fuente: KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios...*, p. 96.

descubrir su efecto artístico. “Analizando las cualidades específicas de los sólidos geométricos, he intentado descubrir cómo éstos pueden conmovernos. [...] Todo el efecto proviene del conjunto, y no de los detalles. [...] La distribución de las masas, la iluminación, las dimensiones monumentales y el énfasis en el carácter del edificio. Las masas tienen que ser grandes, y llenas de movimiento, el carácter depende de ellas. [...] Se consideraba el inventor de la arquitectura de las sombras y de las tinieblas”⁷⁰⁵. Al observar los antiguos monumentos funerarios descubre esa sensación sublime que intenta plasmar en sus obras empleando el claroscuro. Así, se decía a sí mismo: “*Fiat Lux*, y según tu voluntad, el templo se verá resplandeciente de luz o no será más que la vivienda de las tinieblas. [...] A continuación ya no me ocuparé de otra cosa que de la arquitectura”⁷⁰⁶.

⁷⁰¹ KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu ...*, p. 112.

⁷⁰² BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte...*, p. 58.

⁷⁰³ KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu ...*, pp. 112-113.

⁷⁰⁴ BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte...*, p. 58.

⁷⁰⁵ KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu ...*, pp. 112-113.

⁷⁰⁶ BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte...*, pp. 81-82.

La mayoría de los proyectos que diseñó no llegaron a realizarse al ser demasiado colosales; de ahí que su obra se tilde de “utópica”. Un buen ejemplo de ello fue el denominado *Cenotafio para el físico Isaac Newton*, que diseñó en 1784 (Fig. 96). En él “se pone de manifiesto la tensión espacial. El sarcófago en relación con la bóveda es tan diminuto, [...] que la sala se convierte en un vasto campo magnético atravesado por innumerables líneas de fuerza. Por una idea de composición extraordinariamente simple, el vacío vive. [...] Tenemos el irreconciliable contraste entre lo finito y lo infinito”⁷⁰⁷. Inspirado en el Panteón romano ⁷⁰⁸, basa su concepción en la simetría circular, empleando una gran bola de unos 150 metros de diámetro que aparece semienterrada, pues como él mismo decía, “habiendo determinado caracterizar la estancia de la muerte con una entrada de cementerio, me llegó el pensamiento de la arquitectura enterrada”⁷⁰⁹; tal vez esta idea la tomó observando “las arquerías con la base hundida en la tierra para cargar el acento en la sencillez semicircular”⁷¹⁰ de los grabados de Piranesi. Dicha esfera macla una plataforma circular cubierta de cipreses, pretendiendo representar la sensación de tristeza extrema producida

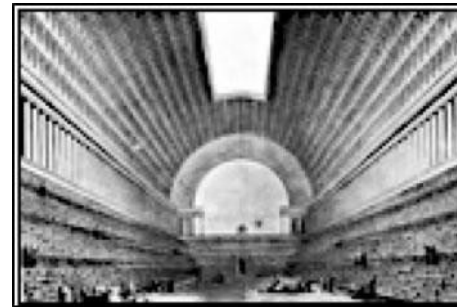


Fig. 97. Proyecto de la Biblioteca Nacional. 1785. Fuente: BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte...*, p. 115.

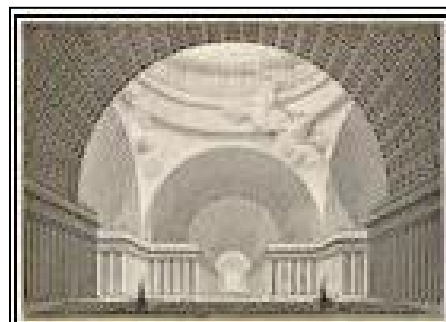


Fig. 98. Proyecto de la Iglesia Metropolitana, 1780-1781. Fuente: KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios...*, p. 103.

por las sombras de los árboles proyectadas sobre la tierra a la luz de la luna. En su interior, sobre un basamento escalonado, se alza el sarcófago de Newton, iluminado por la luz que penetra a través de las perforaciones realizadas conforme a la disposición que los astros presentan en la naturaleza, de modo que “los efectos de esta imagen están producidos por la naturaleza”⁷¹¹.

También destacan entre sus proyectos el de la Biblioteca Nacional (Fig. 97), la reconstrucción de la Iglesia Metropolitana (Fig. 98) o la Ópera de París (Fig. 99), entre

⁷⁰⁷ KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu ...*, p. 109.

⁷⁰⁸ Panteón de Agripa (templo de todos los dioses) que gobernó Roma en el año 27 a.C. y posteriormente, sobre los restos del mismo, construyó Adriano el templo actual. Se trata de una construcción en que el uso del hormigón y la coronación de la cúpula mediante óculo, son métodos pioneros del momento. La cúpula evocaba la forma esférica del universo y la luz cenital que entraba por el óculo, la luz enviada por los dioses. En el interior la planta circular junto a la cúpula facilita la centralización del espacio; todo ello, unido a las grandes dimensiones del edificio, recrea la sensación cosmológica.

⁷⁰⁹ BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte...*, p. 112.

⁷¹⁰ HONOUR, H. *Neoclasicismo...*, p. 94.

⁷¹¹ *Ibidem*, p. 130.

otros. Todos ellos elocuentes muestras de su perseguida simplicidad y solemnidad. Sus diseños aun hoy siguen siendo inspiración para muchos arquitectos.



Fig. 99. Proyecto reconstrucción La Opera de París. Fuente: KAUFMAN, E. *Tres arquitectos revolucionarios...*, p. 98.

John Soane (1753-1837), arquitecto de vocación, claro exponente de la arquitectura europea de la Ilustración y del primer tercio del siglo XIX, está considerado uno de los grandes genios de la arquitectura británica, y “precursor del historicismo ecléctico”⁷¹². Estudió en la *Royal Academy of Art*, ganando en 1772 una beca con la que pasaría dos años de su juventud en Italia, a modo de Grand Tour, suerte de experiencia iniciática para su futuro como arquitecto, conociendo a “personalidades y artistas como Piranesi, del que se convertiría en ferviente coleccionista, el arte italiano clásico y renacentista, y la luz meridional”⁷¹³.

Soane empleará los diversos elementos arquitectónicos de las distintas épocas, combinándolos y creando un estilo integrador; como él mismo dijo, “una unión de las artes”⁷¹⁴, al relacionar el clasicismo con el gótico. “Cualesquiera que fuesen sus modelos, supo cómo usar los diversos elementos para expresar crecimiento, movimiento y unidad”⁷¹⁵. Traspasará las fronteras de la teoría y de la práctica, fusionando ambas ramas en su quehacer. Será, pues, un buen ejemplo del concepto que definía, según Alberti en su *De re aedificatoria*, a un buen artista: “el artista debe dominar los principios fundamentales de su arte por medio de la razón; debe estudiar las mejores obras de los artistas de las generaciones anteriores a la suya; sólo así estará capacitado para formular preceptos relativos a la práctica de las artes que, sin embargo, debe ser combinada con la experiencia”⁷¹⁶.

Debido a los cambios de gusto urbanísticos, y a la huella de las guerras, quedan pocos restos de su legado. Sin embargo, aun podemos admirar algunos de ellos como su Casa Museo y el *Stock Office* del Banco de Inglaterra.

⁷¹² KAUFMAN, E. *La arquitectura de la ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia*. Barcelona: Gustavo Gili, 1974. p. 53.

⁷¹³ LÓPEZ-FANJUL DÍEZ DEL CORRAL, M. “Sir John Soane, arquitecto de colecciones. Su Casa-museo”. *Museos.es*, N.º 3, 2007, p. 125. Disponible en: <http://www.mcu.es/museos/MC/MES/index.html>. (Consulta 20/08/2013).

⁷¹⁴ *Ibidem*, p. 123.

⁷¹⁵ KAUFMAN, E. *La arquitectura de la ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia ...*, p. 53.

⁷¹⁶ BLUNT, A. *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600...*, p. 23.

En sus arquitecturas podemos apreciar la atmósfera creada por el especial tratamiento de la luz, “*lumière mystérieuse*”⁷¹⁷, con la que intentará imitar, gracias al empleo de vidrieras y demás estructuras, a la de las catedrales góticas. Cada una de sus obras supone un buen ejemplo, fruto de la selección cultural, en el que la luz generadora del espacio unificará las formas relacionando el microcosmos con el macrocosmos. Se trata de espacios creados como seres vivos, donde el uso de la geometría en cúpulas, óculos, ventanas semicirculares sobre segmentos de arco, y bóvedas cruzadas, son el resultado de la abstracción del círculo o la esfera y, por tanto, de la simetría circular que tanto prolifera en la realidad, como hemos referido con anterioridad. Estas formas, a modo de ojos esféricos, dejan pasar la luz dirigida, marcando de una manera muy evidente una predominante tendencia cenital.

La casa-museo donde vivió y “en la que trabajó desde 1812 hasta su muerte”⁷¹⁸, situada en Lincoln’s Inn Fields en Londres será “el primer museo de arquitectura concebido como tal”⁷¹⁹. Aloja las múltiples piezas que coleccionó a lo largo de su vida: antigüedades de las culturas griega, romana y egipcia, planos, maquetas, pinturas, esculturas, grabados de Piranesi y una nutrida biblioteca, etc.; “aunque sin proponérselo lo que más coleccionó fue la luz”⁷²⁰. Supone un muestrario de posibilidades arquitectónicas: “una academia para el estudio de la arquitectura sobre principios que son, al mismo tiempo, científicos y filosóficos”⁷²¹, “inspirada en Piranesi”⁷²². El corazón del museo será *The Dome*, una estancia balaustrada que descansa sobre la Cripta. En realidad, se trata de una linterna circular que simula una cúpula por la que entra la luz, la cual, como él mismo decía, “surge a menudo desde fuentes desconocidas”⁷²³ (Fig. 100). Concebida a modo de panteón sagrado, reflejo de su formación en la tradición renacentista, que afirma el arte griego y romano como ideal de belleza universal, y sobre el cual Soane afirmaba: “en el centro del edificio hay una cúpula bajo la que hay otra de diámetro menor que deja un espacio para el paso de la luz, a modo

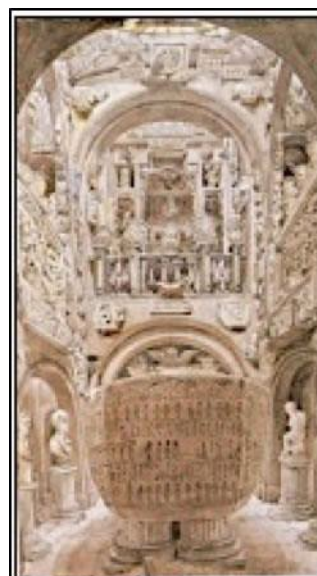


Fig. 100. *The Dome*. La Cúpula balaustrada y la Cripta. Acuarela de C. J. Richardson. Fuente: VV. AA. *John Soane...*, p. 31.

⁷¹⁷ VV. AA. *John Soane*. Londres: Academy Editions/St. Martin’s Press, 1983, p. 31.

⁷¹⁸ KAUFMAN, E. *La arquitectura de la ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia* ..., p. 55.

⁷¹⁹ LÓPEZ-FANJUL DÍEZ DEL CORRAL, M. “Sir John Soane, arquitecto de colecciones. Su Casa-museo” ..., p. 123.

⁷²⁰ *Ibidem*, p. 125.

⁷²¹ *Ibidem*, p. 123.

⁷²² KAUFMAN, E. *La arquitectura de la ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia* ..., p. 55.

⁷²³ LÓPEZ-FANJUL DÍEZ DEL CORRAL, M. “Sir John Soane, arquitecto de colecciones. Su Casa-museo” ..., p. 127.

de la *Lumière mystérieuse*⁷²⁴. Aloja múltiples piezas de su colección, entre las que destaca el sarcófago original del faraón Seti I.

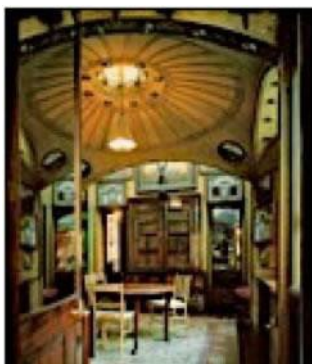


Fig. 101. *The breakfast room*, Lincoln's Inn Fields. (Soane Museum). Fuente: VV. AA., *John Soane...*, p. 8.

Uno de los ejemplos arquitectónicos definitorio de su arquitectura es *The breakfast room* (Fig. 101), donde destaca la bóveda rebajada de doble arista, con espejos cóncavos en las esquinas y una gran linterna de cristal tintado: “la vista desde esta habitación hacia el Patio monumental y hacia el museo, los espejos en el techo, el cristal reflectante, combinado con una variedad de trazados y soluciones generales en el diseño y decoración del espacio limitado, presentan una sucesión de esos famosos efectos que constituyen la poesía de la arquitectura”⁷²⁵. Estas salas ejemplifican también la cara y la cruz que representan el Neoclasicismo y el Romanticismo en la Historia del Arte pues, aunque es clásico el origen de las piezas, su exposición aglomerada, su evocación casi de ruina y dramática iluminación nos conducen al vértigo romántico de los delirios de Piranesi⁷²⁶.

El Banco de Inglaterra, en la *Threadneedle Street*, fue construido por Soane entre 1792 y 1823, y supuso su obra más importante. Paradigma de la composición diáfana y utilitaria, curiosamente sirvió de modelo en la representación ruinosas que Soane encargó al pintor Joseph Michel Gandy, intentando imitar una vez más los edificios de la Antigüedad semiderruidos que tanto había admirado en las obras de Piranesi, en esa tendencia romántica a sugerir el paso del tiempo, donde siempre veremos el edificio como algo bello, evocando la nostalgia por el pasado y lo sublime, permitiéndonos imaginar el esplendor vivido. Posteriormente Gandy pintaría la parte más emblemática del Banco, una vez construida. Se trata de *La Rotonda* (Fig. 102), donde Soane recrea, influenciado por los admirados efectos cavernosos y angustiosos de los interiores cupulados de Piranesi, la arquitectura romana desprovista de todo detalle innecesario, forjada en sus formas básicas y en toda



Fig. 102. *La Rotonda*. Acuarela de J. M. Gandy, 1798. Fuente: VV. AA. *John Soane...*, p. 73.

⁷²⁴ KAUFMAN, E. *La arquitectura de la ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia* ..., p. 54.

⁷²⁵ VV. AA. *John Soane...*, p. 68.

⁷²⁶ LÓPEZ-FANJUL DÍEZ DEL CORRAL, M. “Sir John Soane, arquitecto de colecciones. Su Casa-museo”. ..., pp. 127-128.

su pureza geométrica, diseñando así un espacio circular, funcional y diáfano, coronado por la gran cúpula por la que penetra la luz natural a través de linternas y lunetos esparciéndose de forma cenital, reforzando la captación de su belleza y proporcionalidad.

14.1.3. LA ESFERA EN EL PALACIO DE DEPORTES DE ROMA DEL INGENIERO PIER LUIGI NERVI

El ingeniero italiano Pier Luigi Nervi (1891-1979) fue uno de los máximos exponentes del movimiento de arquitectura racionalista de los años veinte y treinta del siglo XX. Comenzó la práctica profesional de la ingeniería civil después de 1923, construyendo varios hangares entre sus contratos, y a partir de 1940 ayudó a reconstruir muchos edificios y fábricas por toda Europa Occidental.

Nervi formó parte de la generación de ingenieros que desarrollaría una nueva estética constructiva heredera de las decimonónicas torre *Eiffel* de París y *The Cristal Palace* de Londres, basada en las estructuras metálicas y en el hormigón armado.

Tomó como referente elementos compositivos de la arquitectura romana y renacentista como la simetría axial y radial, la modulación y el ritmo constantes. No obstante, al plasmar los perfiles de los miembros estructurales, como la forma de nervios y bóvedas a menudo basados en formas naturales, no sólo tendrá en gran consideración la labor constructiva bajo una estricta obediencia a las leyes físicas de la estática, sino que dotará a su conjunción de una gran expresividad estética, reflejada en formas fluidas y elegantes.

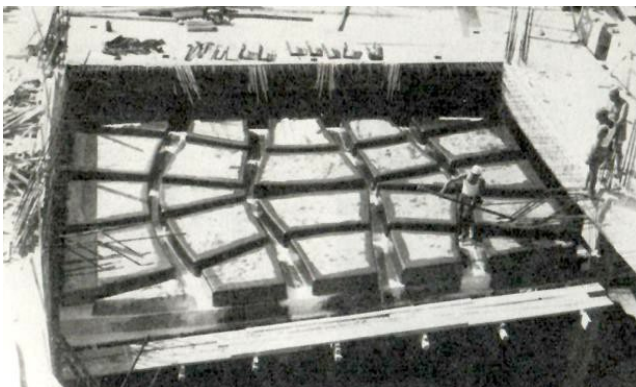


Fig. 103. Detalle del encofrado móvil de cemento férreo de los nervios curvilíneos. El diseño de los nervios está sugerido por las curvas estáticas. Fuente: DESIDERI, P.; NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi Pier Luigi Nervi*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982, p. 107.

De modo que toda la actividad práctica de este ingeniero italiano, que comienza en los años treinta y termina en los setenta, será un reflejo del compromiso integral con sus obras, abarcando desde la idea de construcción del edificio hasta todo el ciclo de su realización. A esta tenaz actividad unirá un trabajo de síntesis teórica, publicando diversos ensayos, artículos y libros, así como

dando clases en la facultad de Arquitectura de Roma. Nervi se mostraba especialmente incrédulo hacia todo pensamiento que no estuviera estrechamente ligado a los hechos y a las cosas. “De todas maneras, puede decirse que la operación que lleva a cabo de restablecer la unidad de la construcción integrando la creación y el proyecto de la obra con las operaciones de ejecución, reelaborando, por tanto, a nivel de proyecto, las observaciones y las experiencias hechas en la obra, pertenece al ideal humanístico de la cultura en la que él había sido educado”⁷²⁷. En esta línea, Nervi considerará que el proceso de creación no puede dissociarse de las leyes de la física que regulan la distribución de fuerzas en el espacio, ni del uso para el que se destinará el proyecto.

En sus obras como “organismos” primará la lógica estructural del interior al exterior, anteponiéndose la estática a posibles contrariedades estéticas. No obstante, enfatizará el empleo de la intuición además de las matemáticas en el diseño, aunque siempre concebida bajo principios ordenadores, en la tradición de la cultura científica positivista.



Fig. 104. Vista frontal del Palacio de los Deportes de Roma. Fuente: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/23lcc23de39.pdf?sequence=23&isAllowed=y>

Así, buena parte de sus edificaciones seguirán formas cupuliformes o abovedadas trabajando a compresión, exigiendo una continuidad formal para la descarga de fuerzas, y logrando una unicidad volumétrica total de la estructura final. Además, para la realización de obras estructuralmente tan osadas, Nervi desarrollará el método de cálculo llamado de “sensibilidad estática” a fin de mejorar la resistencia estructural y de eliminar la necesidad de columnas. Por otra parte, al ser en Europa muy cara la mano de obra, Nervi no podrá desarrollar los cascarones de hormigón armado levantados, por ejemplo, por arquitectos como Félix Candela en México, que precisan colocar muchas cimbras, por lo que recurrirá en gran medida a las estructuras prefabricadas. De modo que,

⁷²⁷ DESIDERI, P.; NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi...*, p. 35.

basándose en una tecnología de estructuras “hiperestáticas” de hormigón armado y de cemento férreo, inventará varios sistemas de moldes y de conglomerado, así como el diseño de revestimientos de chapas onduladas especialmente resistentes, rigidizadas con nervios, celosías y pliegues. Ello llegó a ser un sistema económico de prefabricación y utilización prácticamente universal (Fig. 103).

Como ejemplo de lo dicho exponemos la construcción que Nervi realizó, con el fin de albergar los Juegos Olímpicos de 1960, el Palacio de los Deportes de Roma entre 1958 y 1959, contando con la colaboración del arquitecto y urbanista Marcello Piacentini (Fig. 104).

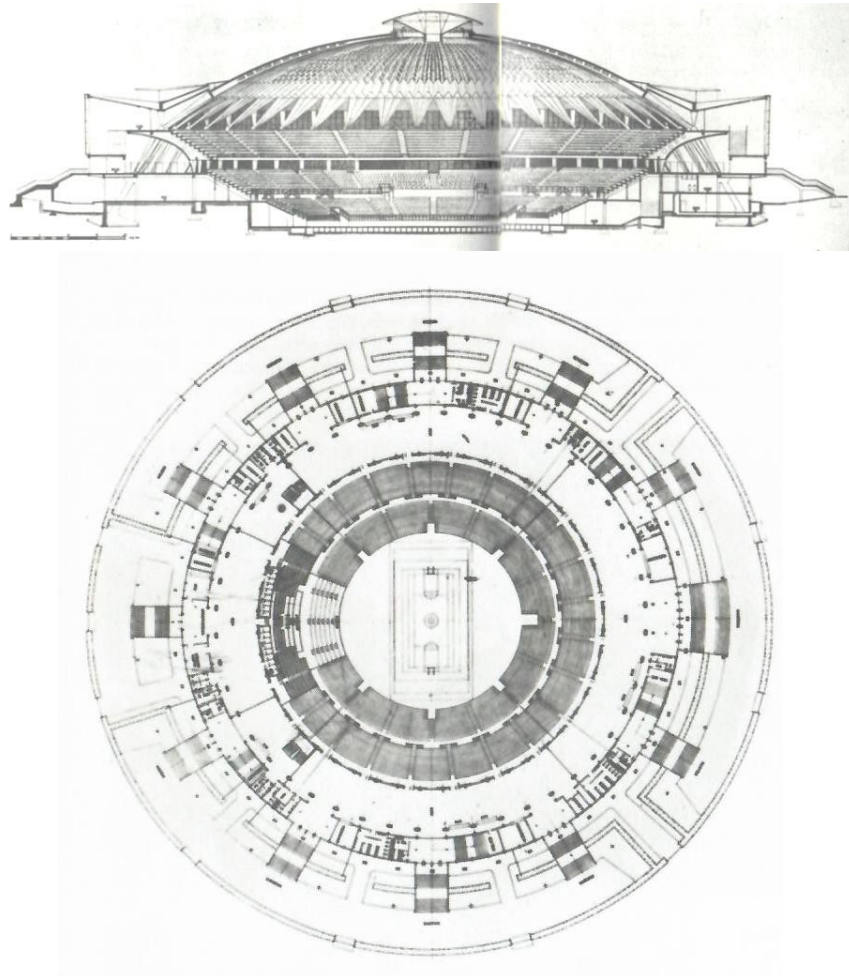


Fig. 105. Alzado y planta del Palacio de los Deportes de Roma. Fuente: DESIDERI, P.; NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi...*, p. 102.

Se trata de un edificio exento, en cuya realización Nervi primaría la flexibilidad del uso deportivo de sus instalaciones; además, debido a sus buenas condiciones acústicas también se empleará para llevar a cabo eventos musicales y todo tipo de espectáculos. Según declaraciones del propio Nervi: “La estructura está determinada por exigencias estáticas y funcionales. De este modo, el empuje horizontal de la cúpula va dirigido en

sucesivas composiciones con las acciones verticales (peso de la cubierta anular y de las diversas plantas) hasta los cimientos. En particular se puede notar que los pilares de la galería perimetral de distribución del público resultan exactamente inclinados según la resultante de las fuerzas agentes sobre ellos”⁷²⁸.

Su planta es circular, y la cubierta de casquete esférico posee un óculo central por el cual entra la luz (Fig. 105). La cubierta de la sala central, que supera las dos series de graderíos circulares, es una cúpula de 100 m de diámetro formada por 144 nervios prefabricados *in situ*, enlazados con un vertido de hormigón armado. La galería perimetral supone un espacio diáfano en dos niveles, que permite la distribución continuada del



Fig. 106. Galería perimetral del Palacio de los deportes de Roma. Fuente: DESIDERI, P., NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi...*, p. 100.

público mediante unas escaleras de acceso entre el exterior y el graderío, y posee un techo bóveda de soporte de las gradas superiores, inclinado hacia el centro del edificio (Fig. 106). La fachada exterior del edificio se constituye por un gran cilindro acristalado que permite ver el interior. El hecho de que el forjado vuela sobre el acceso al edificio, en desnivel con el suelo de acceso, dota al edificio de una sensación de movimiento e ingravidez.

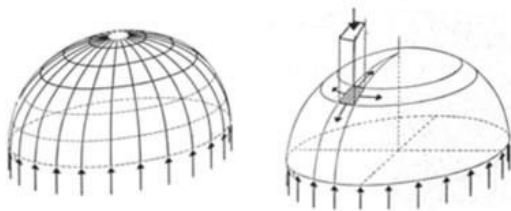


Fig. 107. Esquema ilustrativo del comportamiento de los empujes en la cúpula. Fuente: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/231cc23de39.pdf?sequence=23&isAllowed=y>

La cúpula de nervios prefabricados tiene un funcionamiento hiperestático, que hace que la cúpula encuentre estabilidad como membrana y contrarreste aisladamente los empujes externos. Dichos empujes siguen trayectorias meridianas y paralelas (Fig. 107).

Las primeras son de compresión, y aunque las segundas también, a cierta altura las fuerzas anulares que siguen los paralelos se vuelven también de tracción, aumentando los empujes laterales de las trayectorias meridianas; de ahí que, buscando un equilibrio, se aligere la cobertura para reducir el empuje, y se añada peso en los apoyos del perímetro.

⁷²⁸ DESIDERI, P.; NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi...*, p. 100.

Las referencias clásicas en la obra de Nervi se hacen aquí patentes. La relación en este caso con el Panteón de Agripa, también en Roma, se hace evidente, no sólo en la forma de la planta y de la cubierta esférica, sino también en el tratamiento del esquema tectónico equilibrando los empujes de la cúpula en las cargas laterales, y disminuyendo la sección de los nervios en su cercanía al óculo (Fig. 108).

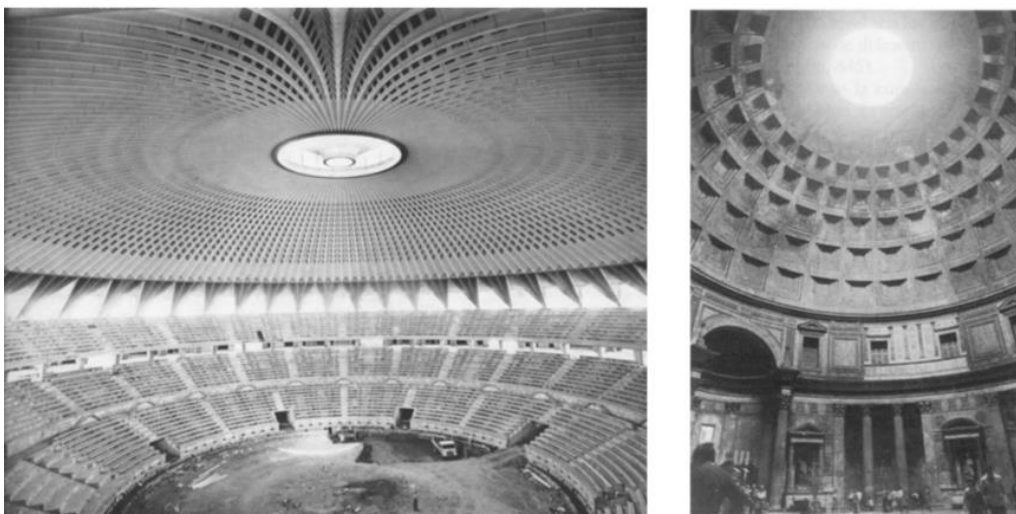


Fig. 108. Imagen comparativa del Palacio de Deportes de Roma y el Panteón de Agripa. Fuente: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/23Icc23de39.pdf?sequence=23&isAllowed=y>

En definitiva, aplicando una geometría simple unida a una prefabricación sofisticada, Nervi acabará siendo uno de los máximos exponentes en su campo, convirtiendo la ingeniería en un arte. “Nervi es un artista contra su voluntad, a veces incluso contra sus propias convicciones teóricas; es un artista porque, a pesar de su asombroso caudal de saber, no confunde el fin con los medios; porque no se contenta con los instrumentos, sino que los hace útiles para el fin mediante el empleo adecuado”⁷²⁹.

14.1.4. LA ESFERA EN EL MUSEO DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA

También queremos destacar, en este apartado, una de las últimas obras del arquitecto Oscar Niemeyer, que algunos especialistas consideran el paradigma de la arquitectura moderna. Nacido en Río de Janeiro en 1907, Oscar Niemeyer (1907-2012) era sólo un niño en la época de la Revolución Rusa de 1917, y por motivo de la Segunda

⁷²⁹ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea*. Barcelona: Labor, 1969, p. 74.

Guerra Mundial se convirtió en un joven idealista. En 1934 se graduó como arquitecto en la Escuela de Bellas Artes de Brasil. Ya como arquitecto de cierta reputación, se unió al Partido Comunista de Brasil. Su trayectoria profesional fue muy larga y fecunda, trabajando en proyectos innovadores y con aportaciones mundiales a la arquitectura de los siglos XX y XXI, por lo que su obra no siempre siguió los mismos principios.



Fig. 109. Vista frontal del Complejo Internacional de la Cultura, Centro "Niemeyer". Fuente: <http://Wikipedia.org>.

Aunque su base arquitectónica siempre fue organicista, y por tanto viva y cambiante, en sus inicios Niemeyer se vio influido, al igual que Nervi, por el racionalismo, llegando a ser un gran seguidor y promotor de las ideas de Le Corbusier, que como iremos comentando, fue considerado uno de los personajes más influyentes de la arquitectura moderna internacional, con quien incluso llegará a colaborar estrechamente en algunos proyectos. Por otra parte, Niemeyer será también un pionero en la exploración de las posibilidades constructivas y plásticas del hormigón armado, cuya maleabilidad abrirá su imaginación, aunque nunca se apartará de los principios funcionalistas. Es decir, "los ensayos espaciales del maestro carioca se podrían catalogar en tres importantes apartados: según la clasificación que propone Rafael Moneo, hay un primer tipo en el cual el espacio surge a partir de la definición de la planta, un segundo que se basa en la sección y un tercero que podríamos definir, reinterpretando las palabras de Bruno Zevi, en un espacio total, cuadrimensional. En el desarrollo de los proyectos que pertenecen a las dos primeras categorías, Niemeyer utiliza muy a menudo el método de la extrusión, ideando y dibujando una planta, o una sección, que se extruye y se repite

paralelamente con respecto a su eje principal, vertical u horizontal, según los diferentes casos”⁷³⁰.

Tras su exilio en Francia a mediados de los sesenta, regresará a Brasil diez años más tarde, donde no dejará de trabajar en obras tanto dentro de sus fronteras, como por ejemplo en *El Museo Nacional Honestino Guimarães* (2006), como fuera de ellas.

Entre sus proyectos internacionales destacará el *Centro Niemeyer* de la ciudad de Avilés, en el Principado de Asturias en España, el cual será un compendio de todo su saber (Fig. 109). “El Niemeyer” (2008-2011) como se conoce coloquialmente, fue construido “como una gran Plaza abierta a todos los hombres y mujeres del mundo, un gran palco de teatro sobre la ría y la ciudad vieja. Un lugar para la educación, la cultura y la paz”⁷³¹.

Este proyecto, enclavado en la ría de Avilés, nacerá del proceso de reconversión iniciado en la década de los setenta y ochenta, como estrategia de control de las tasas de contaminación atmosférica que se había llegado a registrar en esta ciudad, la cual experimentó un fuerte proceso de industrialización y expansión económica hasta la mitad del siglo pasado. De modo que, en esa transformación de suelo industrial en urbano para disfrute del ciudadano, el centro Niemeyer participará activamente, colaborando en la idea de crear esta “isla de innovación” que ha sido impulsada por la Fundación Metrópoli, teniendo como director técnico del equipo Multidisciplinar al arquitecto Norman Foster, premio Príncipe de Asturias de las Artes en 2009, y creando el nexo de unión entre la Ciudad y la ría, en una integración del Centro Cultural con el casco histórico.

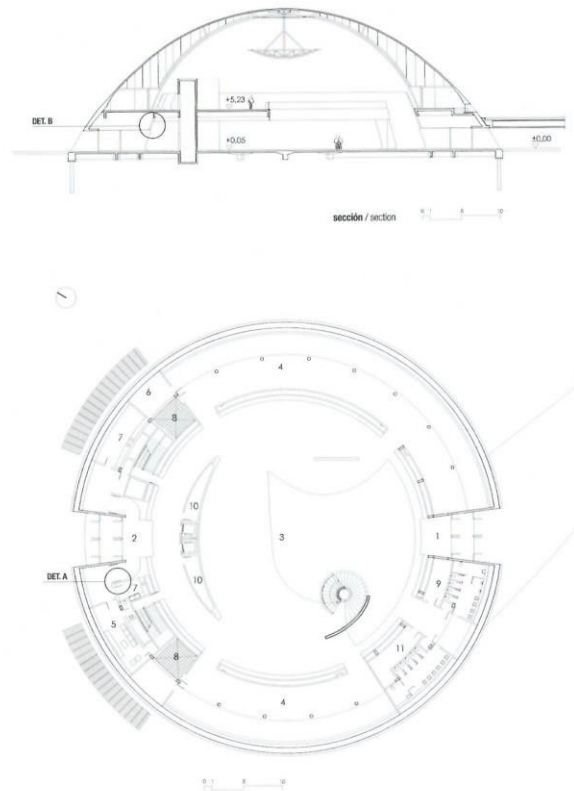


Fig. 110. El Museo del Complejo Internacional de la Cultura, Centro “Niemeyer”. Fuente: RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura. Proceso Constructivo*. Oviedo: Síntesis Arquitectura, 2013..., p. 42.

⁷³⁰ <https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

⁷³¹ RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura...*, p. 11.

Así el centro Niemeyer, situado en una Plaza abierta que vincula la isla y la ciudad, se halla compuesto de cuatro volúmenes o edificios diferenciados y complementarios: un auditorio y un museo con una marquesina o pérgola sinusoide que cubre y comunica los dos espacios, una torre mirador y un edificio polivalente, constituyendo todo el conjunto una “cabeza tractora” que debe ser capaz de impulsar o tirar del tren de la transformación de estos espacios de la ría, en los que se asentaron, en otro tiempo, las dotaciones industriales, para dar paso al futuro Avilés, “Nueva Centralidad”⁷³².

Aunque es obligatorio comenzar reconociendo que lo realmente peculiar y complejo en su ejecución han sido los hormigones, sus elementos estructurales, las formas curvas, arrastrando también especial dificultad en la ejecución los forros u hojas interiores, así como los falsos techos, que condicionan a su vez los trazados ocultos de algunas de las instalaciones, especialmente la climatización. [...] Cada uno de los volúmenes o edificios cuenta a su vez con peculiaridades intrínsecas, aunque el “hermano mayor” resulta ser sin duda el Auditorio, [...] O también, particularmente, la membrana de cubrición de la cúpula del museo, con un diámetro en la base de 55m y una altura de 18m, que se ejecuta empleando un novedoso sistema -al menos en edificación- de la patente Estructuras Domo, S.A. [...] Por ser solución genérica para todos los edificios o volúmenes, la cimentación se resuelve por un sistema profundo mediante pilotes⁷³³.



Fig. 111. El Museo del Centro “Niemeyer”.
Fuente: RÚA GARCÍA,
M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura...*, p. 42.

De esta forma, la cúpula del museo que emerge en la Plaza como un montículo natural, según la documentación técnica consultada, ocupa 4000 metros cuadrados de superficie y está constituida por dos bóvedas sobrepuestas (Fig. 110). A efectos prácticos, su membrana de cubrición consistió en una cúpula ensamblada en tangencia sobre un tronco de cono. Se sustituyó el encofrado tradicional por un sistema ligero en inverso, constituido por una lámina inflable y presurizada de PVC con malla de soporte de poliéster (Fig. 111). “También merece una mención estructural la losa del nivel +1 de este edificio Museo, que se ejecuta con una única losa nervada, empleando postensados en su vano central, que alcanzan voladizos de 9 m de luz. [...] La hoja interior de la cúpula, resuelta con un sándwich compuesto por placas de cartón-yeso,

⁷³² *Ibidem*, p. 18.

⁷³³ *Ibidem*, p. 24.

lana de roca, lámina Tecsound y placa de cartón-yeso perforada acústica, así como la formación del luneto central colgado de la clave de la cúpula, han requerido buenas dosis de ingenio y paciencia en su ejecución”⁷³⁴. El entrepiso del museo es “un forjado de geometría circular dentro de la cúpula del Museo, con un gran hueco interior de manera que se genera un espacio abierto de grandes dimensiones”⁷³⁵. En su interior, el elemento más destacado es la escalera helicoidal que une las dos plantas del edificio, cuya explicación se completa en los apartados dedicados a la espiral y a la hélice, donde también se introduce el edificio paradigmático de la Torre.

Para conocer algo más del Auditorio y el centro multiusos, edificios que rematan el conjunto del Centro Cultural, remitimos al apartado dedicado a la onda.

14.2. EL HEXÁGONO EN:

- LA OBRA DE FRANK LLOYD WRIGHT.
- LA OBRA DE RICHARD BUCKMINSTER FULLER.
- LA OBRA “EDENPROYECT” DE NICHOLAS GRIMSHAW.
- LA OBRA APARTAMENTOS IZOLA DE OFIS ARCHITECTS.
- EL CENTRO NACIONAL DE NATACIÓN DE PEKÍN DE PTW ARCHITECTS.

14.2.1. EL HEXÁGONO EN LA OBRA DE FRANK LLOYD WRIGHT

Frank Lloyd Wright (1867-1959), arquitecto americano nacido en Wisconsin, inició su carrera en el taller de Sullivan en Chicago, pero pronto se independizó. Se le considera el primer clásico de la arquitectura moderna americana, conocido por su arquitectura orgánica y funcional. “Fue el único en llevar a la práctica los postulados de las escuelas que habían impulsado la reforma del diseño arquitectónico antes y después de su nacimiento, como el movimiento Arts and Crafts, el esteticismo de fin de siglo y las diversas corrientes Art Nouveau. [...] Estas escuelas promovían el diseño como progreso social para todos, aborrecían la ornamentación superflua, y aspiraban a la obra

⁷³⁴ *Ibidem*, p. 28.

⁷³⁵ *Ibidem*, p. 40.

de arte unitaria o Gesamthunswerk”⁷³⁶. El organicismo, aspecto clave de su ideario arquitectónico, “hará de la naturaleza arquitectura y de la arquitectura naturaleza”⁷³⁷. Su obra bien puede representar el resultado de la selección cultural que surge al final del proceso evolutivo. “En él persisten dos tendencias distintas: una hacia lo racional y geométrico, y otra hacia lo irracional y lo orgánico. [...] Son dos maneras de abordar el entorno”⁷³⁸. Efectivamente “el organicismo de Wright le lleva a fijarse en los ritmos y formas de la naturaleza. [...] Al concebir la naturaleza como reflejo de lo divino se le englobará dentro de los seguidores del transcendentalismo norteamericano. [...] Su propósito fue integrar sus edificios en la naturaleza en un sentido no sólo simbólico, sino también espiritual, empleando materiales vernáculos para tal fin”⁷³⁹. “La reverencia que Wright siente por la naturaleza le ha llevado a conseguir en el efecto general una armonía que entronca directamente con el pintoresquismo de los primeros románticos”⁷⁴⁰. Consideró la arquitectura como una culminación de las construcciones animales, diciendo: “El construir sobre la tierra es tan natural para el hombre como para los otros animales, aves o insectos. En la proporción en que él se distinguía de los otros animales, sus construcciones se convirtieron en lo que llamamos arquitectura”⁷⁴¹. Su obra reflejó una actitud ecológica de respeto por el entorno, considerando al hombre un eslabón en la cadena de la evolución natural. Como él mismo dijo: “El hombre realiza una tarea positiva en la creación, siempre que levanta un edificio sobre la tierra, bajo la faz del sol. Si ese edificio tiene algún derecho de existencia, debe ser éste: que él también no sea más que un rasgo del paisaje, como las rocas, los árboles, los osos o las abejas de la naturaleza a la que debe la vida”⁷⁴². Y testifica la aprehensión humana de las funciones percibidas y heredadas en las construcciones animales para posteriormente, mediante la creatividad, buscar nuevas soluciones siempre en sintonía con lo anterior. “Por naturaleza el hombre deseaba construir, así como los pájaros hacían mientras tanto sus nidos, los insectos edificaban sus ciudades y los animales buscaban sus cuevas, hacían sus guaridas o cavaban en el suelo. Y por medio de este deseo, la arquitectura se convirtió en la mayor prueba de la grandeza del hombre, de su derecho a la vida, a heredar la tierra”⁷⁴³. Para

⁷³⁶ FILLER, M. *La arquitectura moderna y sus creadores. De Frank Lloyd Wright a Frank Gehry*. Barcelona: Alba Editorial, 2012, p. 46.

⁷³⁷ PRECKLER, A. M. *Historia del arte universal de los siglos XIX y XX. Arquitectura, pintura y escultura del siglo XIX. Arquitectura del siglo XX. Tomo I*. Madrid: Editorial Complutense, 2003, p. 515.

⁷³⁸ GIEDION, S. *Espacio, tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 413.

⁷³⁹ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 116.

⁷⁴⁰ ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1990, p. 9.

⁷⁴¹ *Ibidem*, p. 116.

⁷⁴² *Ibidem*, p. 117.

⁷⁴³ *Ibidem*, p. 116.

Wright, la casa era un refugio, un cobijo al que el animal humano podía retirarse como si fuera una cueva, protegida de la lluvia y del viento y de la luz; en ella podía agazaparse con total seguridad y relajación, como un animal en su guarida⁷⁴⁴.

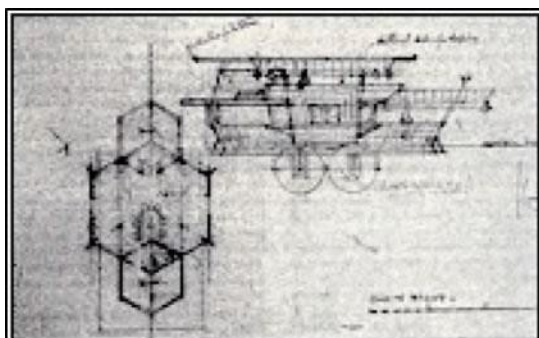


Fig. 112. Proyecto de casas en La Colonia de verano de Lake Tahoe. (1922). Fuente: RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 116.

En definitiva, para Wright era importante el desarrollo evolutivo orgánico de los espacios de dentro hacia fuera. La forma hexagonal de las colmenas de las abejas, insectos sociales por antonomasia, no pasó desapercibida para un organicista como Wright. En el proyecto de casa para La Colonia de verano de Lake Tahoe (1922), sigue su propio modelo/diseño “de planta alargada”⁷⁴⁵ (Fig. 112). A partir de una sala central, en este caso de planta hexagonal, se extienden en ambos extremos otras dos salas, también de planta hexagonal, algo más pequeñas y levemente elevadas sobre el terreno. Una de ellas haría las veces de cocina y la otra de dormitorio principal. En las intersecciones romboidales resultantes se alojarían un baño y un vestíbulo respectivamente. Aquí tenemos un buen ejemplo en que la forma hexagonal, como dijimos, es la más adecuada para ahorrar espacio.

The Honeycomb House, también conocida como la Casa Hanna, fue edificada por Wright entre 1935-1937 para el matrimonio Paul y Jean Hanna en Standford, California (Fig. 113). La búsqueda de un espacio flexible, tanto en la planta como en el interior, se consigue mediante un diseño basado en una “malla hexagonal que se abre en abanico en un mostreado de movimiento reflejo”⁷⁴⁶, pues “la trama hexagonal se adapta al movimiento humano mucho mejor que las formas rectangulares”⁷⁴⁷. Comparada según Wright con “una sección transversal de colmena”, mantenía “que su flujo y movimiento” dan una flexibilidad al espacio que le permite abrirse y cerrarse, expandirse y contraerse, y, finalmente, casi retornar a sí mismo sobre

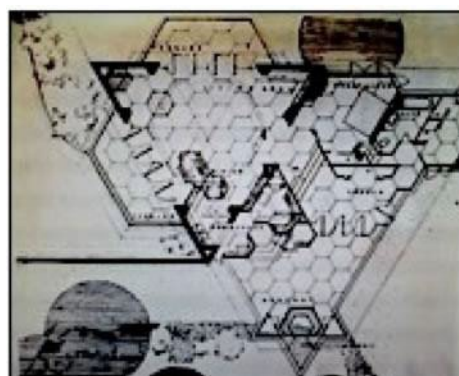


Fig. 113. Planta de la Casa Hanna. Fuente: BROOKS PFEIFFER, B. *Frank Lloyd Wright (1867-1959). Construir para la democracia*, Madrid: Taschen, 2004, p. 62.

⁷⁴⁴ GIEDION, S. *Espacio, tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 417.

⁷⁴⁵ *Ibidem*, p. 401.

⁷⁴⁶ ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright...*, p. 151.

⁷⁴⁷ ZEVI, B. *Frank Lloyd Wright*. Barcelona: Gustavo Gili, 1988, p. 174.

una curva continua”⁷⁴⁸. “Y entendí que en realidad era la propia casa la que nos hacía tomar conciencia de la curva pura del terreno, que en cierto sentido sus formas

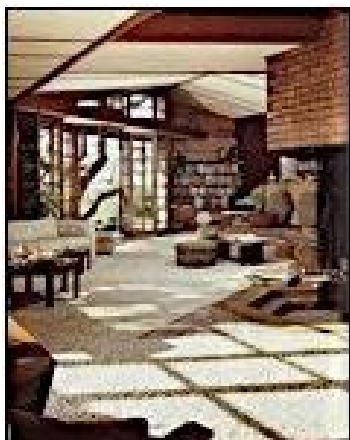


Fig. 114. Salón de la Casa Hanna.
Fuente: BROOKS PFEIFFER, B.
Frank Lloyd Wright (1867-1959)
..., p. 63.

multiestratificadas y discretas conferían significado y definición a los contornos a partir de los cuales se levantaba”⁷⁴⁹. Muchos detalles decorativos y utilitarios de la vivienda mantienen la configuración hexagonal del edificio, desde la chimenea, hasta los cojines, etc. (Fig. 114). Ésta fue otra de las contribuciones estilísticas de Wright, el cual “retomó esos elementos que estaban en todas partes, inadvertidos, elementos surgidos de soluciones puramente utilitarias, y descubrió en esa materia prima su expresividad oculta. [...] Puso de manifiesto su fuerza simbólica como hace un poeta al desvelar ese contenido

interno de sensibilidad que tienen para él y para nosotros los árboles, las montañas, los ríos y los lagos de su tierra natal”⁷⁵⁰.

El Colegio Jiyu Gakuen (Fig. 115), situado en el centro de Tokio (Japón), fue creado por Wright en 1921, siguiendo la ergonomía infantil. Como el mismo nombre de la escuela promulga, “espíritu libre”, Wright y su socio, Arata Endo, concibieron un lugar sencillo y feliz para niños felices. Tal como Wright dijo: “la fundadora de la escuela, Madame Hani, fue una inspiración para todos nosotros. [...] Entendía y amaba los ideales culturales de su pueblo y sabía de la importancia de inculcar el amor a la belleza en los niños que le habían sido confiados a su cuidado”⁷⁵¹. El diseño interior y exterior del edificio, así como su



Fig. 115. Comedor del Colegio Jiyu.
Fuente: BROOKS PFEIFFER, B.
Frank Lloyd Wright (1867-1959) ...,
p. 51.

decoración, siguieron una vez más el patrón hexagonal que se repite pavimentando el espacio. La idea de unidad orgánica de Wright estará en consonancia con la *concinnitas* de Alberti, la de armonía obtenida por la unidad de las partes en un todo. Será de los últimos arquitectos que promueva la consideración romántica de la unidad en la totalidad como propósito de la naturaleza.

⁷⁴⁸ ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright*..., p. 181.

⁷⁴⁹ GIEDION, S. *Espacio, tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 415.

⁷⁵⁰ *Ibidem*, p. 407.

⁷⁵¹ BROOKS PFEIFFER, B. *Frank Lloyd Wright (1867-1959)* ..., p. 51.



Fig. 116. Comedor a la "Peacock Room" del Hotel Imperial. Fuente: BROOKS, B. P. *Frank Lloyd Wright 1867-1959...*, p. 47.

Frank Lloyd Wright terminaría también para la ciudad de Tokio el Hotel Imperial entre 1915-1922 (Fig. 116). En él pondría en práctica un sistema de cimientos y estructuras portantes totalmente novedoso hasta el momento. Su finalidad era combatir el efecto de los posibles movimientos sísmicos tan habituales en la zona. Empleó el hormigón armado, la piedra y el ladrillo como principales materiales, pero no dejó de lado

su constante búsqueda de la forma hexagonal en múltiples detalles y estructuras.

14.2.2. EL HEXÁGONO EN LA OBRA DE BUCKMINSTER FULLER

El norteamericano Richard Buckminster Fuller (1895-1983) fue uno de los principales renovadores de la construcción del siglo XX, ya que, aunque de forma autodidacta, consiguió grandes logros no sólo en el terreno arquitectónico o ingenieril, sino también como profesor, investigador, filósofo, y cartógrafo, permaneciendo aun hoy en vigor su influencia. Y es que, durante toda su trayectoria, el pensamiento de Fuller girará en torno a una perspectiva planetaria y al mismo tiempo humanista y ecológica, desde la que buscará transformar el mundo con herramientas técnicas. Probablemente esta visión transcendentalista le venga heredada de su familia patricia en Nueva Inglaterra, concretamente de su tía-abuela Margaret Fuller que fue una activa seguidora del pensamiento de Ralph Waldo Emerson y de Henry David Thoreau.

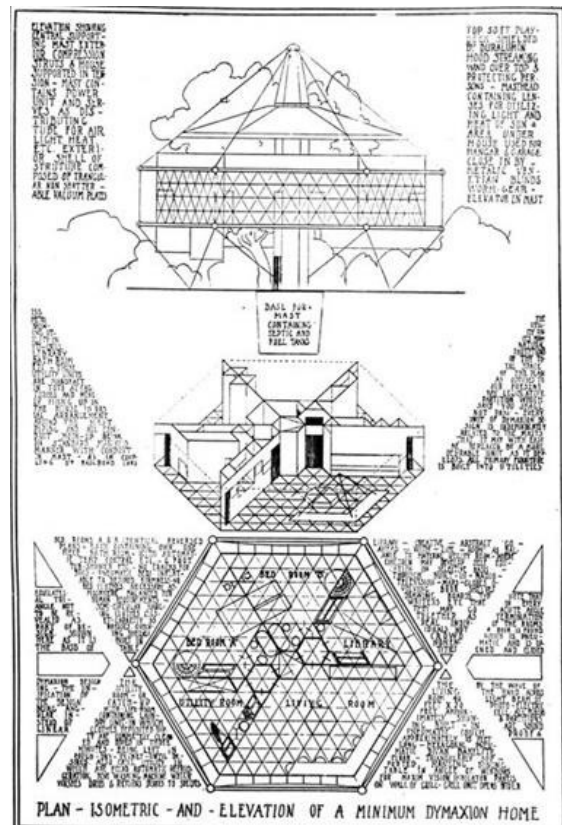


Fig. 117. Diseño futurista de 1929 de la *Dymaxion House* de Fuller. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-288162/clasicos-de-arquitectura-la-casa-dymaxion-buckminster-fuller>

Con esta motivación, Fuller irá creando un sustrato nutrido de ideas, metodologías y estrategias donde, al relacionar diseño y revolución, sembrará un nuevo diálogo entre la ciencia y otros muchos ámbitos.

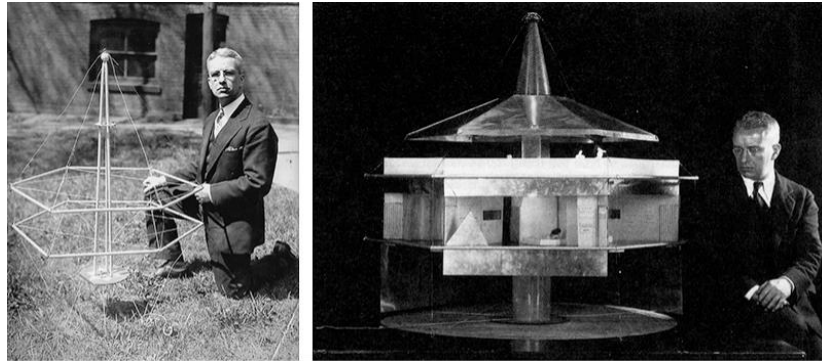


Fig. 118. Fuller junto a sus maquetas de la *Diamaxión House*. Fuente: <https://casa-abierta.com/post.php?t=58db9d5e93d2b>

Así, durante los años veinte, siendo consciente de que la crisis de la producción de la vivienda aun no se había solventado tras la revolución industrial, propondrá su visión de una construcción de reducido peso y corto proceso de montaje en la marca 4 D, y en 1929, en vísperas de la gran depresión, expondrá su modelo “Dymaxion” (Fig. 117), que combinaba las palabras dinámico, máximo y tensión, como una forma de vivienda unifamiliar autónoma y sostenible (Fig. 118), adelantándose incluso a las propuestas cúbicas que Gropius, Mies van der Rohe o Le Corbusier acabarían imponiendo. Así, “la casa *dymaxion*, basada en un funcional sistema orgánico modular y automórfico de empaquetamiento hexagonal, podía montarse desplegándose fácilmente, quedando suspendida de una columna de acero, y girar según la posición del sol, siendo el proyecto para una casa de apartamentos colgante que Fuller haga en año 1927, mientras surgían los proyectos casi simultáneos de casas colgantes de los hermanos Heinz y Bodo Rash”⁷⁵², que consistían en unas torres cilíndricas acristaladas cuyos forjados cuelgan de mástiles atirantados por cables de acero, a modo de metáfora del árbol y del nido; y que, junto a otras propuestas y bocetos de *containers* y de arquitecturas neumáticas, serán todas ellas obras conceptual y técnicamente adelantadas a su tiempo, ya que, aludiendo a la necesidad de la industrialización de la construcción, a pesar de permanecer prácticamente desconocidas para el gran público durante la Segunda Guerra Mundial, y de no ser nunca llevadas a cabo, influirán no obstante notablemente en las propuestas que presenten arquitectos contemporáneos en las décadas posteriores.

⁷⁵² KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea...*, p. 78.

Verbigracia, siendo muy consciente de lo limitado de los recursos del planeta, propondrá, siguiendo la máxima “hacer más con menos”, crear viviendas aprovechando materiales reciclados, y en 1946 construirá para sí mismo su prototipo de casa “Dacota”, prefabricada de aluminio, la cual, empaquetada en un cilindro, podía ser transportada, así como un cuarto de baño modular, que se adaptaba a cualquier tipo de vivienda. También creará un sistema cartográfico, el “dymaxion map”, así como diferentes tipos de avión y de automóvil como el *dymaxion car*, en el que aplicó la tracción trasera, habiendo observado la naturaleza y la eficiencia de los peces, que podían recorrer grandes distancias invirtiendo muy poco esfuerzo, accionados mediante el único impulso de su aleta trasera. Incluso será pionero en reclamar un tipo de sistema con el cual compendiar los datos con una mayor visualización de los mismos, colaborando así al caldo de cultivo que más adelante dará a lugar a la industria tecnológica e internet. Y es que Fuller también será un avanzado a su tiempo, ya que para desarrollar todas sus ideas trabajará con equipos multidisciplinarios constituidos por artistas, ingenieros, matemáticos o filósofos.

A todo esto, también Fuller introducirá el término *Synergetics*, basado en un lenguaje metafórico con el que comunicaba sus experiencias empleando términos geométricos, mucho antes de que la sinergia se difundiera. De este modo, acuñará el término *Tensegrity* para referirse a sus estructuras autotensionadas que, al igual que las estructuras biológicas de los huesos y los músculos, trabajan intrínsecamente bajo esfuerzos de compresión y tracción formando un todo integrado, propiciando gran resistencia y estabilidad.

En este sentido, Fuller, que continuará desarrollando sus ideas alrededor de la geometría para crear construcciones muy ligeras y sostenibles, desembocará en la que probablemente sea su creación más popular, las estructuras conocidas como cúpulas geodésicas (Fig. 119). Toda cúpula geodésica es una porción de una esfera geodésica que, como ya comentamos al iniciar el

Capítulo IV, se genera a partir de un sólido platónico, eligiéndose por lo general el icosaedro o el dodecaedro. Sus caras triangulares producen hexágonos o pentágonos, de

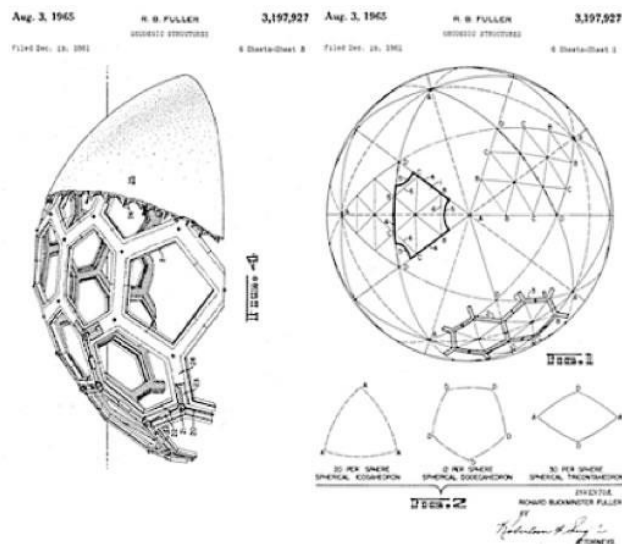


Fig. 119. Infografía de la cúpula geodésica. Fuente: <https://teoriadeconstruccion.net/blog/cupulas-geodesicas-y-bucky-fuller/>

modo que es indispensable que los vértices del polígono empleado coincidan con los de la esfera imaginaria que los circunscribe, ya que serán sus radios los que se empleen en los cálculos no-lineales que permitan determinar las cargas, evitando con ello las posibles inestabilidades elásticas antes de levantar la red tridimensional. De suerte que cuantas más particiones triangulares determinen la malla geodésica, mayor será su frecuencia, y, por tanto, más esférica será la superficie, al tener más puntos de contacto con ella. En definitiva, se trata de una de las estructuras que permite abarcar la mayor cantidad de superficie, con el menor peso y la menor cantidad de material, y debido a su gran resistencia se puede emplear como base que sustente la estructura de construcciones en cualquier material.

En 1949 Fuller erigirá la primera cúpula geodésica con forma de red tetraédrica, inspirándose en los esqueletos radiolarios, de 4,2 metros de diámetro, hecha con tubos de aluminio y cubierta de una tela vinílica que podía sostener su propio peso sin límite; aunque en 1954 registró su patente, en realidad existieron ejemplos anteriores de estas cúpulas, como por ejemplo el Palacio Imperial de China realizado durante las dinastías Ming y Qing en 1885, o el Planetario de los talleres Carl Zeiss en 1922.

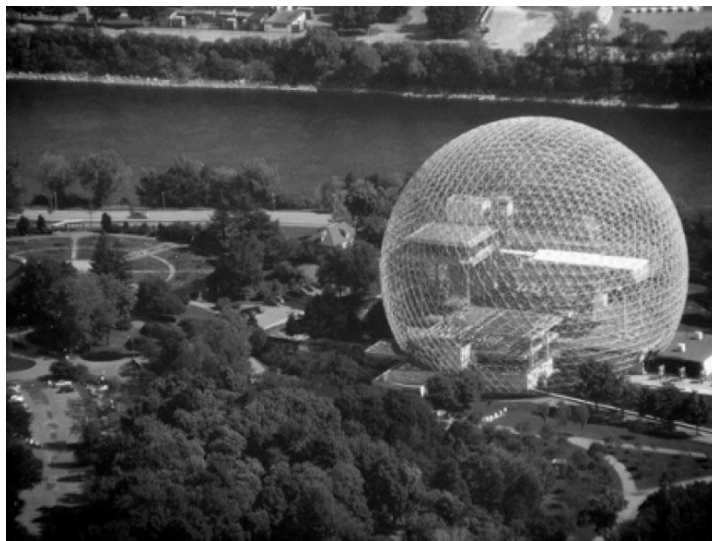


Fig. 120. Domo geodésico “Biosfera” de Fuller del pabellón de EE. UU. para la Exposición Mundial de 1967. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758384/clasicos-de-arquitectura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>

A esta primera cúpula, le seguirá la construcción de otras muchas en todo el mundo, de modo que la figura de Fuller se volverá tan popular que lo elegirán para realizar el pabellón de Estados Unidos para la Feria Mundial de la Exposición Universal e Internacional de 1967 en Montreal, para la cual Fuller proyectará, junto a su colaborador Shoji Sadao, el gran domo geodésico denominado “Biosfera” (Fig. 120). Con un diámetro

de 76 metros y alcanzando la luz de 72 metros, “este domo generaba un volumen interior de 6,7 millones de pies cúbicos, superior al de San Pedro en Roma, con un peso total similar al de uno solo de los pilares de dicha basílica: unas 800 toneladas”⁷⁵³, cubriendo enteramente el edificio de siete pisos que se alojaba en su interior, siendo tan espectacular, que atraería por completo la atención de los visitantes al dominar enteramente la isla en la que se ubicó, eclipsando otras atracciones como la exposición del Pabellón alemán de Frei Otto, o el icónico Hábitat 67 de Moshe Safdie. Geométricamente, se trataba de un icosaedro cuya malla estaba constituida de múltiples triángulos equiláteros, dando lugar a pentágonos en una rejilla hexagonal (Fig. 121), estructura que dotaba al domo de la inercia geodésica suficiente como para soportar los esfuerzos de flexión resultantes de su



Fig. 121. Detalle de la malla hexagonal constitutiva de la geodésica “Biosfera” de Fuller. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758384/clasicos-de-arquitectura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>

forma esférica. “Esta geometría fue criticada en su momento por Robert Le Ricolais, quien creía que el perfil de los grandes domos debía de seguir una geometría parabólica que adaptase la forma a su línea de presiones y minimizase los esfuerzos de flexión”. Sin embargo, Fuller consideró que la forma esférica simplificaba la fabricación y los costes, creándola de unidades simples de tubos de acero de tres pulgadas y nodos

repetitivos, lo que mantenía la curvatura de la superficie constante durante todo su desarrollo, generando un todo-domo de complejidad mayor. Y teniendo en cuenta que, a diferencia de los radiolarios o los adenovirus, sobre los que la gravedad repercute despreciablemente desde el punto de vista tensional al ser microscópicos y habitar en medios isotrópicos, en el caso del domo, aunque la forma parabólica hubiera resultado ser la más adecuada desde el punto de vista estático, “la economía espacial de la forma esférica, la rigidez geométrica de la malla espacial triangulada y el poco tiempo que requería su montaje al generarse el domo a partir de la repetición de un único módulo de base, hicieron de este sistema estructural uno de los más fuertes, livianos y eficientes de la época”⁷⁵⁴.

⁷⁵³ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 124.

⁷⁵⁴ *Ibidem*, p. 125.

Originalmente la geodésica se cubría de una piel vinílica controlada por ordenador cuyas células cambiaban de color, se abrían y cerraban para controlar la entrada de luz, aire y sonido, lo que además representaba la idea cosmológica de microcosmos dentro de macrocosmos, con un orden fractal o autorreferencial que obsesionaba a Fuller, y que se podría decir continuaba la línea aristotélica en que la obra de arte es un reflejo de su visión personal de la naturaleza, regida por sus mismas leyes y su mismo orden perfecto y supremo.

Aunque el domo se quemó en un incendio en 1976, tras varios años en desuso, la Biosfera fue adquirida por el gobierno canadiense en 1995, y en honor a Fuller, se reutilizó, siendo hoy en día empleada como espacio de exposición ambiental donde, a través de animaciones y recursos científicos, se pretende concienciar a los visitantes sobre el cambio climático y la necesidad de conservar el medio ambiente, así como sobre lo fundamental que es la implantación del desarrollo sostenible y la importancia de mantener la biodiversidad.

Y es que en los diseños de Fuller se hace presente el concepto de fractalidad, ya que para él “la arquitectura debe reflejar las leyes naturales y un edificio es, por lo tanto, un universo dentro del universo”⁷⁵⁵. Así también fueron destacables otros proyectos visionarios que Fuller realizará junto a su colaborador Shoji Sadao, como la famosa cúpula sobre Manhattan en 1960, consistente en un casquete esférico de dos millas de ancho que serviría para regular la contaminación del aire y la temperatura, o los que proyectará junto a Norman Foster como el “Climatoffice” de 1971, un prototipo de eficiencia energética en el que Foster se inspirará para realizar posteriores proyectos como el famoso rascacielos Swiss Re de Londres en 2004, o el Nuevo Aeropuerto Internacional de ciudad de México, cuyas obras se cancelaron por falta de fondos en 2018.

Finalmente, en 1965, una comunidad *hippie* de artistas formará en el sur de Colorado su comuna “Drop City” (Fig. 122), consistente en crear una obra en vivo. Inspirándose en las ideas arquitectónicas de Fuller y Steve Baer, construirán domos geodésicos donde albergarse, empleando materiales de desecho de desguaces de coches como metáfora para simbolizar su lucha contra la velocidad y la contaminación. Así mismo emplearán los espejos retrovisores reciclados para crear sistemas eólicos con los que aprovechar la luz solar para abastecer las viviendas de energía, en la línea del aprovechamiento de los recursos naturales que promovía Fuller.

⁷⁵⁵ *Ibidem*, p. 362.



Fig. 122. Imagen primer plano de domos geodésicos de la “Drop city”. Fuente: <http://www.sanatatak.com/view/drop-citynin-oykusu>

14.2.3. EL HEXÁGONO EN LA OBRA “EDENPROYECT” DE NICHOLAS GRIMSHAW



Fig. 123. Celdillas almohadilladas. EdenProyect. Fuente: <https://www.architecturaldigest.com/gallery/famous-architecture-seen-from-outer-space>

Nicholas Grimshaw (Hove, Gran Bretaña, 1939) es uno de los principales miembros del estudio arquitectónico Nicholas Grimshaw & Partners, que con frecuencia lleva a cabo proyectos arquitectónicos ligados con el desarrollo sostenible. Durante los años sesenta, Grimshaw fue uno de los arquitectos que llevaría el sueño funcionalista hasta sus últimas consecuencias, mediante el empleo de la alta tecnología. En los 70 y 80 será conocido por su personal estilo de construcción, al emplear la misma forma de fabricación de cobertizos utilitarios en la de edificios industriales, basándose siempre en la máxima de que los edificios deben ser diseñados para poder responder a las necesidades



Fig. 124. Estructura hexagonal desde el interior del Eden Project. Fuente: <https://newtonexcelbach.com/2010/09/06/the-eden-project/>

cambiantes con el uso. Finalmente irá aplicando este mismo enfoque a proyectos en mayor escala, como serán las grandes infraestructuras de vidrio serpenteantes de la terminal internacional de la estación de Waterloo en 1993, o las altísimas bóvedas de acero del aeropuerto de Zurich, en 2004. Así, en 1999 emprenderá el proyecto Eden Project (1999-2001) (Fig. 123), situado en la región de Cornualles, consistente en un complejo medioambiental inspirado en el comportamiento de las pompas de jabón, capaces de mantener su estructura estable a pesar de los posibles cambios. Mediante cascarones realizados en ETFE (etileno tetrafluoroetileno), un material caracterizado por su durabilidad, reciclaje, resistencia y ligereza, que ha sustituido las membranas simples de la arquitectura neumática por las membranas dobles, “los biomas de Eden son una serie conectada de cúpulas de hasta sesenta metros de altura, construidas con células hexagonales cuyas diagonales alcanzan los nueve metros (Fig. 124). Las cápsulas geodésicas, como se explicó anteriormente, son una aproximación poliédrica de la esfera, poseen las mismas funciones que las cúpulas, pero con la ventaja de ser livianas, versátiles, fácilmente desmontables y ampliables. Las células de Eden son infladas con aire y están compuestas por finas láminas transparentes (Fig. 125). Contienen plantas procedentes de dos regiones climáticas; el objetivo del proyecto es explotar las relaciones entre las plantas y los seres humanos, a través de la ciencia y la educación”⁷⁵⁶.

⁷⁵⁶ PEARSON, D. *Arquitectura orgánica moderna...*, p. 186.



Fig. 125. Biomas geodésicas. Fuente:
https://elpais.com/elpais/2019/04/15/del_tirador_a_la_ciudad/1555319612_448277.html

14.2.4. EL HEXÁGONO EN LA OBRA APARTAMENTOS IZOLA DE OFIS ARCHITECTS.



Fig. 126. Perspectiva de los apartamientos Izola. Fuente:
<https://arquitecturaviva.com/obras/viviendas-sociales-izola>.

El Estudio OFIS Architects (OFIS Arhitekti), constituido por los jóvenes arquitectos eslovenos Rok Oman (1970) y Spela Videcnik (1971), lleva a cabo en 2006 el proyecto de Apartamentos Izola en Eslovenia (Fig. 126). Situados entre la bahía de Izola y una colina con vistas, el proyecto consistía en crear un complejo de treinta viviendas de bajo coste para jóvenes, para lo que se ideó una solución funcional y flexible, maximizando la superficie habitable. Inspirándose en la forma hexagonal de los panales

de las abejas, lograron crear una solución fácilmente apilable y adaptable al entorno por su economía de medios y ahorro de espacio. Se trata de unidades que incluyen desde estudios a pisos de tres dormitorios, donde el espacio interior está libre de elementos estructurales.

“El clima mediterráneo de la región convierte los espacios exteriores y la sombra en elementos esenciales del proyecto. Así, cada vivienda dispone de una pequeña terraza que conforma un espacio íntimo conectado con el interior, resguardado del sol y ventilado. Unos toldos de tejido semitransparente protegen de las miradas de los vecinos, permitiendo al mismo tiempo disfrutar de las vistas, mientras los paneles perforados laterales dejan pasar la brisa proporcionando ventilación natural (Fig. 127). Los fuertes colores crean diferentes atmósferas en los apartamentos, cuyas habitaciones parecen más grandes por el efecto de la perspectiva que generan los toldos”⁷⁵⁷.



Fig. 127. Detalle de los apartamentos Izola. Fuente: BAHAMÓN, A. *Analogías entre el mundo animal y la arquitectura contemporánea*. Barcelona: Parramón, 2007 p. 131.

14.2.5. EL HEXÁGONO EN EL CENTRO NACIONAL DE NATACIÓN DE PEKÍN DE PTW ARCHITECTS

El Centro Nacional de Natación de Pekín (2003-2007) (Fig. 128), fue diseñado por la firma australiana de arquitectos PTW Architects, junto al equipo internacional de ingeniería Arup & Partners, al resultar ganadores del concurso convocado en julio de 2003 por el consorcio formado por la CSCEC (China State Construction Engineering Corporation) y CCBP (Construcción de China Internacional de Diseño) de Shanghai, para acoger los Juegos Olímpicos del 2008 en la ciudad de Pekín. También hoy



Fig. 128. Vista aérea del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/centro-nacional-de-natacion-pekín-7>

⁷⁵⁷ <https://arquitecturaviva.com/obras/viviendas-sociales-izola>.

se prevé su uso como emplazamiento de la próxima competición de *curling* en los próximos Juegos Olímpicos de invierno de 2022.



Fig. 129. Vista aérea del Centro Nacional de Natación de Pekín junto al Estadio Olímpico (2003-2007). Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekkin-chine/>

Se encuentra ubicado en la parte oeste del Parque Olímpico, junto al Estadio Nacional diseñado por Herzog&Meuron a modo de nido de pájaro, constituyendo el yin y el yan uno del otro, en el que uno representa el fuego y el otro el agua, uno lo místico y el otro lo volátil, uno lo curvo y otro lo poliédrico (Fig. 129). Así, el centro acuático ha sido bautizado como el “cubo de agua”, ya que el cubo es la forma de la vivienda tradicional china, y el volumen se conforma como una malla tridimensional que alude al patrón natural de las burbujas de agua en el estado de adición en el que se halla cuando

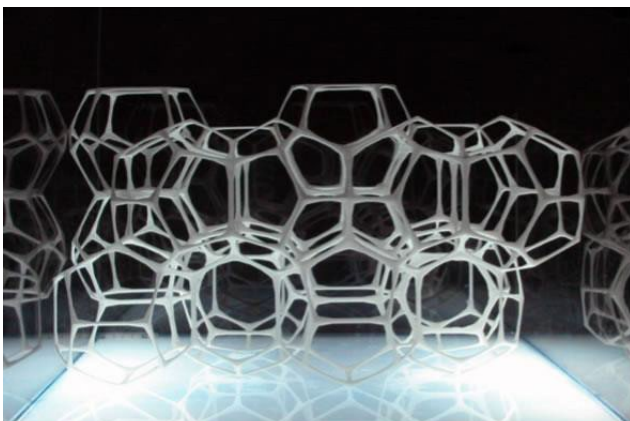


Fig. 130. Modelo de compartimentación Weaire-Phelan. Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekkin-chine/>

forman la espuma, concretamente la espuma Weaire-Phelan (tal y como ya explicamos en el capítulo IV), conformando un volumen girado algunos grados respecto de los ejes cartesianos, e integrado por celdas de dos tipos: un tetracaidecaedro (con dos hexágonos y doce pentágonos) y un dodecaedro pentagonal, que es a día de hoy la forma más eficiente de

ocupar el espacio y, por este motivo, se escogió como base del diseño de esta malla estructural (Fig. 130).

En realidad, la estructura basada en la compartimentación Weaire-Phelan de este edificio podría considerarse una evolución optimizada y compleja de los estudios sobre el grado de isotropismo de las redes tridimensionales estudiadas por Le Ricolais, materializada en sus estructuras resistentes de barras cubooctaédricas. En esta ocasión, las barras conforman las aristas de las celdas de la red estructural del edificio, constituyendo una cáscara continua de gran rigidez geométrica, necesaria para hacer frente a los constantes movimientos telúricos e inclemencias atmosféricas en Pekín, así como “una imagen orgánica de alta complejidad acentuada por el giro de la malla, a pesar de estar generadas por la repetición de unos pocos elementos un número elevado de veces”⁷⁵⁸.



Fig. 131. Maqueta del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekin-chine/>

El modelado estructural de un edificio con tan alta complejidad geométrica se pudo llevar a cabo, en los plazos y con el rigor requerido, gracias al desarrollo de un innovador proceso de diseño consistente en “la creación de programas informáticos específicos para la generación de la geometría de la malla estructural y para el cálculo, dimensionamiento y optimización de las secciones de todas las barras y nudos, que permitieran a su vez la exportación de los datos con altos niveles de precisión a otros programas informáticos para la realización de maquetas, de la planimetría tradicional y

⁷⁵⁸ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 158.

para el intercambio de información con los asesores, los fabricantes y los constructores de la obra”⁷⁵⁹.

Se fabricó una maqueta (Fig. 131) empleando un método similar a la estereolitografía, mediante la estratificación de resina líquida y modelado digital con la fabricación asistida por ordenador según procedimientos CAD/CAM. Los ingenieros de Arup desarrollaron un programa optimizado, con el cual calcularon y diseñaron de manera sistemática los datos del tamaño, forma y peso de las barras huecas y nudos de acero, generando una estructura lo más liviana, económica y eficiente posible, con un alto grado de precisión en un tiempo mínimo. Una vez realizada la malla esquelética de barras a escala, se cortó un prisma con las dimensiones del edificio, del cual se vaciaron los volúmenes de las distintas bañeras de natación, waterpolo y recreo (Fig. 132).



Fig. 132. Interior del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekin-chine/>

En este cubo de 177 m de lado por 30 m de altura, el concepto de autoorganización está presente a lo largo de todo el proyecto, no sólo en la elección de la geometría natural fractal de la estructura (Fig. 133), sino en el sistema de abastecimiento energético sostenible en el que se basa todo el edificio: el recinto se encuentra revestido de paneles con una doble piel traslúcida de mullidas células o burbujas realizadas de ETFE serigrafiado y una membrana de una superficie de más de 100000 metros cuadrados (Fig. 134), lo que permite dejar pasar, según el uso de cada espacio, la luz solar, y, a su vez,

⁷⁵⁹ Ibidem. p. 162.



Fig. 133. Estructura iterativa llevada a cabo en la construcción del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekin-chine/>

reflejar el calor como si de un invernadero se tratara. La cámara de aire entre las paredes interior y exterior constituye un sistema de calefacción sostenible que captura el 90% de la luz solar, empleándola en calefactar tanto el edificio como el agua de las piscinas, así como en abastecer de luz al espacio. Finalmente, el edificio también funciona como una estructura ecológica a través del sistema de recogida de aguas pluviales instalado en el techo, pudiendo recibir hasta el 80% del agua de lluvia que, una vez depurada, se emplea en abastecer las piscinas, por lo que la construcción presenta una ganancia neta de energía todo el año.

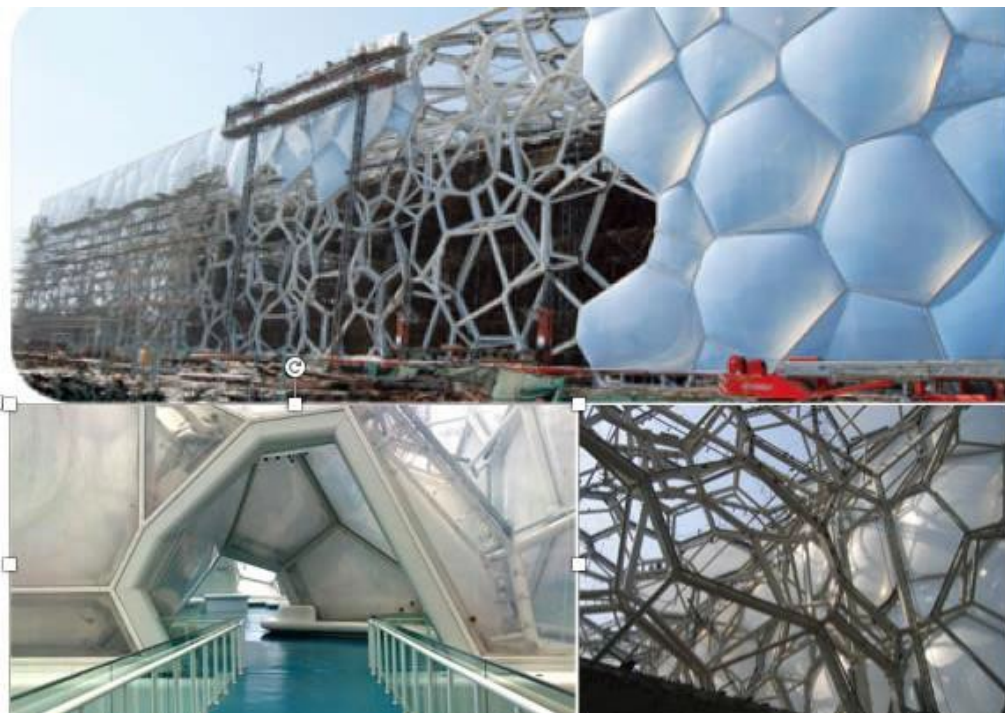


Fig. 134. Imágenes interior y exterior de la estructura con revestimiento de ERFE del Centro Nacional de Natación de Pekín. Fuente: <http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekin-chine/>

14.3. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN:

- LA LINTERNA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI
- EL MUSEO GUGGENHEIM DE FRANK LLOYD WRIGHT
- LA OBRA DE ZVI HECKER
- EL MIRADOR VOGELNEST DEL ARQUITECTO PETER KARLE
- LA TORRE MIRADOR DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA.
- "PT BAMBOOPURE BALI" Y PETER KARLE.

14.3.1. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN LA LINTERNA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI

Un helicoide será la superficie conoidal seleccionada por la mente culta de Borromini como la más representativa para coronar la linterna de la Iglesia de *Sant'Ivo alla Sapienza*, por ser la más adecuada para cumplir esta función.

Según asevera Portuguesi:

La arquitectura es según la tradición una imitación de la naturaleza, pero el ejemplo aclara que se trata de una imitación estructural que no tiene nada que ver con la reproducción de una imagen formada. La misión del arquitecto llega a ser la de indagar las razones constructivas de las formas de la Naturaleza, la lógica de sus productos y de sus operaciones, para transferir su experiencia cognoscitiva a su obra. La componente naturalista de las obras de Borromini confirma esta indicación teórica. La naturaleza es un alimento continuo en la aplicación del léxico y en el estudio de la conexión de los elementos, pero el problema no es reconstruir una situación natural, sino oponer a ella y a la experiencia del espacio no arquitectónico una situación artificial derivada, abstrayendo reglas, métodos y leyes, de un riguroso análisis estructural de los textos naturales. La espiral de San Ivo deriva sin duda de la concha marina, montada sobre un pedestal que Borromini tenía en su estudio, pero no responde en la obra a una exigencia ilusoria del lenguaje natural; es, por el contrario, un estudio inédito del dominio de nuevos tipos, más complejos, de simetría, y la evocación y la conquista de la regularidad y una necesidad que supera el repertorio de las formas elementales y alcanza esos tipos de configuración más directamente ligados al mundo de la vida. Concavidad, convexidad,

espiral, articulación mixtilínea de las superficies, todo ello es ante todo imitación de la naturaleza más allá de la perfección mineral, del cubo, de la esfera, del cilindro, del prisma, y orientado hacia la belleza vegetal y animal de la unión⁷⁶⁰.



Fig. 135. Linterna helicoidal de San Ivo. Punto culminante del movimiento impreso en toda la arquitectura. Fuente: GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 120.

Y es que, como modelo de síntesis orgánica, San Ivo se basa en “el modelo antiguo de Panteón que sufre la influencia del campo iconológico. El tema de los doce apóstoles en Pentecostés, el del misterio de la Trinidad, la negación de la ecuación tradicional entrada-capilla mayor, la interpretación de la cúpula como esfera celeste, producen todos ellos un espacio cargado de indicaciones, de contenidos y rituales, y al mismo tiempo dotado de una altísima regularidad geométrica, que introduce en la centralidad una

⁷⁶⁰ PORTOGHESI, P. *El ángel de la historia. Teorías y lenguajes de la arquitectura ...*, pp. 101-102.

alternancia rítmica no sólo al nivel de la declinación gramatical de los órdenes, sino también a nivel de las indicaciones espaciales que ven la alternancia cerrada de concavidades y convexidades”⁷⁶¹. En San Ivo, “el contraste operado entre el vaciado de las capillas y las proas de sus pilares, la concavidad de las capillas semicirculares y la convexidad de las triangulares, la transición entre la convexidad de la pared de éstas y la concavidad de los gallones, manifiestan una técnica de contrapunto similar”⁷⁶² a la orquestada en San Carlino.

Así pues, Borromini, además de arquitecto, fue escultor, uno de los más eminentes del barroco, “aunque no produjo ni hermosos bustos ni imágenes de Santos en un transporte de éxtasis místico-erótico. En realidad, no produjo escultura alguna, en el estricto sentido de la palabra. Se expresó, como algunos maestros modernos, en espirales abstractas, en esculturas filiformes en las cumbres de sus iglesias. Pero él era, por encima de todo, escultor de edificios, expresándose de una manera más completa a través de la inseparable unión de planos matemáticamente calculados, con espacios huecos fantásticamente vaciados, en estructuras en donde es arduo distinguir dónde termina la arquitectura y dónde principia la escultura”⁷⁶³.

Borromini fue un artista apasionado y entregado a su arte. Tanto es así que hasta en ocasiones se negaba a aceptar dinero por sus obras, con tal de garantizarse el dominio total de la dirección de sus proyectos. Metodológicamente Borromini se caracterizaba por su método científico: “Comenzaba con un trazado sencillo y lo iba complicando poco a poco, introduciendo variaciones, sustituyendo la línea recta por la curva y haciendo después una curva más compleja hasta que alcanzaba en el movimiento y en el espacio un definitivo refinamiento”⁷⁶⁴. Por ejemplo, “la linterna que cubre la iglesia, con sus columnas gemelas, la cornisa osadamente curva y la fantástica espiral que substituye al usual casquete cupular, hacen pensar en un organismo en crecimiento. La espiral culminante presenta un angosto repecho que llega hasta la cumbre”⁷⁶⁵ (Fig. 135).

Se ha indicado en numerosas ocasiones la semejanza de la linterna de Sant’Ivo con los antiguos *zigurats* mesopotámicos, y es más probable que Borromini conociera grabados de la Torre de Babel con esa forma, como por ejemplo el que realizó Martin Van Heemskerck. Por un curioso giro, sin embargo, la torre, que había aparecido como símbolo

⁷⁶¹ *Ibidem*, pp. 220-222.

⁷⁶² ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, pp. 247-248.

⁷⁶³ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., pp. 117-118.

⁷⁶⁴ BLUNT, A. *Borromini* ..., p. 24.

⁷⁶⁵ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 116.

de la locura del hombre, pasó después a utilizarse como representación de la idea exactamente opuesta, y la confusión de lenguas que se asociaba a Babel se transformó en el conocimiento de las lenguas que los Apóstoles recibieran en Pentecostés, como se representaba en el interior de la iglesia. La Torre de Babel se convierte así en la *turris sapientiae*, la torre de la sabiduría, e incluso Martin van Heemskerck llega a emplearla para representar el faro de Alejandría, el faro que da luz, que es también un símbolo evidente de la sabiduría. Aparece así mismo con este valor simbólico, aplicado a Salomón, en una pintura del siglo XV, obra de Butinone (hoy en la National Gallery de Escocia), en la que se muestra al joven Jesucristo que discute con los doctores en el Templo sobre una estructura en espiral similar a la linterna de Sant'Ivo.

El remate de toda la obra lo constituye una serie de símbolos tomados de la Iconología de Cesare Ripa, publicada por vez primera en 1593 (la primera edición ilustrada es de 1603), que es una de las fuentes preferidas de los artistas del siglo XVII. La estructura de hierro forjado en forma de llama representa el deseo de saber, inspirado en el intelecto, y las antorchas encendidas que hay en torno a la base de la linterna significan el saber mismo⁷⁶⁶.

14.3.2. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN EL MUSEO GUGGENHEIM DE FRANK LLOYD WRIGHT

La forma helicoidal y su función empaquetadora y de agarre son buscadas en la selección cultural por el arquitecto Frank Lloyd Wright (1867-1959) en su obra más creativa y simbólica, volcando en ella todo cuanto había aprendido a lo largo de su vida. Se trata del Museo Guggenheim emplazado en la Quinta Avenida de New York. Su construcción se prolongó a lo largo de diecisiete años, retrasándose su inauguración hasta 1959 (Fig. 136). En él “la expresión integral de la forma circular es absolutamente dominante”⁷⁶⁷. Se compone de un volumen principal que, desarrollado verticalmente, ocupa un extremo del solar y está destinado a albergar el área expositiva, de otro secundario, de menor tamaño, que denominado *Monitor* está reservado a usos administrativos, y de una plataforma horizontal elevada que unifica el conjunto (Fig. 137).

⁷⁶⁶ BLUNT, A. *Borromini...*, p. 134.

⁷⁶⁷ ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright...*, p. 182.

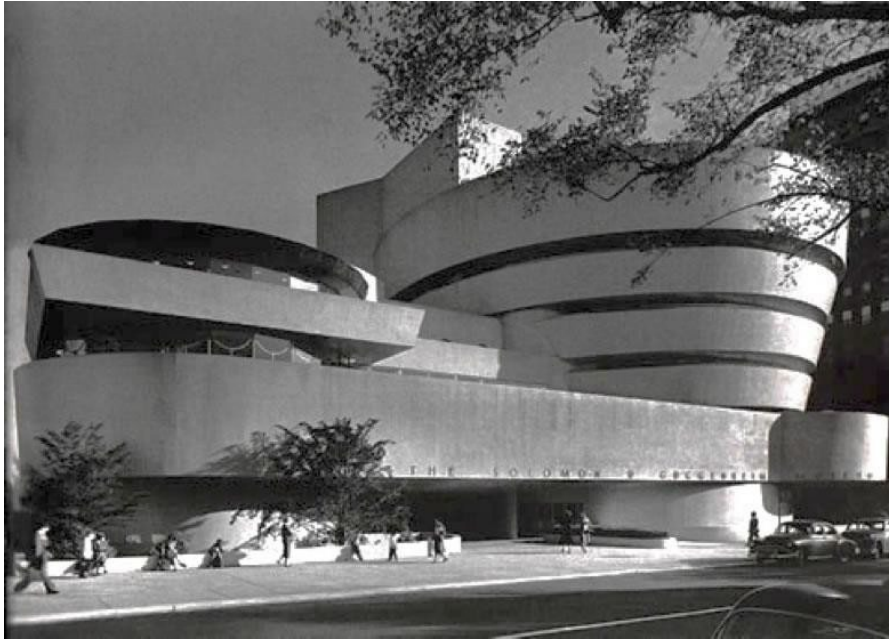


Fig. 136. Perspectiva del Museo Guggenheim, 1956. Fuente: DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright...*, Apéndice de dibujos y fotografías.

El volumen principal “posee una forma portentosa, semejante a una cáscara, *streamlined*, en el collar mediano que envuelve y compone volúmenes emergentes, toscamente modelada, sin juntas, fijada en el suelo de Manhattan a modo de las ilustraciones de Katsushita Hokusai, uno de los artistas predilectos de Wright”⁷⁶⁸. Se trata de una hélice inapropiadamente denominada “espiral invertida que denuncia e ilumina su discontinuidad sin límites; atornillándose al plano que parece sostenerla, interrumpe la Babel que la circunda, un trozo de tierra sobre el que se eleva como una potente metáfora, teatro de la urbe que se transforma en teatro de vida”⁷⁶⁹. El edificio es una unidad, un organismo continuo que crece, desarrollándose desde dentro hacia fuera como la espiral logarítmica de un *nautilus*, “una voluta que gira en torno al vacío interno y que junto a la envoltura exterior no poseen ni representan identidades diversas y contrapuestas [...] sino que expresan una dinámica que las une y las

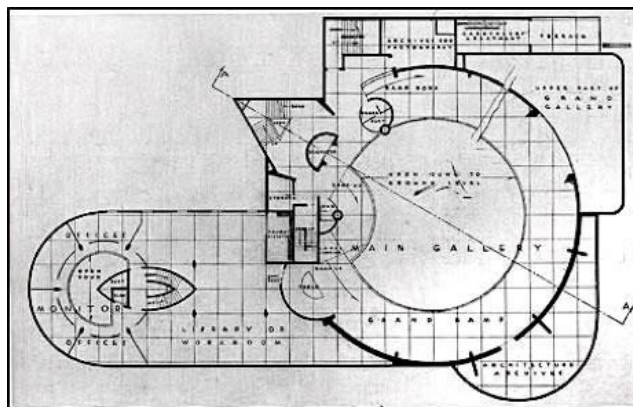


Fig. 137. Planta del Museo Guggenheim, 1956. Fuente: DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright...*, Apéndice de dibujos y fotografías.

⁷⁶⁸ ZEVI, B. *Frank Lloyd Wright...*, p. 248.

⁷⁶⁹ DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright y El Museo Guggenheim. El tiempo y el arquitecto*. Madrid: Abada Ediciones, 2011, p. 9.

transforma conjuntamente, puesto que el espacio no es sino orgánica relatividad”⁷⁷⁰ (Fig. 138).

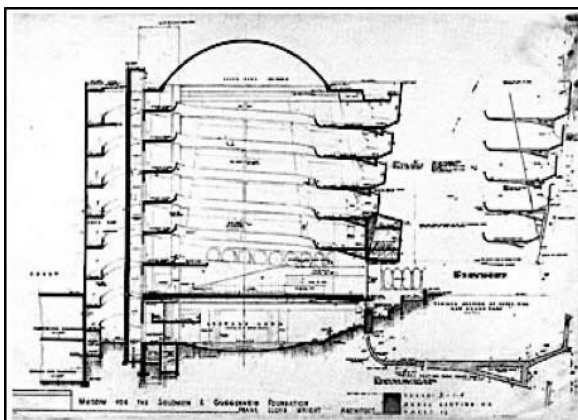


Fig. 138. Alzado del Museo Guggenheim, 1956. Fuente: DAL, F. C. Frank Lloyd Wright..., Apéndice de dibujos y fotografías.

El sentido de extensión infinita del espacio se une a la sensación de suspensión del tiempo. Según Wright, “lo que caracteriza al edificio es esta cualidad extraordinaria de reposo absoluto conocida sólo en movimiento, un reposo completo similar al que produce una ondulación suave, que nunca se rompe, que nunca ofrece un objetivo a la visión”⁷⁷¹. La hélice cónica

invertida, que aumenta su diámetro a medida que asciende, “describe seis evoluciones completas cuyos diámetros internos disminuyen según se sube”⁷⁷², “una voluta continua cuyo diámetro se restringe progresiva y regularmente hacia la cúspide”⁷⁷³ (Fig. 139). La simetría circular es una constante en todo el edificio, desde la rotonda hasta el diseño del suelo, pasando por el gran lucernario, cuya forma hexagonal adoptada por el entramado regular de “horquillas para el pelo”⁷⁷⁴ conforma la cúpula reloj con doce velas abasteciendo de luz natural al recinto (Fig. 140). Wright concibió este espacio de modo que el visitante pudiera “subir con el ascensor hasta el nivel superior de la rampa e ir descendiendo poco a poco por ésta alrededor del patio abierto - teniendo siempre la opción de subir o bajar con el ascensor desde todos los niveles de la rampa- para, por último, encontrarse al final de la exposición en el nivel más bajo, cerca de la salida”⁷⁷⁵. De este modo se



Fig. 139. Rampa del Museo Guggenheim, 1956. Fuente: DAL, F. C. Frank Lloyd Wright..., Apéndice de dibujos y fotografías.

conseguiría facilitar la visión ininterrumpida, a manera de fotogramas de una película, de las obras expuestas. Así, Wright afirmó que “las pinturas serán expuestas iluminadas por la luz natural, suspendidas en la atmósfera creada en torno a cada una de las obras, gracias

⁷⁷⁰ *Ibidem*, p. 67.

⁷⁷¹ ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright...*, p. 184.

⁷⁷² DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright y el Museo Guggenheim. El tiempo y el arquitecto...*, p. 71.

⁷⁷³ *Ibidem*, p. 29.

⁷⁷⁴ *Ibidem*, p. 80.

⁷⁷⁵ GÖSSEL, P. *Frank Lloyd Wright*. Nuremberg: Taschen, 1994, p. 151.

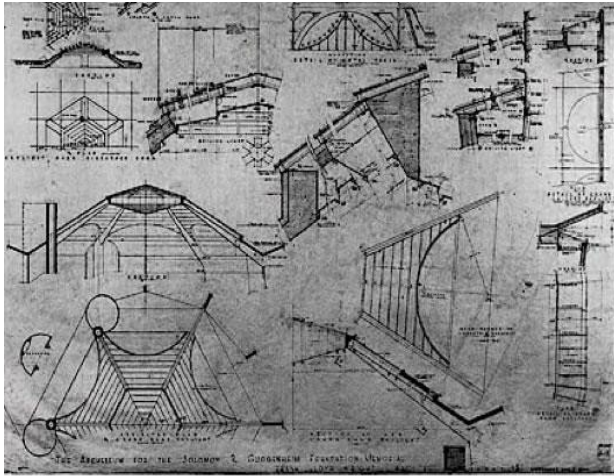


Fig. 140. Diseño de la Cúpula del Museo Guggenheim, 1956.
Fuente: MACCARTER, R. *Frank Lloyd Wright Architect...*, p. 312.

a la dilatación espacial producida por las paredes inclinadas y continuas, trazadas por las volutas externas en espiral, que deben acompañarlas”⁷⁷⁶. Originalmente, la rotonda iba acompañada de otra más pequeña y de una torre para albergar estudios para artistas y apartamentos. Hoy en día este Museo está considerado como uno de los hitos arquitectónicos del siglo XX, así como uno de los edificios más bellos.

14.3.3. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN LA OBRA DE ZVI HECKER

Zvi Hecker es uno de los arquitectos más destacados de Israel, y posee un amplio reconocimiento internacional debido a su dilatada trayectoria. Nacido en Cracovia en 1931, pasó su juventud en Polonia y en Samarcanda, Uzbekistán. Inició sus estudios de arquitectura en la Universidad Tecnológica de Cracovia, y continuó en el Instituto Tecnológico de Israel, donde emigró en 1950. Fue alumno de Alfred Neumann (1900-1968), con quien en 1959 fundaría una firma, junto a su también compañero Eldar Sharon (1900-1984). A lo largo de la década de 1960, los socios construyeron algunas de las edificaciones más controvertidas de Israel. Desde un enfoque basado en la arquitectura de

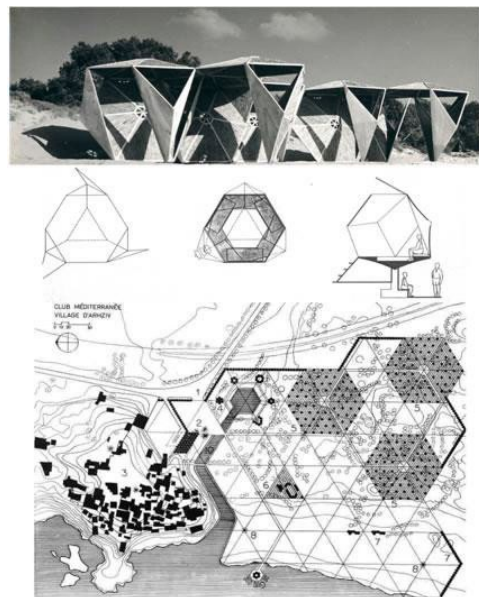


Fig. 141. Imagen frontal y planta del Club Marino Mediterrané en Aczib (1960-1961). Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/club_mediterran_e-68-1.html#1

⁷⁷⁶ DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright y el Museo Guggenheim. El tiempo y el arquitecto...*, p. 29.

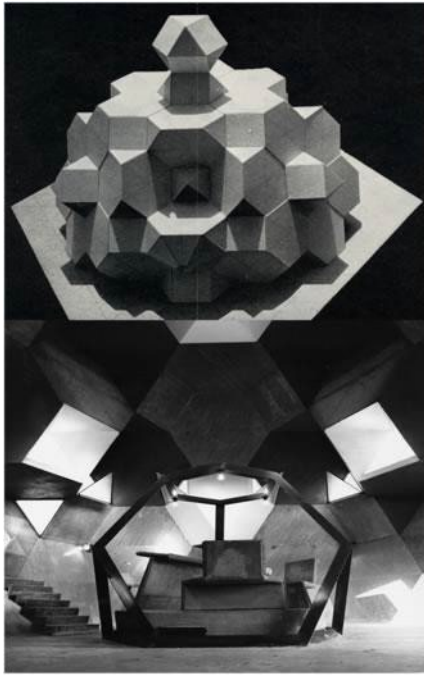


Fig. 142. Maqueta e interior de la Sinagoga en el desierto de Néguev. Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/synagogue_in_the_negev_desert-60-1.html#13

vanguardia, contrario al estilo moderno de geometría simple y de ángulos rectos, produjeron edificios de complejas y poligonales formas modulares iteradas, al considerar que se ajustaban al clima y topología locales, dotando de un estilo propio a la arquitectura israelí, y a su vez, siendo fáciles y económicas de fabricar. Entre ellas destacamos la pirámide invertida del Ayuntamiento de Bat-Yam (1959-63), el Club Marino Mediterráneo en Aczib (1960-1961), donde emplea tetraedros truncados partiendo de paneles triangulares y formas hexagonales (Fig. 141), la sinagoga de la academia militar del desierto de Néguev (1967-1969), que surge a partir de tres tipos diferentes de unidades poliédricas macladas (Fig. 142), o el edificio de apartamentos Dubiner (1961-1964) en Ramat Gan.

A partir de 1970, Hecker empezará su carrera en solitario, y realizará diseños que guardarán similitudes con el Metabolismo, movimiento que se caracterizaría por emplear muchas veces formas geométricas complejas y modulares, que configuran “todos” asimétricos mayores, a modo de organismos capaces de crecer y adaptarse a las nuevas incertidumbres del entorno. Así, ante la propuesta de construcción rápida y económica de viviendas de un nuevo barrio residencial en expansión al este de Jerusalén, Hecker desarrollará probablemente su proyecto más controvertido, el complejo de apartamentos *Ramot Polin* (1972-1975) (Fig. 143). Basado en el número 5, planeará la construcción en cinco alineaciones sinuosas y en zigzag, delimitando espacios interiores peatonales y de uso común, donde las viviendas formarán dodecaedros

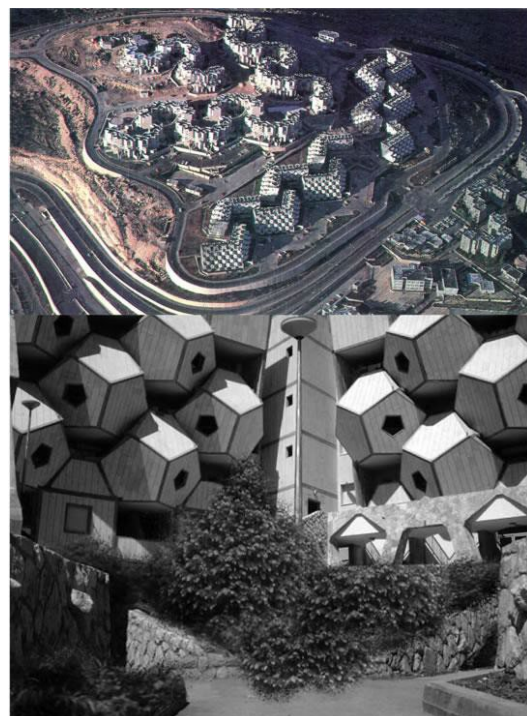


Fig. 143. Vista aérea y frontal de *Ramot Housing* (1971-1975). Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/ramot_housing-113-1.html#1

homogéneos, realizadas mediante piezas pentagonales prefabricadas ensambladas, dispuestas a modo de colmena.



Fig. 144. Bocetos y contrapicado de Spiral Apartment House (1984-1989). Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/project_titel-30-1.html#4

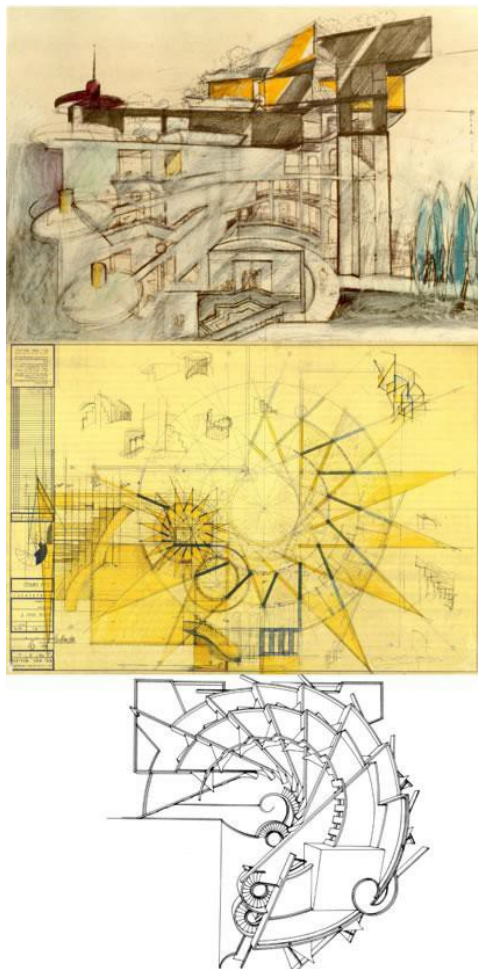


Fig. 145. Spiral Apartment House (1984-1989) Bocetos de alzado y planta. Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/project_titel-30-1.html#4

Con el tiempo, Hecker irá centrando su interés por las formas curvas que emanan de un punto central, como las curvas logarítmicas desplegadas por las semillas en crecimiento de los girasoles que observaba en los campos de Samarcanda, donde fue deportado durante la Segunda Guerra Mundial cuando era niño. Partiendo de esta forma y de su desarrollo helicoidal tridimensional, Hecker diseñará uno de sus proyectos más llamativos: el complejo residencial conocido como *Spiral Apartment House* (1984-1989) (Fig. 144), en Ramat Gan. De aspecto “inacabado”, fue diseñado a modo de escalera helicoidal que se enrosca a un patio interior (Fig. 145). “Su materialidad brutalista, su aspecto dinámico e inacabado dan un aire manierista a la edificación. Siguiendo con el símil de Babel, para Zvi Hecker *Spiral* habla árabe, argumenta en hebreo, dialoga en ruso y

se expresa en un italiano barroco, cercano al lenguaje de Guarino Guarini”⁷⁷⁷.

A partir de los 90, Hecker abrirá su segunda oficina en Berlín desde la que aun hoy trabaja, y sus diseños adquirirán un carácter mucho más conceptual. En este período, llevará a cabo uno de sus proyectos más destacados, la primera escuela judía en Berlín desde la Segunda Guerra Mundial, la escuela Heinz-Gainski (1991-1995). El estudio del movimiento solar y las formas complejas darían como resultado una forma intrincada, y fragmentada entre llenos y vacíos. Inicialmente para la idea del diseño, Hecker partió del patrón de crecimiento de las semillas de girasol (flor común en Israel), en espiral áurea, y de su movimiento siguiendo el sol. Sin embargo, a medida que fue desarrollándose el proceso constructivo, esta primera disposición experimentó sucesivos cambios hasta asemejarse a un libro abierto. Así, en opinión de Hecker,

el carácter dinámico y orgánico del girasol resuena con la naturaleza de la educación. [...] La naturaleza única del girasol, no su forma, está en juego aquí. La forma en que los niños asimilan el conocimiento es una reminiscencia de la forma en que el girasol cautiva los rayos del sol. La educación es la iluminación de la mente. Y creo que la educación en esta escuela continúa no sólo en estas aulas. La arquitectura del edificio es una fuente de educación es sí misma⁷⁷⁸.

De modo que, desde el centro del edificio, todos los elementos orbitan de forma centrífuga. En definitiva, “el edificio es una combinación de una retícula ortogonal y una concéntrica, intentando representar la simbiosis entre la rigidez del pensamiento humano y el caos controlado de lo natural. Imita a la planta, que sigue la órbita del sol, para que los rayos iluminen las clases a lo largo de todo el día”⁷⁷⁹.

Mediante la yuxtaposición y variación de los materiales, colores y texturas, así como el contraste entre formas macizas y lineales, crea una obra abstracta casi escultórica, opuesta a sus anteriores apuestas estructurales y tardomodernas. Así mismo, la fluidez de espacios intersticiales, las formas sinuosas, los expresivos y coincidentes encuentros angulares, y los diferenciados elementos arquitectónicos, confieren a esta obra un marcado carácter deconstructivista (Fig. 146).

⁷⁷⁷ <https://arquitecturayempresa.es/noticia/de-la-arquitectura-cristalina-la-deconstruccion-zvi-hecker>.

⁷⁷⁸ <https://spa.architecturaldesignschool.com/interviewwithzvihecker>.

⁷⁷⁹ CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza...*, p. 118.

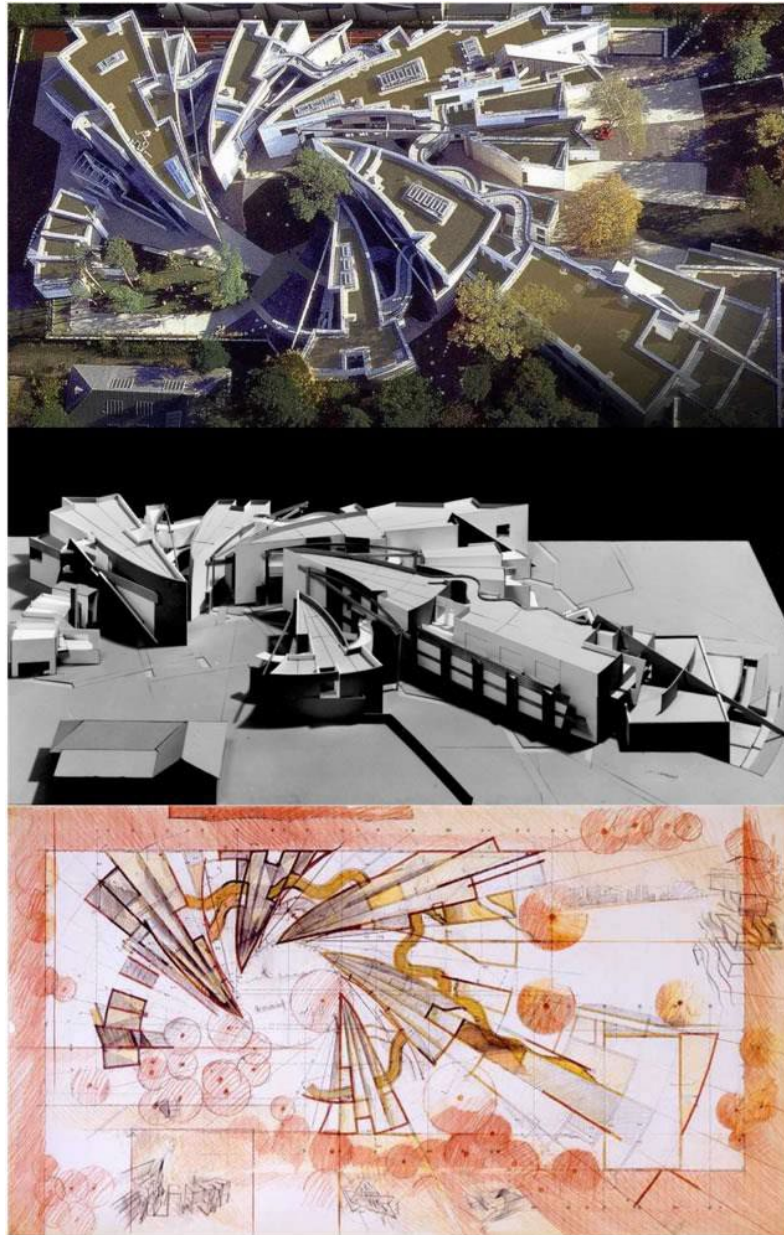


Fig. 146. Heinz-Galinski-Schule. (1991-1995), Vista aérea, maqueta y boceto.
Fuente: http://www.zvihecker.com/projects/heinz_galinski_schule-110-1.html

14.3.4. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN LA TORRE MIRADOR DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA

También encontramos como manifestación cultural del empleo de la hélice la Torre que Oscar Niemeyer diseña en 2008 para completar el conjunto sobre la plaza que conforma el Centro Cultural Internacional “Niemeyer” en Avilés, ya citado. Ubicada

entre el Auditorio y el Museo, la Torre-Mirador es un balcón hacia la Ría, desde el que contemplar el grupo arquitectónico completo, cuyo uso está destinado a actividades gastronómicas (Fig. 147). Sobre un fuste de hormigón armado de 24 m de altura y 4,70 m, en cuyo interior discurre el aparato elevador, se sitúa un volumen cilíndrico de plantas circulares de 22,60 m de diámetro, siendo la superior o portante sostenida por cuatro vigas diametrales que trasladan sus esfuerzos al fuste central (Fig. 148). A pesar de la dificultad que supuso el hormigonado de las losas de las plantas, el elemento arquitectónico que mayores problemas trajo en su



Fig. 147. La Torre-Mirador del Centro "Niemeyer". Fuente: RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura...*, p.32.

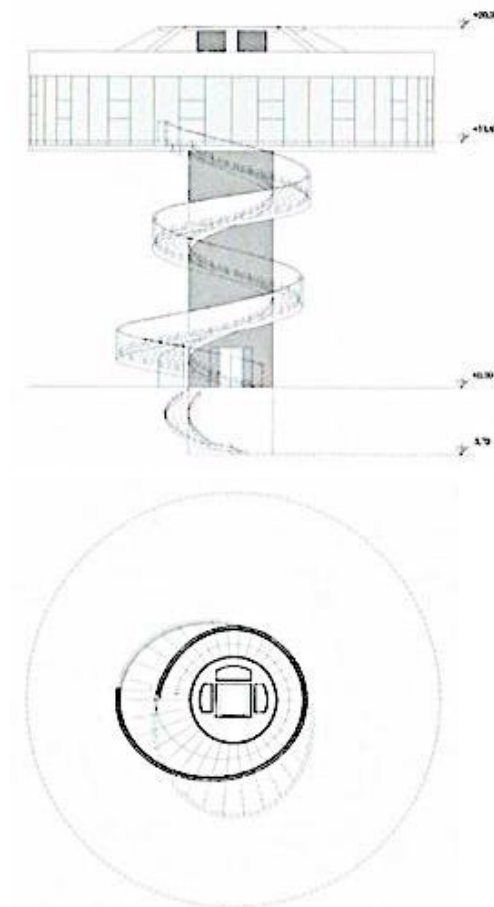


Fig. 148. Planta y alzado de la Torre-Mirador del Centro "Niemeyer". Fuente: RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura...*, p. 69.

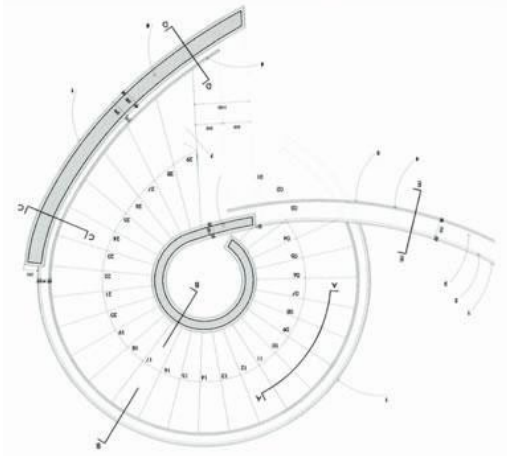
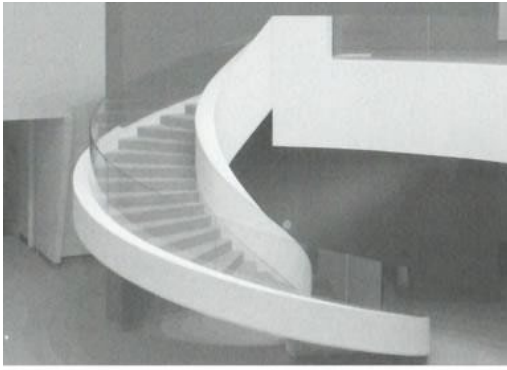


Fig. 149. Imagen frontal de la escalera helicoidal interior del Museo del Centro "Niemeyer y Planta en espiral de la escalera interior del Museo del Centro "Niemeyer". Fuente: RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura...*, p. 45.

ejecución fue la escalera de acceso que circunda el fuste central, en desarrollo helicoidal continuo, pero variando su perímetro, en planta exterior elíptica, un avance de 90° en curva excéntrica respecto del eje del fuste. El resultado final será una escalera funcional y bella, algo siempre presente en la obra de Niemeyer.

También al Museo del conjunto Niemeyer, (ya comentado en el apartado de la esfera), se accede por una escalera helicoidal auténticamente artesanal, situada empaquetada en su interior. Dicha escalera comunica el nivel +0 y el nivel +1 del espacio de exposiciones, y fue ejecutada totalmente en hormigón, con petos perimetrales rebajados también de hormigón, donde se encastran barandillas de vidrio laminar curvo (Fig. 149).

14.3.5. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN "PT BAMBOOPURE BALI" Y PETER KARLE

En Bali, isla archipiélago de Indonesia, el equipo local PT BambooPure, dirigido por el escultor suizo afincado en la isla Aldo Landwehr, construye el nuevo campus y escuela Green School en 2008. La edificación de esta escuela tuvo presente los mismos principios que rigen la enseñanza de la misma, respetando los métodos tradicionales y el medio ambiente mediante el empleo del bambú local, material de construcción intrínsecamente renovable y de rápido



Fig. 150. Estructura de la techumbre de la Green School. Fuente: PT BAMBOO PURE, "Bucles de bambú. Campus y escuela Green School, Bali (Indonesia)". *Arquitectura Viva*, N.º 137, 2011, p. 53.

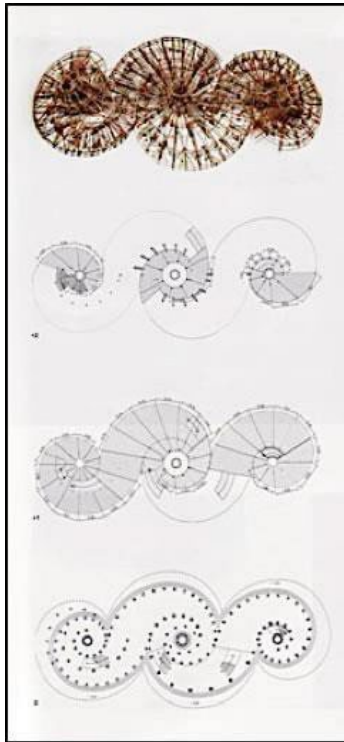


Fig. 151. Planta de la Green School. Fuente: PT BAMBOO PURE, "Bucles de bambú. Campus y escuela Green School, Bali (Indonesia)" ..., p. 51.

crecimiento. Con una superficie de ocho hectáreas divididas en zonas construidas, con edificios abiertos y ligeros, y de cultivos, "las estructuras que constituyen la techumbre están formadas por piezas de bambú apoyadas en pilares compuestos, situados en el interior y en una serie de soportes colocados perimetralmente"⁷⁸⁰. Su forma sigue la disposición de la superficie reglada helicoidal cónica que, al igual que el sombrero tradicional de Indonesia, se agarra a la testa de quien lo porta protegiéndole del sol y la lluvia (Fig. 150).

Como se puede apreciar en la imagen, "las aulas y los espacios comunes están contenidos en el edificio principal, formado por la concatenación sucesiva de espirales de bambú ligeras, impermeables al agua y ventiladas, de tal modo que pueda hacerse frente al clima monzónico tropical del enclave"⁷⁸¹. Esta forma en espiral empaqueta el edificio, siendo la más práctica a la hora de ahorrar material y espacio (Fig. 151). También se han empleado materiales autóctonos, como piedra y grava volcánicas, para fabricar los solados y caminos de acceso.

14.3.6. LA ESPIRAL Y LA HÉLICE EN EL MIRADOR VOGELNEST DEL ARQUITECTO PETER KARLE

El mirador Vogelnest es diseñado por el arquitecto Peter Karle en 2001, integrándolo dentro de la reserva natural situada al norte de Hochheim, a las afueras de Wiesbaden y Francfort, Alemania (Fig. 152). Con este mirador se pretendía que el visitante pudiera observar las aves y el entorno natural sin entrar en contacto con el ecosistema protegido, para lo cual se ideó un observatorio elevado como el nido de las aves

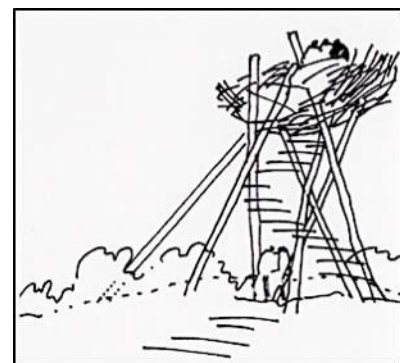


Fig. 152. Diseño del Mirador Vogelnest. BAHAMÓN, A. *Analogías entre el mundo animal...*, p. 88.

⁷⁸⁰ PT BAMBOO PURE, "Bucles de bambú. Campus y escuela Green School, Bali (Indonesia)" ..., p. 51.

⁷⁸¹ *Ibidem*, p. 53.

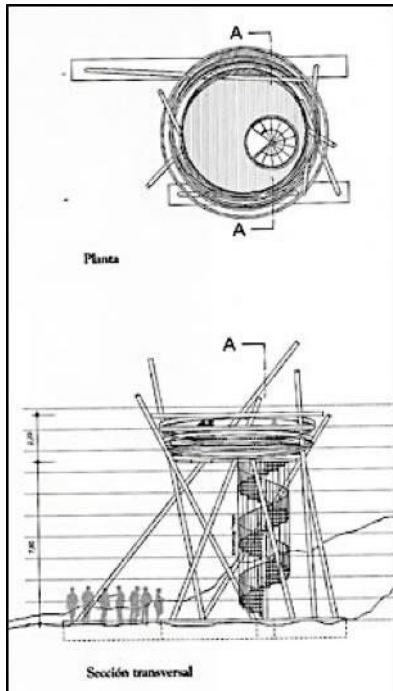


Fig. 153. Planta y sección transversal. Mirador Vogelnest. BAHAMÓN, A. *Analogías entre el mundo animal...*, p. 90.

sobre los árboles. La plataforma del observatorio, situada a unos siete metros y medio de altura es circular y está rodeada por un antepecho de anillos circulares de distintos diámetros colocados a distintas alturas e inclinaciones. Ocho postes de madera oblicuos, entrecruzados en forma de tenedor, la sustentan a modo de ramas de árbol. Se accede al observatorio mediante una escalera de forma helicoidal, confiriendo al conjunto un gran dinamismo y funcionalidad (Fig. 153). Por tratarse de un mirador en el que lo que se pretende es tener el mayor ángulo de visión a distintas alturas, la forma adoptada más adecuada para tal propósito es la hélice cilíndrica. Ésta aparece sugerida en el observatorio, dotándolo de un aspecto dinámico, y apoyando la idea de “nido”, tan recurrente en este caso, mientras que es evidente en la escalera optimizando su función (Fig. 154).



Fig. 154. Mirador Vogelnest. BAHAMÓN, A. *Analogías entre el mundo animal...*, p. 89.

14.4. LA ONDA EN:

- LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI.
- LA CASA BATLLÓ Y LA CASA MILÁ DE GAUDÍ.

- LAS ESCUELAS PROVISIONALES DE LA SAGRADA FAMILIA DE GAUDÍ.
- OBRAS DE LE CORBUSIER.
- OBRAS DE ELADIO DIESTE.
- EL AUDITORIO Y LA MARQUESINA DEL CENTRO NEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA.

14.4.1. LA ONDA EN LA IGLESIA DE SAN CARLOS DE LAS CUATRO FUENTES DE BORROMINI

Si, como ya dijimos, la onda mueve, emite, recibe y comunica similares funciones, éstas son plenamente expresadas en el mundo culto a través de la obra de Borromini. Y es que, Borromini junto a Bernini y Piero de Cortona, fueron quienes, de algún modo, crearon en Roma el barroco, nuevo estilo en arquitectura, “expresión del sentimiento de optimismo y agresividad que existía en la Iglesia Católica Romana tras los años austeros de la Contrarreforma [...] Aunque sus respectivas contribuciones difícilmente podrían ser más distintas. [...] Los edificios de Bernini se ven con los ojos, los de Borromini se sienten con el cuerpo entero”⁷⁸².

Borromini trabajó a pequeña escala, generalmente en ladrillo y estuco, aunque a veces utilizaba travertino; nunca empleó el color, y todos los interiores de sus iglesias están pintados de blanco; cuando introduce escultura lo hace incorporándola a la decoración del edificio, y la luz la utiliza para subrayar el espacio, no para crear contrastes dramáticos. Sus efectos los constituye por medios estrictamente arquitectónicos, denotando al idearlos una suprema inventiva. Sus espacios desembocan unos en otros, los muros se curvan o se articulan en profundidad mediante columnas y nichos; emplea originales formas de arcos, dislocándolos a veces en tres dimensiones, e inventando formas fantásticas para sus cúpulas, sus campanarios y sus linternas. El resultado es una arquitectura en la que su más brillante expresión es un rasgo esencialmente barroco que es el movimiento⁷⁸³.

Así, en “La fachada de *San Carlino alle Quattro Fontane* de Borromini (1662-1667), expresa el movimiento (Fig. 155). [...] una continua cadena de nexos recíprocos

⁷⁸² BLUNT, A. *Borromini*..., pp. 25-26.

⁷⁸³ *Ibidem*, p. 26.

corre a través [...], yendo a converger en el centro del edificio hacia un punto focal que nos hace experimentar la sensación de mirar hacia lo alto. [...] La superficie similar a una onda resultante fue la gran invención de Borromini. Invención que no reaparece únicamente como medio para atraer la atención de los transeúntes que pasan por las



Fig. 155. Fachada ondulada de “San Carlo alle Quattro Fontane. Fuente: GIEDION, *S. Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 158.

estrechas calles romanas, sino que se afirma nuevamente, de modo que nos sorprende, en los *crecents* ingleses de finales del siglo XVIII, y persiste todavía, aunque algo modificada, en la arquitectura contemporánea⁷⁸⁴. Con esta fachada ondulada, Borromini no busca el efecto decorativo, sino que “en la actualidad nos es fácil ver el nervio con que aparece, en su estructura total, esta forma de acentuar la progresión y regresión de la fachada, obtenida construyendo hornacinas y adicionándole, en contraposición, diversos elementos

salientes. Podemos reconocer aquí una auténtica manera de modelar el espacio mediante elementos cóncavos y convexos, que hacen vibrar la luz a todo lo ancho de la fachada de la iglesia. Francisco Borromini logró crear, con elementos puramente arquitectónicos, y al aire libre, algo equivalente al suave claroscuro de su contemporáneo Rembrandt, que en aquella misma época trabajaba en sus últimos lienzos⁷⁸⁵.

Por otra parte, según Deleuze, “el barroco no remite a una esencia, sino más bien a una función operatoria, a un rasgo. No cesa de hacer pliegues. No inventa la cosa: ya había todos los pliegues procedentes de Oriente, los pliegues griegos, romanos, góticos, clásicos...”⁷⁸⁶. Sin embargo, según Giedion,

algunos historiadores del arte han encontrado en la antigüedad el origen de esta manera de tratar el muro lograda por Borromini. Es posible, pero de ninguna manera cierto que Borromini conociera, en su tiempo, un grabado al aguafuerte de los templos de Petra, en Asia Menor. Pero tales templos (El Chasne es el más conocido) fueron excavados en la

⁷⁸⁴ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, pp. 111-112.

⁷⁸⁵ *Ibidem*. pp. 112-113.

⁷⁸⁶ DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco ...*, p. 11.

pétreo ladera de una montaña; el muro no es ondulado, y todos sus elementos -columnas, frontones, quebrantos, garitas para los centinelas- se hallan aislados uno del otro. Parece mucho más lógico suponer que Borromini partiera del tipo de fachada plana empleado por Alberti para la construcción de la iglesia florentina de “Santa María Novella”, y que modelara todos sus elementos en concordancia con su propia visión. Es más interesante la comparación con la cúpula de la Villa Adriana, cerca de Tívoli. Todo el *hall* está emplazado en medio de una sala cuadrada. Pero aquí, como en otros edificios antiguos, no hay ondulación en la pared en el sentido de la ininterrumpida corriente de movimiento que abarque toda su longitud. En la Plaza del Oro no hay continuidad de movimiento: hay interrupciones allí donde las secciones de la pared se encuentran. Esta solución es la opuesta de la que aparece en el Templo de Venus, en Baalbeck, donde fueron tallados cornisamentos cóncavos en la parte superior central circular⁷⁸⁷.

De modo que, finalmente, para Deleuze, “San Carlino y San Ivo o la articulación de las sucesivas curvaturas de la fachada del Oratorio de San Felipe Neri representan explícitas demostraciones de cómo el pliegue constituye un mecanismo específico de Borromini. [...] La modulación metodológica que Borromini experimenta entre San Carlino y San Ivo le permite afrontar con mayor naturalidad la continuidad del pliegue”: “... El Barroco inventa la obra o la operación “infinitas”. El problema no es cómo acabar un pliegue, sino cómo continuarlo, hacer que atraviese el techo, llevarlo hasta el infinito. Pues el pliegue... determina y hace aparecer la Forma, la convierte en una forma de expresión”⁷⁸⁸.

Ejemplo de ello es que con “el muro ondulado de invención de Borromini, dio flexibilidad a la piedra, transformó el muro pétreo en material dúctil. El muro ondulado es el corolario adecuado de los amplios espacios en el sistema de la planta flexible”⁷⁸⁹.

En definitiva, “por su tratamiento del muro, y del trazado de la planta, Borromini introdujo una nueva flexibilidad en la arquitectura. Al cuerpo entero de ésta le fue infundido un mayor dinamismo”⁷⁹⁰.

⁷⁸⁷ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 113.

⁷⁸⁸ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini*..., p. 185.

⁷⁸⁹ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 113.

⁷⁹⁰ *Ibidem*. p. 119.

14.4.2. LA ONDA EN LA CASA BATLLÓ Y LA CASA MILÁ DE GAUDÍ

Como hemos visto, el arquitecto Antonio Gaudí (1852-1926) se caracterizó por desarrollar un espíritu indagador, alimentándolo desde su niñez cuando observaba la naturaleza de los campos de Reus (Barcelona), donde nació. Proveniente de una familia de cinco generaciones de caldereros, practicará desde muy joven el oficio, lo que le permitirá desarrollar precozmente el concepto del espacio tridimensional y la habilidad para el trabajo manual. No obstante, Gaudí decidirá estudiar arquitectura. Entre 1869 y 1873 estudiará las asignaturas previas al ingreso en la Escuela de Arquitectura, y debido al gran interés que le suscitaba el conocimiento de la naturaleza, en 1871, aun pendiente de aprobar las asignaturas de Mecánica racional, se matriculará y aprobará, entre otras asignaturas que no pertenecen a la carrera, la Historia Natural. Ya en 1873, Gaudí empezará sus estudios de Arquitectura en la Escuela de Bellas Artes (La Lonja) de Barcelona, que a partir de 1875 pasará a ser la Escuela de Arquitectura, llevando “al más alto nivel universitario los estudios de construcción, hasta entonces impartidos por la Escuela de Maestros de Obras”⁷⁹¹. En este mismo período comenzaría a utilizarse extensivamente la fotografía documental, por lo que Gaudí frecuentará con asiduidad la Biblioteca de la Escuela, para analizar en detalle los repertorios fotográficos de las arquitecturas clásicas y exóticas de todo el mundo que allí se conservaban. En esta misma época también estudiará a Pugin, Viollet-le-Duc, Otto Wagner o Ruskin; de hecho, debido a que con el transcurrir de los años su religiosidad fue en aumento, su obra se desarrolló en términos muy similares a los de Ruskin, sosteniendo “la continuidad natural de la obra divina, perpetuada por medio del hombre, con el libro de la naturaleza como fuente sagrada de inspiración”⁷⁹². No obstante, Gaudí también contrastará estos aprendizajes investigando en el conocimiento de las tradiciones arquitectónicas, lo que se hace evidente en toda su obra. Finalmente, una vez acabada la carrera, sus pocos recursos económicos le obligarán a trabajar como ayudante en varios despachos, antes de poder independizarse con algo de clientela propia. Así, en 1882 trabajará como ayudante en el estudio de Joan Martorell, pionero en la aplicación de la estática gráfica en España, experiencia que lo dotará de un gran dominio de la mecánica constructiva.

⁷⁹¹ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 23.

⁷⁹² BERGÓS MASSÓ, J. *Gaudí. El hombre y la obra*. Barcelona: Universidad Politécnica, 1974, p. 34.

Por otra parte, Gaudí también tuvo la fortuna de vivir en un momento histórico favorable para dar rienda suelta a su creatividad. Coincidió con la época en que la burguesía

vivía un período de crecimiento económico, marcado además por la confianza en sí misma y por la necesidad de reafirmarse en todos los aspectos y hasta de competir con sus iguales para tratar así de ser menos iguales. [...] Entonces la burguesía encontró en la arquitectura no sólo una forma de invertir sino también un medio sólido, vistoso y público de aparentar, de confirmar quién era cada cual. [...] Y, por si fuera poco, se daba otra circunstancia más: era el momento en el que Cataluña empezaba a encaminarse con decisión al reencuentro de su perdida identidad política [...] a raíz de la derrota de 1714⁷⁹³.

Todo ello provocó que, con el modernismo, los arquitectos gozasen de una libertad jamás antes soñada. No obstante, los militantes del Noucentismo posterior abogarán por la demolición de tales manifestaciones. Gaudí, que no era modernista, pero que pertenecía a esa misma generación, en buena medida también sufrió las consecuencias de aquella campaña, incluso, más todavía si cabe, por su vanguardismo acérrimo. “La ironía es que el reconocimiento a escala mundial de la grandeza de Gaudí, como uno de los genios de la arquitectura universal, propició hace unos años la revalorización definitiva y por supuesto merecida del Modernismo”⁷⁹⁴.

La casa Batlló

En 1904 Gaudí recibió el encargo de José Batlló Casanovas de proyectar la reforma de la Casa de Luis Sala Sánchez, de 1877, en el vistoso y elegante paseo de Gracia. Para este cometido, Gaudí cuidará el respeto por el entorno urbano, eliminando a la izquierda el volumen de la fachada del quinto piso y añadiendo una moldura similar a la de la Casa Amatller colindante, que Josep Puid i Cadafalch había levantado cinco años antes. Asimismo a la derecha añadió otra moldura helicoidal, siguiendo los accidentes de la casa vecina hasta la cornisa, aunque en este caso el efecto no se secundó por la ampliación irrespetuosa de dos pisos.

La intervención gaudiana en el edificio consistió en

⁷⁹³ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí*. Barcelona: Ediciones Poligrafía, 1996. p. 7.
⁷⁹⁴ *Ibidem*, p. 15.

la sustitución de los bajos de la fachada, reemplazados por una nueva estructura de piedra de Montjuïc que sube hasta la tribuna del primer piso y una parte del segundo con unas aperturas onduladas y columnas de forma ósea; la ondulación y chapado del resto con mosaico vítreo policromo y discos cerámicos; la instalación de nuevos balcones de hierro en forma de antifaz; el añadido de un quinto piso y dobles buhardillas cubiertas con escamas cerámicas de múltiples colores; y una torre cilíndrica coronada por una forma bulbosa acabada con una cruz de seis brazos y con anagramas de Jesús, María y José⁷⁹⁵.

Sin duda, será la fachada principal con la que, trabajando en estrecha colaboración, según Lluís Permanyer, con el joven arquitecto Josep María Jujol, cuya influencia se advierte sobre todo en la ornamentación abstracta, “tan gestual como tachista, tan característica de esa imaginación bajo el signo de la libertad y jamás de la contención, de la improvisación pero nunca del cálculo, de la espontaneidad más provocativa y abiertamente vanguardista”⁷⁹⁶, cause todo tipo de reacciones entre los barceloneses de la época. Así, para este autor la simbología que más cree que se halla sujeta a la fachada es la de una evocación de Sant Jordi, el patrón



Fig. 156. Fachada principal de la casa Batlló. Fuente: ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 51.

de Cataluña. De modo que Gaudí representó, encarnado por el espinazo curvo del remate, el cuerpo del dragón, que herido de muerte por la lanza representada por la torre coronada por la cruz de la cubierta, derrama su sangre por la herida del hueco de bordes encarnados cerca de su espina dorsal, “y las barandillas de los balcones hacen pensar en los alveolos

⁷⁹⁵ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 152.

⁷⁹⁶ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 131.

oculares de las calaveras, así como en los huesos, en todas las formas que empleó para componer buena parte de la parte baja de la fachada, que evocan los restos de las víctimas que ha devorado el dragón”⁷⁹⁷ (Fig. 156).



Fig. 157. Zaguán que mediante la escalera da acceso al piso principal de los Batlló. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 133.



Fig. 158. Chimenea y puerta de perfiles sinuosos en vivienda de la casa Batlló. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 141.

La casa Batlló puede ser considerada una obra de arte total. “En el zaguán de entrada una escalera conduce directamente al piso principal, vivienda del propietario Batlló. Su residencia fue minuciosa y cuidadosamente creada por Gaudí, quien logró obtener así el conjunto más unitario, si exceptuamos el Palacio Güell” (Fig. 157). Y es que “la chimenea, las puertas casi tridimensionales (Fig. 158), el altar, las sillas, los cielos

⁷⁹⁷ *Ibidem*, p. 131.

rasos trabajados con bajorrelieves, la metalistería, etc”, así como los azulejos cerámicos con texturas en relieve de color azul degradado, en relación directa con la luz natural que entra en el patio interior, la solución dada a las agrupaciones altamente creativas de las chimeneas de la azotea, y los suelos del terrado realizados mediante la técnica del “trencadís”, etc., conducen a percibir el conjunto como un todo. “En esta casa también nos es dado descubrir y disfrutar de un paseo arquitectónico nacido mucho antes de lo que propusiera Le Corbusier: comienza en el vestíbulo, sigue por la escalera privada, entra en el recibidor, continúa por la sala de espera y termina en los salones privados”⁷⁹⁸.

Tan conforme quedó Batlló con el resultado que, a pesar de haberse salido de su presupuesto, no dudó en recomendar a su amigo Milá que contratara a Gaudí para realizar su casa también en el paseo de Gràcia.

La Casa Milá

De modo que, tras terminar la casa Batlló en 1906, Gaudí iniciaría las obras de la Casa Milá conocida popularmente como la Pedrera (la cantera, en castellano), y no sin sentido, ya que durante su levantamiento se podía ver como los obreros desde los andamios iban picando, bajo las indicaciones de Gaudí, la piedra de la fachada, “pareciendo una cantera en plena urbe”⁷⁹⁹. A diferencia de la casa Batlló, aquí se derribó el edificio anterior y se procedió a la excavación del terreno. Se trata de una composición asimétrica tanto en la fachada como en el interior, para la que el arquitecto creó un chaflán (Fig. 159),

una compleja estructura de piedra de El Garraf y de Vilafranca, que dejó a la vista con formas erosionadas escultóricamente, con la particularidad de que podía sostenerse de forma autónoma. Entre esa fachada y los muros de los patios se alza una estructura de columnas de hierro o piedra que sostiene las vigas de hierro de los diferentes niveles. Esta disposición posibilita unas plantas interiores libres que podían distribuirse a voluntad⁸⁰⁰.

“Tanto en la planta como en los alzados domina un tratamiento orgánico de líneas cóncavo-convexas. [...] Esta influencia está presente tanto en el tratamiento vertical como

⁷⁹⁸ Cfr. PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, pp. 131-138.

⁷⁹⁹ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí...*, p. 53.

⁸⁰⁰ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 154

en el horizontal, y esta doble ondulación ortogonal semeja una malla que estructura toda la superficie de su envoltura; a su vez, los huecos surgen tanto de las partes entrantes como de las salientes, contribuyendo a hacer más evidentes los ritmos de esta onda inestable”⁸⁰¹. Y es que, tal y como ya hemos referido anteriormente, “Las curvas redondeadas son curvas topológicamente equivalentes a un círculo que se obtiene por deformación continua de éste, y se erigen en sello característico del modernismo”⁸⁰².



Fig. 159. Fachada en chaflán de la casa Milá. Fuente: ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí* ..., p. 54.

Así quedaría formalizada esta casa en su fachada, como expresivo y ondulado mar pétreo salpicado de crestas de espuma metálica. Movimiento suavemente transmitido a los patios interiores y su rica policromía. A las blancas cubiertas fluctuantes, como etéreas nubes en la coronación de esta singular montaña de piedra. Y hasta en los cielos rasos de los distintos pisos, que suelen ser de líneas delicadas como arenas peinadas por la brisa y las corrientes submarinas⁸⁰³.

También, según escribe V. Scully,

Tanto en la planta como en los alzados, es como una escollera perforada por el mar, con la fachada tallada en la roca y pulida por la erosión del agua, donde cuelgan algas

⁸⁰¹ DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea*. Madrid: Celeste, 1997, pp. 148-152.

⁸⁰² GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma*..., p. 35.

⁸⁰³ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*..., p. 53.

metálicas marinas y se horadan ventanas como ojos... Parece encarnar una participación humana total en ritmos adoptados del mundo natural⁸⁰⁴.

No obstante, existen diversas especulaciones acerca de cual debió de ser la inspiración en que Gaudí se basó para llevar a cabo este proyecto: Así,

Joan Bergós creía que tuvo en mente las peñas de Fra Guerau, en la sierra de Prades, que conoció en su niñez, Joan Matamala pensaba en Sant Miquel del Fai, adonde le llevó su conocido afán excursionista. El escultor Vicente Vilarrubias se inclinaba por la montaña y la playa de Pareis, mientras que hay quien es más partidario del paraje de Calescobes, en Menorca. Tokutoshi Torii reproduce en su exhaustiva obra no pocas imágenes de lo más exóticas. Y Juan Goytisolo, en este caso más novelista que ensayista, ha dejado volar la imaginación nada menos que hasta una lejana Capadocia⁸⁰⁵.

Sin embargo, Según Lluís Permanyer se inspiró en el conjunto achaflanado que dibuja la cresta de Sant Sadurní, que se eleva sobre la verticalidad de Gallifa, en el Vallés Occidental, donde permaneció bastante tiempo, según el especialista Juan Bassegoda Nonell, para refugiarse de la grave epidemia de cólera que azotó Barcelona entre la primavera y noviembre de 1885. Sin embargo, para el arquitecto Alberto T. Estévez, “de nuevo una concepción formal abstracta y tectónica rige la concepción gaudiana. [...] Que por concisión, exactitud y fuerza expresiva, alcanza mucho realce en las ideas o imágenes mentales, hasta el punto de conquistar el territorio en el que el público entenderá su obra como figurativa, no hermética y, por tanto, próxima y amable”⁸⁰⁶. Luego, no debe plantearse la lectura de la obra de Gaudí en clave mimética, “el maestro catalán participa de la cultura del *Einfühlung*⁸⁰⁷ y del *Art Nouveau*, como de la del simbolismo, y anticipa

⁸⁰⁴ DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea...*, pp. 148-152.

⁸⁰⁵ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí ...*, p. 150.

⁸⁰⁶ ESTÉVEZ, A. T. *Gaudí...*, pp. 53-56.

⁸⁰⁷ Endopatía es la traducción del término estético y filosófico alemán *Einfühlung*, que fusiona la visión y sentimientos del observador sobre el objeto intuido. “Nace del compromiso entre el pensamiento idealista y la investigación psicológica para responder a la pregunta del por qué los hombres son atraídos o repelidos por las formas de los fenómenos, tanto en el arte como en la naturaleza. [...] Nicco Fasola escribe: «Nada de lo que percibimos actúa puramente por sí mismo, sino que todo actúa en conjunto, como resonancia de la afinidad que hay en nosotros». Se determinaba así una serie de símbolos y de formas cuya presencia permitía la lectura semántica de la arquitectura. Las líneas verticales, horizontales, oblicuas, las formas geométricas planas y volumétricas, las ilusiones ópticas y los colores se asocian y se aceptan o rechazan gracias a sensaciones análogas preexistentes en nosotros, como el sentido de la calma, de equilibrio, de incertidumbre y otros similares [...] Entre todos los estudiosos que se ocuparon de tales problemas, el arquitecto Henry Van de Velde hizo una interpretación y adoptó una metodología que convirtió el *Einfühlung* en uno de los principales soportes teóricos del *Art Nouveau*. «La línea es la fuerza -escribe en 1902- que actúa de la misma manera que las fuerzas naturales elementales: varias líneas de fuerza que se encuentran, actuando en sentido contrario en las mismas condiciones, producen los mismos resultados que las fuerzas naturales en oposición recíproca (...). Operan en estas líneas las mismas fuerzas que en la naturaleza están presentes en el viento, en el fuego y en el aire. El arroyo que se precipita contra la piedra que se opone a su curso cambia de dirección y dirige sus aguas contra la orilla opuesta, para socavar y minar sus márgenes. Los vientos que soplan contra las poderosas cimas de las montañas se rompen en sus masas inmóviles, y el fuego encendido bajo bóvedas de piedra se extiende, sube y se lanza en busca de la salida». Con estas observaciones, Van de Velde no sólo establece una relación entre acción y reacción que puede encontrarse tanto en la naturaleza como en el cálculo estático, sino, además, mediante un proceso de semejanza, explica el gusto

el cubismo. [...] Podemos decir que es un artista moderno, y como tal contrapone el artificio a la naturaleza (es indiferente aquí si está dictado por motivos religiosos, necesidades esenciales o manifestaciones oníricas). Si además la obra de arte adquiere capacidades evocadoras, y entre ellas las del mundo natural, al interpretarla debemos referir lo segundo a lo primero, y no al contrario”⁸⁰⁸.



Fig. 160. Vista aérea de las terrazas de la casa Milá. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 150.

Vista la fachada desde el exterior se advierten tres partes muy bien diferenciadas: las seis plantas ceñidas por los bloques sinuosos de piedra, los dos pisos de buhardillas que evidencian una ruptura de ritmo, así como de materia y también de color, y finalmente el terrado. [...] Este cuerpo del edificio aparece retranqueado hacia el interior, lo que le permite ser circunvalado por un inesperado camino de ronda, que presagia esa posibilidad de recorrer la arquitectura que se impone con extraordinaria fuerza sugestiva en el terrado⁸⁰⁹ (Fig. 160).

En el terrado, aprovechando la experiencia realizada en el Palacio Güell, Gaudí adopta una solución más vanguardista, creando volúmenes rotundos y valientes agrupados en tres tipologías funcionales: ventiladores, chimeneas y salidas de escaleras, adoptando estas últimas formas arbitrarias dentro de una uniformidad, entre las que destaca “la que aparece como recorrida por un látigazo que crea aristas sinuosas y rematada por una versión muy personal de cruz tridimensional”⁸¹⁰ (Fig. 161).

sinuoso por la línea, denominado «golpe de látigo», típico del Art Nouveau, refiriéndolo al movimiento y a la dinámica de las fuerzas naturales. Sin embargo, y esto es lo que más importa, «la línea extrae la fuerza de la energía de quien la ha lanzado». Con este comentario, Van de Velde no considera la obra del artista como un mimetismo naturalista pasivo”. En DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea...*, p. 106.

⁸⁰⁸ *Ibidem*, p. 153.

⁸⁰⁹ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí ...*, p. 160.

⁸¹⁰ *Ibidem*, p. 162.



Fig. 161. Distintas tipologías de los remates de los conductos en el terrado funcionales y escultóricos. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p 161.

Y es que “se llega con este edificio a la cumbre de la arquitectura que hace del movimiento su tema. Por tanto, privilegiada precursora de toda la vanguardia futurista, que nace cuando esta obra acaba, y que precisamente toma como objetivo clave la introducción del movimiento como tema abstracto del arte. También será un especial modelo de lo que un decenio después se configuró como la arquitectura expresionista alemana”⁸¹¹.

En definitiva, “la Pedrera, es la obra en la que Gaudí pudo avanzar más en su concepción de conjunto y realización efectiva y donde, por tanto, mejor se puede visionar hasta qué punto de intensidad puede llegar una obra genuina gaudiana”⁸¹².

A pesar de que no contó con artistas colaboradores a tiempo completo, como muchos de sus colegas, no obstante los pocos colaboradores que puntualmente tuvo daban lo mejor de ellos bajo las indicaciones que Gaudí les transmitía, el cual previamente había proyectado hasta el más mínimo detalle. Resultados tan asombrosos como los que nos ocupan lo ejemplifican. De modo que, en las fachadas de piedra esculpida de Gaudí,

se llega a saltar una generación entera, y con la precisión matérica de la casa Batlló y el dinamismo futurista de la casa Milá avanza hasta el entendimiento más propio de las vanguardias artísticas que de su época. Las carnosidades blandas de la casa Batlló sujetadas por débiles palillos fascinaron a Dalí, que realizó pinturas y esculturas con formas parecidas, entusiasmado con esta arquitectura que veía como protosurrealista. Él mismo comentaba que la arquitectura del futuro sería como la de Gaudí, blanda y peluda. Las olas suaves de la casa Milá superpuestas con espuma metálica serán a su vez motivo de inspiración para arquitectos expresionistas. [...] Así será propio de la capacidad gaudiana el abordaje simultáneo del gran concepto arquitectónico y del pequeño detalle



Fig. 162. Detalle ondulante de los techos del interior en la casa Milá. Fuente: ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 55.

⁸¹¹ *Ibidem*, p. 54.

⁸¹² ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí...*, p. 9.

doméstico, visible por ejemplo en los pilares interiores de la casa Milá, bajo formas abstractas, delicadas flores, anagramas religiosos y palabras enteras con diferentes versiones interpretativas”⁸¹³ [...] “Por fuera mantiene la imagen de cuevas excavadas en la roca para procurar nidos genesianos, exteriores pétreos que protegen interiores confortables. Mientras que por dentro se reviste de formas similares a suaves pieles vitelinas, de una delicadeza extrema en su diseño”⁸¹⁴ (Fig. 162).

En cuanto a los trabajos en madera, sobre todo muebles, sus acabados se “fueron puliendo con los años, para centrarse más y más en la tectonicidad limpia e inteligente, en una organicidad unitaria, en una plasticidad dinámica y abstracta que va fundiendo el soporte y lo soportado, y a su evocación de formas abstractas de la naturaleza”⁸¹⁵.



Fig. 163. Potente cromatismo del remate cerámico de la fachada de la casa Batlló. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 147.

En los trabajos con cerámica, Gaudí introdujo el sistema clave del “trencadís”, que acabaría teniendo un gran éxito, siendo incluso identificado como seña de identidad del modernismo catalán. Se trata de un término “literalmente traducible por “quebradizo” (de *trencar*, “romper”). Nombre que alude al carácter que tiene el mosaico de piezas cerámicas rotas irregularmente. [...] El sistema se adapta perfectamente a las curvadas superficies de su arquitectura aplicándolo en todas sus construcciones para resolver cualquier recubrimiento y detalle”⁸¹⁶. También realizó piezas cerámicas autónomas como los girasoles de El Capricho, las escamas de la casa Batlló o las palomas y hojas de ciprés en la Sagrada Familia,

que aparte de emplear materiales muy económicos y dúctiles, le permitieron aplicar el vivo cromatismo imprescindible y característico de sus obras. Más aun en la casa Batlló, ya que “el vivo colorido de piezas cerámicas y vidrio con que se reviste toda la

⁸¹³ *Ibidem*, pp. 67-69.

⁸¹⁴ *Ibidem*, p. 55.

⁸¹⁵ *Ibidem*, pp. 70-71.

⁸¹⁶ Cfr. ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 73.

construcción está en la línea del macropuntillismo con que Henri Matisse estaba iniciando en estos mismos años el fauvismo”⁸¹⁷ (Fig. 163).

Finalmente, en los trabajos con hierro sobre los que ya hemos hablado será donde Gaudí sacará “desde el principio el mayor rendimiento plástico y la conceptualización más avanzada para su tiempo”. Su maestría fue perfeccionándose “hasta llegar a su cumbre en las rejas, barandillas y balcones de la casa Milá”⁸¹⁸. Aquí, su colaborador Jujol fue culpable de la dimensión escultórica total que presenta esta obra. Por ejemplo, en los antepechos de los balcones, donde

cada barandilla es una pieza distinta, ejecutada de forma improvisada en el taller del forjador. [...] Y es que tan pronto como esta obra de Jujol fue terminada, dos escultores catalanes, Pau Gargallo y Juli González, descubrieron que era posible el empleo del hierro y esta es la razón por la que ellos fueron los primeros que aportaron tal materia a la historia de la escultura universal, hasta entonces nunca empleada. Y fue Juli González quien enseñó la técnica a Picasso⁸¹⁹ (Fig. 164).



Fig. 164. Detalle de las barandillas de los balcones de la Pedrera. Fuente: ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 6.

Finalmente, Casa Milá, junto a Parque Güell y Palacio Güell, fueron declarados Patrimonio Mundial de la Humanidad en 1984 por la UNESCO.

14.4.3. LA ONDA EN LAS ESCUELAS PROVISIONALES DE LA SAGRADA FAMILIA DE GAUDÍ

En definitiva, lo que queda claro es que, en su forma de concebir la arquitectura, Gaudí se inspiró en la geometría de la naturaleza, que contrapuso a la racionalista

⁸¹⁷ *Ibidem*, p. 50.

⁸¹⁸ Cfr. ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 76.

⁸¹⁹ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí ...*, p. 158.

geometría euclidiana, siendo elementos fundamentales en su obra las simetrías circulares, las esferas, los hexágonos, las curvas cónicas, los arcos parabólicos, catenarias y las superficies regladas. El propio Gaudí llegó a afirmar: “Soy geómetra, es decir, sintético. Yo lo calculo todo. [...] La geometría en la ejecución de las superficies no complica, sino que simplifica la construcción”⁸²⁰. De hecho,

una de las grandes aportaciones de Gaudí a la arquitectura moderna ha sido el uso constructivo de las superficies regladas. Muchas de ellas contaban con una historia destacada en el ámbito geométrico, pero fue precisamente Gaudí el primer arquitecto que se dio cuenta de su interés arquitectónico. Las descubrió en su época de estudiante, especialmente a partir de los estudios de geometría descriptiva del texto de C. F. A. Leroy de 1855, aunque fue a raíz de su redescubrimiento experimental, trabajando con modelos y maquetas, cuando incorporó progresivamente a sus proyectos todo el repertorio reglado⁸²¹.

Para Gaudí, “El uso de las superficies regladas es lógico por su superioridad plástica y su facilidad constructiva”⁸²². Y, en relación a la construcción de las bóvedas, “aseguraba que buscaba que sus formas tuvieran propiedades geométricas adecuadas a sus finalidades utilitarias, ornamentales y constructivas”⁸²³.

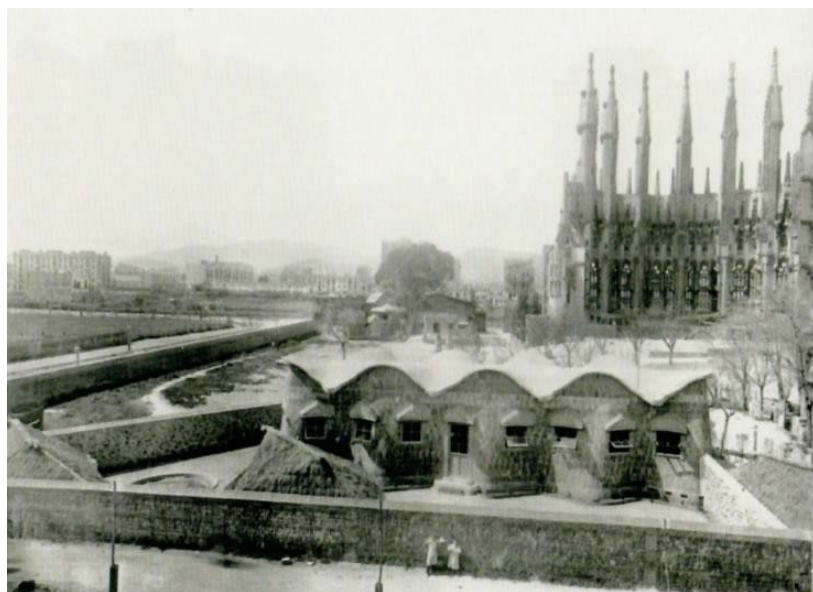


Fig. 165. Conoides de la cubierta y los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 90.

⁸²⁰ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 23.

⁸²¹ *Ibidem*, p. 36.

⁸²² *Ibidem*, p. 36.

⁸²³ *Ibidem*, p. 89.

Conoides sinusoidales gaudianos

En este apartado describiremos el uso de las superficies conoidales en las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia (Fig. 165), aunque este método ya lo había introducido primero en el modesto diseño de su obrador. El pequeño edificio de las Escuelas fue realizado durante los años 1909 y 1910, siendo concebido en principio para

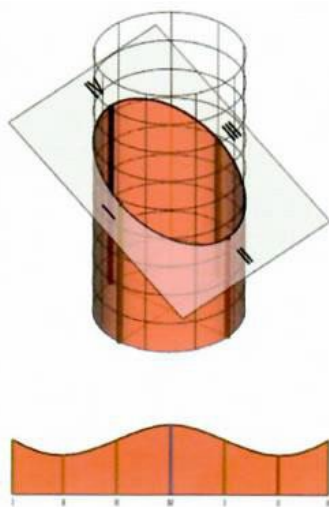


Fig. 166. Sección elíptica de un cilindro.
Al desplegar la superficie cilíndrica
seccionada se genera una senoide.
Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí*.
La búsqueda de la forma..., p. 90.

cumplir funciones provisionales, en un terreno libre aledaño al de la Sagrada Familia. A pesar de sus pequeñas dimensiones (10x20 m), estaba constituido por tres aulas independientes de planta irregular, un espacio de acceso con capilla y un patio pequeño exterior para los sanitarios, cubierto por un paraboloides hiperbólico. Para la cubierta del resto de edificios Gaudí proyectó conoides sinusoidales. Curiosamente estos perfiles son muy corrientes cuando se trabaja experimentalmente la geometría en el espacio. Aunque no sabemos de qué manera Gaudí los trabajó, varias formas sencillas de obtenerlos son las siguientes: “una hoja delgada de cartulina sobre la cual se ejerza presión con las manos simultáneamente por ambas caras adquirirá una forma sinusoidal. Asimismo, si cortamos un cilindro de papel según un plano inclinado respecto al eje del cilindro, obtendremos la sección elíptica del cilindro (Fig. 166), que, desarrollada, dará una curva sinusoidal. También puede obtenerse una senoide a partir de la sombra de una hélice de alambre”⁸²⁴.

Como ya explicamos en el apartado dedicado a la onda, las formas sinusoidales abundan en la naturaleza. Ejemplos de ello: “en las olas del mar, en los movimientos serpenteantes, cuando miramos las líneas de cresta lejanas, o en suaves perfiles presentes en formas vegetales y animales. Según el estudioso George R. Collins, los perfiles de la concha del tacoblo, utilizada a menudo por el arquitecto en el interior de las iglesias para poner agua bendita, podrían haberle inspirado las formas de las cubiertas del obrador y también de las Escuelas provisionales”⁸²⁵.

⁸²⁴ *Ibidem*, p. 90.

⁸²⁵ *Ibidem*, p. 90.

En el recinto de las Escuelas todas las superficies están hechas en la tradición de la bóveda catalana, tabicada con medios económicos. Mediante tres capas de ladrillo cerámico manual macizo visto, que aumentan notablemente la resistencia de esta ligera construcción basada en el juego alterno de concavidades y convexidades con perfiles impecables, se lograba asimismo un desagüe óptimo de la cubierta. También para el levantamiento de la cubierta sinusoidal se emplearon medios muy sencillos: series de tabloncillos apoyados en los muros perimetrales conoidales, y, en su caso, sustentados en una jácena metálica intermedia. Gaudí observó que los tabloncillos de pendiente variable empleados para los tabiques laterales le servían de guía para hacer la cubierta, lo que explica, unido a buscar un efecto más dinámico y atractivo para los niños que la monotonía tradicional plana de las paredes, su uso en ambos elementos, pared y cubierta. También hay que observar que geoméricamente las partes inclinadas parcialmente están limitadas, arriba por la cubierta sinusoidal, y abajo, siguiendo un perfil sinuoso alternando arcos de circunferencia y tangentes interiores a dos circunferencias (Fig. 167).

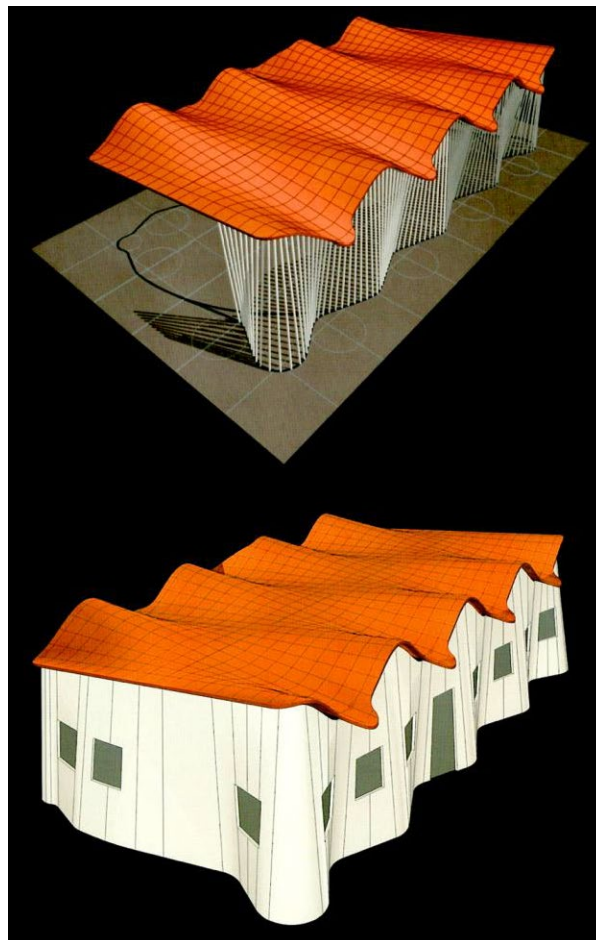


Fig. 167. Modelización informática de los conoides de la cubierta y de los muros de las Escuelas Provisionales de la Sagrada Familia
Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 94.

Este pequeño edificio vuelve a corroborar que su obra es precursora de todas las formas regladas alabeadas que Naum Gabo y Antoine Pevsner usarían en la fundación de la escultura abstracta, o que se pondrían de moda muchos decenios después desde la obra de Pier Luigi Nervi y Félix Candela, por poner algunos ejemplos de arquitectura”⁸²⁶. También se ha dicho que la cubierta de las Escuelas fue objeto del famoso croquis que Le Corbusier hiciera con motivo de su visita a Barcelona en 1928, “sirviéndole de inspiración para obras como el pabellón Philips en la Exposición Universal de Bruselas, y la misma iglesia de Ronchamp”⁸²⁷. Sin embargo, es muy probable que lo que le llamara la atención en aquel entonces fuera el obrador (Fig. 168) de Gaudí, que también se hallaba situado próximo a la manzana de la Sagrada Familia, concretamente haciendo chaflán entre las calles Sardenya y Provenza. Se trataba de una construcción muy interesante en la que Gaudí ensayó sus primeras cubiertas ondulantes, y que entre 1887 y 1906 fue creciendo orgánicamente a medida que Gaudí lo necesitó. Y es que Gaudí empleó este obrador en vez de usar un despacho de arquitecto convencional. En él llevó a cabo todos sus proyectos, contando con “un taller fotográfico, un espacio para hacer esculturas, un almacén para guardarlas, una amplia zona para confeccionar maquetas de yeso, espejos para ensayar visiones indirectas, campanas tubulares para estudiar sonoridades, techos móviles para experimentar la iluminación y una infinidad de “modelos” de los que se servía para investigar activamente soluciones óptimas”⁸²⁸. En definitiva, “todo estaba permitido en ese espacio, a medio camino entre el taller de artista romántico y los laboratorios de ensayo modernos” ⁸²⁹ , siendo donde también guardaba toda su documentación que, desgraciadamente, acabó siendo destruida en 1936. En la actualidad, debido a su interés arquitectónico, el edificio está proyectado para ser reconstruido en el mismo solar.



Fig. 168. Conoide de la cubierta del obrador de Gaudí.
Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 90.

Al final, esto es lo espectacular, lograr con inteligencia más con menos: formas de gran delicadeza y plasticidad, que se despliegan en movimiento constante, coseguidas desde

⁸²⁶ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 86.

⁸²⁷ *Ibidem*, p. 56.

⁸²⁸ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 28.

⁸²⁹ *Ibidem*, pp. 21-22.

criterios funcionales y estructurales, de ahorro de material, donde todo es lo estrictamente preciso para obtener el mayor rendimiento físico y metafísico con el menor coste y esfuerzo. Es lo que caracteriza el quehacer de un genio⁸³⁰.

14.4.4. LA ONDA EN OBRAS DE LE CORBUSIER

El arquitecto y urbanista suizo nacionalizado francés, Charles-Édouard Jeanneret-Gris, más conocido desde la década de 1920 como Le Corbusier, fue uno de los más grandes, influyentes y renovadores de la arquitectura moderna. Perteneció a una familia de grabadores y pintores, por lo que comenzó su formación de juventud como grabador y cincelador en la Escuela de Arte de La Chaux-de-Fonds, encaminándose poco a poco hacia la pintura y la arquitectura. A los 29 años irá a París, donde adoptará el hormigón armado como instrumento para expresar su concepción de la arquitectura. También viajará a Alemania, a Grecia, Italia y el Próximo Oriente, extrayendo de allí elementos que influirán en la construcción de su obra moderna. Igualmente, la obra de Le Corbusier se verá influenciada por la pintura contemporánea, concibiendo ambas disciplinas, pintura y arquitectura, como dos caminos para llegar al mismo objetivo.

Al igual que Picasso y Braque, Le Corbusier adoptará dentro de la arquitectura una concepción del espacio con una visión simultánea del exterior y el interior. En su obra “el espacio es dinámico y activo en su volumen: Es parte constitutiva de la forma total”⁸³¹. “En los edificios del siglo XVII de Francisco Borromini observamos ya esta especie de tentativa en busca de tal compenetración. Pero esta compenetración del espacio total y de los elementos del espacio podía realizar un ulterior progreso solamente en una época en que tanto el arte como la ciencia, simultáneamente, consideran el espacio como entidad multilateral y relativa”⁸³². Tanto es así que el pensamiento plástico de Le Corbusier se manifestará, a la hora de abordar cualquier proyecto que venga precedido de una profunda investigación de la realidad, a través del filtro cubista: empleando mecanismos como la fragmentación analítica del objeto y del espacio, adaptando escenografías espaciales y lumínicas, empleando tramas y ensamblajes multidimensionales, etc. Le Corbusier llegará a desarrollar todo un vocabulario personal capaz de adaptarse a las circunstancias de cada ocasión, pudiendo reducir cualquier

⁸³⁰ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 57.

⁸³¹ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea ...*, p. 95.

⁸³² GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, pp. 535-536.

problema complicado a fórmulas de claridad lapidaria sin perder de vista los principios fundamentales, permitiendo que, tras el planteamiento de las primeras hipótesis, se vaya desarrollando todo el proceso lógico conceptual, del que finalmente emerja una solución que valide universalmente el resultado final. Si bien Le Corbusier, al igual que Sant’Elia, definiría la casa como una máquina, planteará ya en 1929 la siguiente pregunta: “¿Limitaremos el problema al cumplimiento de la mera finalidad? [...] Entonces habría que definir con más precisión la finalidad. La poesía, la belleza y la armonía ¿forman parte de la vida del hombre moderno, o acaso hay para él solamente las funciones mecánicas de la máquina de habitar? Y su respuesta es ésta: Creo que la búsqueda de la armonía es la pasión más bella del ser humano. El objetivo es preciso; dentro de su infinitud, es largo, porque se extiende a todo”⁸³³.

Según Giedion, “la arquitectura de nuestros días es un organismo muy complicado en el cual los elementos de que se compone, tanto visibles como invisibles, no proceden de ninguna fuente determinada. Situado frente a este complicado organismo, Le Corbusier cumple su cometido de suma precisión. Con seguro instinto artístico, dispone los varios elementos de modo que resulte un dibujo claro y evidente para todos”⁸³⁴.

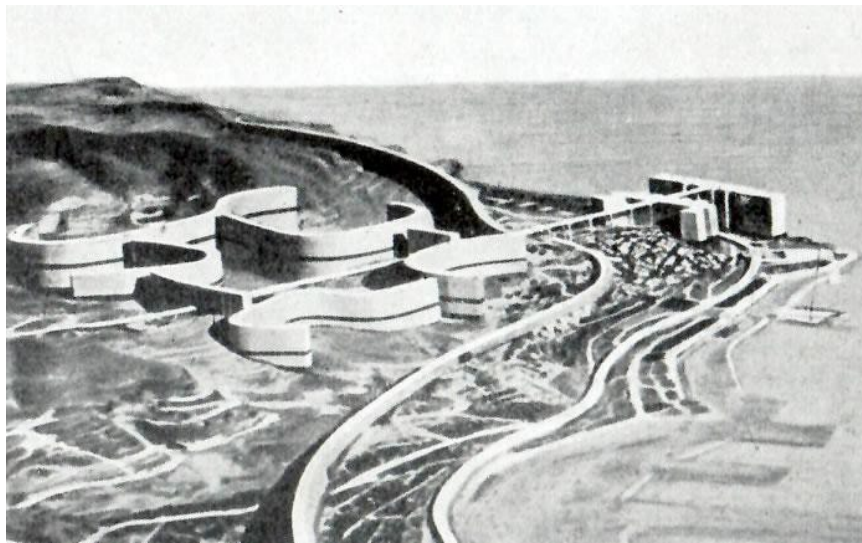


Fig. 169. Proyecto de rascacielos en Argel, 1931. La concepción del espacio en el último barroco se halla muy próxima a soluciones contemporáneas como ésta. Fuente: GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 161.

Una de las obras que mejor evidenciará los elementos anteriormente descritos será el proyecto de 1931 para el mejoramiento de Argel (Fig. 169), para el que Le Corbusier construyó una serie de líneas sinuosas de rascacielos adaptados orgánicamente a los

⁸³³ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea ...*, p. 95.

⁸³⁴ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 535.

accidentes del terreno, y donde cada vivienda individual tiene acceso a su terraza y jardín. Sin embargo, esta solución será tomada por Le Corbusier teniendo como referencia, en la misma línea orgánica compuesta de unidades celulares, “la manifestación más moderna y actual del método y del gusto neoclásico”⁸³⁵, los famosos “Crescents” de Bath (Fig. 170), ciudad situada al suroeste de Inglaterra que, construida en el siglo XVIII para el esparcimiento de la nueva sociedad burguesa enriquecida, se haría famosa por sus aguas termales. El denominado *Landsdowne Crescent* (Fig. 171), es un complejo urbano constituido de tres líneas sinuosas en serpentina, orgánicamente acomodadas a las elevaciones del terreno, que fue construido en la parte alta de la ciudad de Bath, con la finalidad de poder gozar al máximo de la luz y del sol, por el arquitecto John Wood, quien además de arquitecto, era contratista, especulador y artista. Posteriormente el proyecto fue completado por su hijo, que construiría el famoso *Circus* en 1764, y en 1769 el *Royal Crescent*, formando un conjunto de viviendas unidas y adoptando la forma de una elipse abierta a un extenso prado en descenso hacia el valle. Según la descripción de Giedion:

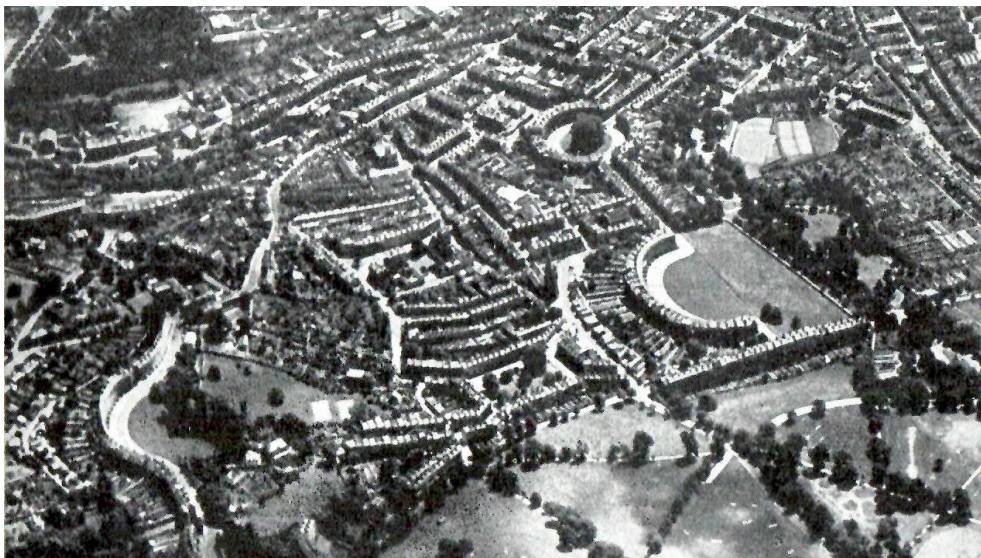


Fig. 170. Bath y sus «Crescents». Vista aérea. Cercanos al centro se hallan el «Royal Crescents» y el «Circus»; abajo, y a la izquierda, el «Landsdowne Crescents». Fuente: GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 160.

Este “Crescent” mantiene incorporados dos hechos fundamentales de los siglos precedentes: el uso de la fachada ondulada de Borromini, para dotar de un sorprendente movimiento y flexibilidad a las angostas calles de Roma, reaparece aquí, en la curva en serpentina de su perfil. Su otro precedente fue Versalles, el primer gran edificio que se halla situado enfrente de un inmenso parque en vez de estar erigido en medio de las calles

⁸³⁵ DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea...*, p. 44.

estrechas de la ciudad. La manera como fue colocado este grupo residencial así, en contacto con la Naturaleza, y la impresión de libertad sin trabas o impedimentos que de él resultaba, le hizo el punto de partida para experimentos posteriores. Una libertad del mismo género caracteriza al *Landsdowne Crescent*. La combinación de movimiento, algo inesperada, y el ser tan despejadas, hace de estas casas exactamente lo que toda residencia tendría que ser: el lugar más a propósito para vivir, el ambiente más adaptado al reposo⁸³⁶.

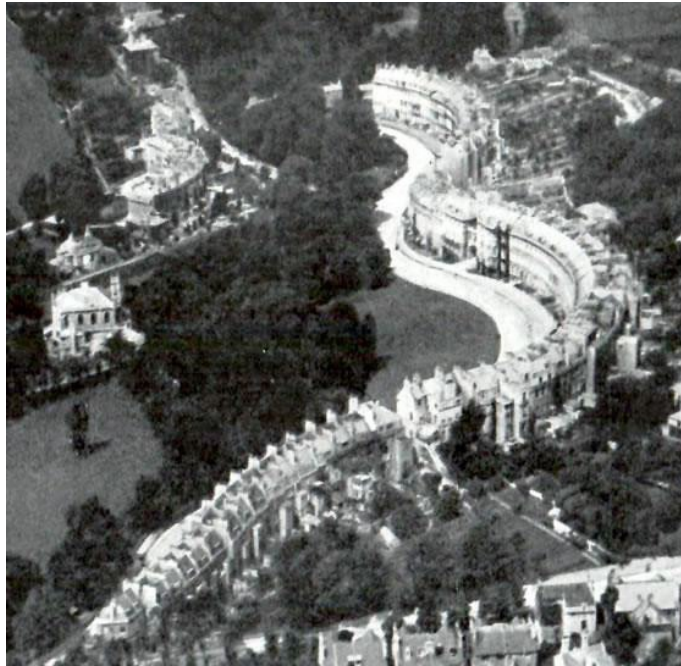


Fig. 171. El «*Landsdowne Crescents*», Bath, 1764. Sus serpenteantes sinuosidades se adaptan a las ondulaciones del terreno. Fuente: GIEDION, *S. Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 113.

La segunda obra de Le Corbusier que queremos mencionar en este apartado de la onda es la iglesia de Ronchamp (1951), considerada precursora del Organicismo. En este proyecto Le Corbusier también dejará de lado las líneas rectas propias del movimiento moderno, creando este pequeño edificio de planta irregular y formas sinuosas.

Y, por último, también citaremos la innovadora fusión artística que Le Corbusier proyectó para el Pabellón Philips (Fig. 172). Concebida como una construcción efímera, fue un encargo de la empresa holandesa Philips para la exposición de Bruselas de 1958, donde Le Corbusier trabajó en colaboración multidisciplinar con el arquitecto y músico Iannis Xenakis. Como diría el propio Le Corbusier, se trataba de un “jarrón contenedor”, de un “poema electrónico” en “síntesis orgánica”. Modelado por una composición

⁸³⁶ GIEDION, *S. Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición) ...*, p. 160.

asimétrica de paraboloides hiperbólicos, formados de piezas de hormigón prefabricado articulado, su función era la de servir de escenario en el que proyectar un espectáculo multimedia mediante el desarrollo innovador de técnicas digitales, integrando arquitectura, música, ingeniería y artes visuales. “La impresión de conjunto del edificio ya no viene determinada por los valores de superficie, sino por la configuración básica dinámico-plástica del exterior y la configuración básica dinámico-espacial del interior”⁸³⁷.

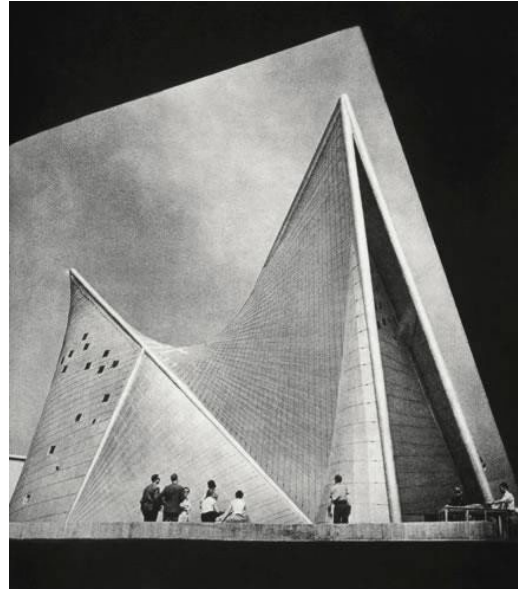


Fig. 172. Pabellón Philips Expo 58/ Le Corbusier y Iannis Xenakis (1958). Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-285062/clasicos-de-arquitectura-pabellon-philips-expo-58-le-corbusier-and-iannis-xenakis/517d3aff6b3fc4b8342000012-clasicos-de-arquitectura-pabellon-philips-expo-58-le-corbusier-and-iannis-xenakis-imagen>

Todas estas construcciones demuestran claramente que no hay que encasillar a Le Corbusier en una sola de las posibilidades existentes de la nueva construcción, porque él abarca todas las posibilidades y a todas las direcciones les dio un soberano impulso. El criterio decisivo sigue siendo para él el efecto causado sobre el ser humano; no la ostentación, el detalle, sino la fuerza activa central de un conjunto de orden configurado que se extiende más allá de las funciones utilitarias racionales⁸³⁸.

14.4.5. LA ONDA EN OBRAS DE ELADIO DIESTE

Nacido en 1917 en Artigas, Uruguay, Eladio Dieste formará parte de un selecto grupo de ingenieros de vocación y arquitectos de pensamiento que, viviendo en la periferia de la considerada civilización avanzada, logrará imaginar y construir obras absolutamente originales y económicas, adaptadas a los medios disponibles, llegando a dar un paso más en el desarrollo de la técnica constructiva cerámica para levantar bóvedas tabicadas. Arquitectos como Rafael Gustavino y Moreno, Gaudí, Luis Moya, Eduardo Torroja o Félix Candela, entre otros, ya habían sido precursores de ello. Dieste logrará ser reconocido mundialmente por el uso del método que él mismo denominó cerámica

⁸³⁷ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea* ..., p. 153.

⁸³⁸ *Ibidem*, p. 100.

armada postensada, que consideraba “una alternativa natural del hormigón armado”⁸³⁹.

Por otra parte, Dieste, cuyas principales obras desarrollará entre los 60 y 70, se opondrá al sistema de descomposición del proyecto en planos, basado en fórmulas abstractas simplistas, al considerar que son un obstáculo para alcanzar lo que, según su visión, conduce a una obra “artística”, cuyas “estructuras sentidas, concebidas y construidas especialmente, nos conmueven y atraen porque resultan misteriosamente expresivas. Y si pensamos en la causa, veremos que nuestra emoción se debe en primer lugar a que en ellas nuestro espíritu percibe, de manera sintética e intuitiva, una adecuación más ajustada a las leyes que rigen la materia en equilibrio”⁸⁴⁰.



Fig. 173. Movimiento ondulante en las paredes y techo de la iglesia La Atlántida de Dieste. Fuente: <http://arquitecturazonacero.blogspot.com/2013/10/eladio-dieste-escritos-y-obras-1943-1996.html>

“Los diseños de Dieste se basan en el estudio de la forma y en el análisis de su relación con las leyes que rigen el equilibrio de la materia. La forma de sus estructuras es el principal factor determinante de la capacidad portante y, en este sentido, sus obras desarrollan tanto las ideas de Robert Ricolais de que un modelo geométrico debe surgir de una determinada acción mecánica, como de D’Arcy Thompson de que las formas son

⁸³⁹ MARÍN, A. M.^a y BARLUENGA BADIOLA, G. “Eladio Dieste y la cerámica armada. La forma de lo resistente”. *Arquitecturas del Sur*, Vol. 32, N.º 45, 2014, p. 92.

⁸⁴⁰ GUTIERREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX*. Madrid: Lunwerg, 1998, p. 46.

modeladas por las fuerzas físicas”⁸⁴¹. En este sentido Dieste afirmará:

Hay pues hondas razones morales (y prácticas, que vienen a ser lo mismo) para nuestra búsqueda. Intentarla es dar forma a nuestra obra, o sea que es con la forma de lo que hagamos como podremos ajustarnos a las leyes de la materia, y hay en el intento y en aquella búsqueda toda la nobleza y la reverencia que supone el diálogo con la realidad y su misterio, y la misma lucha nos muestra que no es extraño a nosotros, sino que está con nosotros en esencial comunión. Las virtudes resistentes de las estructuras que buscamos dependen, pues, de su forma; por medio de ella son estables, no por torpe acumulación de materia, y nada hay más noble y elegante, desde un punto de vista intelectual, que resistir por la forma, y tampoco nada que nos imponga más responsabilidad plástica⁸⁴².

La arquitectura es un arte, quizás el más importante, ya que conforma el espacio en que nos movemos, y tiene de común con otras artes el ayudarnos en la contemplación del universo por su misma indefinición infinita y, por tanto, racionalmente inasible. Si pudiéramos conocerlo de una manera perfecta no haríamos arte: contemplaríamos simplemente. Ese momento final que, como relámpago de visión, nos permite contemplar la armonía e inteligencia del mundo es el momento del arte, sin que esto signifique que sólo por el arte podemos contemplar. [...] No toda la arquitectura que hagamos podrá aspirar a ser arte en este último sentido; debe haber prosa y poesía; danzas populares y cantatas de Bach⁸⁴³.

Dieste fue uno de esos innovadores que creó su técnica de la cerámica armada desde el estudio y para dar respuesta a las necesidades impuestas por la industria, llegando a patentar distintos sistemas adaptados a la construcción, tanto de naves como de infraestructuras (silos, torres de agua, estaciones de servicio), hasta de edificaciones de uso común (como iglesias o gimnasios), donde aplicó como elementos constructivos “diagramas, cúpulas, bóvedas y superficies plegadas o regladas de doble curvatura”⁸⁴⁴. “Usando sencillos moldes, con una parte básica de acero y dispositivos mecánicos que permiten moverlos horizontal y verticalmente con gran facilidad, podemos fabricar láminas de doble curvatura a la que la ondulación longitudinal variable dé la necesaria rigidez frente a la flexión y la inestabilidad elástica. Todas las secciones transversales son catenarias, con lo que, ante el peso propio, la lámina resulta sometida a flexiones muy

⁸⁴¹ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 193.

⁸⁴² GUTIERREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX*..., p. 46.

⁸⁴³ *Ibidem*, p. 47.

⁸⁴⁴ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 193.

pequeñas”⁸⁴⁵. De este razonamiento nacen las *bóvedas gausas*, “que geoméricamente podrían definirse como una catenaria de cuerda fija y flecha variable que se desplaza a lo largo de un eje, de modo que los arranques definen dos rectas paralelas contenidas en un mismo plano horizontal”⁸⁴⁶. “Las *bóvedas gausas* de cerámica armada de Dieste podrían considerarse, hasta el día de hoy, como el máximo nivel alcanzado de *optimización formal*”⁸⁴⁷.

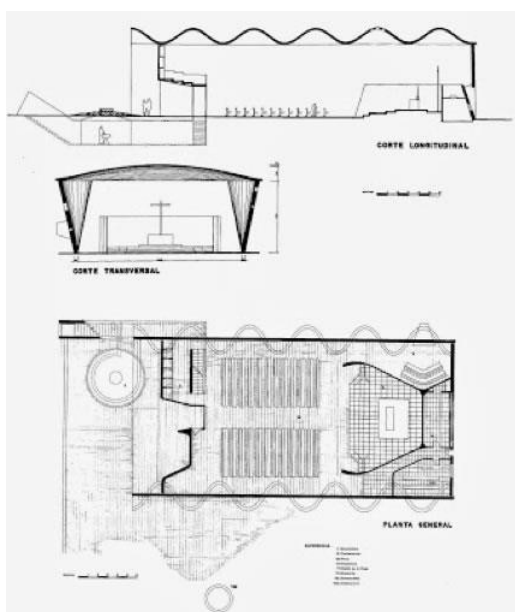


Fig. 174. Sección, Alzado y Planta de la iglesia La Atlántida de Dieste Fuente: <http://arquitecturazonacero.blogspot.com/2013/10/eladi-o-dieste-escritos-y-obras-1943-1996.html>

Una de las obras más destacadas, de entre las múltiples realizadas por Dieste, en que alcanzará su cénit empleando la *bóveda gausa*, será la iglesia La Atlántida, construida en el Departamento de Canelones, en 1960 (Fig. 173). Alberga una nave de 16 m de ancho por 30 m de profundidad y una altura libre interior de 16 m. (Fig. 174). “Las paredes laterales, de 7 metros de altura, se definen geoméricamente a través de una sucesión de conoides de directriz recta a nivel del suelo, y parabólica a nivel de la carrera superior; forman, junto a la bóveda, una estructura aporticada de gran rigidez lateral”⁸⁴⁸.

La Atlántida es puro movimiento. Las paredes y los techos forman una suerte de mantos suavemente ondulados, petrificados en ladrillo, que conducen al visitante hacia el altar envuelto en la tenue luz que se filtra por los pequeños huecos practicados en las cabezas de las inclinadas cáscaras laterales (conoides de directriz recta). El presbiterio se marca en el espacio con una gruesa pared de ladrillo que se detiene a mitad de altura de la nave, dejando pasar visualmente, y por detrás de él, la *marea* de las dos ondas laterales que se detienen sobre un paño ciego que cierra el fondo de la iglesia. La fachada invita a acceder al templo con los brazos abiertos que forman el arranque de los planos ondulados de los cerramientos laterales; sobre una simple abertura que señala la entrada, Dieste elabora un delicado tema en cerámica, un retablo geométrico resuelto de tres franjas horizontales en las que se van alternando estrechos huecos girados respecto de la directriz del plano de

⁸⁴⁵ GUTIERREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX...*, p. 48.

⁸⁴⁶ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 195.

⁸⁴⁷ *Ibidem*, 198.

⁸⁴⁸ *Ibidem*, 202.

fachada, y sobre el que se levanta el primer “labio” de la cubierta cerámica. La torre, esquinada en un lateral de la parcela, retoma ancestrales técnicas constructivas para ofrecernos una esbeltísima columna calada compuesta por apretadas pilastras de ladrillo, arriostradas por los peldaños prefabricados de la escalera helicoidal que alberga, y que se muestran al exterior con un ritmo de increíble plasticidad⁸⁴⁹ (Fig. 175).



Fig. 175. Perfil sinuoso de la pared de la iglesia La Atlántida. Fuente: <https://www.architectural-review.com/archive/church-atlantida-uruguay-by-eladio-dieste>.

También se especializará en la construcción de *bóvedas autoportantes*,

bóvedas de directriz catenaria que no necesitan de los pesados tímpanos de las clásicas láminas autoportantes. Construidas las vigas-losas horizontales de borde, que se mantienen apuntaladas mientras se moldea la bóveda, y se diseñan para que resistan sus empujes, y una vez construidos los “valles” entre las bóvedas, que también se mantienen apuntalados, puede luego construirse la lámina por franjas, los empujes de las cuales se eliminan entre sí en los valles entre bóvedas y son resistidos en los bordes por las vigas-losas. Dejando las armaduras (de hierro común o de cables de precomprimido) en los sitios convenientes, después de endurecidas las bóvedas, y precomprimidas si es el caso, puede eliminarse el apuntalamiento de valles y vigas-losa, consiguiéndose la construcción de una lámina autoportante, con molde móvil, cuya superficie es una pequeña parte del área a cubrir, evitándose los caros enconfrados totales necesarios con otros tipos de láminas autoportantes; la experiencia muestra que son racionales y económicas para el techado de los grandes espacios que requieren la industria, las estaciones, los hangares, etc.⁸⁵⁰.

Se trata de un procedimiento constructivo sin duda más convencional que el de las *bóvedas gausas* o de doble curvatura, pero tal y como es utilizado por Dieste adquieren también el rango de una auténtica invención estructural. Dieste emplea las bóvedas gausas cuando el principal requerimiento es el de salvar luces transversales de más de 20 m, eliminando totalmente los apoyos intermedios y dejando el espacio interior diáfano y libre de obstáculos. El uso de las bóvedas gausas es todavía más pertinente si, además, se requiere incorporar luz natural a esos espacios a través del techo. Por el contrario, cuando

⁸⁴⁹ <http://arquitecturazonacero.blogspot.com/2013/10/eladio-dieste-escritos-y-obras-1943-1996.html>.

⁸⁵⁰ GUTIERREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX...*, p. 48.

es posible hacer llegar la luz natural por los flancos laterales, no causa molestias a la actividad la presencia de pilares intermedios, Dieste suele optar por las bóvedas autoportantes, más económicas y de más fácil ejecución. [...] Las bóvedas autoportantes no requieren apoyos situados en el extremo de la cáscara, lo cual permite la formación de grandes áreas cubiertas en voladizo⁸⁵¹.

Así levantará, en 1984, el Centro Comercial Montevideo, ubicado en un barrio residencial en la Rambla sobre el Río de la Plata (Fig. 176). En una primera fase, para realizar la cubierta superior, empleará tanto bóvedas cilíndricas de cañón corrido como de doble curvatura, con ladrillos huecos unidos mediante mortero de arena y portland.



Fig. 176. Fachada lateral del Centro Comercial Montevideo de Dieste. Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/538039486708679951/>

Los muros fueron proyectados ondulados y de doble ladrillo aprovechando el desnivel del suelo, cumpliendo no sólo una función estructural, sino generando además un movimiento de luces y sombras que da ritmo al espacio (Fig. 177). En una segunda etapa se construyó un cuerpo de dos niveles que intercepta el centro del edificio anterior, integrando el complejo comercial. El techo de bóvedas es similar al de la primera etapa, pero de menor metraje.

⁸⁵¹ https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12194/DPA%2015_26%20MART%C3%8D.pdf

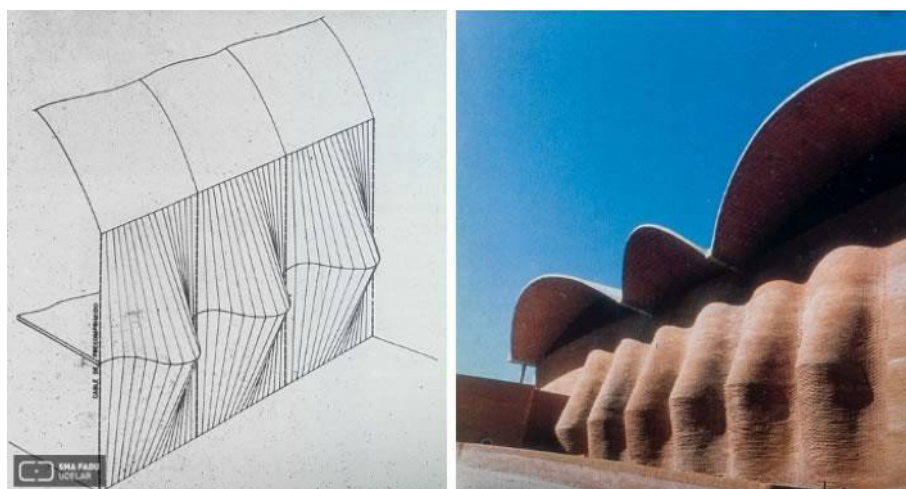


Fig. 177. Detalle de bóvedas de doble curvatura en la fachada trasera del Centro comercial Montevideo de Dieste. Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/montevideo-shopping-center/>

Y es que, en general, “Dieste se mostró muy crítico con las consecuencias de la revolución industrial, pues aunque, a su parecer, conllevó un desarrollo técnico-científico importante, también dejó en abandono los valores universales, y trajo una pérdida de la concepción de la obra como un “todo”, concibiendo ese todo como el pleno logro del hombre”⁸⁵². Dieste, desde su época estudiantil, admirará especialmente al ingeniero Freyssinet, ya que, a su juicio, valoraba al igual que él el trabajo artesanal. Y es que,

aunque los resultados plásticos de ambos sean diferentes, la forma de enfrentarse cada uno de ellos al material que crean, hormigón pretensado y cerámica armada respectivamente, es muy similar. Ambos fueron proyectistas y constructores, y cuando concebían una obra no se limitaban a pensarla acabada, sino que planificaban escrupulosamente todo el procedimiento constructivo que había de hacerla posible, conociendo y ejerciendo todos los oficios que los nuevos materiales conllevaban. [...] Diseñaron, asimismo, la maquinaria necesaria para poder pretensar, uno el hormigón y el otro la cerámica -porque Dieste también realizó estructuras pretensadas y postensadas en ladrillo-. Utilizaron, por último, mano de obra sin cualificar que ellos personalmente se encargaban de contratar y, posteriormente, de capacitar. En suma, fueron los primeros en idear, pero también los primeros, cada uno con su material, en poner lo pensado en práctica⁸⁵³.

⁸⁵² MARÍN, A. M.^a y BARLUENGA BADIOLA, G. “Eladio Dieste y la cerámica armada. La forma de lo resistente” ..., p. 92.

⁸⁵³ *Ibidem*, p. 93.

Finalmente añadiremos que, al hablar del proceso de creación, Dieste diría: “aguda, casi dolorosa necesidad de coherencia y ajuste formal de lo construido. Me atrevería a decir que ella estuvo presente, conscientemente o no, desde el principio, ya que la coherencia formal, el primer eslabón de lo que llamamos goce estético, es un muy sutil registro interior que nos va exigiendo que lo que hagamos se ajuste a las virtudes y capacidades de los materiales que usemos, única manera de construir seria y fundamentalmente”⁸⁵⁴.

En definitiva, se podría decir que Dieste para determinar la forma de estas bóvedas mediante el empleo de la catenaria y de la doble curvatura, así como su personal concepción arquitectónica, estará implicando un diseño ajustado a las leyes de la autoorganización de la materia.

14.4.6. LA ONDA EN EL AUDITORIO Y LA MARQUESINA DEL CENTRO NIEMEYER. COMPLEJO INTERNACIONAL DE LA CULTURA

También en la década de 1940 será cuando Oscar Niemeyer, en proyectos como el de sus edificios en torno al lago Pampulha en Belo Horizonte (Minas Gerais; Brasil), empiece a definir su espíritu innovador, liberándose del uso convencional del hormigón armado. En este conjunto arquitectónico Niemeyer definirá, por primera vez, su postura ante las reglas de la estática, ya que la organización tectónica no requiere el empleo de vigas rectilíneas, ni columnas ni ángulos. Será tanto en la iglesia como en el resto de los edificios del conjunto de Pampulha, “donde, por primera vez, la curva aparece haciendo contrapunto con las líneas rectas de las estructuras, hasta entonces consagradas. La curva comparece en las paredes sinuosas y los techos abovedados, haciendo que la vista recorra caminos insospechados”⁸⁵⁵. No obstante, a pesar de adoptar una tipología novedosa no se apartará de la tradición litúrgica, ya que, por ejemplo, en el diseño de la iglesia, seguirá fielmente el programa litúrgico respecto a los ancestrales criterios compositivos, tales como la disposición separada de la torre del Templo, el baptisterio lindero al acceso, el púlpito elevado y la iluminación dirigida al altar, mediante el empleo del desencuentro de dos bóvedas.

⁸⁵⁴ GUTIERREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX...*, p. 49.

⁸⁵⁵ *Ibidem*, p. 377.

Y es que Niemeyer también será un enamorado de las líneas curvas y sinuosas llegando a aseverar: “No es el ángulo recto lo que me atrae, ni la línea recta, dura, inflexible, creada por el hombre. Lo que me atrae es la curva libre y sensual, la curva que encuentro en las montañas de mi país, en el curso sinuoso de los ríos, en las olas del mar, en el cuerpo de la mujer preferida. De curvas está hecho todo el universo, el universo curvo de Einstein”⁸⁵⁶. En definitiva, “Oscar Niemeyer es un maestro de la inocencia. Más allá de la geometría elemental y la gramática cubista que aprende de Le Corbusier, más allá de las formas curvas y la libertad lírica que provienen del surrealismo o del dadá, y más allá del futurismo naïf y la estética aerodinámica que utiliza el optimismo de los cincuenta, este creador tropical construye con la ignorancia sabia de quien pone la ley del deseo por encima de la ley de la gravedad”⁸⁵⁷.

De modo que, siguiendo estas premisas, trabajará en numerosos proyectos a lo largo de su extensa carrera, llegando a ser mundialmente reconocidas sus intervenciones para la ciudad de Brasilia, que encarnará una de las utopías arquitectónicas y urbanas del siglo XX. Edificios públicos como la *Catedral* (1987), o el Palacio Itamaray (1970), entre otros, llevarán el sello formalista-escultórico de Niemeyer. En 1966 se verá obligado al exilio en Europa, escogiendo como residencia París, donde seguirá recibiendo numerosos encargos de distintos países. En los setenta regresará a Brasil, donde seguirá trabajando también en proyectos internacionales como el *Centro Niemeyer* que realizará en 2006, formando parte del proyecto “isla de innovación” de la ciudad de Avilés en el Principado de Asturias en España, de la que el propio Niemeyer dirá: “Es un trabajo que concebí especialmente para un país que tiene un enorme peso cultural y que marca un momento decisivo en mi trayectoria de arquitecto y mi búsqueda de la arquitectura diferente. Es una oportunidad única para lograr un espacio dirigido a la integración y el diálogo de todas las artes y manifestaciones culturales”⁸⁵⁸.

De manera que, en este apartado de la onda, tal y como introdujimos en el espacio de la esfera, así como en el de la espiral y la hélice, completaremos la explicación del conjunto Niemeyer abordando el edificio del Auditorio y el Edificio Polivalente que, junto a la Marquesina que cubre el tránsito de unión entre el Museo y el Auditorio (Fig. 178), representarán los dos elementos sinuosos que cumplen la función de comunicar los distintos espacios, así como de proporcionar movimiento a la Plaza que, pensada como

⁸⁵⁶ RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura. Proceso Constructivo ...*, p. 7.

⁸⁵⁷ <https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

⁸⁵⁸ <https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

una gran sala de exposiciones a cielo abierto, cumple una función articuladora de cada objeto, y de la vida social y cultural de Avilés.



Fig. 178. Auditorio, Marquesina y Edificio Polivalente del Centro Cultural Internacional Niemeyer. Fuente: <https://tecnne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>

En suma, en el Centro Niemeyer, planteado como un equipamiento para la producción de contenidos culturales de nivel internacional, el Auditorio (Fig. 179) será considerado “el hermano mayor”, materializando la morfología arquitectónica y personal de Niemeyer, en esta etapa de su trayectoria artística, en conexión con las líneas que esculpe la naturaleza. “El Auditorio con su membrana/losa de cubierta que alcanza una



Fig. 179. Auditorio del Centro Cultural Internacional “Niemeyer”.
Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo.

luz transversal de 74 m y un desarrollo de generatriz longitudinal en torno a los 76 m”⁸⁵⁹ asemeja una piedra marina erosionada por el mar. “Se trata de un volumen rotundo y claramente identificable por la apertura de su escenario abierto hacia la Plaza, constituido por pantallas y muros laterales de 25 y 40 cm de espesor”⁸⁶⁰. Tiene una superficie total de 5000 m²,

abarcando la sala principal un aforo para más de 1000 personas. También cuenta con una sala más pequeña para ensayos y representaciones menos multitudinarias. Se trata, en

⁸⁵⁹ RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura. Proceso Constructivo* ..., p. 24.

⁸⁶⁰ *Ibidem*, p. 30.

definitiva, de un edificio flexible, al permitir, con su opcional apertura al fondo de la escena, poder visualizar las representaciones tanto desde su interior como desde el exterior.

Por otra parte, el Edificio Polivalente que establece el límite posterior de la Plaza, aunque estructuralmente sea el menos singular de los cuatro volúmenes, presenta aun así dos soluciones destacables. “Es un edificio de una única planta rasante, a nivel de Plaza, de desarrollo circular con longitud próxima a los 100m en su envolvente sur, facilitando la visual directa hacia todo el espacio, y un nivel de sótano que ocupa parcialmente la planta, donde se sitúan las centrales de producción de las diferentes instalaciones del complejo”⁸⁶¹. “Con una superficie de casi tres mil metros cuadrados, cuenta con dos salas de tamaño flexible para reuniones y conferencias que, según la disposición interna, puede albergar hasta 150 personas. En uno de sus laterales cuenta con un bar y una tienda. En el otro una sala de cine con capacidad para cien personas”⁸⁶².

En conclusión, “Al final de su vida, Niemeyer renunció a la experimentación sobre la complejidad de las formas que constituían las tipologías utilizadas a lo largo de su vida. Prefirió reducir el vocabulario a su mínima expresión, y reiterar elementos formales y espaciales que fueran significativos al inicio de su trayectoria. [...] Transcribiría así la expresión literaria de Manoel de Barros, prestigioso poeta brasileño al decir: “repetir, repetir, até ficar diferente. Repetir é um dom do estilo”. Pero esto no significa subvalorar su trayectoria de un siglo de vida y su contribución a la arquitectura moderna contemporánea. Sin las osadías logradas hace medio siglo con el lápiz sobre el papel blanco, las actuales fantasías oníricas de los protagonistas de la *jet set* no serían posibles. Y cabe recordar sus dotes personales, su generosidad, su sensibilidad humana y su compromiso político con los pobres del mundo”⁸⁶³.

14.5. LA PARÁBOLA Y LA CATENARIA EN:

- LA OBRA DE ANTONIO GAUDÍ
- LA OBRA DE FÉLIX CANDELA
- LA OBRA DE FREI OTTO

⁸⁶¹ *Ibidem*, p. 33.

⁸⁶² <https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

⁸⁶³ <https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

14.5.1. LA PARÁBOLA Y LA CATENARIA EN LA OBRA DE ANTONIO GAUDÍ

Como ya se ha explicado en apartados anteriores, Gaudí destacó por su manera de concebir la arquitectura libre y experimentalmente, circunstancia que le llevó a reflexionar constantemente sobre su labor, recogiendo de la tradición todo lo que le parecía válido y buscando siempre soluciones en las que el saber constructivo, la lógica estructural y la creatividad geométricas se fundieran en un todo. Así, Gaudí intentó recorrer el camino simbolizado en la ruta:

Verdad, Estructura, Belleza. [...] En cuanto a las cargas, la Verdad histórica le aportó sólo las verticales como actuantes y, en consecuencia, “el factor horizontal” tan sólo se encuentra en los empujes que pueden generar los arcos y bóvedas. Así, “Las relaciones estructurales más importantes que marcaron esa época fueron, en primer lugar, las construcciones que surgieron en la escuela de Chicago, hacia 1875: edificios con pilares metálicos y vigas continuas, también metálicas, todo ello trabado por los muros de la fachada, fundamentalmente de fábrica. En segundo lugar, tenemos la torre Eiffel (1888), como culminación de un proceso que había empezado mucho antes y determinó la utilización de estructuras metálicas trianguladas en la investigación de la compresión y la tracción de piezas. Gaudí representó un camino especial que se resume en el pensamiento siguiente: si existe una posición de equilibrio interno para la estructura, ésta es la que utilizará la estructura para resistir⁸⁶⁴.

Por otra parte, según Gaudí, “para que una obra arquitectónica sea bella, es necesario que se ajusten todos sus elementos”⁸⁶⁵. Se inspiró en las formas orgánicas, “ser original es volver al origen”⁸⁶⁶, buscando en dichas formas sus funciones y posibles aplicaciones, siempre cuidando la estética. “En su obra, forma y función se identifican y se funden en una sola cosa”⁸⁶⁷.

Así, su interés por lo tectónico se puso claramente de manifiesto desarrollando toda su obra ceñida a la lógica estructural de los sistemas actuando bajo compresión. La fuerza natural ejercida en los cuerpos por su propio peso bajo la ley de la gravedad, característica de los estilos tanto gótico como mudéjar junto al modernismo español, influyó notablemente en la concepción de sus obras primigenias, amparadas por la

⁸⁶⁴ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, pp. 47-48.

⁸⁶⁵ *Ibidem*, p. 22.

⁸⁶⁶ *Ibidem*, p. 20.

⁸⁶⁷ *Ibidem*, p. 22.

arraigada tradición constructiva mediterránea de las bóvedas tabicadas. Todos los problemas constructivos los resolverá brillantemente, con el uso tan sólo de los materiales de fábrica, mampostería y el hierro primitivo.

Para Gaudí cualquier elemento del proceso constructivo era importante, de modo que, queriendo perfeccionar el empleo de los arbotantes como elemento que consideraba “antinatural” para contrarrestar el empuje de los arcos ojivales en el gótico, puso especial dedicación en el estudio de las estructuras, buscando procedimientos originales y prácticos, por lo que apostó por el arco parabólico como solución. Gaudí sostenía que “las formas curvas son las perfectas”⁸⁶⁸, por lo que percibió en los arcos parabólicos y catenarios elementos sustentantes ideales por su resistencia, eficacia y belleza. A partir de 1900, en vez de buscar la referencia gótica y árabe fue adoptando un evidente formalismo naturalista, con alusiones a musculaturas, formas marinas y montañosas. Confrontaba la geometría de la naturaleza, a la racionalista geometría euclidiana, traduciendo esta racionalidad compleja en la utilización de las formas regladas de forma más conceptual que constructiva, al recorrer todo su trabajo confiriéndole una sorprendente coherencia de conjunto.

Obras como la Cooperativa Obrera Mataronesa, el Palacio Güell, el Colegio de las Teresianas y las buhardillas de la Casas Batlló y Milá fundamentan su diseño en los arcos parabólicos. “Basta invertir un panal, como han hecho siempre los apicultores al catar las colmenas, para que aparezca apoyado sobre una base horizontal el arco catenario que antes colgaba”⁸⁶⁹. De ahí que el experimento del modelo catenario en el plano se base en:

las formas inversas de los arcos colgantes catenarios, funiculares o parabólicos, que soportan su propio peso o cargas y que siempre están traccionados, corresponden a las formas comprimidas que, con las mismas longitudes, soportarían las mismas cargas. [...] El arco catenario ideal puede modificarse en lo relativo a la forma por la acción gravitatoria de pesos insertados a lo largo, que produzcan un arco funicular; cuando un gran peso central supera el resto de las cargas simétricas, se obtiene la forma de un arco funicular apuntado en el centro; cuando las cargas son mayores en los laterales, la forma del arco funicular se acerca al arco carpanel o elíptico; cuando la carga es uniforme horizontalmente, la forma es la de una parábola⁸⁷⁰ (Fig. 180).

⁸⁶⁸ *Ibidem*, p. 34.

⁸⁶⁹ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 48.

⁸⁷⁰ *Ibidem*, p. 97.

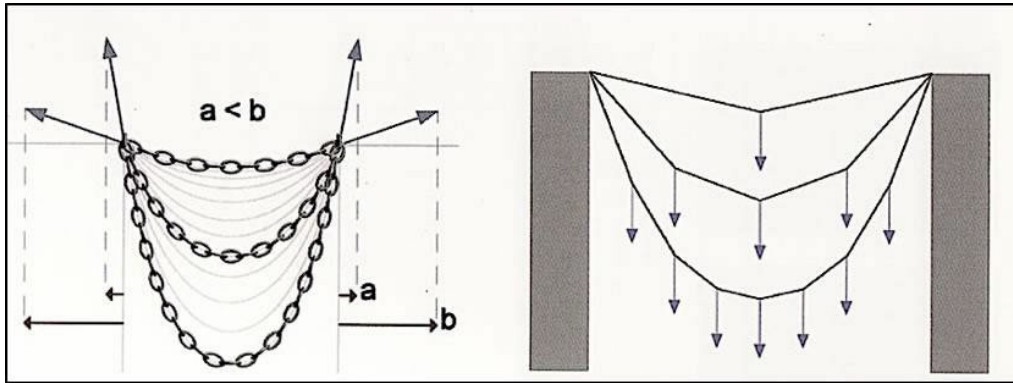


Fig. 180. Catenarias con distintos empujes y funículos según cargas actuantes. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 97.

Esta descripción, llevada a la práctica con hilos y pesos, es la que empleó Gaudí para obtener sus cálculos gráficos. Y es que muchas de las obras en las que Gaudí pondría en práctica su ingenio y sabiduría natural le serían encomendadas por el industrial y político Eusebi Güell i Bacigalupi, I conde de Güell, que, tras quedar admirado por la vitrina de la Guantería Conella que Gaudí diseñó en 1878 con el objetivo de ser expuesta en el pabellón español de la Exposición Universal de París, actuaría desde entonces como su principal mecenas. Lo que le permitió no sólo construir para él, “sino también acceder a nuevos encargos de otros miembros de la alta sociedad: al final muy pocos, pero suficientes para convertirse en un deslumbrante hito de la arquitectura”⁸⁷¹.

En 1898 Eusebi Güell encargó a Gaudí el proyecto de completar con un nuevo templo el gigantesco complejo textil industrial que poseía ubicado en su finca Can Soler de la Torre en Santa Coloma de Cervelló, a las afueras de Barcelona, que ideó quizás inspirado por algún ejemplo que había conocido en sus frecuentes viajes a Inglaterra, además de por su sensibilidad social infrecuente. Se trataba de la primera colonia industrial levantada en España, donde los obreros podían compaginar el trabajo industrial con la vida en el campo y disfrutar de otros servicios, por lo que además de la fábrica y las viviendas, tenía campos de deportes, cooperativas, teatro, etc.

Para el proyecto del templo, que contaba con cinco naves y varias torres, siendo la más alta de hasta 40 m de altura, Gaudí, “que estaba en el inicio de su etapa de madurez, prescindió totalmente de su repertorio del pasado, y gracias a su portentosa imaginación arquitectónica”⁸⁷², planeó por primera vez que la estructura fuera el todo y la esencia, e ideó un original mecanismo empírico (reproduciendo mecanismos naturales de

⁸⁷¹ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí...*, p. 12.

⁸⁷² GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 67.

autoorganización con la intención de descubrir formas eficientes por su función, que más tarde el arquitecto Frei Otto desarrollaría como “form-finding”; sirviéndose tanto de modelos colgantes como de “pompas de jabón”⁸⁷³, en aplicación de la estática mecánica descrita, cuyo ensayo y meticulosa preparación provocó que las obras se prolongasen hasta 1908, año en que empezó la construcción efectiva. Para la fabricación del mecanismo, primero construyó una maqueta con cadenas a modo de cargas, y posteriormente elaboró una segunda maqueta con saquitos como pesos que representaban las cargas de cada elemento de la cubierta. Colocando una tela en el interior de la maqueta, simuló el espacio a escala, y redibujando la



Fig. 181. Modelo funicular de la iglesia de la Colonia Güell. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 99.

fotografía tomada de la misma, la proyectó invertida (Fig. 181). El ensayo de este modelo catenario para la iglesia de la Colonia Güell le sirvió de base para elaborar el posterior proyecto de las naves y torres de la Sagrada Familia. “Lo calculo todo: primero, pongo unos pesos para buscar el funículo, después visto el funículo hallado con formas y materiales cuyos pesos vuelvo a revisar, y a veces varío ligeramente los funículos. De esa manera sale la forma lógica nacida de las necesidades. Los funículos de la Sagrada Familia los he encontrado gráficamente, y los de la Colonia Güell experimentalmente, pero ambos procedimientos son el mismo, y el uno es hijo del otro”⁸⁷⁴.



Fig. 182. Catenarias en la nave de la Cooperativa Mataronesa. Fuente: RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 54.

Del mismo modo, Gaudí empleó constantemente a lo largo de su producción tanto el arco parabólico como el catenario. Sirvan como ejemplo los siguientes casos. La primera obra en la que los utilizó fue en la Cooperativa Obrera Mataronesa, que surgió como resultado de la Asociación Internacional de Trabajadores en el año 1883, y consistía en una especie de pequeña ciudad lineal, con una fábrica textil situada en el barrio obrero, un casino y una nave destinada al blanqueo de tejidos (Fig. 182). Para la construcción de esta última,

⁸⁷³ GONZÁLEZ LISORGE, A. “Del empirismo a la invención: cálculo y proyecto en la arquitectura moderna”. *P+C: Proyecto y Ciudad: revista de arquitectura*, N.º 8, 2017, p. 114.

⁸⁷⁴ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena...*, p. 32.

Gaudí experimentó por primera vez con el arco catenario (“tan sólo los ingenieros civiles desde la ciencia física y los albañiles catalanes desde la experiencia popular se han aproximado al arco catenario, por ser el más consecuente con el natural funcionamiento de las estructuras. Y él, desde su racionalidad artística, será el primero en introducirlo en la arquitectura culta”⁸⁷⁵), quizá movido por la simbología afín de las abejas, como insectos sociales, y la clase obrera, siendo la “colmena y sus arcos catenarios un símbolo de las virtudes del trabajo productivo y la solidaridad”⁸⁷⁶.

Gaudí empleó magistral, e indistintamente, tanto el arco parabólico como el arco catenario en la residencia urbana palaciega que Eusebi Güell le encargó construir aledaño a su vivienda en la calle Nou de la Rambla de Barcelona, “el cual era la imagen social que éste debía de dar ante sus ojos de toda la ciudad (no es algo recóndito ni anecdótico). El estandarte, la cara pública de un noble y su castillo. De hecho, llegaron a visitarlo muchas personalidades. Hasta la mismísima reina de España, María Cristina, el rey Humberto de Italia y el presidente de Estados Unidos, Grover Cleveland”⁸⁷⁷. Concebido, por tanto, como un espacio de recepción y representación, para su diseño Gaudí siguió la misma línea orientalizante que caracterizó su obra de este período, dedicando mucho esmero a su materialización y empleando la piedra como material principal (cuyos conceptos asociados son los de fortaleza, durabilidad y poder), bien tallada y no de mampostería irregular, lo que provocó que la obra se prolongase casi diez años, desde 1886 hasta 1895. Puesto que,

esta tendencia consciente hacia la arquitectura árabe tiene mucho que ver con la búsqueda de una arquitectura nacional en la que, con él, estaban inmersos algunos de sus colegas. Por esto el siglo XIX es de especial despertar de la conciencia nacional, y Cataluña no sería ajena a este movimiento generalizado. Entonces, si los arquitectos del norte de Europa consideraban más propio de su geografía el arte gótico, pues el arte clásico grecorromano procedía del sur, bien podía entenderse el arte mudéjar o mozárabe como el más propio de España, pues es la única tierra europea que lo tiene⁸⁷⁸.

Para este cometido, Gaudí pretendió crear una fachada principal acorde con la solemnidad que el edificio requería. Organizó una disposición ligeramente asimétrica, levantando, para la entrada y salida de los carruajes, dos grandes y elegantes arcos

⁸⁷⁵ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 83.

⁸⁷⁶ RAMÍREZ, J. A. *La metáfora de la colmena*, p. 52.

⁸⁷⁷ Cfr. ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí ...*, p. 22.

⁸⁷⁸ *Ibidem*, p. 22.

catenarios cubiertos de una rejería de hierro con perfiles sinuosos (Fig. 183). En general, “se trata de una fachada escueta, por su desnuda funcionalidad y neutra composición [...]. Próxima en espíritu a la claridad, concisión, constructividad y sinceridad románticas: línea estilística que de nuevo como alternativa al clasicismo tomarían por ejemplo en estos mismos años arquitectos como Henry Hobson Richardson y que fructificaría en la llamada Escuela de Chicago”⁸⁷⁹. Luego esta obra no tendrá,



Fig. 183. Fachada principal del Palacio Güell. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 45.

ni un mínimo eco de los estilos históricos, al contrario de como un arquitecto culto y elegante debía construir por entonces. No hay composición tripartita, ni simetría, ni jerarquización, liberada del lenguaje clásico de la arquitectura y su ornamentación como está toda la casa. Hasta los capiteles, cuando los hay, se reinventan como hiperboloides sin seguir nada previo. Como se ve, años antes que la casa Tassel (1892-1893) de Victor Horta (1861-1947), hecha famosa por los historiógrafos del movimiento moderno, un desconocido Antoni Gaudí ya estaba antecediéndole en la creación original no historicista y en la introducción del hierro creando formas libres en el espacio⁸⁸⁰.



Fig. 184. Cúpula del Palacio Güell. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 50.

Así, el dinamismo sutilmente sugerido en la fachada suponía un aperitivo de lo que encontraríamos en el interior, donde destaca el espacio cuadrangular centralizado, que “evocando los patios interiores característicos de las casas mediterráneas”⁸⁸¹ aparece cubierto por una cúpula típica del estilo bizantino, de perfil paraboloide de revolución en el interior y cónico en el exterior, pavimentado por una recurrente retícula hexagonal perforada por tragaluces a través de los cuales entra la luz cenital a modo de cúpula celestial, sustentada en cuatro arcos, también de tipo funicular,

⁸⁷⁹ *Ibidem*, p. 25.

⁸⁸⁰ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí...*, p. 25.

⁸⁸¹ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 48.

que descansan sobre capiteles hiperbólicos, dinamizando todo el conjunto (Fig. 184). Además, resulta ideal por otra parte para la celebración de conciertos por su acústica, sirviendo también en ocasiones de capilla.

Para resolver el apresurado encargo del Colegio de las Teresianas (1889-1894), para el que además contaba con un reducido presupuesto, Gaudí ideó un edificio austero y sintético pero cargado de inteligibilidad, al conseguir crear un espacio mágico, de contrastes lumínicos, a la par que funcional, mediante la repetición rítmica de vanos y huecos ciegos, “como si de un muro-cortina se tratara”⁸⁸² en el exterior, y de espacios

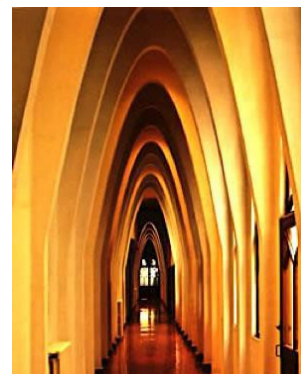


Fig. 185. Corredor de arcos parabólicos del Colegio de las Teresianas. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 63.

diáfanos comunicados por corredores de sucesión de arcos parabólicos en torno a un patio de luz, en el interior (Fig. 185).

“Normalmente en la obra de Gaudí las formas más puras, sin ornamentación, se localizan en los espacios poco relevantes (los sótanos y las buhardillas en los edificios)”⁸⁸³. Así, en la casa Batlló (1905-1907),



Fig. 186. Arcos catenarios en la buhardilla de la Casa Batlló. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 34.

Gaudí no dudó en emplear los característicos arcos funiculares para cubrir la buhardilla de esta vivienda, que, al no precisar contrafuertes ni paredes de carga, suponían la solución más resistente para modelar los espacios livianos y eficientes empleados en las zonas destinadas a secadero, lavadero y trastero, así como de acceso al terrado (Fig. 186).

La buhardilla de la Casa Milá (1905-1910), popularmente conocida, como ya dijimos, como “la Pedrera”, se sustenta en una serie de arcos catenarios de ladrillo (Fig. 187), los cuales, convertidos

en superficie por repetición sucesiva (el espacio diafragmado gaudiano no es más que esto), desplazada por el espacio, pero a lo largo de una segunda curvatura contrapuesta a la suya propia y de similar geometría, lo resuelve todo. En efecto, estos arcos catenarios y su aproximación gráfica a la parábola, sus correspondientes bóvedas de geometría reglada alabeada y pilares inclinados resultantes, fieles a la misma dirección natural de

⁸⁸² *Ibidem*, p. 60.

⁸⁸³ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 53.

descarga de los pesos superiores, consiguen el trabajo estructural ideal de los edificios con el mínimo material necesario⁸⁸⁴.

Seguramente la Casa Milá sea la obra maestra de Gaudí, pues supone una muestra de todos sus recursos técnicos y expresivos, confiriendo al edificio un aspecto orgánico inspirado en la montaña.

Finalmente, será en la construcción de la Sagrada Familia, iniciada en 1882, donde Gaudí culmine su estilo naturalista, haciendo una síntesis de todos los estilos y soluciones probados hasta entonces, ya que “él sólo se inspira en los estilos, pero no los imita como hacen los eclécticos”⁸⁸⁵. Será por consiguiente en esta obra en la que logre una perfecta armonía entre la plástica, la estética, la función y la forma, entre los elementos estructurales y los ornamentales, tanto en el interior como en el exterior, logrando la integración de todas las artes en un todo.

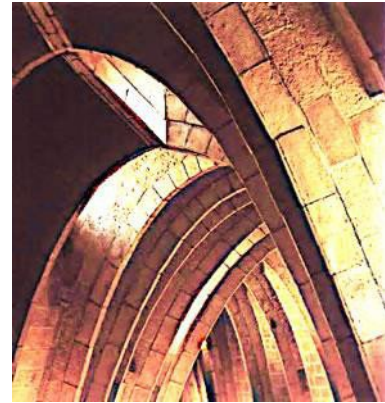


Fig. 187. Arcos catenarios de la buhardilla de la Casa Milá. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 34.

Superficies cuádricas derivadas de la parábola

Gaudí encontró, en el continente espiritual del movimiento modernista unido a la geometría, la vía por la cual evadirse de los ritmos y soluciones rectilíneas del gótico. Y es que, en general, “la arquitectura convencional se ha hecho a partir de una geometría que a pesar de utilizar formas simples (como los triángulos, los cuadrados, los círculos en el plano, y los prismas, los cubos, las pirámides, los cilindros, las esferas, etcétera, en el espacio), es el resultado de la aplicación rigurosa de la regla y el compás”⁸⁸⁶. No obstante,

crítico con los procedimientos académicos de expresión gráfica, Gaudí fue capaz de desarrollar la creatividad tridimensional combinando al mismo tiempo cuatro elementos clave: una extraordinaria inteligencia espacial innata; una contemplación profunda de la realidad; una investigación sobre modelos tangibles, y una visión pragmática de las posibilidades constructivas, estructurales y compositivas. Sin embargo, ese dominio del

⁸⁸⁴ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones ..., p. 85.

⁸⁸⁵ *Ibidem*, p. 84.

⁸⁸⁶ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, pp. 19-20.

espacio nunca le llevó a crear objetos escultóricos. Sus “formas” son siempre elementos arquitectónicos, pendientes de una funcionalidad imprescindible y con elementos de una gran belleza de cara al exterior: la derivada de la decoración, la de la propia originalidad compositiva y la ligada a la propia coherencia estructural⁸⁸⁷. “[Según Gaudí], para que una obra arquitectónica sea bella, es necesario que se ajusten todos los elementos en cuanto a situación, dimensión, forma y color”, pues todas esas cualidades de la obra arquitectónica están íntimamente relacionadas. Si entendemos belleza en el sentido platónico, es sinónimo de bondad, de austeridad y de validez, y ése es el sentido de lo bello, lo ético y lo estético que utilizaba Gaudí. Sus formas, además de la excelencia estructural, tienen una gran calidad estética. En su obra forma y función se identifican y se funden en una sola cosa⁸⁸⁸.

“Cuando Gaudí descubrió (que no inventó, evidentemente) las denominadas superficies regladas, compuestas por líneas rectas, que determinan superficies curvas en el espacio como el paraboloides, el hiperboloides, el helicoides y las que se derivan de ellos, encontró un campo de explotación que le fascinó tanto que le dedicó los últimos años de su vida”⁸⁸⁹. “[Específicamente] empleó los conjuntos paraboloides hiperbólicos intersecados como cierres, los hiperboloides de una hoja para definir las aperturas para dejar pasar la luz, y los elipsoides para conformar elementos macizos, normalmente en los nudos y en los capiteles”, (como ya introdujimos en el apartado de la esfera). “También utilizó cilindros, conos y paraboloides de revolución”⁸⁹⁰ (Fig. 188).

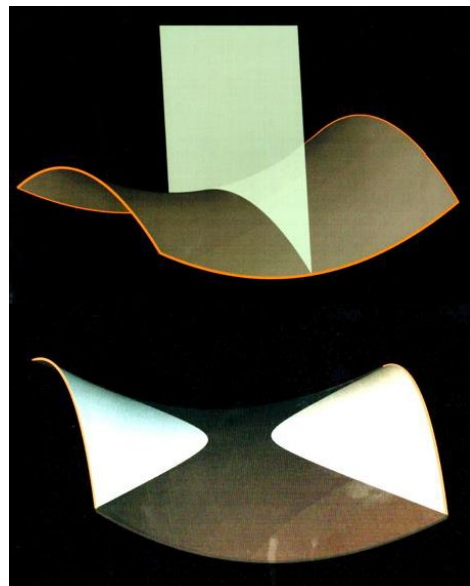


Fig. 188. Secciones parabólica e hiperbólica de un paraboloides hiperbólico. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 81.

Entre las vías que llevaron a Gaudí a trabajar con la geometría reglada del espacio destaca

el análisis que desde la infancia había hecho de las formas naturales (troncos de árboles, huesos, crustáceos, etcétera). Su conocida sentencia “ser original es acercarse a los

⁸⁸⁷ *Ibidem*, p. 30.

⁸⁸⁸ *Ibidem*, p. 22.

⁸⁸⁹ *Ibidem*, p. 20.

⁸⁹⁰ *Ibidem*, p. 53.

orígenes”, no debe interpretarse como un simple retorno a las formas y estructuras procedentes de la naturaleza (geología, mineralogía, botánica y anatomía) o a una imitación de estas, [...] sino como un volver a recorrer el camino que hace hincapié en el “proceso inventivo como tal” y “no repite un lugar común”, como ha apuntado Roberto Pane; es decir, como “una búsqueda de las problemáticas en su propio origen”. [...] “También puede tener que ver con ese retorno a los orígenes el reconocimiento por Gaudí del mundo de los oficios, en el cual se había formado y que, sin duda, le había influido. Al arquitecto le gustaba conjugar la visualidad y la manualidad”⁸⁹¹.

Gaudí hacía pasar la inspiración por el tamiz de una creatividad personal inagotable, y empleaba varios recursos visuales para sintetizar sus ideas, desde dibujos a perspectivas o maquetas:

“A pequeña o gran escala, elementos que al natural o fotografiados manipuló hasta conseguir alternativas formales, fácilmente visualizables”. [...] “La forma que tenía Gaudí de entender la ciencia y la técnica se acerca a la de Leonardo. [...] Ambos llegaron a la teoría a partir de la observación y del análisis. [...] pudieron ir más allá de la superficie y descubrir las fuerzas internas de los cuerpos. No obstante, la de Gaudí no es una geometría como la que Leonardo denominó *De ludo geométrico*, que permite jugar con las formas y las proporciones. Al contrario, la suya está destinada a facilitar los procesos constructivos, para sacar el máximo provecho de las fórmulas tradicionales y asegurar la estabilidad de los edificios. [...] Gaudí ve las formas y, una vez que las tiene determinadas mentalmente, busca los medios para transformarlas en objetos físicos construibles”⁸⁹².

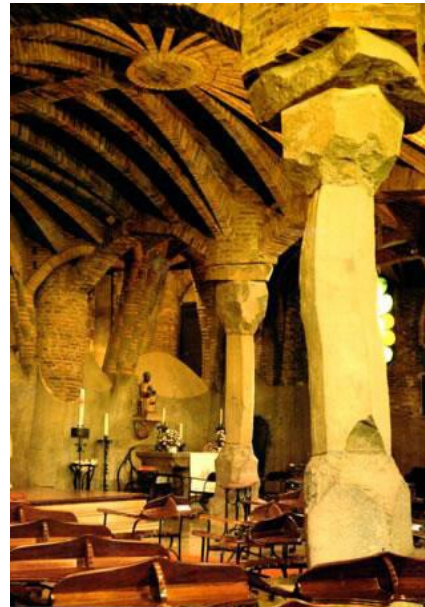


Fig. 189. Visión general de la iglesia de la Colonia Güell. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 57.

En definitiva, “la geometría del espacio, tan fácil, pues, de comprender visualmente, pero tan difícil de explicar con palabras, [...] apasionó a Gaudí. De hecho, está presente en todos sus edificios, si bien los exponentes más emblemáticos del uso

⁸⁹¹ *Ibidem*, pp. 20-21.

⁸⁹² *Ibidem*, p. 21.

creativo que le dio son la Iglesia de la Colonia Güell (Fig. 189) y el proyecto de la Sagrada Familia”⁸⁹³.

El paraboloides hiperbólico

Según Gaudí, “la evidencia es a los ojos del espíritu lo que la visión a los del cuerpo”⁸⁹⁴. Esta teoría se aproxima a la que Rudolf Arheim formuló cuando sostuvo que “lo que se percibe visualmente es pensamiento; los razonamientos y la intuición, invención”⁸⁹⁵. De modo que a sus ayudantes les explicaba, bajo el convencimiento de que lo que se ve no se olvida, todas “las proyecciones del paraboloides hiperbólico jugando con listones e hilos de colores con los que construía un instrumento que, puesto de una forma determinada en la trayectoria de un rayo de sol, proyectaba las sombras de la figura”⁸⁹⁶.

Bóvedas convexas

El sistema inesperado y el nuevo proceder empleado por Gaudí para la realización del Templo de la Colonia Güell, de la que ya hemos hablado, buscaba principalmente exhibir lo funcional. Así, en una particular reinterpretación del gótico, Gaudí desarrolló las primeras bóvedas parabólicas de la historia de la arquitectura y su cuádrlica paraboloides hiperbólica, en el pórtico de la iglesia baja, ya que dejó sin hacer la parte superior para dedicarse por entero al proyecto de la Sagrada Familia (Fig. 190). “Este pórtico está formado por un conjunto de pilares, arcos y bóvedas que forman una retícula triangular que da soporte a dos plataformas y dos



Fig. 190. Fotografía de la maqueta expuesta en el apartado de la catenaria anterior, girada 180 grados y repintada encima con una vista del ábside de la iglesia de la Colonia Güell. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 69.

⁸⁹³ *Ibidem*, p. 19.

⁸⁹⁴ *Ibidem*, p. 18.

⁸⁹⁵ ARNHEIM, R. *El pensamiento visual...*, p. 27.

⁸⁹⁶ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 18.

tramos de escalera que habrían permitido acceder a la iglesia alta. Las bóvedas ocupan los vacíos triangulares de la estructura de los arcos”⁸⁹⁷. En vez de emplear la solución tradicional “de doble curvatura, baídas o de traslación, es decir cóncavas”⁸⁹⁸, empleará unas bóvedas que J. L. González calificará de “convexas”, pudiendo ser de tres tipos (Fig. 191). Finalmente, la superficie de las bóvedas se materializa mediante una mezcla de granos de arena y trozos triangulares de rasilla, completándose la decoración con trozos cerámicos vidriados que forman un aspa o cruz de San Andrés. En realidad, toda la cripta trata de un microcosmos donde Gaudí entronca con los orígenes al hacer aparecer los símbolos cristianos más antiguos: “Alfas y omegas, primera y última letras griegas, símbolos de Jesucristo, en cuanto Dios se dice que es principio y fin de todas las cosas”, etcétera.

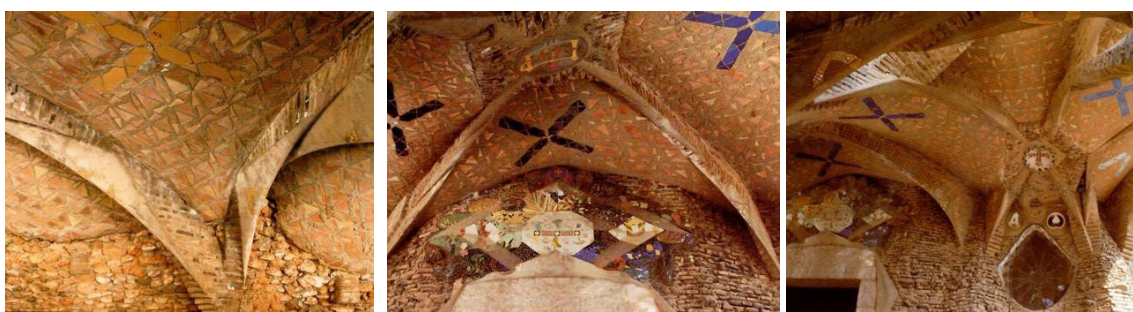


Fig. 191. Bóvedas “convexas” paraboloides-hiperbólicas en la Iglesia de la Colonia Güell de tipo 1, 2 y 3. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, pp. 86-87.

Además, también resulta digna de mención la maestría que una vez más Gaudí despliega en esta composición plástica superficial, fundamentándola en

las mismas propiedades geométricas del paraboloides hiperbólico. En los dos primeros tipos de bóvedas las dos familias de generatrices se cruzan formando ángulos de 60 y 120 grados. Las parábolas de la trama de rasillas son las que se obtienen con intersecciones de planos paralelos al eje menor que acaban de completar la malla de triángulos equiláteros. En el tercer tipo, las generatrices se cortan a 90 grados. El dibujo pasa a ser otro muy distinto y añade todavía más riqueza a todo el conjunto⁸⁹⁹.

El método para conseguir todos los trozos se obtiene de manera sencilla, al trocear las rasillas por medio de tres rectas (Fig. 192). En cuanto al proceso de construcción de las bóvedas, se baraja que pudiera ser similar al de la construcción de las bóvedas de

⁸⁹⁷ *Ibidem*, p. 75.

⁸⁹⁸ *Ibidem*, p. 75.

⁸⁹⁹ *Ibidem*, p. 76.

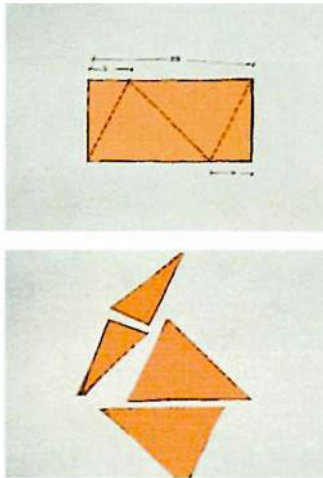


Fig. 192. Cortes hechos en la baldosa del techo y ordenación de las piezas cortadas. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 76.

hormigón de la arquitectura imperial romana apoyadas sobre tablonos de madera, ya que se las ha considerado siempre como el antecedente de las bóvedas tabicadas catalanas mediante encofrados (Fig. 193). De modo que la última operación consistirá en proyectar la arena sobre una lechada de cal fresca, lo que provocaría el camuflaje de todo el proceso.

“Así pues, el edificio exento de una sola planta cobra una traza oblonga, a la que, pese a no ser subterránea, la estética imprime un inevitable aire de espacio cavernoso, que encantaba al autor”⁹⁰⁰. Los pilares inclinados de perfil brutalista siguen junto a “las nervaduras de las bóvedas realizadas en ladrillo las catenarias que les corresponden en la

descarga natural de los pesos superiores. Con todo ello se llega a una arquitectura como primigenia que impresiona por su tecnicidad genésica. Precisamente yendo hacia delante, Gaudí logra el retorno al origen y, por tanto, cierra el círculo”⁹⁰¹, un círculo virtuoso.

“Los materiales de construcción son piedra basáltica y ladrillos recochos, que hay que añadir al cristal de los ventanales y al hierro de las rejas, procedentes de agujas viejas de los telares de la fábrica. Ese uso de materiales pasados por el fuego podría tener alguna relación con el concepto religioso de la purificación por medio del sacrificio”⁹⁰². Aunque también supone un acto de reciclaje, por lo que la iglesia de la Colonia Güell proporciona un claro ejemplo de la mirada amorosa y sensible de Gaudí hacia la naturaleza, y de su respeto por el medio ambiente, pudiendo ser calificado como el primer arquitecto ecologista, cuando este término aún ni existía.

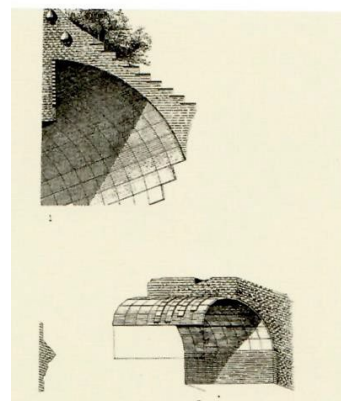
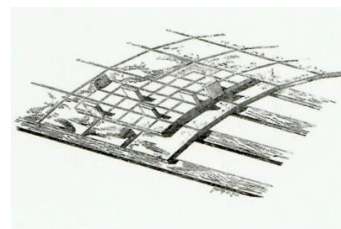


Fig. 193. Imágenes de como hacían los constructores romanos las bóvedas de hormigón con la ayuda de piezas cerámicas apoyadas sobre tablonos de madera. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 79.

⁹⁰⁰ PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 88.
⁹⁰¹ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones ..., p. 41.
⁹⁰² GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 146.

En definitiva, su síntesis estilística dará cierre a todos los estilos históricos, ya que de existir el estilo “tectónico”, esta construcción le pertenecería a él.

Así culminarán esos estilos y su tradición constructiva imperfecta desde el arte y la técnica, con su perfeccionamiento formal y estructural definitivo, descubriendo que justo se corresponde con el funcionamiento exacto del mundo natural. Y al corroborar tal identificación artificio-naturaleza, abre como precursor la nueva tradición moderna, al verificar en su trabajo intenciones y huellas propias del expresionismo, futurismo, abstraccionismo, surrealismo, organicismo, uso del *collage*, *assemblage* y *dripping* como técnicas propias de las vanguardias artísticas, del brutalismo e informalismo, del arte *povera*, y avanzando la ironía posmoderna en la utilización de la historia. Todo trazos, primeros balbuceos, de un mismo lenguaje moderno que revela cinco milenios de desarrollo del llamado lenguaje clásico de la arquitectura⁹⁰³.

Paraboloides en la Sagrada Familia

Otra obra en la que empleará el paraboloides hiperbólico y con la que llegará a la plenitud de su libertad creadora será el sistema de torres y cúpulas del templo de la Sagrada Familia, mediante el empleo de piedra monorresistente.



Fig. 194. Vista general torres y fachada del Nacimiento.
Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 133.

Concretamente, el primer ejemplo donde se puso de manifiesto esta evolución gaudiana fueron las cuatro torres del Nacimiento (Fig. 194), formadas por paraboloides de curvatura muy pronunciada, como solución sustitutiva de las torres altas y rectilíneas que habían permanecido como modelo inalterable durante el gótico, el renacimiento y el barroco. En realidad, forman parte de un conjunto de 20 torres que Gaudí proyectó para el Templo basadas en paraboloides hiperbólicos que se intersecan: 12 de los Apóstoles, 4 de los Evangelistas, 1

⁹⁰³ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones ..., p. 88.

de la Virgen, 2 de las sacristías y 1 de Jesucristo. Estas torres son otro ejemplo en el que Gaudí no tuvo en cuenta las acciones horizontales explicadas anteriormente, pero cuando las proyectó y construyó, “las dotó de secciones que hacían posible el equilibrio sin contrafuertes, a pesar de la acción del viento”⁹⁰⁴. Además, “las torres son campanarios pensados más bien como grandes resonadores de las campanas tubulares que alojarán dentro. Con piezas inclinadas hacia abajo en sus aberturas, a modo de tornavoces, para orientar mejor el sonido sobre la ciudad”⁹⁰⁵, que además consiguen restarles peso visual mediante una



Fig. 195. Detalle de la superficie de las torres de la Sagrada Familia. Fuente: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 179.

disposición calada y rítmica a lo largo de toda su superficie exterior (Fig. 195). Sin embargo, Gaudí sólo pudo llevar a cabo su propuesta en tres de las cuatro torres que no llegó a rematar; tan sólo en el remate de la cuarta torre, la de San Bernabé, ensayó el empleo de hormigón armado, pudiendo conseguir una forma que la piedra

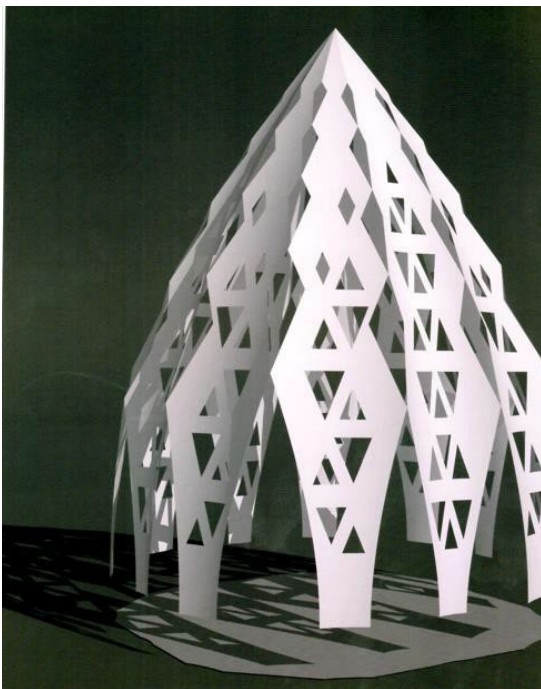


Fig. 196. Modelización informática de la cúpula de la sacristía del templo de la Sagrada Familia. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 82.

monorresistente no le habría permitido realizar, lo que ha provocado la hipótesis de que, de haber podido, Gaudí habría empleado este material para toda la estructura del templo.

Para las cúpulas de las sacristías (Fig. 196), ideó una solución resistente óptima formada por doce paraboloides hiperbólicos intersecados, cuatro simétricos y ocho asimétricos, también calados mediante triángulos vaciados en su superficie, de modo que “dos lados de uno de esos triángulos corresponden a dos de las generatrices, mientras que el tercero, el horizontal, es, lógicamente, la parábola que

⁹⁰⁴ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 48.

⁹⁰⁵ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones ..., p. 63.

corresponde a la intersección propia de un plano con la superficie”⁹⁰⁶. Y es que, en definitiva, la Sagrada Familia constituye la principal muestra de arte total de Gaudí:

Este podría ser el lema [...] de la arquitectura y el diseño de Antoni Gaudí, palabras clave que rigen su quehacer. “Arte y artesanía” (*arts and crafts*) del todo en continuidad con el incipiente despertar de la modernidad, primero en Gran Bretaña, y el movimiento de la reforma de las artes aplicadas que acabó titulándose con ese lema. Con el objetivo de dotar de sensibilidad artística el producto de la artesanía para elevar la calidad. De ahí que Gaudí estuviera intensamente en persona detrás de cada artesano que colaboraba con él. Además “arte y artesanía” es el lema con que se inició la Bauhaus en la Alemania de 1919. Que lo mantuvo hasta 1923, cuando lo cambió por el de “arte y técnica”. La Bauhaus, que fue la escuela paradigmática de la modernidad, pionera en la enseñanza de los principios vanguardistas del arte, arquitectura y diseño. Así, aparece Gaudí, situándose cronológica y conceptualmente de puente entre el ocaso del movimiento decimonónico *Arts ad crafts* y el despuntar de la moderna Bauhaus⁹⁰⁷.

Bóvedas hiperbólicas

Una de las superficies regladas más complejas que Gaudí empleó fue el hiperboloide de una hoja de revolución. La primera toma de contacto con esta superficie la tuvo consultando, como ya hemos apuntado anteriormente, los textos de C.F.A. Leroy, sucesor de Gaspard Monge en la escuela politécnica de París. Uno de sus primeros usos fue en la cúpula central de las caballerizas de la Finca Güell. También, posteriormente, los empleó en los capiteles del Palau Güell (Fig. 197), en la bóveda de giro para carruajes del Parc Güell (Fig. 198), y, por último, en el proyecto de la Sagrada Familia, sobre todo en los techos de las naves.



Fig. 197. Capiteles hiperbólicos del Palacio Güell. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 83.

⁹⁰⁶ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 86.

⁹⁰⁷ ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones ..., p. 67.



Fig. 198. Bóveda hiperbólica para el giro de carruajes de la entrada del Parc Güell. GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 114.

Para este proyecto, Gaudí opta por cubiertas de piedra, que gracias a un sistema mecánico de columnas que se inclinan según las cargas permite la eliminación de los típicos contrafuertes y arbotantes. Se tratará de una doble cubierta: una será la bóveda y otra la cubierta propiamente dicha, dejando una cámara ventilada entre medias que aísla mejor el edificio. Así el capitel de las columnas que soportan el techo del templo son medio hiperboloide pleno, siguen de forma armoniosa la sección circular del remate de las columnas (Fig. 199).

El hiperboloide vacío, que muestra su piel interna, es la base para formar el techo de la nave, como un conjunto de claraboyas soportadas por las columnas, por donde se filtrará la luz natural que llega de las cubiertas, y también la artificial instalada adecuadamente para producir un efecto similar. Gaudí hizo las intersecciones de los hiperboloides de una hoja, difíciles de materializar sobre el papel por la geometría descriptiva tradicional, con modelos de yeso, en los que pudo definir cada una de ellas con la ayuda de recursos sutiles. El arquitecto resolvió el paso de un hiperboloide de una hoja al otro con paraboloides hiperbólicos, también superficies regladas que pueden mantener la continuidad de las formas resultantes por medio de generatrices comunes. [...] Gaudí obtenía la intersección de un hiperboloide de una hoja produciendo un plano de luz a través de una rendija. Así conseguía la recta generatriz proyectada por ese plano de luz sobre una superficie reglada de yeso o de hilos que la materializaban. El conjunto de formas hiperbólicas se completa con lóbulos parabólicos y planos diédricos que acaban de definir la estructura resistente del techo de la nave⁹⁰⁸.

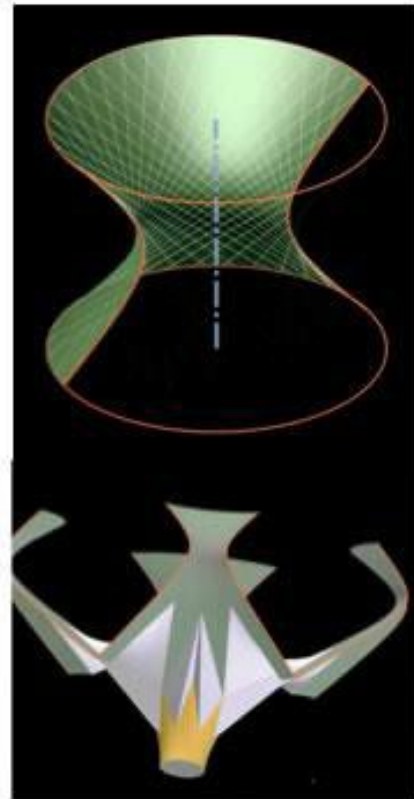


Fig. 199. Modelización informática del hiperboloide de una hoja y un elemento del techo de la nave del templo de la Sagrada Familia. Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 115.

⁹⁰⁸ GIRALT-MIRACLE, D. *La búsqueda de la forma...*, p. 113.

También, para los ventanales de las naves laterales Gaudí empleó las intersecciones de hiperboloides, por ser las superficies que mejor conducen la luz, y paraboloides (Fig. 200). En definitiva,

está claro que, para Gaudí, el hiperboloide de una hoja era la superficie que simbolizaba la luz. El espacio fluye por el cuello circular y se escapa hacia el exterior, a la vez que, desde fuera, la luz invade el interior al deslizarse por su piel, que trató con diferentes texturas con la finalidad de conseguir una serie de vibraciones cromáticas que enriquecen, si es que es posible, la calidad del techo de la nave⁹⁰⁹.



Fig. 200. Maclación de paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de una hoja y columnas (1926).
Fuente: GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 28.

14.5.2. LA PARÁBOLA Y LA CATENARIA EN LA OBRA DE FÉLIX CANDELA

El arquitecto e ingeniero Félix Candela nace en Madrid en 1910, pero desde el año 1939 residirá en México, donde desarrollará la mayoría de sus obras. Englobado dentro de una tradición que comienza más o menos en Freyssinet y Maillart, así como las construcciones de hormigón armado de Eduardo Torroja, Candela será considerado el “Saarinen español”, llegando a ser uno de los mayores genios innovadores de las

⁹⁰⁹ *Ibidem*, p. 114.

estructuras ligeras de hormigón armado sustentadas mediante cimbras, y formadas de paraboloides hiperbólicos.

Candela será un hombre práctico, y junto a su hermano gestionará una empresa de contratación, lo que le permitirá controlar todo el proceso constructivo, desde el proyecto hasta su realización.

En una de sus manifestaciones acerca de la forma de construcción de este material, Candela dirá:

La aparición de un nuevo material, el hormigón armado, dio pie para que se esperase que su aplicación racional conduciría a las formas estructurales que fueran adecuadas a sus propiedades esenciales, y que estas formas a su vez influirían en la composición arquitectónica y contribuirían a producir elementos decorativos y rítmicos de naturaleza sustancial. Sin embargo, las formas del movimiento moderno se basaron en otras consideraciones. Los constructores se volvieron en busca de apoyo hacia otras artes e incluso intentaron en algunos casos imponer formas arbitrarias.

Los estilos históricos nacieron de una realidad estructural. De los nuevos sistemas de estructura surgen los cambios revolucionarios de estilo. Quizá la falta de contenido de la última revolución arquitectónica deba atribuirse a que no estuvo precedida de auténticos cambios en los métodos estructurales.

El motivo adoptado desde principios de siglo por arquitectos e ingenieros para la lucha entre ambas profesiones ha creado un campo de vacío entre ambas. En esta tierra de nadie puede encontrarse la solución al problema principal de la arquitectura actual: el afán de encontrar un estilo contemporáneo o un lenguaje universal que pueda ofrecernos algo más que el yermo de la rutina que actualmente predomina⁹¹⁰.

A lo largo de su carrera, Candela realizó un considerable número de edificios, parte de ellos en México y parte en Estados Unidos, colaborando en ambos casos con arquitectos del país. El primer edificio que queremos mencionar es el edificio del Instituto de Radiología de la



Fig. 201. Instituto de Radiología de la Universidad de México.
Fuente: <https://www.archdaily.com/158000/ad-classics-cosmic-rays-pavilion-felix-candela/5107fb9db3fc4b272000008f-ad-classics-cosmic-rays-pavilion-felix-candela-image>

⁹¹⁰ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea* ..., p. 76.

Universidad de México (Fig. 201), del año 1950, que, a pesar de sus reducidas dimensiones, será el que catapultará a Candela al mundo internacional. La obra, inicialmente diseñada por Jorge González Reina, se basaba en una bóveda de cañón corrido. Sin embargo, al precisar el instituto de un espacio cubierto no mayor de un centímetro y medio de espesor, Candela consideró, para lograrlo, emplear por primera vez en su carrera una estructura en cascarón con doble curvatura inversa, generando la forma de la parábola o la catenaria invertida, consiguiendo a su vez dar rigidez a la estructura, a pesar de no cumplir el reglamento. El edificio aún sigue en pie en la ciudad universitaria.



Fig. 202. Vista aérea del edificio de la embotelladora de Bacardí, en México. Fuente: <https://www.disenoyarquitectura.net/2011/01/planta-de-embotellado-bacardi-de-felix>

En 1960, para cubrir la gran superficie de más de 5000 m² de la embotelladora de Bacardí (Fig. 202), situada junto al edificio administrativo de la marca, obra de Mies van de Rohe, en el área Metropolitana de la Ciudad de México, que debía ser totalmente abierta, Candela, a diferencia de las bóvedas de cañón corrido con crucerías precisando



Fig. 203. Alzado del edificio de la embotelladora de Bacardí, en México. Fuente: <https://www.disenoyarquitectura.net/2011/01/planta-de-embotellado-bacardi-de-felix>

de refuerzos en las aristas que el arquitecto estadounidense Minoru Yamasaki, junto al ingeniero Anton Tedesko, emplearon en 1954 para cubrir la gran superficie de la terminal del aeropuerto Lambert-St. Louis en Missouri, utilizará una superficie sinuosa, quizás emulando el batir de las alas de un murciélago, emblema de la firma, formada de cascarones resultado de la

intersección de 4 paraboloides hiperbólicos en posición ortogonal 2 a 2, de hormigón armado, con claros de 30 metros y con espesores en la cima de tan sólo 4 cm (Fig. 203). Así mismo, puesto que los arcos perimetrales de cada cascarón, al no tener rigidez en la dirección normal a su plano y no coincidir la línea de presión con la curva de contorno, requerían de arcos de borde que absorbieran y transmitieran las cargas por medio de fuerzas tangenciales, Candela añadirá dichos bordes en el interior, logrando dejarlos libres al exterior. Así mismo, las cargas de las cáscaras son transmitidas por sus cuatro esquinas a una pierna que comunica con los cimientos, y estos distribuyen a su vez su peso verticalmente al terreno. Finalmente, Candela aprovechará la inclinación natural de estas curvas para ubicar franjas traslúcidas, que permiten la entrada de la luz natural, junto a las membranas de cristal de parábolas que separan el exterior del interior.

En 1957 Candela realizará una de las obras que más repercusión internacional tuvo, el club nocturno “La Jiagaranda”, de Acapulco. La concha de esta construcción estará formada por tres paraboloides hiperbólicos tan sólo apoyados en tres puntos y con una luz de 18 m y un grosor de 4 cm. “La fascinación espacial que emana de este edificio proviene de la domeñada fuerza de la liberada imaginación en una construcción matemática. Ambas cosas constituyen indisolublemente la obra arquitectónica como un todo en el que la arquitectura y la ingeniería se han fundido en una sola



Fig. 204. Vista frontal del club “La Jiagaranda”, en Acapulco.

Fuente: [https-](https://www.cosmicinspirocloud.com/post/143957890998/felix-candela-la-jacaranda-nightclub-acapulco)

[//www.cosmicinspirocloud.com/post/143957890998/felix-candela-la-jacaranda-nightclub-acapulco](https://www.cosmicinspirocloud.com/post/143957890998/felix-candela-la-jacaranda-nightclub-acapulco)

unidad”⁹¹¹. Esta cubierta servirá de inspiración al ingeniero alemán de la Alemania del este, Ulrich Müther (1934-2007), quien construirá en 1968 el restaurante *Teepott* (Tetera) en Warnemünde, también compuesto de tres eficientes conchas parabólicas hiperbólicas que desafían las leyes de la gravedad al apoyarse toda la estructura sobre losas inclinadas de hormigón sin estructura de soporte alguna. (Fig. 204). También Candela realizará en 1956-57 el restaurante “Los Manantiales” en Xochimilco, en México, obra que será

⁹¹¹ *Ibidem*, p. 77.

calificada de futurista. Al ser Xochimilco un importante lugar de recreo acuático azteca, Candela propone el diseño de un objeto flotante que pudiera integrarse en los jardines a modo de flor de loto. Se constituye de cuatro paraboloides hiperbólicos (Figs. 205-206) acristalados de cerca de 42 m de diámetro, de 25x30 metros en el inicio de su desarrollo, y con una altura máxima de 8,25 m en el exterior y 5,90 m en el interior, dando lugar a una

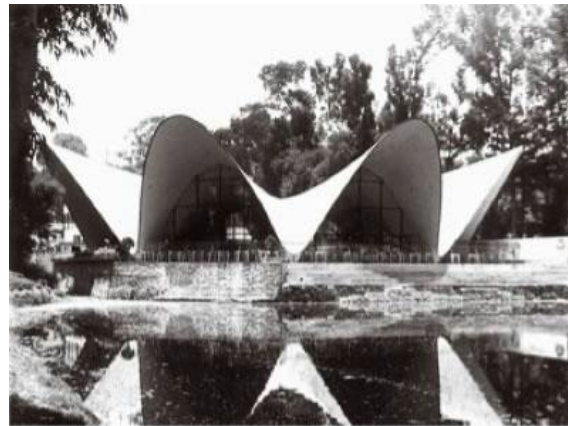


Fig. 205. Restaurante “Los Manantiales” en México.
Fuente: https://www.urbipedia.org/hoja/Restaurante_Los_Manantiales

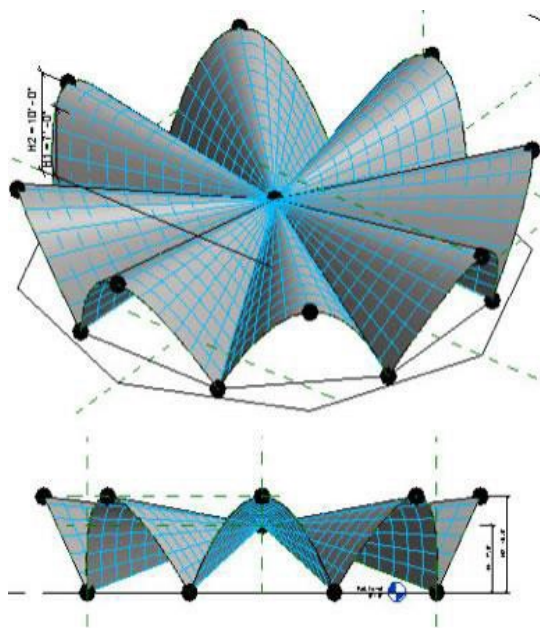


Fig. 206. Diseño tridimensional de la intersección de cuatro Hypars de “Los Manantiales”. Fuente: <https://www.augi.com/articulos/detail/mimic-a-master-builder-a-tribute-to-felix-candela>

espaciosa planta libre. Esta misma forma servirá de inspiración a arquitectos de muchos países. Entre ellos destacamos a Jörg Schlaigh, quien empleará una forma similar para realizar en 1977 su “Cascarón experimental” en fibra de vidrio, en Stuttgart, Alemania, y a Santiago Calatrava que empleará también esta forma, en homenaje a Candela, para realizar su colaboración, en 2002, en el Oceanográfico de la ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia.

Una versión más estilizada de la forma anterior fue la que empleó Candela para cubrir, en 1954, la Capilla de Nuestra Señora de la Soledad, conocida como “El

Atillo”, en *Coyocacán* (Fig. 207). Esta zona del sur de la Ciudad de México se caracteriza por la frondosidad de sus jardines, y por ser un espacio de recogimiento provinciano. De ahí que Candela tenga presente en este proyecto crear un espacio propicio para la meditación y que se fundiera con el paisaje. De este modo, diseñó una planta romboidal cubierta por un paraboloides hiperbólico de hormigón armado de bordes rectos, limitando sus generatrices y sus apoyos descentrados en el eje menor, y donde las puntas hacia los lados más largos se elevan, mientras que en la parte posterior empleó un elemento vertical en forma de cruz como soporte. Se trata de un tipo de bóveda libre, donde se eliminan los



Fig. 207. Capilla “El Altillo”. Fuente: <https://unavidamoderna.tumblr.com/post/38719984684/capilla-de-los-misioneros-del-esp%C3%ADritu-santo.jpeg>

elementos lineales de refuerzo necesarios para absorber las tensiones. Para ello se sustituyen los bordes por estructuras secundarias que trasladen los esfuerzos a los apoyos. Una forma similar, pero en equilibrio, será la que emplee Ulrich Mütter para el diseño de una “Parada de Autobús” en Binz, en Alemania Oriental, sirviéndole de ensayo para otros muchos proyectos, como la obra que le daría mayor fama, el icónico “Restaurante La Hoja de Maple”, en Berlín en 1973, donde empleará la técnica del hormigón proyectado. También Eero Saarinen, junto a Gensler Studio, diseñará, siguiendo este mismo concepto de cascarón de Candela, la mega construcción del Terminal de la TWA, Aeropuerto John F. Kennedy de Nueva York. En una época en que las compañías aéreas construían sus propias terminales como muestra de su pujanza, el arquitecto Eero Saarinen fue el encargado de realizar, entre 1956 y 1962, el que será su último trabajo. “La terminal de la TWA está esculpida como si de un símbolo de vuelo se tratara, abstracta, una alegoría al vuelo realizada en hormigón armado. A menudo ha sido descrita como la figura de “un águila tomando tierra”. Sus formas curvas evocan un vuelo fluido. El vocabulario formal del arquitecto moderno aparece en la simetría de la planta y los alzados, siendo el movimiento de las formas la inspiración principal, aun en los mínimos detalles, para desarrollar su diseño”⁹¹² [...] “antes de elaborar el proyecto analizó los movimientos de los recorridos a pie de flujos de usuarios, viajeros, acompañantes y visitantes en otras terminales, observando que sus trayectorias nunca eran rectilíneas. Cuando un peatón percibe la proximidad de un obstáculo, observó, sigue un camino curvilíneo similar a las

⁹¹² En: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-de-la-twa-aeropuerto-john-f-kennedy/>.

trayectorias aerodinámicas de algunos gases. [...] Saarinen analiza de esta manera el edificio como un artefacto entre máquina y órgano. La función, podría decirse, esculpe la forma de la terminal”⁹¹³. Por otra parte, Frei Otto empleará en su “Construcción de Carpa Experimental”, en 1960, una tenso-estructura de membrana. Se trata de un paraboloides hiperbólico que, en vez de estar armado, se realiza mediante una membrana plástica traccionada por cables, todo ello calculado geoméricamente.

A continuación se muestran algunas superficies activas de paraboloides hiperbólicos:

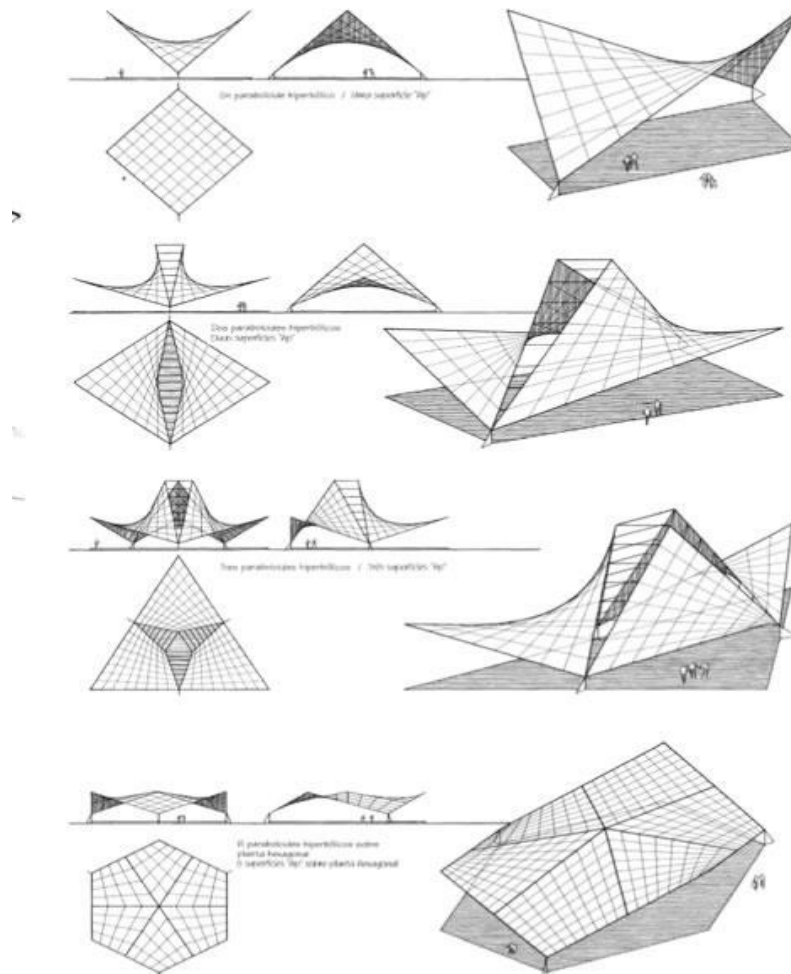


Fig. 208-211. Planta, alzado y perfil de superficies activas de paraboloides hiperbólicos.

Fuente:

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/16128/RodriguezCancela_Daniel_TFG_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Paraboloides hiperbólico unitario con bordes rectos, como estructura de superficie activa de planta cuadrada (Fig. 208).

⁹¹³ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 181.

- Intersección de paraboloides hiperbólicos con bordes rectos, como estructura de superficie activa de planta romboidal (Fig. 209).
- Intersección de paraboloides hiperbólicos con bordes rectos, como estructura de superficie activa de planta triangular (Fig. 210).
- Intersección de paraboloides hiperbólicos con bordes rectos, como estructura de superficie activa de planta hexagonal (Fig. 211).

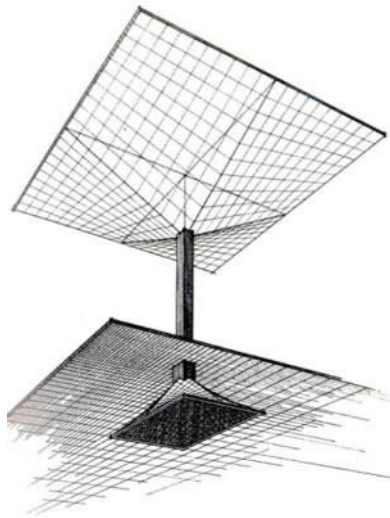


Fig. 212. Unidad modular y soporte de cimentación de forma de "paraguas".

Fuente:

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/16128/RodriguezCancela_Daniel_TFG_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Normalmente, para cubrir grandes superficies se emplean sistemas modulares. Candela, que se definirá como un constructor más que como un arquitecto, buscará lograr en sus obras la máxima economía de material y la máxima eficiencia estructural, de modo que una forma sostenible de conseguir estas características básicas consistirá en el empleo de estructuras modulares, donde a partir de un módulo eficiente, por repetición del mismo, se puede obtener un efecto reiterativo en forma de red. Una de sus más importantes aportaciones en este campo de trabajo será el denominado "paraguas", en el que, invirtiendo la estructura resultante de la combinación de varios segmentos de paraboloides hiperbólicos, se obtiene un paraguas invertido que se

apoya en un pilar (Fig. 212). Candela desarrollará diversas variantes de este sistema con el fin de poder ser aplicado no sólo para cubrir superficies industriales, sino también viviendas.

Una obra representativa de Candela, en la que pondrá en práctica estas soluciones modulares, será el "Estadio de los Deportes" de la ciudad de México (Fig. 213), que diseñará junto a Enrique Castañeda Tamborrell y Antonio Peyri, entre 1966 y 1968, año este último en que México fue sede de los Juegos Olímpicos. Se trata de una de las pocas obras en que Candela realizará un cascarón de cobre en vez de hormigón armado con forma geodésica, empleando los paraboloides hiperbólicos. Así, Candela, basándose en el racionalismo y teniendo como precedente las obras de Pier Luigi Nervi y más concretamente su Palacio de los Deportes de Roma, apostará por llevar a cabo una obra vanguardista, buscando una función escenográfica. Candela proyectará un edificio de planta circular cubierto mediante una cúpula geodésica reticulada en cuadrados (Fig.

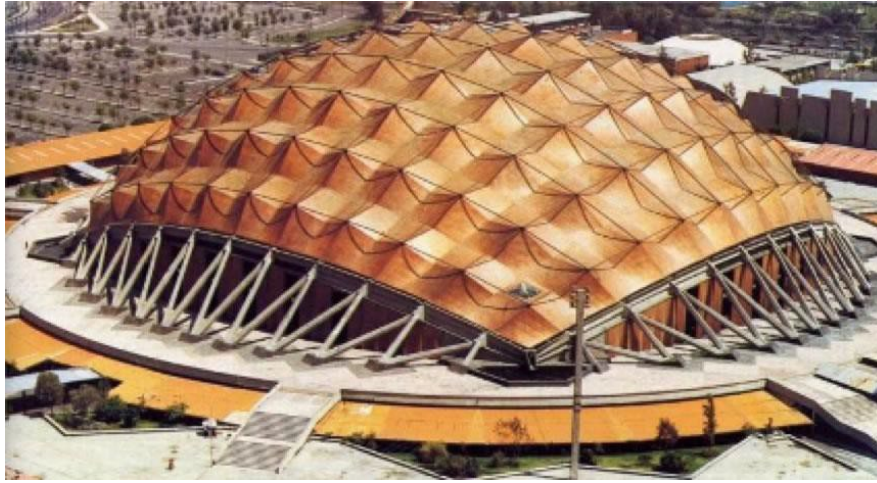


Fig. 213. Vista aérea del Estadio de los Deportes de México. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>.

214), que abarcarán un máximo de 160 metros, hasta cubrir una superficie aproximada de 27,171 m². Y donde múltiples pilares de hormigón cubiertos de ladrillo, junto a otros más esbeltos en V, actúan de contrafuerte en todo el diámetro exterior de la base de la cúpula, dando a su vez forma a los accesos al recinto. Esta armadura formada por rectas que configuran la geodésica tridimensional se repiten indefinidamente junto a los arcos de las cúpulas descansando sobre los contrafuertes. Un arquitecto que intercambiará ideas

en varias ocasiones con Candela será Emilio Pérez Piñero, el cual, a pesar de su pronto fallecimiento, concebirá una atractiva y original obra basada en estructuras desmontables y desplegadas. Sus estructuras desmontables se caracterizarán por el empleo de barras en “X” en el espesor de la estructura, con generación tanto de superficies planas como curvas. Finalmente, en



Fig. 214. Proceso de construcción de los paraboloides hiperbólicos con planchas de cobre. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>.

Londres, también destacamos la versión de los cascarones del “Proyecto Edén” que realiza Nicholas Grimshaw, que ya desarrollamos en el apartado del hexágono. En definitiva,

la obra de Candela ha permitido madurar la idea de que la arquitectura de concha sustituirá a la arquitectura de esqueleto; que al hormigón corresponde la concha esférica en oposición a la construcción de acero de la estructura esquelética, para la cual es adecuado el ángulo recto. Todos los intentos del arquitecto de combinar la construcción de hormigón con la construcción de esqueleto de acero deben ser considerados como un compromiso. El ángulo recto limita las posibilidades creadoras del arquitecto de nuestros días. La nueva arquitectura dinámica necesita sobre todo experimentos de construcción de concha, experimentos que nadie hasta ahora ha realizado en forma más perfecta que Félix Candela⁹¹⁴.

14.5.3. LA PARÁBOLA Y LA CATENARIA EN LA OBRA DE FREI OTTO

Frei Paul Otto (1925-2015) fue uno de los arquitectos-ingenieros que lideró la vanguardia de la arquitectura de las formas orgánicas. Nació en Siegmarsdorf, Chemnitz (Alemania), en una familia de escultores, pero creció en Berlín, donde comenzará sus estudios de arquitectura en la Universidad Técnica, poco antes de ser reclutado a prestar el servicio militar. Durante la Segunda Guerra Mundial fue entrenado como piloto de aviación. También estuvo prisionero en un campo de concentración en Francia, período durante el cual comenzó a trabajar como arquitecto de campo, lo que le obligó a experimentar con coberturas ligeras, con materiales de bajo costo y tiendas desmontables hechas con telas de cobertizo. Tras la guerra, volvió a Berlín, donde estudió Arquitectura en la Universidad Técnica. En 1950 fue becado a los Estados Unidos, completando allí sus estudios, y conoció a figuras tan importantes como Mies van der Rohe o Frank Lloyd Wright. En 1952 comenzó su práctica independiente en Berlín, obteniendo en 1954 también su doctorado en Ingeniería Civil.

Su arquitectura será una reacción contra los edificios macizos con columnas creados para la posteridad bajo el Tercer Reich en Alemania. La arquitectura será una cuestión existencial para Frei Otto quien, inspirándose en la línea de compromiso social que promovieron arquitectos como Bruno Taut en los años veinte a través del movimiento *Neues Bauen* y su “cadena de cristal”, exigiendo la desmaterialización de la arquitectura y, por tanto, su espiritualización, promocionará un tipo de arquitectura que pueda ser un hábitat terrenal para el hombre en la naturaleza: “[...] la tarea de los arquitectos no es

⁹¹⁴ KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea* ..., p. 77.

simplemente proveer de un refugio contra las fuerzas de la naturaleza, sino crear las condiciones que permitan a la gente vivir en armonía con la naturaleza y en paz los unos con los otros”⁹¹⁵. Por lo que, comprometido con el rechazo a cualquier forma del pasado asociada al sentimentalismo alemán sobre la patria nazi, ideará una arquitectura ligera, móvil, flexible, mutable y por lo tanto efímera, que pueda dar lugar a una sociedad nueva y abierta, y se consagrará por el uso de estructuras tensadas y de membranas ligeras sometidas a tracción que pudieran responder a las fuerzas aerodinámicas y estructurales.

Naturaleza y Autoformas, “Form Finding”

Otto considerará que la arquitectura debe de estar en un constante diálogo con la naturaleza, y “en esta búsqueda el entendimiento de la forma de trabajo de las geometrías contenidas o interpretables de la naturaleza ha sido una de las constantes de su sistemática labor a lo largo de los años. La naturaleza será vista como modelo de aprendizaje geométrico en el que las cosas se resuelven fácilmente, con el mínimo esfuerzo”⁹¹⁶.

Por ende, en 1957 fundará su famoso Instituto dedicado a la investigación de estructuras ligeras (I.L.) en la Universidad de Stuttgart. También en 1961 establecerá un grupo colaborativo de investigación integrado por biólogos, ingenieros y arquitectos, centrados en aplicar sus conocimientos en carpas, cáscaras y otras superficies ligeras para comprender mejor los diseños de las estructuras y formas biológicas. Según la clasificación que Rainer Bartlhel hizo en su libro *Natural Form*, haciendo referencia a los campos de intervención y experimentación que Otto llevó a cabo junto a su grupo de colaboradores, destacan: “tiendas y películas de jabón”, “*pneus e hydros*”, “construcciones suspendidas”, “inversiones de la forma suspendida”, “conchas en malla”, “estructuras en rama” y “formas de vida natural”⁹¹⁷. Así, realizó

experimentos con películas de jabón para producir modelos de tensoestructuras de membranas y redes de cables pretensados con áreas mínimas, experimentos con membranas traccionadas por aire o agua hechas con pieles de goma u otros materiales capaces de endurecer luego de inflados, experimentos con cadenas y redes de cadenas

⁹¹⁵ G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha”. *Rita: revista Indexada de Textos Académicos*, N.º 5, 2016, p. 107.

⁹¹⁶ *Ibidem*, p. 106.

⁹¹⁷ *Ibidem*, p. 106.

para hallar formas de construcciones colgantes estabilizadas por su propio peso y cáscaras comprimidas con la forma inversa de formas traccionadas suspendidas, tal como hacía Gaudí, experimentos con hilos para investigar estructuras ramificadas, experimentos con montañas de arena para estudiar construcciones de barro y experimentos con discos giratorios para investigar la estabilidad de construcciones de mampostería frente a cargas horizontales⁹¹⁸.

En definitiva, dirigió su interés al análisis de los procesos naturales de autogeneración de formas, lo que le condujo a desarrollar numerosos métodos de “form finding” o de modelado por autoorganización de la materia. [...] Estos experimentos consisten en procedimientos físicos relativamente simples que ponen en marcha, artificialmente, procesos naturales de selección de formas optimizadas para cumplir una determinada función. Podría decirse que la sistematización de estos experimentos, tal y como fue realizada en el I.L. por Frei Otto, vuelve más comprensible la manera en que la naturaleza selecciona las formas y pone en evidencia la infinita diversidad de morfologías posibles para cumplir óptimamente con una determinada función⁹¹⁹.

Los métodos “form finding” comenzaron a utilizarse como instrumentos de diseño a finales del siglo XIX [...] reproducían mecanismos naturales de autoorganización intentando descubrir formas eficaces para determinada función⁹²⁰.

Sin embargo, una de las grandes aportaciones de Otto estriba en haber dotado a estas estructuras de una enorme libertad formal, que no deriva de la aleatoriedad sino de la manifestación de los principios físicos que gobiernan estas tipologías mediante la generación de lo que podemos denominar *autoformas naturales*. Afirmaba Otto: “Mi planteamiento no es estructural. Utilizo conceptos que están en la naturaleza. La naturaleza viva se mueve en la tracción y en el equilibrio dinámico”⁹²¹.

De manera que, según Otto, “el arquitecto deberá centrar sus esfuerzos en generar una investigación experimental para obtener invenciones, creaciones informadas a través de la observación de los mecanismos que llevan a la naturaleza a generar sus formas, siempre con una ley de consumo de energía mínima y de empleo del menor material posible”⁹²². En este sentido, coincidirá con los planteamientos de arquitectos como Buckminster Fuller, que también visitará su departamento de estructuras. Y es que Otto siempre tuvo un contacto fluido con otras muchas autoridades en su mismo campo de

⁹¹⁸ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 211.

⁹¹⁹ *Ibidem*, p. 211.

⁹²⁰ *Ibidem*, p. 209.

⁹²¹ LÓPEZ-CÉSAR, I. y ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J. “Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales”. *Estoa: Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, Vol. 7, N.º 13, 2018, p. 15.

⁹²² G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha” ..., p. 107.

investigación, como pueden ser Eduardo Torroja, Félix Candela, Eladio Dieste y Pier Luigi Nervi, entre otros. Sin embargo, en vez de experimentar como la mayoría de ellos con estructuras de cáscaras, Otto se especializará en el estudio de membranas. “La condición estática en la que se resuelven las formas naturales es la que más le interesa, y esta ligazón científica numérica, así como su observación en busca de procesos y sus leyes, es la que le coloca igualmente en un territorio paralelo al de D’Arcy Thompson y sus estudios sobre el crecimiento y la forma”⁹²³. Así, en

el libro *Form follows nature. A history of nature as model for desing in engineering, architecture and art*, el arquitecto Rudolf Finsterwalder recoge el método de trabajo de Otto y varios de sus textos, como el dedicado al crecimiento y división de las *pneus*, o el relacionado con los caparazones de los crustáceos, Así mismo contiene el capítulo V, “Espículas y esqueletos espiculares”, del libro “Sobre el crecimiento y la forma” de D’Arcy Thompson, junto a textos y trabajos gráficos de otros autores importantes como Johannes Kepler o Ernst Haeckel, etc., siendo, por tanto, un compendio de la larga tradición histórica en que la naturaleza ha sido observada más allá de sus formas superficiales, desde las estructuras y los procesos que las hacen posibles”⁹²⁴. Sin embargo, Otto reconocerá que “en la actualidad el arquitecto se desentiende voluntariamente de las ciencias naturales, pero comete un grave error pues la construcción es una ciencia de la naturaleza aplicada”⁹²⁵.

Otto entiende que lo subjetivo, la visión personal, es fundamental para que se produzca la investigación con éxito, la experimentación sistemática no es suficiente, necesitamos que nuestra intervención activa haga visible los aspectos que siempre han estado ahí y que son perceptibles solo cuando damos ese salto cualitativo, cuando cambiamos el patrón de mirada para permitir un entendimiento no preestablecido, que evalúa las mismas cosas bajo nuevas perspectivas y que, por tanto, permite una revisión y un aprendizaje infinito sobre la naturaleza y sus procesos como enseñanza. [...] “La discusión sobre el concepto de infinito es de extremada importancia, algo que la mayoría de los arquitectos no entienden, que existen infinitas posibilidades para la arquitectura del futuro. No hay límites”⁹²⁶.

⁹²³ *Ibidem*, p. 107.

⁹²⁴ Cfr. G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha” ..., p. 107.

⁹²⁵ *Ibidem*, p. 109.

⁹²⁶ *Ibidem*, p. 108.

Estructuras superficiales

Desde muy joven, Otto tuvo la oportunidad de experimentar con la materia y su manipulación en el taller de escultura de su padre, donde eran frecuentes

los trabajos con telas empapadas en escayola suspendidos para luego ser utilizados de un modo inverso, que pusieron de manifiesto, de un modo experiencial, las demostraciones de Isaac Newton y Robert Hooke con respecto a la igualdad de las formas o diagramas de las fuerzas de las formas colgadas y erguidas, es decir, la igualdad de tensión de las estructuras a tracción y a compresión, que era ya una evidencia física para Frei Otto. Por lo tanto, no necesitó del aprendizaje a través de las estructuras de Gaudí de cadenas invertidas para también “inventarlas”, como proceso de búsqueda de la forma a través de funiculares invertidos. De hecho esta técnica se convirtió en una práctica común en su laboratorio para dar con la forma apropiada⁹²⁷.

Tal técnica aprendida será la que aplique en sus pabellones expositivos, ya que su arquitectura, al estar basada en unos pocos materiales capaces de adaptarse a cualquier sitio o terreno, y que una vez diseñados y prefabricados podían ser montados y desmontados en unos pocos días, será la más idónea para este fin.

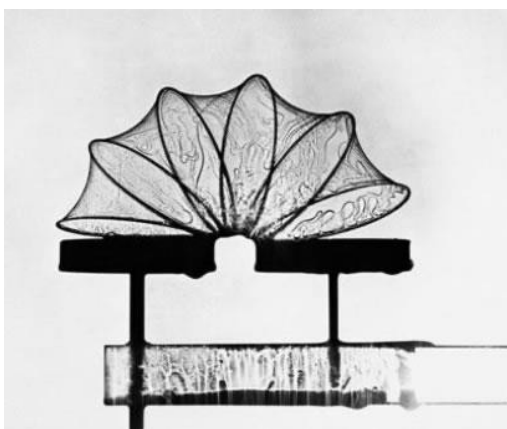


Fig. 215. Ensayo con superficies en jabón obtenido mediante marcos metálicos. Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/437764026260512993/>

En otro orden de cosas, durante los años 60, Otto continuará experimentando con pompas de jabón, aprendiendo a descubrir cómo curvarlas y plegarlas, a pesar de su fragilidad, para obtener modelos con los que llevar a cabo sus membranas sin tratar de imitar la naturaleza, sino comprendiendo sus mecanismos (Fig. 215). Una vez definidos y simplificados, se los transformará en técnicas eficientes para la construcción material, puesto

que, como Otto aseverará, “La Naturaleza no es imitable, es demasiado compleja”⁹²⁸. Se tratará de

⁹²⁷ *Ibidem*, p. 109.

⁹²⁸ *Ibidem*, p. 110.

superficies extremadamente delgadas en las que la forma es fruto de un equilibrio en el que la tensión superficial de la película consigue resolver con el mínimo esfuerzo posible la unión, desde una activación determinada mediante un elemento o anillo metálico que se introduce en la solución jabonosa”. Necesitaba por tanto un mecanismo para convertir en datos fidedignos estos experimentos que, por otro lado, tenían una vida estable corta, ya que una pompa de jabón ofrece una geometría pura y precisa pero inestable en el tiempo. Para ello trabaja con una máquina y técnicas de fotogrametría y aparatos de medición directa que permiten obtener datos de los experimentos de un modo iterativo. Estos datos se usarán luego en los cálculos y en la realización de un segundo modelo. A veces las maquetas le sirven para materializar un comportamiento de un modo permanente, o para ver cómo el cuerpo se deforma de modo elástico. “Nosotros construimos maquetas para conocer la forma y, una vez obtenida, construimos también maquetas para saber lo que ocurre en su interior.” [...] La forma, como ya habíamos visto, es consecuencia de un proceso de búsqueda, no se modela una figura según una forma prevista o anticipada o deseada, sino que la figura se extrae de lo desconocido a través de la experimentación”⁹²⁹. Este interés de Otto por el análisis de la relación entre forma y sollicitaciones estáticas en algunos fenómenos naturales, con el objetivo de optimizar y comprender mejor un sistema estructural, puede considerarse en la línea de las investigaciones morfológico-estructurales llevadas a cabo por Robert Le Ricolais y por Buckminster Fuller⁹³⁰.

Por otra parte, también “en los años 60 comenzó el desarrollo de programas informáticos basados en análisis de elementos finitos y matrices de rigidez para determinar con exactitud la forma óptima y las tensiones resultantes en cubiertas traccionadas, completando o sustituyendo el trabajo de modelos o maquetas. [...] Sin embargo, según Otto los modelos materiales le permiten visualizar y verificar mejor sus resultados, por lo que seguirá empleándolos al comienzo y final de sus diseños”⁹³¹. Entre los pabellones de exposiciones más importantes que Otto realizó, destacamos el de Alemania para la Exposición Universal de Montreal (Canadá) en 1967 (Fig. 216). Se trataba de una compleja estructura, topológicamente conformada por un paisaje de curvas parabólicas, en cuyo diseño tanto la matemática como la física jugaban un importante papel. Estaba constituida por una membrana textil de poliéster traslúcido, de unos 8000 m², suspendida mediante una red de cables de acero tensados, sujetos a 8 mástiles, y unos

⁹²⁹ *Ibidem*, p. 109.

⁹³⁰ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 208.

⁹³¹ *Ibidem*..., p. 209.

anclajes. En este pabellón, Otto experimentará por primera vez con una estructura traccionada, una geometría tan compleja que el sistema irregular creado resultará ser expresivamente de una libertad compositiva sin límites.

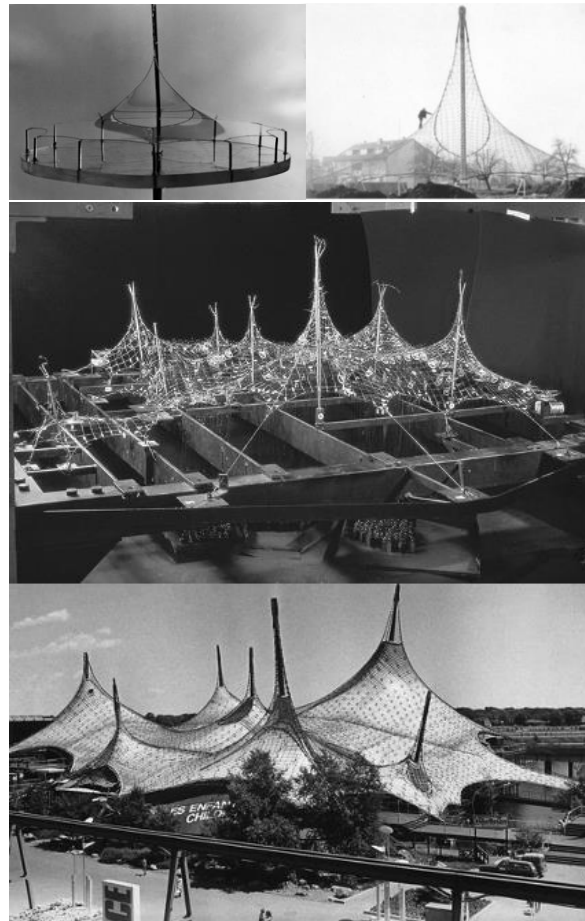


Fig. 216. Arriba: Modelo de piel de jabón equitensional y primer prototipo a escala real del Pabellón Alemán de la Exposición Universal de Montreal 1967. Fuente: Izquierda: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>. Derecha: LÓPEZ-CÉSAR, I. y ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J. *Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales...*, p. 14. Medio: Modelo de medición para determinar las fuerzas de los cables en la red del Pabellón Alemán de Montreal, 1967. Abajo: Imagen picado del Pabellón Alemán de la Exposición Universal de Montreal 1967. Fuente: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

En 1968 Frei Otto fue requerido para desarrollar las tensoestructuras proyectadas para cubrir de manera orgánica el Parque Olímpico de Múnich (1968-1972) (Fig. 217). Los espacios previstos incluían un estadio, un gimnasio, piscinas interiores, un restaurante y varias zonas recreativas exteriores, ocupando una superficie aproximada de unos 74800 m² (Fig. 218). Para proyectar estas estructuras colgantes Frei Otto realizó, junto a sus colaboradores, una serie de modelos en el I. L. siguiendo el mismo procedimiento que llevara a cabo un año antes para el diseño de la cubierta de la



Fig. 217. Vista desde el Olympiaberg a la arena de las cubiertas del Parque Olímpico de Múnich 1972. Fuente: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

Exposición Internacional de Montreal: primero modelaron una maqueta con pompas de jabón para definir las formas y su patrón como superficie mínima, luego un modelo con telas a escala; posteriormente construyeron otra maqueta con cables y cargas a escala en el laboratorio, con lo que pudieron comprobar su funcionamiento a través de sus deformaciones; y, por último, definieron los patrones geométricos de la malla (Fig. 219). En esta última fase, dada la precisión requerida y la complejidad no-lineal del proceso, se precisó crear un programa informático que pudiera realizar los cálculos matemáticos necesarios para diseñar el patrón de la malla. “Tal y como ocurre en un experimento de “form finding”, o en un proceso natural de autoorganización de la materia, la geometría de la estructura cubierta fue paulatinamente optimizada a través del trabajo con modelos cada vez más precisos, y del posterior ajuste con programas informáticos. El trabajo en colaboración entre arquitectos, ingenieros, matemáticos, programadores y contratistas



Fig. 218. Vista del Parque Olímpico de Múnich desde la Torre de Comunicaciones. Fotografía de Mercedes Torrens Bermejo.

resultó indispensable para el desarrollo de un proceso de diseño de estas características”⁹³².

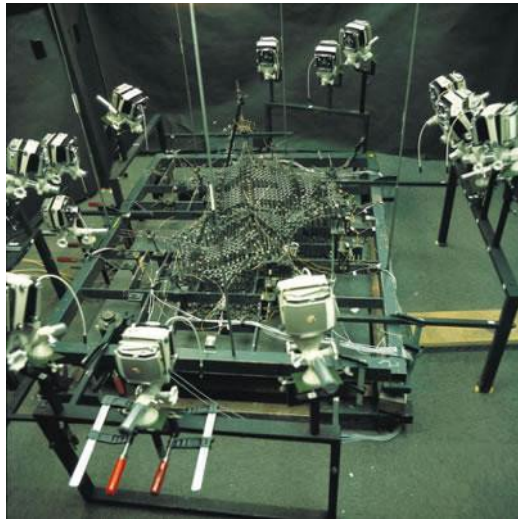


Fig. 219. Modelo de medición de la cubierta del parque olímpico de Múnich, 1972. Fuente: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

Doblar la malla hasta obtener una cáscara

En 1975 los arquitectos Carlfried Mutschler y Joachim Langer, ganadores del concurso en 1973 para el diseño del Multihalle temporal que cobijaría los pabellones para la Exposición de Agricultura en Mannheim, solicitaron la colaboración de Frei Otto, quien ya había diseñado y edificado en Essen la Feria para la construcción de 1962. En esta ocasión, Frei Otto “propuso la construcción de una cáscara comprimida con una forma curva, libre y continua. [...] Finalmente, la cubierta del edificio fue diseñada como una superficie geodésica continua y de gran complejidad geométrica, formada por una trama cruzada de listones de madera que cubre un espacio de 7400 m² en planta, y alcanza una altura máxima de 20 metros. En los dos espacios multiusos principales salva luces de 30x55 y 60x80 metros respectivamente”⁹³³.

El procedimiento llevado a cabo para el primer ensayo fue similar al modelo funicular que Gaudí ideó para el diseño del templo de la Colonia Güell.

⁹³² *Ibidem*, p. 222.

⁹³³ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 223.

Otto aprovechó para aplicar directamente sus recientes investigaciones. Inmediatamente se puso a trabajar con maquetas realizadas con mallas de cadenas cargadas con pesos para una obtención de la forma. Las formas con las que se empieza a trabajar provienen de los estudios previos con pompas de jabón y con secuencias de sumas de pompas de jabón, así como sus estudios sobre formas neumáticas e hidráulicas. En paralelo al trabajo con estas formas invertidas de mallas de cadena, se trabaja con el ordenador en la retícula principal, de tal modo que el dibujo provenía del ordenador, pero a través de los datos de forma y geometría obtenidos de la información estereofotométrica del modelo físico construido por el equipo de Otto a escala. Otto utiliza el término “*gridshell*” para referirse a “tramas deformables” que normalmente ejecuta en madera. Estas tramas se resuelven mediante nudos flexibles y están constituidas por varias capas superpuestas, lo que permite la flexibilidad y la sección suficiente para evitar el pandeo. El cálculo del ángulo de inclinación de cada nudo en ambas direcciones confiere a la superficie la capacidad de doble curvatura y, al contrario que las conocidas estructuras colgadas de Montreal y Múnich, los elementos de la estructura trabajan todos a compresión, en lugar de estar traccionados. Otros elementos diagonales son necesarios en este tipo de estructuras para resolver los problemas de estabilidad de la estructura. En el caso de Mannheim la solución será aportada por cables que circulan por las diagonales de los cuadrados de la malla para fijar la deformación de esta en un punto determinado. Estos elementos de rigidización de acero son incorporados también en el cálculo⁹³⁴ (Fig. 220).

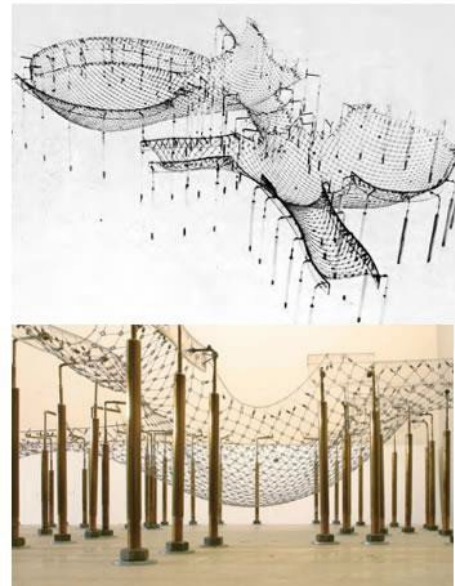


Fig. 220. Centro Multifuncional de Mannheim. Arriba: Ensayo con maqueta invertida con pesos para la obtención de la forma: Fuente: OTTO, Frei. *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, p. 140. IL Archive. *apud* LÓPEZ-CÉSAR, I. y ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J. *Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales...*, p. 14. Abajo: Modelo colgante. Fuente: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

Nunca antes se había construido una cáscara de madera mediante listones de estas dimensiones, la cual para ser suficientemente resistente precisaba de un sistema doblemente multicapa; de ahí que también se programara un modelo matemático no-lineal para su diseño. La malla de madera de cicuta americana se montó en obra sobre el suelo, y poco a poco y con mucho cuidado se fue ajustando a su lugar por su propio peso;

⁹³⁴ G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha” ..., p. 111.

por eso, en tal procedimiento estuvo implícito el concepto de autoorganización. Debido a las grandes dimensiones, el proceso fue muy largo, y se precisó de muchos andamios para que por su propio peso fuera adquiriendo la forma deseada. La piel del edificio se realizó con fibras de poliéster entretejidas, recubiertas de un material de PVC protector (Fig. 221). El edificio que diseñó Otto resultó ser una construcción asombrosa, desde el espacio interior hasta el más mínimo detalle de la estructura. “La más compleja cubierta



Fig. 221. Centro Multifuncional de Mannheim. Fuente: <https://www.designboom.com/architecture/frei-otto-a-life-of-research-construction-and-inspiration-detail-book-report-06-02-2015/.jpeg>

sencilla del mundo”⁹³⁵, que sirvió a la vez como restaurante y espacio expositivo. La metodología de diseño de proyecto pergeñada por Frei Otto y sus colaboradores ha sido primordial para el posterior desarrollo de estructuras.

“Hoy en día es posible llegar a resultados similares a los de estos experimentos utilizando programas informáticos especializados. El arquitecto alemán Bodo Rasch ha desarrollado modelos numéricos basados en los experimentos físicos llevados a cabo por Frei Otto y los ha combinado con programas de dibujo asistido por ordenador (CAD). En el futuro se prevé la creación de varios modelos numéricos con la ayuda de algoritmos informáticos basados en matemáticas fractales que puedan ser utilizados para simular estos procesos de autogeneración de formas”⁹³⁶. Si bien,

ante el debate de la precisión del sistema o la fiabilidad del mismo, Frei Otto plantea que la fiabilidad de los sistemas de cálculo por ordenador dependerán de la fiabilidad del ingeniero y no del programa en sí mismo. Los métodos de cálculo en cualquier caso

⁹³⁵ *Ibidem*, p. 113.

⁹³⁶ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., pp. 211-212.

mantienen el error de ser métodos aproximativos, en los que ni siquiera las cargas que se consideran son reales. Además, cuando uno trabaja en el límite, los cálculos por ordenador a veces no son suficientes y es necesario acudir a otros sistemas como los modelos físicos a escala, algo que comparte con sus ingenieros habituales: el equipo de Ove Arup y el de Ed Happold. No siempre las cosas construibles son calculables y tradicionalmente así ha sido en la historia de la invención arquitectónica. Para Otto, con el uso de los ordenadores solo encuentras lo que buscas, aquello que en el fondo has metido previamente, no es posible encontrar en él invenciones, sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se está buscando, el proceso es más abierto y creativo⁹³⁷.

Por otra parte, “a finales del s. XX ocurren dos hechos fundamentales. En primer lugar, la sensibilización social hacia el respeto del entorno natural, derivada del calentamiento global y de la certeza del agotamiento de los combustibles fósiles, cristaliza en el surgimiento de nuevas corrientes arquitectónicas basadas en la sostenibilidad, el reciclaje o el uso de materiales cuya manufactura precisa menor consumo energético. En segundo lugar, se produce un enorme desarrollo tecnológico de los productos derivados de la madera. Ambos hechos confluyen en la primera Exposición Universal del s. XXI, celebrada en Hannover en el año 2000, la cual, titulada “Hombre, Naturaleza y Tecnología”, constituirá el marco ideológico ideal”⁹³⁸. Así, el propio techo que cobijaba la Exposición, realizado con diversas variantes de la madera, sería una brillante muestra de las posibilidades del diseño con este material reciclable.



Fig. 222. Pabellón japonés en la Expo Hannover 2000. Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-japon-expo-2000-en-hannover/>

Entre los pabellones internacionales diseñados para la Exposición destacó el Pabellón de Japón, proyectado por el arquitecto Shigeru Ban 1957 (conocido por sus revolucionarias arquitecturas emergentes con materiales económicos e inusuales como el

⁹³⁷ G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha” ..., p. 110.

⁹³⁸ LÓPEZ-CÉSAR, I. y ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J. “Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales” ..., p.

papel o el plástico), en colaboración con Frei Otto (Fig. 222). Para este fin diseñaron durante tres años la que finalmente sería la construcción definitiva del pabellón, una edificación temporal que tardarían en montar tan sólo tres días, realizada principalmente con tubos de papel prensado (Fig. 223), con el doble propósito de ser un reflejo de la tradición japonesa de la construcción en papel, y también de facilitar su desmontaje y reciclado, causando el menor impacto ambiental una vez finalizada la exposición.



Fig. 223. Detalle estructura del Pabellón Japonés Expo Hannover 2000 hecha con tubos de cartón. Fuente: <http://www.wikiarquitectura.com/building/japan-pavillion-expo-2000-hannover/>

Con una superficie de 3600 m² y una altura de 16 metros, se trataba de una estructura ondulada cuadrangular de diseño paramétrico en doble curvatura. El sistema portante se realizó mediante una red laminar en arcos compuestos de 440 tubos de cartón de 20 metros de longitud, conectados con empalmes de cinta metálica, que dotaba a la red de la flexibilidad suficiente como para poder adaptarla a la forma sinusoidal, a modo de

panal, que, por otra parte, se contempló como la más idónea para resistir la inercia de los fuertes vientos alemanes. La cimentación de la estructura se compuso de cajones con marcos de acero y zapatas de madera rellenas de arena reutilizable. Para la cubierta se empleó una membrana de papel japonés, compuesto de cinco capas ignífugas e impermeables, así como por una capa de PVC traslúcida especial, que no producía dioxinas tóxicas para el medio ambiente (Fig. 224). Finalmente, a pesar de que según Ban

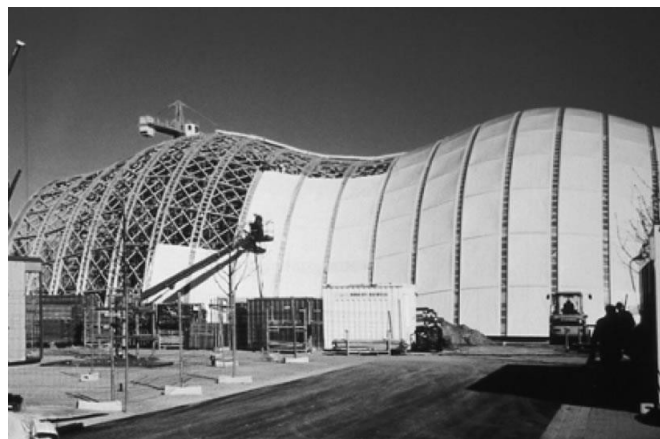


Fig. 224. Estructura de soporte cubierta con una membrana de papel como piel de la cubierta del Pabellón japonés en la Expo Hannover 2000. Fuente: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

era totalmente innecesario, las autoridades ingenieriles obligaron a dotar a la estructura de marcos de madera estabilizados con cables tensados a 60° desde la base, al no estar contempladas en la normativa alemana las construcciones hechas en papel.

Al cabo del tiempo, Frei Otto, reconocido por sus ideas visionarias, diseños arquitectónicos asociados al uso de las tensoestructuras, mente inquieta, afán por compartir de forma desinhibida conocimientos e invenciones, espíritu de colaboración y preocupación por el uso cuidadoso de los recursos, y por toda una vida dedicada a la investigación constructiva, fue galardonado con el Premio de Arquitectura Pritzker en 2015.

14.6. LOS FRACTALES EN:

- LA IGLESIA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI.
- LA CASA BATLLÓ, LA CASA MILÁ Y LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ.
- EN LAS ESTRUCTURAS DE ROBERT LE RICOLAIS.

La arquitectura fractal es una forma creativa con la que la mente se enfrenta a la incertidumbre. En ella la fractalidad emerge en distintos grados, como veremos en los ejemplos que se citan a continuación. Sin embargo, el gozo mental experimentado al percibir cada uno de ellos es una evidencia.

14.6.1. LOS FRACTALES EN LA IGLESIA DE SANT'IVO ALLA SAPIENZA DE BORROMINI

Durante el pontificado del papa Urbano VIII Barberini (1623-1644), a Borromini se le nombró arquitecto de la Universidad de la *Sapienza* (la Universidad de Roma), lo que le permitió realizar una de sus obras maestras, la iglesia de San Ivo. Aunque comenzó a trabajar en este templo en 1642 (un año más tarde de finalizar San Carlino), no lo terminó hasta veinte años después, por lo que continuó su construcción también bajo el pontificado primero de Inocencio X Pamphili (1644-1655), y después de Alejandro VII Chigi (1655-1667), razón por la cual, como más adelante veremos, coexisten en la iglesia alusiones simbólicas de estos tres papas.

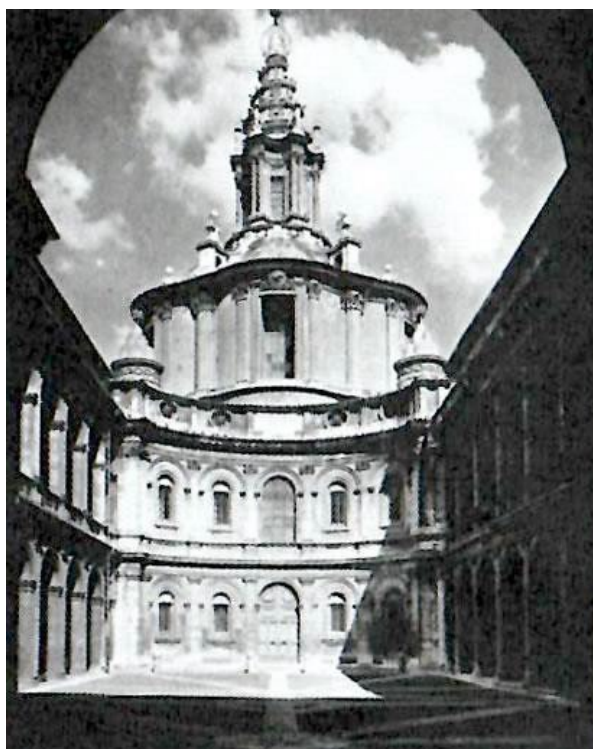


Fig. 225. San Ivo. Vista desde la logia del patio. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 347.

San Ivo, que se halla detrás del patio estilo Renacimiento de la Sapienza, es tal vez el ejemplo más representativo de la expresividad e innovación arquitectónicas de Borromini, donde supo fundir magistralmente, en un todo armónico, la cóncava logia del patio del Renacimiento con la convexidad del tambor que envuelve la cúpula de la iglesia (Fig. 225). Como dice el arquitecto Eusebio Alonso García:

Guiacomo della Porta, al realizar el trazado cóncavo de la fachada que cierra el patio, introdujo una sensación de retorno sobre la fuga perspectiva que dibujan las arcadas de las logias. Con la triple convexidad que percibimos del tambor hexalobulado, Borromini realiza una operación especular, devolviendo la fuga espacial sobre el ámbito de las galerías, enunciando una intención que se confirma, tanto en el diseño de la planta como en la solución volumétrica, con la precisa identificación dimensional entre el espacio del patio y el volumen de la iglesia⁹³⁹.

De entre las fuentes, de las que algún modo podemos sacar conclusiones acerca de las ideas inspiradoras de Borromini, destacan

⁹³⁹ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 347.

la extensa introducción al *Opus architectonicum, con grabados del Oratorio* de San Felipe Neri, en la que estuvo trabajando desde 1637 hasta 1650. Se halla escrita en primera persona, pero el texto fue en realidad preparado por Vigilio Spada, que era prior (*preposito*) del Oratorio. [...] Un *Memorandum* dirigido al cardenal Camillo Pamphili, que contiene un proyecto de la villa que el cardenal estaba pensando construirse fuera de la Porta de San Pancrazio. Y una guía manuscrita de Roma escrita por Fioravante Martinelli, amigo personal de Borromini. [...] De estos textos se deduce inmediatamente un punto fundamental: Borromini era un innovador consciente, pero como muchos otros innovadores, se apoyaba de modo considerable en la autoridad de anteriores maestros del arte. Ello se pone de manifiesto con toda claridad en una frase de la dedicatoria que encabeza la *Opus architectonicum*, en la que afirma que su propósito es realizar “cosas nuevas” y no “diseños convencionales”, pero lo justifica refiriéndose a Miguel Ángel que hizo lo mismo [...] Martinelli hace esta misma observación, aunque referida a los antiguos en lugar de a Miguel Ángel, cuando dice que se eligió a Borromini para restaurar la iglesia de San Juan de Letrán “por la viveza de su invención [...], por su conocimiento de las reglas de Vitrubio y por su experiencia en la imitación de las obras de los mejores maestros de la arquitectura de entre los griegos y los romanos”⁹⁴⁰.

Según Blunt, muchas de las invenciones más revolucionarias de Borromini se basaban directamente en modelos obtenidos de ambas fuentes. Sin embargo, aunque Borromini era gran conocedor de la arquitectura antigua y del siglo en que vivió, se destacó entre sus contemporáneos, como ya hemos recalado anteriormente, por su actitud crítica frente a la tradición, desarrollando una metodología estructural y proyectual únicas. Y es que

en el interior de síntesis tipológicas, que Borromini adopta constantemente como método de configuración del espacio, se insinúa siempre un bricolaje de modulaciones, de memorias, de objetos extraídos de la antigüedad clásica, de la baja antigüedad, del paleocristianismo, del gótico, del humanismo de Alberti y del humanismo utópico-romántico, de los más variados modelos de la arquitectura del Quinientos: desde las compenetraciones espaciales de Peruzzi, las contracciones anamórficas de Miguel Ángel o de Montano, al decorativismo antropomórfico de Pellegrini, o a las tentativas de reestructuración espacial de Vignola o de Palladio⁹⁴¹.

⁹⁴⁰ BLUNT, A. *Borromini...*, pp. 29-30.

⁹⁴¹ TAFURI, M. *Teorías e historia de la arquitectura: hacia una nueva concepción del espacio arquitectónico*. Barcelona: Laia, 1972, p. 41.

En resumidas cuentas, las invenciones de Borromini surgen como resultado de la metamorfosis suscitada sobre modelos citados de la tradición. Así, en San Ivo podemos observar además cómo “se encuentran y chocan el modelo del espacio unitario del Panteón con la sugestión, quizá, de la iglesia vitozziana de la Trinidad de Turín, con la memoria de las incisiones de Kircher y de la iconología de Ripa”⁹⁴².

Por otra parte, “Miguel Ángel rompió con la tradición de la arquitectura de la línea y el plano, que tenía vigencia en su época, y concibió un nuevo arte arquitectónico plenamente tridimensional, “por así decirlo, vivo. Esta cualidad se halla sin duda entre las que más profundamente apreciaba Borromini en los edificios de Miguel Ángel, que con tanta devoción estudiara”⁹⁴³. En efecto,

Borromini se consideraba el heredero espiritual de Miguel Ángel, y no le faltaba razón. La historia de la arquitectura romana entre, más o menos, 1565 y 1620, presenta una serie de prudentes avances que parten de Vignola, donde de vez en cuando se incorpora algún detalle -una puerta o una ventana- tomado de Miguel Ángel. [...] Sólo Borromini amó realmente los edificios de Miguel Ángel y comprendió los principios que lo inspiraban: la inventiva en el trazado de las plantas, el tratamiento plástico del muro, las originalidades en el detalle cuidadosamente pensadas, y todo ello combinado con un profundo conocimiento de la mecánica y una gran destreza en la técnica de la construcción, de tal modo que lo que a simple vista parece ser una demostración deliberada de ingenio resulta ser muchas veces la solución de algún problema práctico. Todos estos rasgos pueden encontrarse en los edificios de Borromini como en los de ninguno de los demás arquitectos del Seicento⁹⁴⁴.

En consecuencia, “al igual que Miguel Ángel, Borromini fue acusado por sus coetáneos más conservadores, aunque de una forma mucho más encarnizada, de anárquico transgresor de las normas, muy a pesar de que cómo dice Martinelli, hubiera estudiado las obras de los antiguos, de que comprendiera los principios de arquitectura establecidos por Vitruvio y de que no quisiera instaurar una nueva escuela en esta disciplina”⁹⁴⁵. En otro orden de cosas,

⁹⁴² *Ibidem*, p. 42.

⁹⁴³ BLUNT, A. *Borromini ...*, p. 55

⁹⁴⁴ *Ibidem*, p. 225.

⁹⁴⁵ *Ibidem*, p. 226.

hay una tercera autoridad a la que Borromini acude además de a Miguel Ángel y a los antiguos, y es la Naturaleza. La idea de que la arquitectura se basa en la Naturaleza fue un lugar común en los siglos XV y XVI, aunque tomando varios significados diferentes. Algunos tratadistas recogen la idea que expresara Vitrubio de que las columnas imitan la forma de los árboles que en épocas primitivas sostenían los techos de los edificios, y algunos arquitectos como Bramante en su logia de San Ambrosio de Milán o Philibert de l'Orme en su tratado de arquitectura, idearon columnas con forma de árboles, con los arranques de las ramas unidas al tronco. [...] Con Alberti la teoría de que la arquitectura imita la naturaleza se unió el principio aristotélico de que ésta se basa en unas leyes, y de que tiende a la perfección que en sus obras concretas no logra alcanzar por accidente. Es tarea del arquitecto- al igual que del pintor o del escultor- buscar esa perfección, esa armonía, y materializarla en sus obras. La mayoría de lo existente en la Naturaleza se asocia con frecuencia al principio matemático, bien a la idea platónica de que la Naturaleza se compone de cinco sólidos regulares, bien a la creencia pitagórica en el valor entero de las relaciones numéricas. Las proporciones válidas de un edificio se basaban para Palladio en ciertas relaciones aritméticas simples que se derivaban de la armonía musical. Para Alberti y otros esa conexión se daba más bien con la geometría, y afirmaban, por ejemplo, que los arquitectos debían trazar sus iglesias sobre planta circular, ya que el círculo, como forma que poseía una simetría perfecta en relación a todos los ejes, era el símbolo de la perfección de Dios⁹⁴⁶ [...] La voluntad de abstracción teórica de Alberti, que aplica además en sus obras, es abandonada por Borromini, cuyas referencias a la naturaleza resultan más analógicas y expone en clave paradójica: “no sin misterio he hecho los balaustres triangulares y los he colocado uno al contrario del otro...Sabiendo que muchos, que no saben inventar, han creído que está hecho por mero capricho, y que es impropio que una parte de los balaustres sea más gruesa por arriba que por abajo, no advirtiendo que la naturaleza, a la cual debemos imitar, produce árboles bastante más gruesos por los pies, también ha hecho al hombre más grueso por arriba que por los pies”. Guarini participará también de esta misma mirada hacia la naturaleza atenta a su complejidad y a su posibilidad de importar para la arquitectura analogías formales y, considerando el movimiento pulsante y ondulatorio como la propiedad fundamental de la naturaleza, afirmará: “El movimiento espontáneo de la dilatación y contracción no procede de ningún principio, pero aparece en todo ser viviente”⁹⁴⁷.

De manera que, según Blunt,

⁹⁴⁶ *Ibidem.* p. 50.

⁹⁴⁷ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 251.

hacia el siglo XVII la identificación de la Naturaleza y la ciencia matemática era ya ampliamente aceptada, y la hallamos expresada con claridad en las obras de Galileo, quien afirma que “el gran libro de la Naturaleza... está escrito en el lenguaje de la matemática, y son sus caracteres triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra de él”. Las obras de Galileo se estudiaban intensamente en los círculos intelectuales romanos cuando Borromini era joven, y pensamos que es de él de quien el arquitecto tomó su concepción de la Naturaleza. De ser así, ello explicaría un aspecto fundamental del método de trabajo de Borromini: el de obtener sus más complejas y aparentemente caprichosas trazas mediante una serie de operaciones geométricas. Se ha señalado con frecuencia que las plantas de *San Carlo alle Quattro Fontane* y de *Sant'Ivo* están basadas en una serie de triángulos y de círculos, pero nunca se ha subrayado suficientemente el hecho de que se concibieran a partir de esas figuras geométricas. No se trata simplemente de que podamos superponer a la planta una serie precisa de tales figuras, sino de que en los dibujos previos podemos ver que las plantas se obtuvieron mediante ese procedimiento⁹⁴⁸.

Luego lo que queda claro es que la planta de ambas iglesias, que a priori parecen tan complejas, se halla sujeta a un esquema geométrico básico:

Afortunadamente poseemos un testimonio directo que nos confirma la hipótesis de que Borromini concebía la arquitectura en términos matemáticos. Lo obtenemos de la carta que el arquitecto escribió al cardenal Camillo Pamphili acompañando a las trazas de su villa. Explica en ella que el edificio iba a tener treinta y dos ventanas situadas de tal forma que las líneas trazadas desde el centro del edificio hasta ellas corresponderían a los treinta y dos puntos de brújula, que representan los treinta y dos vientos, estando otros cuatro puntos del edificio unidos por líneas que representarían los trópicos de Cáncer y Capricornio. Iba a haber dos habitaciones con cúpulas hemisféricas en las que podría pintarse la bóveda celeste, al igual que en la Domus Aurea de Nerón. Otros elementos indicarían muchas cosas “que los matemáticos nos enseñan a partir de la esfera”; Borromini termina así el pasaje: “Todo el edificio sería, en realidad, un estudio de matemática aplicada”. Para Borromini, el vínculo esencial entre la arquitectura y la Naturaleza era, en mi opinión, la matemática⁹⁴⁹.

⁹⁴⁸ BLUNT, A. *Borromini...*, pp. 50-52.

⁹⁴⁹ *Ibidem*. p. 54

Y, en definitiva, “de lo que se ha dicho hasta aquí puede deducirse claramente que poseemos amplios testimonios en apoyo de la apreciación que hiciera Martinelli de Borromini como arquitecto que, aunque lleno de inventiva, conocía bien las obras de la Antigüedad y la teoría de su arte. Si se apartó de la tradición fue con conocimiento pleno de lo que estaba haciendo, y teniendo en mente un objetivo muy definido. El análisis de sus obras nos revelará cómo combinaba razón e imaginación cuando se enfrentaba a los problemas de la práctica constructiva”⁹⁵⁰. Ejemplo de ello es que “el método de Borromini consiste en dotar a un organismo del mayor número de “privilegios espaciales”, remitiéndose libremente a las reglas de centralidad y de monoaxialidad, se lleva hasta sus últimos términos con un carácter consecuente y casuístico que retoma a distancia de más de un siglo el método de Serlio”⁹⁵¹.



Fig. 226. Cúpula de San Ivo. La conquista de la pura centralidad en la cúspide de la cúpula a través de la metamorfosis operada en la envoltura muraria. Y el desarrollo mixtilíneo del entablamento, junto a la alternancia formal de capillas, enuncia un efecto de rotación. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...* p. 61.

Empero, si tenemos en cuenta que “toda arquitectura es una estructura del espacio mediante una meta o un camino”⁹⁵², Borromini “afrenta la necesidad de demostrar la validez de su proceso de metamorfosis para alcanzar la idea de espacio unitario a través de un espacio continuo, que se demuestra en la consecuencia plástica de su envolvente. En este sentido, sus espacios más significativos eluden la planta central pura y, sin

⁹⁵⁰ *Ibidem*, p. 55

⁹⁵¹ PORTOGHESI, P. *El ángel de la historia. Teorías y lenguajes de la arquitectura* ..., p. 222.

⁹⁵² NORBERG-SCHULZ, C. *Existencia. Espacio y Arquitectura*, Barcelona: Blume, 1975, p. 16.

embargo, explicitan la conquista de la idea de centralidad en la cúspide de sus bóvedas”⁹⁵³ (Fig. 226). “La forma de la base se proyecta en el entablamento y sólo gradualmente va desapareciendo, hacia lo alto, hasta convertirse en un círculo perfecto del que arranca la linterna”⁹⁵⁴.

Pero el observador profano, lo único que con toda probabilidad admira es la animación y riqueza de movimiento. El impulso artístico de su creador puede ser captado sin necesidad de analizar la complicada concepción del espacio que aquel edificio encierra; ciertamente, la vista no puede percibir la elemental base matemática que encierra el trazado de la planta. [...] Esta forma dominante apenas si se hace más evidente en la planta que lo que ocurre con el esqueleto de un animal sano; sólo lo percibimos después de un detenido examen mediante los rayos X⁹⁵⁵.

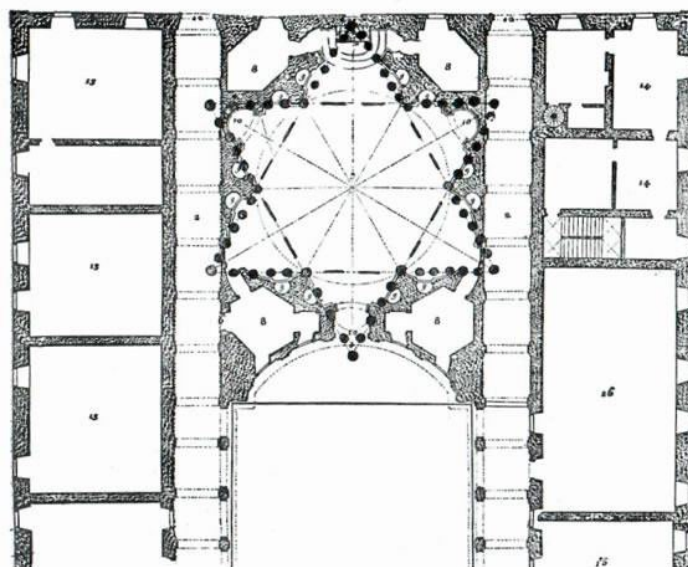


Fig. 227. San Ivo, Roma, 1642, Planta inferior. Construida en el patio renacentista de la *Sapienza*. San Ivo se funde en un conjunto integral de unidad. Fuente: GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 117.

Así, la planta de la iglesia de *Sant'Ivo alla Sapienza* presenta un esquema que, a priori, nos puede parecer centralizado, como la planta que proyectó Giacomo Della Porta. “El círculo, que como es sabido, es la figura que contiene la máxima superficie con el mínimo perímetro, constituía a su vez la representación de la infinitud, por no tener ni

⁹⁵³ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini* ..., pp. 41-42.

⁹⁵⁴ RAMÍREZ, J. A. *Edificios y sueños (ensayos sobre arquitectura y utopía)*. Málaga: Universidad de Málaga y Salamanca, 1983, p. 195.

⁹⁵⁵ GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 115.

principio ni fin”⁹⁵⁶. Sin embargo, Borromini resuelve la planta dibujando un triángulo equilátero cuyos lados divide en tres partes iguales, quedando así definido el hexágono estrellado (Fig. 227) de modo que, al hallar su centro mediante las bisectrices de los ángulos y trazar la circunferencia circunscrita, se delimitan las seis hornacinas cóncavas asimétricas respecto del centro, incluida la capilla mayor, transmitiendo en un efecto de rotación, dos medidas ya ensayadas en San Carlino:

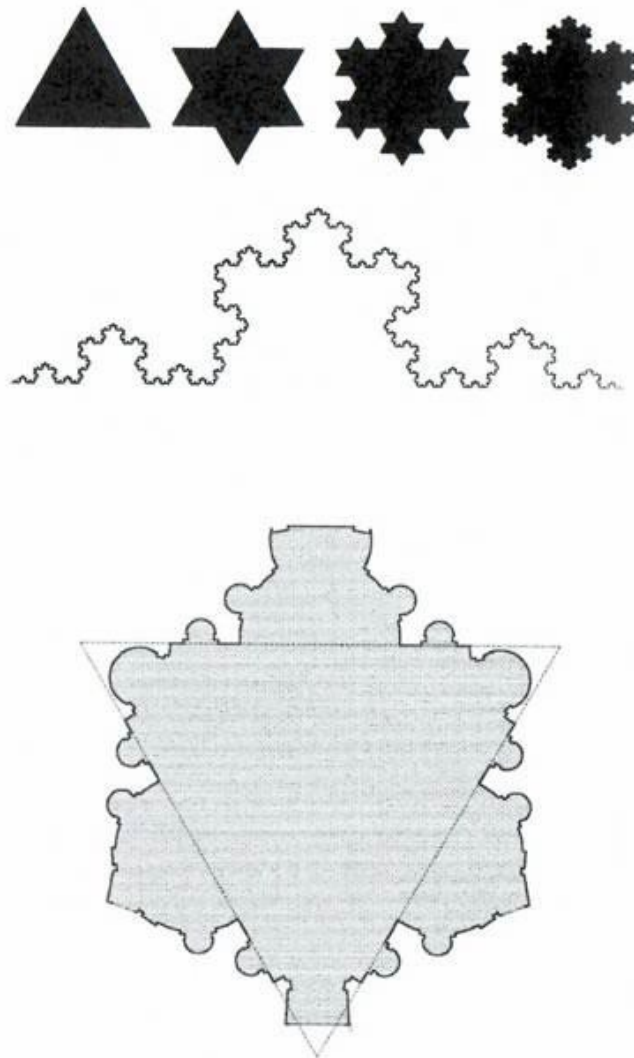


Fig. 228. Arriba: Helge von Koch: El copo de nieve, 1904 (de B. Mandelbrot). Debajo: Autor: Eusebio Alonso García. San Ivo, planta del perímetro interior. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...* p. 250.

la idea de expansión espacial en la dirección de las capillas y el mayor desarrollo del perímetro, a través de los sucesivos pliegues operados en su contorno, cuyo mecanismo,

⁹⁵⁶ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 248.

por iteración, enuncia la posibilidad de crecimiento ilimitado. Esta última contingencia ha sido ya expresada matemática y contemporáneamente en la “curva de Koch”, con la que el contorno de San Ivo guarda una similitud en cuanto a su génesis, forma y dos cualidades que nos parecen pertinentes en este análisis: el proceso de crecimiento, mediante la subdivisión de los lados del triángulo inicial y de sucesivos triángulos cada vez más pequeños, produce un crecimiento continuo y una longitud del perímetro infinita; no obstante, su área es siempre menor que la del círculo trazado alrededor del triángulo primitivo. Por lo tanto, un contorno *infinitamente* largo rodea un área finita, capaz de crecer indefinidamente⁹⁵⁷ (Fig. 228).

Por otra parte, entre los precedentes que J. A. Ramírez encuentra para esta iglesia organizada, por tanto, sobre una estrella de seis puntas, puede estar la obra de Serlio, cuyos diseños de Templo Antiguo en el libro III de su tratado, o el dibujo para una chimenea en el libro VII, representan formas con alternancia entre ángulos agudos y concavidades similares a la planta de San Ivo. También destaca Francesco Contini, cuyo Casino Barberini en Palestina se compone de un cuerpo bajo triangular soporte de uno alto hexagonal.

En cuanto a la coincidencia iconológica entre el hexágono, en referencia a las abejas, y la estrella de seis puntas formadas por dos triángulos girados, recordamos que “Urbano VIII fue llamado “rey de las abejas” y también fue visto como “el nuevo Salomón”⁹⁵⁸. Si bien J. A. Ramírez asevera al respecto:

que la planta de esta iglesia evoca al hexágono del panal y a la abeja de los Barberini es cosa demostrada. [...] El célebre plano del Archivo di Stato, identificado ya en 1928 por Oskar Pollak como obra del arquitecto, muestra un altar con siete columnas perforadas que sugiere bien la cabeza del insecto. Seis abejas rodearían al sol en el centro de la bóveda o del pavimento. La planta de la iglesia “*secondo la prima Idea*”, transmitida por Giannini, ofrece algunas modificaciones en la cabecera (desaparecen las siete columnas) y muestra, en lo alto de la cúpula, una abeja como concreción figurativa de la forma general, más abstracta, de la iglesia⁹⁵⁹. [...] En realidad este insecto venía siendo identificado con la virginidad y, por ende, con la Redención; San Ambrosio había comparado la Iglesia con una colmena. Hans Ost, por su parte, observó que en la corte de Barberini la abeja se identificaba con el símbolo de la sabiduría. [...] Battisti ha recordado también que para F.

⁹⁵⁷ *Ibidem*, p. 249.

⁹⁵⁸ *Ibidem*, p. 62.

⁹⁵⁹ RAMÍREZ, J. A. *Edificios y sueños (ensayos sobre arquitectura y utopía)* ..., p. 203.

Girolamo Roca la abeja era un símbolo de la *Sapientia naturale* (a causa de la miel) y de la *celestes* (debido a la cera), mientras que Horapollo figura como representación de la obediencia al Rey. No olvidemos que Urbano VIII fue llamado el “Rey de las abejas” y que, según Ost, el conjunto de la Iglesia recuerda a una colmena y también a la tiara pontificia⁹⁶⁰.

Y es que también, según Martinelli, San Ivo

se fundó sobre la empresa pontificia de la abeja barberiniana, la cual, con la apertura de las cuatro alas, con la cabeza y el cuerpo, forma una figura hexagonal, considerada entre las más perfectas por los autores de arquitectura y muy bien adaptada al estrecho lugar... Por tanto, dibujada la dicha abeja, elevó la fábrica con ángulos y líneas en varias formas y órdenes correspondientes, disminuyéndola. A modo de pabellón hasta la embocadura de la linterna, la cual, por fuera, se transforma en un templete o torre, rodeada por columnas, y coronada en forma de caracol; en ella hay una cómoda escalera para subir a la cruz, la cual está escondida a los ojos de quienes miran el ornamento que, a modo de corona, rodea a la dicha logia por todo el caracol⁹⁶¹.

Por consiguiente, “el efecto de movimiento que crea esta planta se puede apreciar con más facilidad mirando hacia arriba, a la cúpula, en la que la mirada recorre la línea del entablamento en un movimiento incesante, yendo desde la sencilla concavidad de un tramo a la que cubre un cuarto de esfera, en una disposición poco frecuente que es probable que tomara Borromini de la iglesia paleocristiana de San Lorenzo de Milán, que Martino Bassi había restaurado en el siglo XVI”. También hay que tener en cuenta que, en Sant’Ivo, a la función litúrgica de las plantas centrales como escenarios idóneos para la contemplación del Sacramento, expuesta en San Carlino,

se añade una nueva significación al tratarse de la disposición adecuada para la predicación y escucha de los sermones, a los que la Universidad, dominada por la facultad de teología, concedía gran importancia. La forma de la bóveda, además, la cual, como se ha señalado en numerosas ocasiones, es una especie de tienda de campaña, bien puede querer ser una repetición a gran tamaño de la pequeña pieza de seda que, también en forma de tienda, cubría – y aún a menudo lo hace- el sagrario que guarda el Sacramento⁹⁶² (Fig. 229).

⁹⁶⁰ *Ibidem.* p. 204.

⁹⁶¹ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...* p. 72.

⁹⁶² RAMÍREZ, J. A. *Edificios y sueños (ensayos sobre arquitectura y utopía) ...*, pp. 122-129.

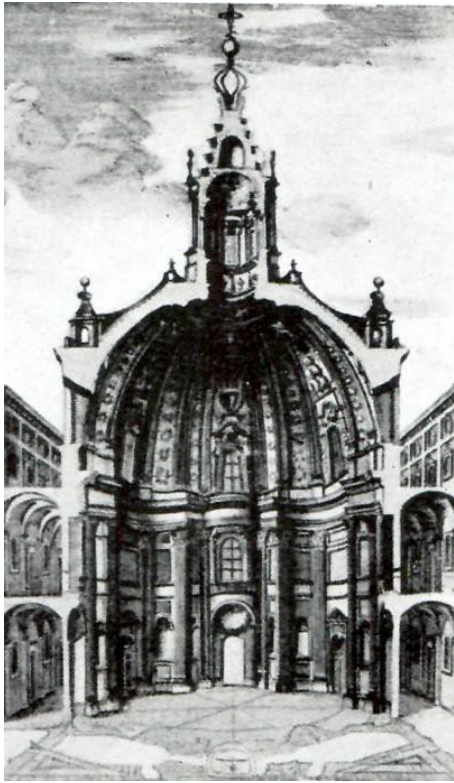


Fig. 229. San Ivo, Roma. Sección transversal de su interior. Fuente: GIEDION, S. *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)* ..., p. 117.

Por lo tanto, en San Ivo, “es la forma en su sentido más abstracto la que configura el espacio y esta forma es entendida como materia plástica capaz de moldearse, plegarse, transformarse y transmitir esa sensación, que podemos experimentar en San Ivo, de que sus superficies parecen estar hinchadas por el espacio que contienen, como si se tratase de un pabellón o tienda”⁹⁶³.

En definitiva, “Borromini genera la tensión de sus espacios operando sobre sus límites formales, a través de los cuales nuestra mirada es guiada en un viaje desconcertante porque el ingenio formal que se nos muestra nos sorprende, por “inexplicable”, y tal vez por eso, nos sentimos cautivados por el espacio en el que estamos”⁹⁶⁴.

Análogamente, en San Ivo Borromini lleva a cabo un ejemplo de arte total constituyendo su obra una muestra, tal y como decía Hegel en su *Estética*, de que “la arquitectura no puede ser autónoma, es un envoltorio de las demás artes...”⁹⁶⁵:

El simbolismo que subyace a la planta se extiende también a la decoración. No se llevó a cabo hasta el pontificado de Alejandro VII, y contiene numerosas referencias al escudo de los Chigi. Los *monti* coronados y rematados por una estrella aparecen en la cúpula ocupando tres paneles alternantes, y aparecen, asimismo, en alternancia con las ramas de roble de los Della Rovere, que Julio II permitió que los Chigi acuartelaran en su escudo, en torno a la base de la linterna, mientras que las bellotas solas aparecen también en los capiteles de las pilastras. También hay alusiones a las armas de los Chigi en las secciones estrechas de la cúpula, que están decoradas con estrellas, pero en este caso sin el monopolio del simbolismo, ya que alternan con la estrella de seis puntas de David, con lo que regresamos al tema del Templo, plasmado de hecho en otros elementos de la

⁹⁶³ ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 72.

⁹⁶⁴ *Ibidem.* p. 75.

⁹⁶⁵ CRAVINO, A. “Renacimiento, Manierismo, Barroco” ..., p. 97.

decoración. Las plantas de hermosa viveza que dominan las puertas que llevan a las capillas laterales se refieren probablemente, más que al Templo, a la vida eterna, ya que aparecen en combinación con coronas. En la cúpula, sin embargo, las vemos acompañadas por cabezas de querube aladas que forman un círculo debajo de la linterna. Existe, además, un dibujo preliminar que califica aún más las intenciones del arquitecto, pues utiliza en él palmeras enteras en vez de hojas, lo cual es una alusión más específica al Sancta Sanctorum.

Todo el interior de la iglesia iba a constituir un símbolo de la sabiduría. Según la inscripción que hallamos en uno de los dibujos realizados para el primer proyecto de la iglesia, tras el altar mayor iba a haber siete columnas que simbolizaban los Siete Pilares de la Sabiduría de que se habla en el Antiguo Testamento, y el cuerpo de la iglesia iba a ser una escena en la que iban a representar, a través del tema de Pentecostés, las manifestaciones de la sabiduría del Nuevo Testamento: en la cima de la linterna iba a mostrarse la paloma del Espíritu Santo y, si aceptamos como prueba las láminas de la *Opera*, de principios del XVIII, los doce apóstoles iban a aparecer en los doce nichos principales que hay en los muros en torno a la nave. En algunas iglesias altomedievales, como por ejemplo en San Marcos de Venecia, hay paralelos de esta forma de representación del tema de Pentecostés⁹⁶⁶.

De cualquier modo, el exterior de la iglesia también resulta admirable:

La parte baja del templo queda escondida tras la exedra, para la que Borromini siguió la planta de Giacomo della Porta, aunque proyectó una original puerta con doble frontón que no llegó a realizarse. Encima de la exedra se alza lo que parece un tambor, si bien Borromini sigue en este caso, al igual que hiciera en San Carlino la tradición lombarda de envolver la verdadera cúpula en un cilindro de mampostería sobre el que recaen los empujes laterales de aquella. En este caso tal disposición casi vino impuesta, pues debido a la escasa anchura del solar no tenía sitio para que esa función la realizaran unas capillas abovedadas o unos contrafuertes. El “tambor” no revela exactamente la forma de la cúpula -pues está formado, en planta, por seis lóbulos, convexos todos ellos-, ni refleja tampoco la alternancia de tramos que se da en el interior. Es probable que esto obedeciera también al deseo de engrosar la masa de mampostería que iba a recibir los empujes. Es interesante señalar aquí que, estando la cúpula en construcción, algunos críticos manifiestan sus dudas acerca de su solidez, y hay una nota autobiográfica en la que Borromini recuerda la promesa que en la época solían hacer los arquitectos de aceptar responsabilidades sobre

⁹⁶⁶ RAMÍREZ, J. A. *Edificios y sueños (ensayos sobre arquitectura y utopía) ...*, pp. 122-129.

cualquier defecto que pudiera aparecer en sus edificios en un plazo de quince años, aceptando él mismo con orgullo esa responsabilidad con respecto a su cúpula. No apareció grieta alguna, de hecho, aunque en el siglo XIX se añadió un apoyo suplementario al tramo que alberga el altar mayor.

Sobre el tambor hay una zona escalonada que, al igual que la parte superior de la cúpula de San Carlino, recuerda al Panteón, aunque en este caso es plenamente visible y constituye una parte importante del conjunto. El contorno de esta zona es ligeramente convexo, como repitiendo la



Fig. 230. Vista aérea de San Ivo alla Sapienza. Fuente: ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini...*, p. 346.

curva de la cúpula que hay dentro, y Borromini introduce un característico contraste al dar forma cóncava a los pequeños arbotantes que ascienden por ella. Estos contrafuertes acaban, como se observará, en pilares cuya forma es la del motivo jónico que hallábamos en la Porta Pia. Sobre esta zona escalonada tenemos la linterna, construida en su nivel inferior por una rotonda, la cual recuerda el templo circular de Baalbek⁹⁶⁷. (Fig. 230).

Y es que, como ya se ha señalado, a Borromini le atraían instintivamente géneros muy distintos de la arquitectura antigua. Concretamente, para el edificio de San Ivo que nos ocupa, Blunt dice que se centra en muestras tan espectaculares de la última época Imperial en Oriente como la ya citada Baalbeck, así como

Petra, Sabatha y Leptis Magna. Algunas son tan sorprendentemente parecidas a edificios de Borromini que parece inevitable admitir una conexión directa entre ellos -la fachada de uno de los sepulcros rupestres de Petra sugiere la de San Carlino alle Quatro Fontane y el templo circular de Baalbek es en planta casi idéntico a la linterna de Sant'Ivo. [...] no hay duda de que Borromini no conoció las edificaciones de Petra y Sabratha, y [...] es poco probable que viera dibujos de las de Baalbek. [...] Sin embargo, Borromini se basó al parecer para algunos de sus modelos en una muy importante fuente intermedia, los dibujos de Arias Montano a que antes nos hemos referido. Sus reconstrucciones aparecieron en forma de grabados entre 1624 y 1664 en una serie de volúmenes llamada

⁹⁶⁷ BLUNT, A. *Borromini...*, pp. 131-133.

Li cirque libri di architettura, pero es probable que Borromini se basara en los dibujos originales de la colección de Pozzo⁹⁶⁸.

Esta rotonda nos lleva al elemento más imaginativo de todo el conjunto, una rampa helicoidal (sobre la que se habla más en detalle en el apartado de la espiral y la hélice de esta tesis), que va enrollándose en torno al cono interior de la linterna, y que asciende hasta el punto culminante de todo el edificio: la estructura de hierro forjado que, en forma de llama, sostiene una cruz.

Aun los elementos más fantásticos de la cúpula están sujetos a un riguroso esquema geométrico. El dibujo original de Borromini (Albertina 509) y el grabado que representa la planta de la cúpula escalonada nos muestran que los escalones no son, como pudiera pensarse en un primer acercamiento, una serie de círculos concéntricos, sino arcos de circunferencias que tienen el mismo radio y que están trazadas desde unos centros que van retrocediendo, para cada círculo sucesivo, lo que es la anchura de un escalón. Todas las líneas del motivo de la Porta Pia se encuentran además en la circunferencia del escalón más bajo. En el nivel superior, todos los elementos de los tramos cóncavos de la linterna están formados por arcos de circunferencias cuyos centros se hallan en el perímetro exterior del conjunto de la linterna, y la espiral de ésta consta de dos series de semicírculos concéntricos.

La prueba de todas estas construcciones geométricas podemos hallarla en los grabados que ilustran la Opera, habiéndose sugerido en varias ocasiones que ellas representan un sistema que el autor de los grabados impuso a los planos y que no corresponden a las intenciones de Borromini. Por fortuna, sin embargo, en la Albertina se conserva el dibujo original del arquitecto para la cubierta escalonada, que demuestra sin lugar a dudas que Borromini desarrolló efectivamente la traza por el método arriba indicado, pues todavía son visibles los agujeros que hiciera el arquitecto con las patas del compás al clavarlo en el papel. El autor del grabado siguió exactamente el método de Borromini, aunque ampliando la escala a más del doble que la del original⁹⁶⁹.

Finalmente, todo lo dicho da muestras de que “la lucha que hay en Borromini entre la energía de la imaginación y el control de la razón, así como la pasión intensa, pueden ser para nosotros características más atractivas que la fácil consecución que hay en la

⁹⁶⁸ BLUNT, A. *Borromini...*, pp. 42-43.

⁹⁶⁹ *Ibidem*, pp. 133-134.

retórica de Bernini”⁹⁷⁰. Según Rolf Toman, de la arquitectura Barroca destaca el carácter teatral: “sus formas pretenden impresionar, convencer, provocar un movimiento interior [...] San Ivo della Sapienza es la obra que más profundamente apela a lo sorprendente, emocional, no puede ser entendida en términos puramente lógicos o geométricos. Su forma configurada por triángulos, círculos, hexágonos, octógonos, arcos cóncavos y convexos, sin embargo, configura un espacio a la vez ambiguo y unitario”⁹⁷¹. Así dice entonces Norberg Schulz que Borromini “hizo del espacio mismo un accidente vivo, que expresa la posición siempre cambiante del hombre del mundo...”⁹⁷².

En resumen, en San Ivo, como diría Ghyka Matila, “como el gran Ordenador del Timeo, el arquitecto ha recortado, desarrollado, opuesto, sus cortejos de formas; ha “armonizado”, relacionado sus acordes, llenando los intervalos por medio de las “medidas” requeridas, y si, en un relámpago de pasión creadora vibrando su ritmo personal al unísono de un Ritmo más alto, ha obtenido la gran consonancia, la *Symphonia*, que tiende y hace vibrar, arco invisible, su obra de piedra o de mármol...la obra vive, y como los templos de Grecia y Sicilia, como las catedrales góticas, como las sirenas de la visión de Er..., canta”⁹⁷³.

14.6.2. LOS FRACTALES EN LA CASA BATLLÓ, LA CASA MILÁ Y LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDÍ

Gaudí, gran arquitecto y observador de la naturaleza, fue capaz muchas veces de intuir las formas como un artista, y otras de comprenderlas científicamente. Gaudí es un magnífico ejemplo de seleccionador cultural, de mente que busca las formas en la naturaleza, y con una alta dosis de creatividad, las moldea produciendo obras maravillosas de peculiar belleza e inquietante inteligibilidad. Para empezar, el propio modo globalizador de concebir sus proyectos desprende aroma a fractalidad. Gaudí ponía la misma dedicación e ingenio en todas y cada una de las partes de sus obras, en todos y cada uno de sus detalles. Desde las fachadas hasta los interiores, desde los suelos hasta las cubiertas, desde las puertas hasta los apliques de la luz, repitiendo en todos ellos las mismas señas de identidad que en el todo. Dotando de autosimilitud a la unidad

⁹⁷⁰ *Ibidem*. p. 237.

⁹⁷¹ CRAVINO, A. “Renacimiento, Manierismo, Barroco” ..., p. 100.

⁹⁷² *Ibidem*. p. 100.

⁹⁷³ GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos* ..., p. 44.

constructiva, repitiendo el patrón fractal en cada elemento y en el todo. Y es que, partiendo de elementos simples, conseguía crear auténticas complejidades. Tal era la búsqueda de unidad y belleza en Gaudí que procuraba dar a cada elemento las formas que mejor cumpliesen su función, sin que para ello perdiesen su belleza y equilibrio sintético para con el organismo, inspiración y guía de su obra. “Gaudí era de la opinión de que la nueva arquitectura que le inspiraba la observación de la naturaleza debía tener las características de la vida, que puede mostrarse con el color y el movimiento”⁹⁷⁴. Buenas muestras de todo lo dicho son las Casa Batlló y Milá o la Sagrada Familia, ejemplos que testifican la evolución artística y fractal de este genio humano en busca de la verdad.

Si se admite que todo el acontecer del arte contemporáneo, entre sus numerosos componentes dialécticos, presenta también los del binomio racional-imaginario, Gaudí es el arquitecto que, no en proyectos sino en obras efectivamente construidas, más ha profundizado en la segunda vía; no en la fantasía individual que se reduce a actos no comunicables, sino en el imaginario del inconsciente colectivo que, para ponerse de

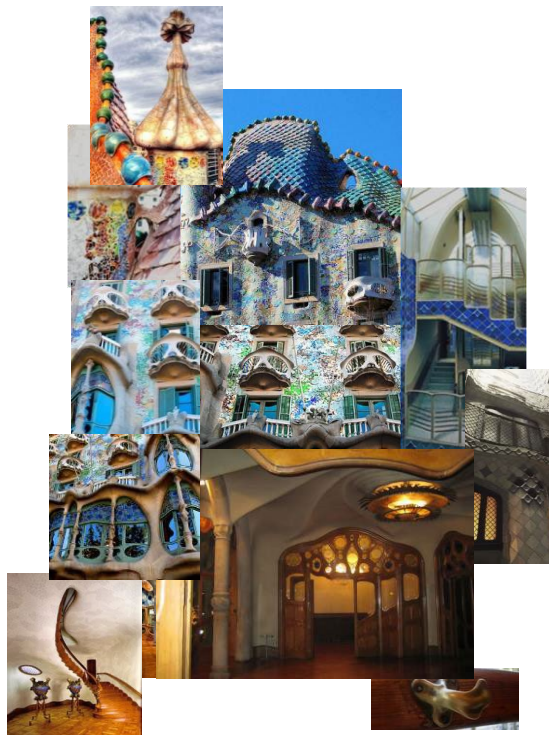


Fig. 231. Casa Batlló. Fuentes: ESTÉVEZ, A. T. *Gaudí...*, pp. 50-51; PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, pp. 127-147; GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, pp. 152-153.

manifiesto, ha tomado la forma de una idea religiosa común. Y precisamente a este valor imaginario, independiente, al menos aparentemente, de la problemática circunstancial, se debe el hecho de que puedan encontrarse en la arquitectura de Gaudí anticipaciones de muchos momentos y tendencias del arte moderno, desde el expresionismo al surrealismo, del cubismo al informalismo. [...] [Para Gaudí, el estilo Art Nouveau] constituye un punto de llegada, y por tanto está lleno de connotaciones y significados, dando una idea de éste mucho más amplia que sus manifestaciones centroeuropeas y precediendo en numerosos aspectos, como ya se ha dicho, al arte posterior⁹⁷⁵.

⁹⁷⁴ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 105.

⁹⁷⁵ DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea...*, pp. 120-121.

Al igual que los huesos, que sirven de estructura fractal en los organismos animales, la Casa Batlló se alza como un expositor monocromo de cráneos, clavículas y articulaciones hiperboloides sobre las que descansa el cuerpo draconiano herido, pavimentado de escamas y trencadís, cuya policromía y fuerza se desparrama, inundando cada forma de curvatura, cada porción, cada detalle interno o externo que, en su descenso desde los cielos, todo lo que a su paso encuentra, lo transforma (Fig. 231).

La Casa Milá, pedrera ambivalente que cristaliza cual roca mineral marmórea a medio camino entre el mundo inerte y el vivo, sometiéndose a la selección fundamental hacia la selección viva en busca de movimiento, en la que la fractalidad, ondulantemente evidente e iterativa de llenos y vacíos, es sutilmente mojada por el color del mar mediterráneo, adopta formas vigilantes en sus crestas modeladas helicoidalmente por el viento (Fig. 232).



Fig. 232. Casa Milá. Fuentes: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo...*, pp. 150-167; ESTÉVEZ, A. T. *Gaudí...*, pp. 50-51; GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, pp. 54 y 155; <http://www.wikipedia.org>

La Sagrada Familia es, como ya hemos venido diciendo, el templo que aúna el saber gaudiano. Color, movimiento y fractalidad en sus más puras manifestaciones. “El interior del templo será como un bosque”⁹⁷⁶. “Este árbol cercano a mi obrador: este es mi

⁹⁷⁶ GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, p. 47.

maestro”⁹⁷⁷, decía expresando su devoción por Dios, pero al entrar en el interior de la Sagrada Familia la complejidad geométrica del bosque fractal de columnas allí representado “va mucho más allá que el crecimiento helicoidal del tronco de los eucaliptos o del desarrollo en el espacio natural del ramaje de los plátanos”⁹⁷⁸. Aquí, “el tronco origina, a partir de los “nudos” elipsoidales, nuevas “columnas rama”, una manera genial de distribuir y transmitir las cargas superiores”⁹⁷⁹. Éstas se levantan para entregarse

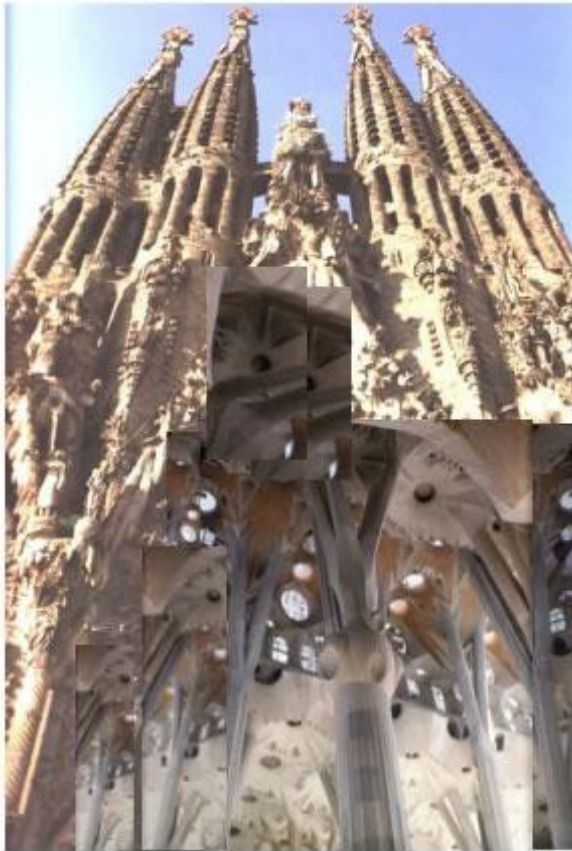


Fig. 233. La Sagrada Familia. Fuentes: PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí...*, p. 173; GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma...*, pp. 47 y 132.

sin discontinuidad a los hiperboloides de una hoja que se abren más hacia arriba, hacia las formas estrelladas de gigantescos paraboloides hiperbólicos de las bóvedas, complejas formas matemáticas, síntesis de hojas de eucalipto por las que se filtra la luz, que al colonizar el espacio mediante “modelos minúsculos de la misma superficie para decorar la carga de las columnas al suelo, o en la leve decoración de algunas partes del techo [...], o en la inclusión de las luces”⁹⁸⁰, distribuyen las tensiones y pesos de la forma más bella y eficaz que ninguna mente hubiese antes creado, pues “da la vuelta a la imagen gótica de una estructura “estrecha” en la parte más alta (la bóveda), que se ensancha hacia abajo

mediante los contrafuertes y los arbotantes, y plantea unos pilares que se abren en ramificaciones sucesivas hacia arriba, haciendo una especie de figura invertida del gótico”⁹⁸¹. Gaudí es un estructuralista convencido, cuya racionalidad, de una complejidad coherente, le permite paradójicamente levantar en un mismo edificio externamente un retablo, explosión barroca de vida en su comienzo, y en el interior la manifestación de la

⁹⁷⁷ *Ibidem*, p. 27.

⁹⁷⁸ *Ibidem*, p. 28.

⁹⁷⁹ *Ibidem*, p. 32.

⁹⁸⁰ *Ibidem*, p. 32.

⁹⁸¹ *Ibidem*, p. 47.

pureza de complejas formas geométricas en crecimiento ascendente hacia un orden fractal, en diseño global autosemejante, desde la estructura hasta el mobiliario (Fig. 233).

14.6.3. LOS FRACTALES EN LAS ESTRUCTURAS DE ROBERT LE RICOLAIS

George Robert Le Ricolais nació en 1894 en La Roche sur Yon, Francia. Tras obtener su Licenciatura en Ciencias realizará la matrícula para ampliar sus estudios en la Sorbona, pero en 1914 será reclutado para luchar en la Primera Guerra Mundial. En 1918 trabajará como ingeniero hidráulico, lo que le permitirá ampliar sus conocimientos en el campo de las estructuras. Además, también realizará estudios de Bellas Artes en La Grande-Chaumiére y Montparnasse de París, despertándose su faceta de pintor en el estilo constructivista a lo Tatlin, y de escritor de poesía, afición que desarrollará a lo largo de toda su vida. En 1931 se trasladará a Nantes donde comenzará la etapa más productiva de su carrera, llegando a desarrollar varios sistemas constructivos y patentes, y produciendo también varias publicaciones científicas. A partir de 1951 residirá en Estados Unidos donde ejercerá una gran labor docente e investigadora en varias universidades, llegando a liderar un taller de cursos experimentales en la Universidad de Pensilvania, en Filadelfia, donde también participará asiduamente en el taller de proyectos del Máster de Arquitectura de Louis I. Kahn.

“El pensamiento de Robert Le Ricolais, tan difícilmente encuadrable en el discurso lineal, nace de la inquietante curiosidad intelectual, del convencimiento de que para descubrir la naturaleza de las cosas el secreto está en ser curioso, de una profunda impaciencia por entender los principios que rigen la realidad física. Para él, la intervención es el soporte natural. A través de la forma construida requiere -en principio- obedecer a la naturaleza, pero esto no es sinónimo de imitarla”⁹⁸². Para Ricolais, las imágenes percibidas por nuestros sentidos son ilusiones, de modo que su noción de forma no estará ligada a la extendida idea Platónica estática y cristalizada, sino que, abrazando el pensamiento contemporáneo, extiende su conocimiento, como un concepto más fluido, a menudo unido con el parámetro del tiempo, que implica *movimiento*. [...] como lo vemos en los organismos vivos, conectando lo estático y lo dinámico⁹⁸³.

⁹⁸² Cfr. JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais”. *Arquitectos*, N.º 141, p. 73.

⁹⁸³ JUÁREZ CHICOTE, A. “El arte de construir con agujeros. Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais”. *Circo*, N.º 39, Madrid, 1996, p. 2.

La misma necesidad de representación que tiene la mente humana, de encontrar alguna clase de modelo físico en cuanto en nuestra mente aparece un concepto nuevo, era para Ricolais una muestra de lo infantil que a veces es nuestro pensamiento. En un intento de escapar del poder casi mágico de fascinación de la imagen, Le Ricolais se vuelve hacia el pensamiento abstracto [...] hacia la *analogía*, método de pensamiento que Le Ricolais adopta -camino de ida y vuelta de lo concreto a lo abstracto-⁹⁸⁴.

Es por esto por lo que su aproximación a la forma construida no se produce desde un punto de vista estético, sino más matemático, tratando de eliminar las particulares visiones individuales, y cualquier “idea prefabricada” de belleza. Una tendencia nueva, probablemente de origen abstracto o matemático, quiere hacernos considerar la forma como una pura geometría de ocupación del espacio, sustituyendo así las impresiones sensoriales, imprecisas, por una noción más valedera de organización o de disposición, y en ciertos casos particulares de medida⁹⁸⁵.

Así, apoyando la idea gaussiana de que “la forma es una entidad puramente matemática”⁹⁸⁶, Le Ricolais aceptará las hipótesis científicas como punto de partida de la imaginación, y reconociendo la no-linealidad de los fenómenos naturales, empleará la paradoja como elemento metodológico, avalando “la belleza del fallo”, del “*error*”⁹⁸⁷, tras el cual se haya la verdad. Defendiendo esta concepción, establecerá la experimentación con maquetas como su principal sistema de investigación, que también inculcará a sus alumnos de la Universidad de Pensilvania. No obstante, previo a la experimentación, siempre empleará un estudio precursor de observación, análisis y síntesis del que surgían diferentes soluciones estructurales posibles.

En sus reflexiones sobre la estructura de la materia y de la naturaleza, la intención de Le Ricolais consistía en encontrar aquello que subyace en lo que para él era la constante en nuestro universo: el *cambio*. En su trabajo, Le Ricolais asimila de un modo analógico enseñanzas pertenecientes a la biología, la topología, la geometría, y la cristalografía, situándose en la frontera de estas disciplinas. De este modo Poincaré, Euler, Lor Kelvin, Ernst Haeckel y D’Arcy Thompson, son referencias constantes en su pensamiento⁹⁸⁸.

⁹⁸⁴ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 73.

⁹⁸⁵ *Ibidem*, p. 75.

⁹⁸⁶ JUÁREZ CHICOTE, A. “El arte de construir con agujeros. Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais” ..., p. 3

⁹⁸⁷ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 73

⁹⁸⁸ JUÁREZ CHICOTE, A. “El arte de construir con agujeros. Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais” ..., p. 3.

Sobre tales cimientos asentará, en la década de los años 40, un método de investigación orientado hacia la deducción de los principios constructivos y estructurales de la observación de las estructuras naturales.

Para Le Ricolais lo importante, más que la estructura, será “la estructura de las estructuras. Se ve dibujarse la evolución intelectual en curso, donde lo cualitativo importa más que lo cuantitativo, con la emergencia de la noción matemática de la variación”⁹⁸⁹. De modo que será en “la disposición, propiedad que estudia la topología. Es en *dis-poner* (*arrangement*), en la organización topológica, en lugar de *com-poner* (*composition*), que se basa en lo puramente visual, donde se libera la energía creadora en la que se funda el arte y la técnica: “Todo no es más que cuestión de disposición; en la física, de electrones; en la poesía, de palabra; en todas partes están a mano salvajes energías, a punto casi de desaparecer si se rompen las oportunas conexiones... Sin duda en la mayor parte de los casos nuestras percepciones son torpes, y para descubrir estas disposiciones algo o alguien ha de descorrer el velo...”⁹⁹⁰.

Y es que, para Le Ricolais, la estética será algo subjetivo, considerando que la simetría perfecta no está presente ni en la naturaleza ni en el arte, pues lleva al aburrimiento, por lo que apostará por “una estética inspirada por la naturaleza y gobernada por los números, una estética en la que no hay un orden claro, pero todo tiene sentido, todo es necesario. Él apostaba por la funcionalidad antes que, por la estética, pero gracias a la utilización de fórmulas matemáticas, conseguía que esas estructuras sin un orden claro fueran atractivas al ojo humano”⁹⁹¹.

Como ya explicamos en el apartado dedicado a las matemáticas de la complejidad en el capítulo III de nuestra tesis, la topología “es la rama de la matemática que estudia las propiedades de las figuras geométricas que son invariables bajo continuas transformaciones. Dos figuras son topológicamente equivalentes si una se puede obtener de la otra curvando o estirando sin cortar ni plegar”⁹⁹². Persiguiendo la meta “Peso cero y Luz infinita”, Le Ricolais buscará conseguir la estructura más ligera que cubra la mayor superficie posible, para lo cual desarrollará varias topologías estructurales basadas en paradojas, resultado de la observación previa de diferentes estructuras naturales que, finalmente, se aplicarán en otras tipologías estructurales concretas.

⁹⁸⁹ *Ibidem*, p. 5.

⁹⁹⁰ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 73.

⁹⁹¹ LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Alicante, 2019, p. 26.

⁹⁹² JUÁREZ CHICOTE, A. “El arte de construir con agujeros. Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais” ..., p. 5.

El arte de la estructura es dónde colocar los huecos

Una de las estructuras naturales que más fascinaría a Le Ricolais, al igual que a D'Arcy Thompson, serían los huesos y su configuración interna, altamente eficiente por su resistencia y liviandad, similar en los distintos animales, consistente en una malla tridimensional, fundamentalmente de colágeno de disposición hueca, que aumenta proporcionalmente su complejidad formal, en cuanto a su grosor y la cantidad de los huecos, a medida que el animal es más grande, posee un mayor peso y está constituido por un mayor número de iteraciones. Por lo que, a este mecanismo geométrico, que emplea la naturaleza para aumentar la escala de las superficies óseas, se le podría denominar *crecimiento fractal*. Esta optimización de las estructuras óseas es aún mayor si cabe en los huesos largos de animales como las aves grandes (Fig. 234), cuyos huecos se hayan rellenos de aire, en vez de médula ósea, apareciendo reforzados por estructuras espaciales trianguladas al estilo de la viga Warren⁹⁹³, las cuales les confieren una gran eficiencia energética, facilitándoles, de esta forma, la tarea de volar (Fig. 235).



Figs. 234 y 235. Izq. Hueso metacarpiano de un ala de buitre. Robustecido según la manera de un entramado de Warren. Fuente: THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma...*, p. 228. Dcha. Alzado Viga Warren. Fuente: https://www.construmatica.com/construpedia/Viga_Warren

De modo que, partiendo de estas observaciones, Le Ricolais comenzará a investigar la manera de construir mecanismos con huecos.

Parece que hay dos posibles actitudes opuestas en la búsqueda de las estructuras: comenzar con un “bloque” y trabajar por medio de escisiones o, por el contrario, comenzar con una célula germinal para llegar a la forma definitiva por medio de adiciones, como en una forma de orden de elementos repetitivos. Él apostaba rotundamente por la segunda y se ve muy claramente en sus dibujos y maquetas⁹⁹⁴ [...] Si se piensa en los vacíos, en lugar de trabajar con los elementos sólidos, la verdad aparece⁹⁹⁵ [...] El arte de la estructura es cómo y dónde colocar los huecos, construir con huecos [...] el arte de fabricar una estructura ligera reside en trabajar con elementos grandes y pesados⁹⁹⁶.

⁹⁹³ Viga Warren: Viga de celosía constituida por la unión de barras formando triangulaciones (triángulos equiláteros).

⁹⁹⁴ LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, 2019, p. 32.

⁹⁹⁵ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 73.

⁹⁹⁶ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 119.

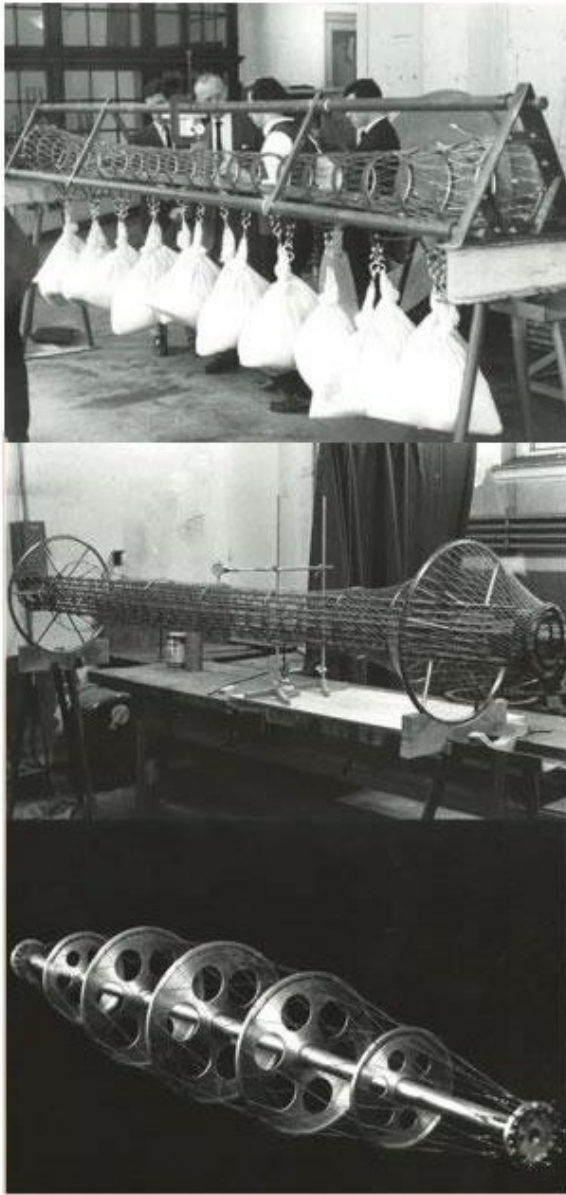


Fig. 236. Maquetas de Polígono Funicular de Revolución.
Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, pp. 33-35.

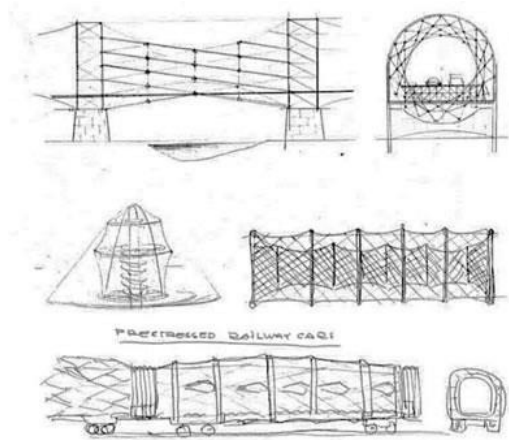


Fig. 237. Bocetos de aplicaciones constructivas del Polígono Funicular. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 35.

Y es que este será uno de los puntos que Le Ricolais comparta con su colega y colaborador Luis Kahn, quien, en 1953, aseverará al respecto: “en los tiempos del gótico los arquitectos construían con piedras macizas. Ahora nosotros podemos construir con piedras huecas. Los espacios definidos entre los miembros de una estructura son tan importantes como la estructura misma. Estos espacios varían en rango desde los vacíos de un panel de aislamiento, los vacíos para la circulación del aire, la iluminación y la calefacción, hasta los espacios suficientemente amplios para andar por ellos y vivir en ellos”⁹⁹⁷.

En definitiva, Le Ricolais construirá su Polígono Funicular de Revolución teniendo en cuenta esta paradoja (Fig. 236). En él las fuerzas de compresión y tensión se equilibran de forma óptima, como más adelante lo harán en pilares y soportes de

⁹⁹⁷ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 75.

construcciones de grandes luces como puentes, edificios de altura y torres de alta tensión (Fig. 237).

Perfiles sinusoidales dinámicos

Le Ricolais también observó el diseño de los caparazones y las conchas de los moluscos, llegando a la conclusión de que sus formas sinusoidales y curvas no son más que perfiles estáticos adaptados, que les dotan de gran resistencia tanto a las fuerzas de compresión como de torsión. Y teniendo en cuenta que esta solución ondulada ya estaba presente en las columnas estriadas de la antigua Grecia, como

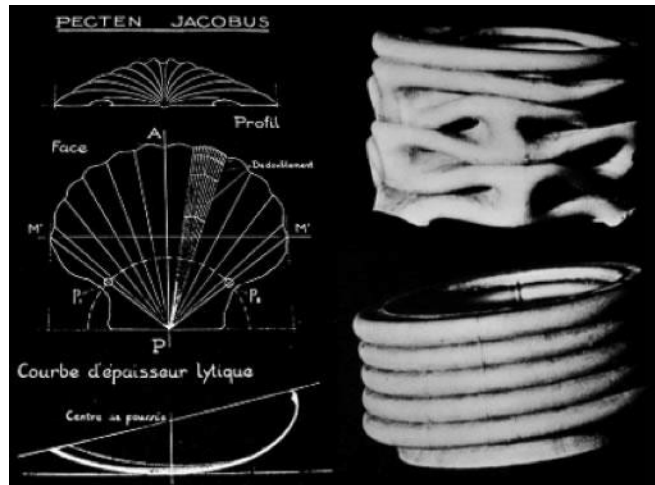


Fig. 238. Estudio de caparazón de molusco y sistema Isoflex.
Fuente: FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 115.

una especie de curva repetitiva sin fin que aumentaba su resistencia, Le Ricolais empleará la mecánica ondulatoria, la cual, introduciendo el parámetro del tiempo, le permitirá abrirse a la consideración de problemas más contemporáneos, al aislar la preocupación estática de la forma, entendiéndola como un concepto más abierto y fluido. Así, en 1935 publicará en el Boletín de Ingenierías Civiles de Francia, el artículo *Les toles composeés et leurs applications aux constructions métalliques légères*, donde tratará de aportar a la industria aeronáutica la posibilidad de fabricación de revestimientos resistentes corrugados aplicando las características de estos perfiles eficientes naturales, que denominó “sistema *Isoflex*” (Fig. 238). Se trataba de tubos formados mediante una superposición de planchas metálicas corrugadas en direcciones opuestas, lo cual, entre otras propiedades físicas, les confería cualidades altamente resistentes (Fig. 239).

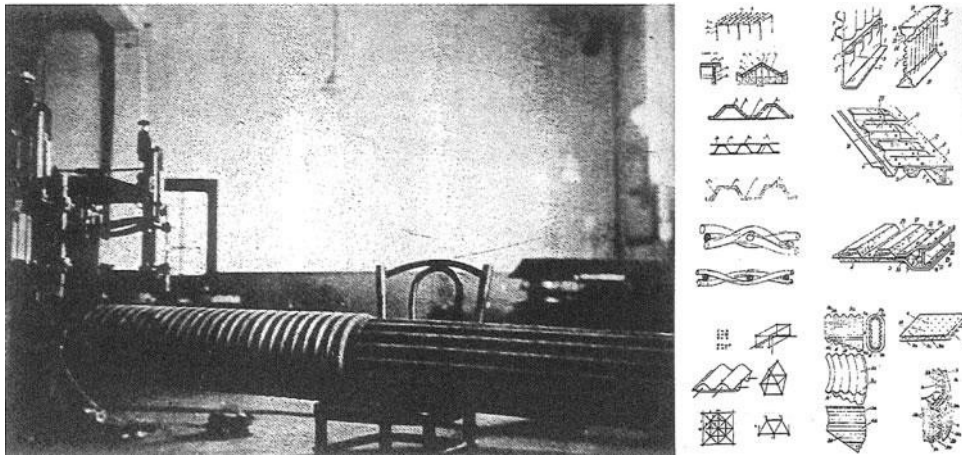


Fig. 239. Sistema automórfico y bocetos de proceso de ideación. Fuente: JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 74.

El traje con agujeros

El sistema *Isoflex* también llevará a Le Ricolais a reflexionar sobre otro concepto, el de cuerda, que entiende “como un sólido formado al enroscar juntas tiras de hilo o de cable; que a su vez está formada por fibras, sucesiones lineales de granos de materia fuertemente conectados entre sí. Al enroscar unas fibras junto a otras, se refuerzan mutuamente en su capacidad de resistir tensión. [...] “Si tú pudieses hacer una cuerda a mayor escala sin nada dentro, trabajaría como si fuera una lámina extremadamente delgada, y no pandearía, pues está tensionada”⁹⁹⁸. Será cuando Le Ricolais relacione estas características con la idea topológica de disposición, de ordenación espacial de elementos. Así, tomará como modelo para la arquitectura la organización del tejido, entendido como “estructura resistente, como conjunto de agujeros separados y rígidamente atados, según un proceso de fabricación industrial [...] Todo se reduce a hacer una adecuada distribución del máximo número de agujeros, y conectarlos entonces lo más rígidamente posible con cadenas que los rodeen [...] Las mallas repetitivas, tan frecuentes en los elementos constructivos, pueden ser consideradas así como una clase de tejido, que explota su estructura resistente y su construcción de fibras y agujeros, para aplicar otro orden constructivo, en este caso el del arquitecto, que lo adapta a sus necesidades de uso, y a unas condiciones de sus límites”⁹⁹⁹.

⁹⁹⁸ *Ibidem*, p. 75.

⁹⁹⁹ *Ibidem*, p. 75.

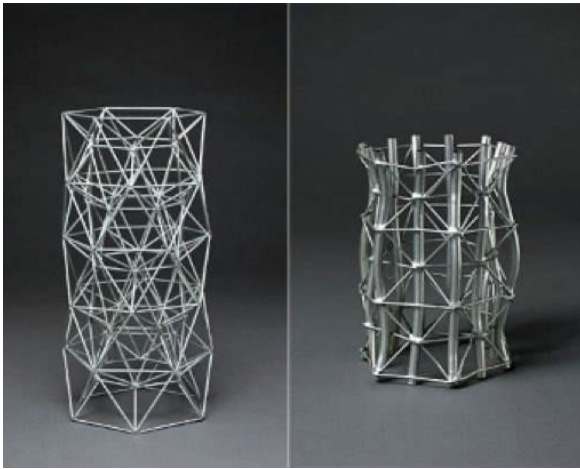


Fig. 240. Columna automórfica con geometría basada en el uso de tetraedros y pirámides de base cuadrada. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 44.

Finalmente, Le Ricolais, relacionando esta base con el estudio de las vibraciones, buscará también una optimización híbrida del sistema de revestimiento Isoflex y la triangulación, y con la finalidad de encontrar una forma óptima de soportar las fuerzas de compresión axiales de peso mínimo, desarrollará la que denominó como “*forma automórfica*”: una estructura que se repite sobre sí misma de modo periódico”¹⁰⁰⁰, ligada por tanto al

concepto de tiempo. Así, “el tubo automórfico” consistente en pilares tubulares de doble capa con ondulaciones sinusoidales, unidas por soldaduras en los puntos de contacto de las generatrices, dará lugar a una de sus aplicaciones: “la columna automórfica” (Fig. 240), fundamentada en la iteración de una o varias unidades elementales, en este caso de tetraedros y pirámides de base cuadrada, que al igual que ocurría con las unidades proteicas auto ensambladas del adenovirus, que describimos en el apartado del hexágono en el capítulo IV, “ya contienen en su propia geometría la información necesaria para multiplicarse y acoplarse a unidades semejantes y formar estructuras de mayor escala y complejidad”¹⁰⁰¹. Y sobre las que Peter McCleary dirá: “Estas estructuras automórficas “danzan” sobre sí mismas, como si estuvieran en movimiento; la forma ideal del tubo reverbera sobre sí misma como un sonido, se escinde en una nota fundamental y sus armónicos. Esta cualidad “armónica” de sus estructuras, tan en consonancia con el elemento físico-armónico del sonido, se manifiesta hasta en sus análisis de procesos de rotura”¹⁰⁰².

Ricolais seguirá esta línea de trabajo en los proyectos de investigación que llevó a cabo con sus estudiantes del taller de Estructuras experimentales de Pensilvania, y también se aplicará en varios diseños, tanto ingenieriles como arquitectónicos, durante la segunda mitad del siglo XX. Definitivamente, su frase sobre el empleo de los huecos podría reformularse como “el arte del diseño arquitectónico a gran escala consiste en

¹⁰⁰⁰ *Ibidem*, p. 76.

¹⁰⁰¹ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 121.

¹⁰⁰² JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 76.

cómo y dónde disponer una organización jerárquica de huecos con características fractales”¹⁰⁰³.

La destrucción sigue a la construcción

En otro de sus artículos, *Survey of Works; Structural Research 1935-1971*, Le Ricolais citará al biólogo Monod-Herzen, quien será el primero en describir los protistas ameboides radiolarios como

una malla esférica de unos 2 mm de diámetro compuesta por una red semirregular de hexágonos y triángulos yuxtapuestos. Cada hexágono, decía, es la base de una pequeña pirámide hexagonal compuesta por barras tubulares de silicio de entre 0,1 y 0,2 mm de largo y de entre 0,003 y 0,005 mm de espesor, en la cúspide de la cual se apoya un epísculo con dirección radial. Una membrana exterior apoya en los extremos de los epísculos transmitiendo al esqueleto las presiones ejercidas por el fluido en que el radiolario se encuentra inmerso. De esta manera, todas las barras del esqueleto se encuentran únicamente sometidas a esfuerzos de compresión o tracción. [...] Ricolais, en esta configuración geométrica, no reconoce un modelo formal a seguir, sino un modelo de organización, de disposición estructural¹⁰⁰⁴.

Posteriormente, en sus ensayos de 1940, tratará conceptos surgidos de la observación de estos microorganismos, tales como: economía de material, isotropismo, partición igualitaria del espacio o geodesia, y se interesará por un tipo especial de radiolario cuyo esqueleto estaba constituido por tres esferas una dentro de otra, unidas por epísculos (Fig. 241). E inspirado en ellos, y en las vigas tipo *Queen Post* con

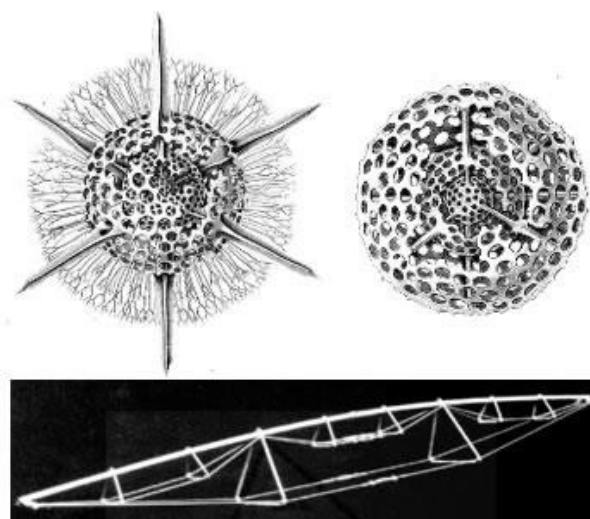


Fig. 241. Columna automórfica con geometría basada en el uso de tetraedros y pirámides de base cuadrada. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 44.

¹⁰⁰³ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente ...*, p. 122.

¹⁰⁰⁴ *Ibidem*, p. 116.

pendolones de las que era ferviente admirador, diseñará la viga optimizada *Polyten*, conformada mediante el uso de repeticiones fractales o automórficas internas. Luego la viga *Polyten*, al igual que el modelo de cometa celular¹⁰⁰⁵ que en 1907 diseñó Graham Bell, se generarán por un proceso que persigue un patrón de crecimiento fractal, mucho antes de que Mandelbrot definiera el concepto. Por otra parte,

a partir del estudio de las estructuras cristalográficas, Le Ricolais llega a la conclusión de que es necesario establecer una comparación del grado de isotropismo de las distintas redes o configuraciones espaciales. Este es el núcleo temático de su ensayo de 1941. Descubre que cuanto más se expanda una estructura en las tres direcciones del espacio, o sea, cuanto mayor espacio ocupe, menos se deformará. El momento de inercia es proporcional a la resistencia a la deformación y está, por lo tanto, estrechamente ligado al concepto de isotropismo. [...] Analiza comparativamente tanto volúmenes como redes capaces de ocupar el espacio de forma homogénea. Tomando como referencia la esfera (isotropismo=1) y el cubo (isotropismo= 0,62), llega a la conclusión de que el tetrakaidecaedro (isotropismo= 0,98) es la forma más efectiva de ocupar el espacio, superando al cubooctaedro (isotropismo= 0,88)¹⁰⁰⁶.

A partir de estas investigaciones ensayará diversas configuraciones geométricas eficientes de vigas atirantadas, basadas en la geometría cubooctaédrica, que resisten de manera homogénea tanto flexiones como torsiones, utilizando perfiles ligeros y de sección constante, los cuales facilitan enormemente su fabricación. También estas estructuras se considerarán automórficas, ya que, al comprobar los procesos de rotura, justo antes de que el modelo falle, percibirá en ellos la ondulación sinusoidal del cordón superior y no sólo una simple flexión, lo que le llevará a confirmar “que el orden de la destrucción de un sistema sigue al orden de su construcción, de que la armonía interna que se manifiesta en el colapso de una estructura es análoga a su construcción física”¹⁰⁰⁷. Su aplicación dará origen a una nueva arquitectura del acero sustituyendo los revestimientos portantes por los perfiles laminados.

¹⁰⁰⁵ La cometa celular es un tipo de malla espacial compuesta de celdas siguiendo un modelo de crecimiento lineal, fractal y celular tetraédrico. Fue inventada por el científico Alexander Graham Bell, inspirándose en los experimentos realizados por el ingeniero australiano Lawrence Hargrave con sus cometas de caja y sus intentos para construir una cometa escalable y lo suficientemente grande como para elevar un hombre y un motor a la vez. Como tal, realizó el primer experimento exitoso en el largo camino que llevaría a las aeronaves tripuladas trabajando en las cometas entre 1895 y 1910.

¹⁰⁰⁶ FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente* ..., p. 118.

¹⁰⁰⁷ JUÁREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais” ..., p. 76.

Espejismo en perfiles jabonosos

También Le Ricolais realizó diversos experimentos con láminas de jabón. Cualquier contorno cerrado sumergido en una solución de glicerina con jabón origina una película de mínima superficie, un espejismo que tendemos a reconocer como una superficie de jabón. Sin embargo, tan sólo se trata de la atracción entre moléculas que se encuentran en constante movimiento. Uno de los experimentos que Le Ricolais llevó a cabo fue el de sumergir un perfil hexaédrico hueco, y observó que surgía una superficie de doble curvatura a la que denominó “La silla de montar de mono” (Fig. 242). Esta

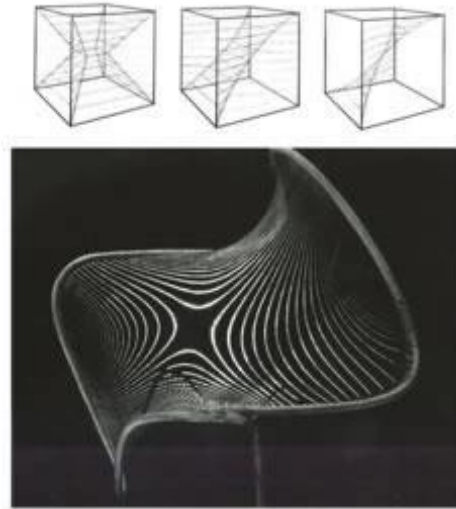


Fig. 242. Estudios con películas jabonosas en perfil cúbico y superficie convexa “Silla de montar de mono”. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 48.

solución proyectada resultó ser la más óptima, al abarcar la mayor superficie para un perímetro dado. Se trata de una idea de forma como estructura que emerge de un constante

cambio, que también Le Ricolais aplicaría, unida a la mecánica ondulatoria y a sus figuras automórficas armónicas vinculadas con un sistema reticular, en la red *Trihex*, compuesta por una distribución de cables de tensión triaxial que forman un mosaico de hexágonos y triángulos regulares. Ésta, pretensada, permitía cubrir superficies de grandes dimensiones como pabellones o cubiertas temporales (Fig. 243). Finalmente, con el paso del tiempo, Le Ricolais caerá en el error que hasta entonces había estado cometiendo al pensar que, para construir con elementos ligeros, precisaba de estructuras ligeras: puesto que el elemento que más pesa de cualquier construcción son las uniones, debía en realidad reducir el número de ellas. Así redujo las juntas, en una primera aproximación, a un simple anillo, haciendo que las

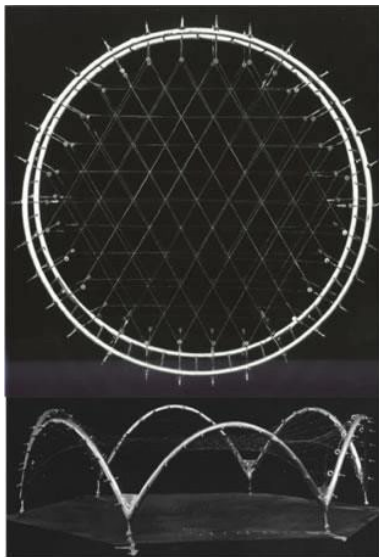


Fig. 243. Arriba sistema de red *Trihex*. Abajo maqueta de red *Trihex* sobre Silla de Montar de mono. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 50.

estructuras fueran más baratas y ligeras. Pero al no poder materializar sus hipótesis, definitivamente ideó el sistema *Tetragrid* (Fig. 244), que podía adaptar a diversas

geometrías de cubierta, y que resultó ser mucho más eficiente si se empleaba una única solución de junta modular (Fig. 245). Además, al emplear sistemas automórficos, Le Ricolais llegó a la conclusión de que, si aplicaba *in situ* en la obra el sistema, adaptándolo a la incertidumbre del momento y a las condiciones indeterminadas de ubicación, escala, o material apropiado a cada caso, era mucho más fácil concebir y llevar a cabo el proyecto. Algo que pudo corroborar en la cubierta para un mercado en Camerún a mediados del siglo XX (Fig. 246).

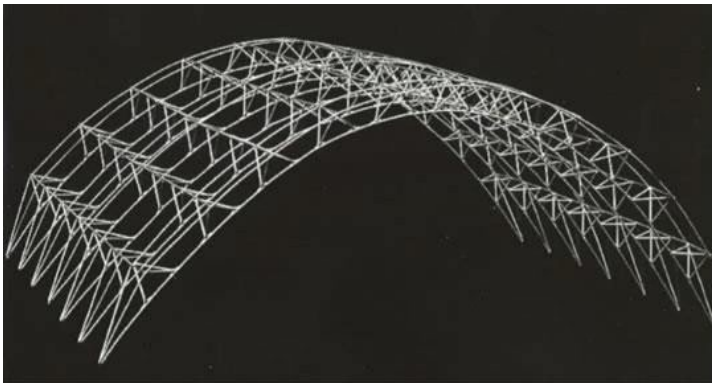


Fig. 244. Maqueta sistema *Tetragrid*. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 52.

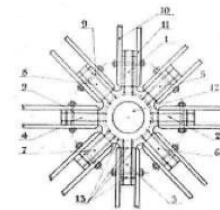
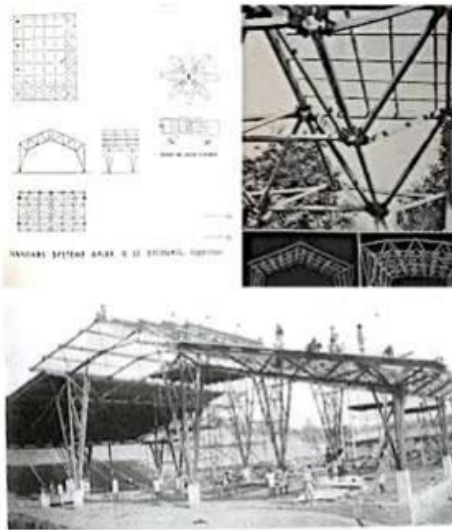


Fig. 245. Croquis Nudo Apex. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 53.

En resumen, ya que para Le Ricolais “sus búsquedas estructurales son también un modo de conocimiento, un cuestionamiento sobre la realidad, sus respuestas pueden ser entendidas como una búsqueda de lo invariable en el curso de un constante cambio, como configuraciones armónicas en un mundo en permanente vibración en el que la quietud no es más que una ilusión”¹⁰⁰⁸.

A pesar de que Le Ricolais no llegase a construir grandes obras aplicando sus invenciones, sus estructuras espaciales sí que inspiraron a otros muchos ingenieros y arquitectos de su época y posteriores. A continuación, mencionaremos algunos de ellos, como el Proyecto City Tower (1952-1957) de Louis Kahn, o las cúpulas geodésicas (1948) de Buckminster Fuller -aunque con muchas más barras que las de Le Ricolais-. También Pier Luigi Nervi coincidía con Le Ricolais en construir estructuras prefabricadas y ligeras empleando la matemática. El Pabellón de Japón en la Exposición Universal de Osaka en 1970, donde Kenzo Tange empleó una estructura triangulada ligera capaz de

¹⁰⁰⁸ *Ibidem*, p. 76.



Figs. 246. Arriba dossier informativo del Hangar Aplex. Abajo mercado de Camerún en construcción. Fuente: LÓPEZ ANIORTE, I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais...*, p. 83.

cubrir una gran superficie muy similar al *Tetragrid* de Le Ricolais. Frei Otto, que compuso estructuras resistentes a la compresión y a la atracción observando la naturaleza, y empleando un método de trabajo basado en maquetas similar al de Le Ricolais. El Centro George Pompidou de París (1977) llevado a cabo por Piano and Rogers, donde una vez más la estructura lo es todo, organizando los espacios y los vacíos de circulación, tal y como defendía Le Ricolais. Asimismo, la cubierta que Norman Foster realiza para el patio central del British Museum en Londres (2000) proyecta una estructura ligera, optimizando el material, habiendo basado sus

estudios previos en la observación del comportamiento natural en cáscaras y radiolarios tal y como lo hiciera Le Ricolais. Por último, citaremos el puente Helix Bridge que en 2010 realizó el estudio COX Architects: se trata de un puente muy similar a los tubos automórficos que Le Ricolais proyectó basándose en el concepto de la cuerda, y que nunca pudo llevar a cabo.

CONCLUSIONES

El fundamento del conocimiento científico clásico consistía en explicar lo visible complejo por lo invisible simple, de modo que en su tarea de tratar de legislar las leyes por las que se regían los elementos fundamentales de la materia, de la vida, aislaba los objetos sometidos a dichas leyes. En la actualidad, el pensamiento científico ha empezado a considerar dichas prácticas cartesianas del conocimiento insuficientes, y en vez de ir de lo complejo a lo simple, tratará de leer la complejidad de lo real bajo la apariencia simple de los fenómenos, aun a sabiendas de que no hay fenómeno simple. En efecto, tal es el sentimiento con el que podemos sintetizar, ahora que nos acercamos al término de esta tesis, lo experimentado a medida que avanzábamos en nuestra investigación. Y es que desde que iniciamos la andadura, estimulados por la inquietud que nos suscitaba tratar de comprender las formas que percibíamos iteradas en la realidad circundante, poco a poco nos vimos inmersos en una aventura helicoidal, tratando de buscar una teoría que justificase su emergencia. Así, comenzamos la investigación partiendo de un punto de vista histórico, que paulatinamente nos fue guiando a través del conocimiento de las distintas leyes evolutivas, como las de la teoría de la selección natural o las de la termodinámica de no equilibrio, y, una vez superado este umbral, pasamos de golpe a tener que enfrentarnos con el estudio de la complejidad en toda su magnitud; un camino plagado de bifurcaciones, muchas de ellas englobadas en las recientes teorías de sistemas (como las teorías de la autoorganización, del caos, de las catástrofes, la teoría fractal), que surgen en los años cincuenta del siglo XX como un esfuerzo interdisciplinar centrado en buscar propiedades comunes presentes en los diferentes niveles de la realidad. Y, aunque el recorrido ha dado como fruto este proyecto, hemos de admitir que nos hallamos en una especie de círculo virtuoso que no tiene fin. Tanto es así que, aún hoy, nos encontramos inmersos en él.

Uno de los trajes con los que, según hemos aprendido, se viste la complejidad de la realidad es el de la incertidumbre, la cual hemos definido como la variabilidad de los estados posibles de aquella. También hemos aprendido que, aunque la realidad se fundamente en leyes deterministas, en los nudos de esa inmensa red de leyes se da la contingencia, lo que permite cierto margen para que la selección, el azar, la creatividad y el cambio intervengan en la evolución de las cosas. De modo que, puesto que la realidad se expresa desde varios niveles de observación con leyes diferentes actuando sobre ella, debemos seleccionar el nivel de examen desde el que queremos comprenderla. Así,

nosotros nos hemos situado en el lugar desde el que las leyes anteriormente citadas intervienen en la nervura de la realidad sometiéndola a continuas fluctuaciones, de modo que, para conseguir mantener nuestra identidad como individuos y para perseverar el mayor tiempo posible, continuamente estamos autoorganizándonos y buscando nuevas formas que propicien nuestra independencia de la incertidumbre local.

De esta forma, parece ser que la realidad se constituye de diversas realidades anidando unas dentro de otras. No obstante, no todas son relevantes para nuestra tarea de tratar de comprender el mundo. Digamos entonces que, en síntesis, la realidad se constituye de objetos que ocupan el espacio compuesto de materia, energía e información, y de fenómenos (variaciones temporales de los objetos) que ocupan el tiempo, de modo que, en su transcurrir, los objetos que emergen van cambiando de identidad, pues todo lo que empieza se transforma o termina. En el caso de la materia inerte, la realidad se estructura en dos grandes grupos, el de lo microscópico y el de lo macroscópico, resultando capital el nivel en el que ciertas individualidades y sus interacciones mutuas determinan objetos que, al aportarnos conocimiento sobre su entelequia, son susceptibles de ser observados en el mundo. En cambio, en un nivel superior, el de la materia viva, las individualidades se transforman en *individuos* con distintos grados de complejidad.

Por ende, a medida que subimos de nivel, la materia y la nervura de su realidad se va complicando, sufriendo bifurcaciones donde las fluctuaciones pueden derivar y donde la selección, por tanto, puede actuar. De modo que, de lo que emerge en la realidad se selecciona aquello que más probabilidades tiene de perseverar. En la materia inerte los objetos que superan la selección fundamental, rebelándose contra la incertidumbre del medio, son estables. En la materia viva la selección natural premia los objetos capaces de adaptarse, modificando la incertidumbre y evolucionando. La materia culta, por su parte, supera la selección culta, no sólo modificando su incertidumbre, sino anticipándola, pudiendo reducirla. De forma que, si la inteligencia abstracta no emergió antes que la vida, ni la vida antes que la materia inerte, podemos decir entonces que con el transcurrir del tiempo la materia ha ido progresando, ajustándose cada vez más a la complejidad del mundo, llegando incluso al grado de complejidad en el que la inteligencia humana, mediante proyectos, sueños e ideas, ha acabado creando su realidad propia.

Como hemos venido planteando, uno de los principales mecanismos con los que extraemos información del mundo es la percepción. Ésta es selectiva y se autoorganiza, se alimenta a sí misma mediante estímulos como la inteligibilidad y la belleza. La belleza es un estado de la mente al que se accede por un estímulo perceptual. La inteligibilidad

es un estado mental al que se accede por reflexión, al descubrir lo común entre lo diverso. Y es que, asentados en el hábito organizador del mundo, buscamos regularidades, redundancias exhibidas por los objetos, y, como nuestra inteligencia es eminentemente práctica, aunque sabemos que no hay casos idénticos, desestimamos las diferencias de cierto nivel de detalle y, por tanto, englobamos en una misma categoría general los fenómenos que percibimos; en definitiva, aplicamos el principio de parsimonia. Así, cuando buscamos algo que se repite en una diversidad de pedazos de la realidad estamos buscando su inteligibilidad, y cuando busquemos el grado de repetición que puede percibirse entre las partes de un pedazo de realidad, estaremos buscando su belleza. Si la propiedad que nos ha interesado describir de los objetos para comprender la realidad ha sido la forma, y las funciones (en el sentido amplio de ganancia) asociadas a ella, el método que hemos urdido en esta tarea de comprender el mundo se sustentará en buscar formas que se repiten dotadas de inteligibilidad y belleza, para lo cual emplearemos la matemática, pues con la selección matemática aprehendemos más fácilmente lo comprendido, incorporando este paquete de información ordenada fácilmente a nuestra red de conocimientos en sintonía, por ejemplo, con el proceso evolutivo basado en interacciones cíclicas descrito por James Lovelock.

Es por ello que, si tenemos en cuenta la visión que sobre la evolución ya introdujera Jean-Baptiste Lamarck en el siglo XIX, basada en la generación espontánea y progresiva de los organismos en respuesta a los cambios externos y a sus necesidades internas, la forma en la naturaleza sería, por tanto, resultado de su uso, de la función que cumple. En consecuencia, la necesidad será la que cree a los organismos, dando lugar a la complicación y transformación espontánea y progresiva de la materia en los seres vivos, tendente a la complejidad y a la perfección, pudiendo ser transmitidos estos cambios posteriormente a sus descendientes. Con esta aportación, Lamarck creará por primera vez un cuerpo teórico que justifique la evolución mediante mecanismos y leyes, diferenciando la forma y la función como unidad directriz vital en relación con su contexto, y cuyo desarrollo en el tiempo da origen a la historia evolutiva de la tierra.

Sin embargo, a pesar de que Lamarck planteó un programa metodológico y epistemológico de investigación coherente, su teoría apenas tendrá alcance en la ciencia evolucionista hasta que, ya en el siglo XX, D'Arcy Thompson la relacione con la teoría física, promulgando que son las fuerzas físicas las que actúan sobre las formas inertes y vivas, haciéndolas más eficientes. Es decir, la herencia genética no sería la única responsable de la morfología de los seres vivos. O, dicho de otra manera, la selección

natural sólo elimina aquello que no se adapta al medio, y las nuevas estructuras vivas e inertes surgen por la acción de fuerzas naturales presentes en el medio ambiente y modelizables según leyes matemáticas. En definitiva, las formas en la naturaleza también son resultado de la optimización energética.

Desde este punto de vista se podría decir que la teoría de Darwin sobre la selección natural, basada en la descendencia con adaptaciones acumuladas a lo largo de una cadena de transiciones (pequeños cambios genéticos guiados por presiones selectivas), sería tan sólo un tamiz que restringiría la creatividad, atribuyendo exclusivamente al azar el origen de las novedades y de las formas, dando sólo explicación a la transformación de estas una vez han sido generadas. Por ello, la ciencia actual, considerando que la adaptación al medio es insuficiente para explicar la evolución en su totalidad, ha retomado el interés por conocer la mecánica oculta tras las novedades como base sobre la que desarrollar, bajo una visión holística, la teoría evolutiva. Y destacando la reciprocidad no lineal del organismo y el medio, considerando el genoma no como una disposición de genes independientes, sino como una red altamente interconectada de elementos, divulgará el papel activo de los individuos cambiando cualitativamente al unísono con el medio, es decir, participando en su propia evolución.

Una de las aportaciones más importantes a la teoría evolutiva fue la sustentada en la termodinámica. Según fundamenta su segunda ley, en todo sistema cerrado, la entropía (medida que establece la distribución de las moléculas) tiende a un grado máximo de desorden con el transcurrir del tiempo. Efectivamente, así ocurría en los sistemas ideales aislados, donde procesos reversibles de dinámicas lineales causa-efecto eran estudiados por la termodinámica clásica. Más adelante, la termodinámica se centró en la observación del comportamiento de sistemas reales, comprobando que la naturaleza está constituida por sistemas abiertos, donde el flujo de materia, energía e información con su entorno es continuo, y donde el intercambio, la construcción y degradación de sus componentes materiales permiten su lejanía del equilibrio. También pudo comprobar que se trataba de sistemas organizados con una memoria que conectaba sus formas y funciones en un tiempo irreversible. Eran, en definitiva, como diría Bertalanffy, sistemas abiertos complejos, que exhibían un principio de sinergia (propiedades que emergen de la interacción de sus componentes, por lo que no se pueden predecir con la observación aislada de éstos), y que además eran cibernéticos (se autorregulaban mediante bucles de retroalimentación, por lo que se caracterizaban por poseer las mismas propiedades

observables desde la escala molecular a los ecosistemas: comportamiento caótico, redes complejas, estructuración y autoorganización).

En la actualidad, la termodinámica de no equilibrio, basada en los sistemas disipativos estudiados por Ilya Prigogine, promulgará la metaestabilidad como el estado en que los organismos, mediante su metabolismo, logran perseverar, manteniendo sus estructuras ordenadas (viviendo), a expensas de la entropía negativa que importan del medio, acoplando gradientes termodinámicos y exportando entropía positiva al exterior.

De entre los ejemplos más ilustrativos del orden causado por la diferencia de gradientes subrayamos el de las células de Bénard. Según éste, un sistema expuesto al flujo continuado de materia y energía no está en condiciones de alcanzar el equilibrio, por lo que se acopla en un estado de mínima producción de entropía, pudiendo adquirir espontáneamente nuevas estructuras al superar puntos de bifurcación, atractores o catástrofes (umbrales de estabilidad en que, dependiendo de la historia previa del sistema, la estructura disipativa puede derrumbarse o trascender en uno o varios nuevos estados de orden). De estas dinámicas internas (aunque desencadenadas por agentes externos), que producen fluctuaciones amplificadas por bucles de retroalimentación positiva (no negativa y destructiva como en cibernética), y cambios cualitativos en las propiedades o patrones espaciales y temporales, emergen sistemas autoorganizados, y éstos solo son describibles mediante ecuaciones no lineales.

No obstante, esta idea, que describe los organismos como sistemas metaestables que se reorganizan, ya fue de algún modo expuesta por Immanuel Kant en 1790, definiendo el organismo como un “propósito natural” autoorganizado y autoorganizador, es decir, que aúna tanto la causa y efecto como el fin y el medio.

Así mismo, según la autocatálisis informada de Jeffrey S. Wicken los sistemas vivos, desde los organismos a los ecosistemas, son procesos relacionalmente constituidos, ligados por la interrelación funcional entre el todo y las partes, y que comparten dinámicas de no equilibrio impulsadas por gradientes que les permiten autoorganizarse, y que sugieren una conexión profunda entre la autoorganización y la segunda ley de la termodinámica. También Dorion Sagan y Eric Schneider describirán los seres vivos como entidades organizadas que persisten gracias a gradientes, canalizando a través de sí mismos y de los ecosistemas los flujos de energía. Incluso, a día de hoy, se relaciona el origen prebiótico con la autoorganización en estructuras disipativas. Por último, también algunos estudios revelan que los componentes celulares pueden autoorganizarse, haciendo ostensibles patrones análogos a los de las reacciones Belóusou-Zhabotinsky.

En conclusión, la comprensión de la vida desde el enfoque de la termodinámica de no equilibrio establece que los sistemas abiertos pueden mantener su entropía total, e incluso disminuirla, a expensas de los flujos con el exterior, justificando el acoplamiento de gradientes a través de la formación espontánea de estructuras disipativas, permitiendo la autoorganización definida por la aparición espontánea de nuevas propiedades, patrones espaciales y temporales de manera emergente, fruto de dinámicas internas o externas mediante bucles de retroalimentación, al acoplar flujos externos en sistemas lejos del equilibrio y descritos por ecuaciones no lineales.

Otra de las características de los sistemas complejos es que se estructuran en patrones organizativos en forma de red, que básicamente están constituidos de una serie de nodos (elementos) y sus respectivos nexos (enlaces). Se trata de sistemas intrincados de comprender, por lo que no existen demasiados modelos que los representen. Los más importantes son las redes aleatorias, las redes sin escala y las redes neuronales.

Llegados a este punto, podemos decir que la organización biológica, bajo la mirada sistémica, radicará en la unión de su estructura y sus funciones conectadas y ordenadas en un *proceso* (programa temporal). La estructura consistirá en una descripción topológica de sus componentes junto con sus conexiones, que no cobrarán significado si no es en relación con una serie de funciones a desarrollar en el tiempo. De este modo el sistema se convertirá en una unidad reconocible y característica para el observador, que por otra parte también estará implícito en el mismo sistema, luego también estará organizado, participando del mismo proceso autorreferenciado e interconectado, que será entonces autopoyético (denominación propuesta por los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela).

En suma, el término autoorganización hace referencia a aquellos fenómenos termodinámicos en que la organización de los sistemas (en este caso biológicos), y su proceder, no son resultado de un programa determinista, definido por sus elementos constituyentes, sino que se trata de propiedades emergentes que surgen espontáneamente de las interacciones del sistema. Y puesto que ya Ernst Popper aseveró que la vida, y posteriormente la mente, han evolucionado en un universo que durante un tiempo fue sin vida ni mente, podemos afirmar que los primeros sistemas de transición emergente, *teleodinámicos*, justamente emergieron, no evolucionaron. Es decir, que emergieron de patrones específicos de interdependencia que, a su vez, surgieron de procesos morfodinámicos especificados, según asevera Deacon, como aquellos que generan regularidades espontáneamente en virtud de otras previas amplificadas por dinámicas

iterativas internas, bajo el mantenimiento de perturbaciones externas, y no en respuesta a una imposición extrínseca de regularidad ni a una plantilla o forma arquetípica (por ejemplo, codificada en los genes). No obstante, este nivel emergente será insuficiente para justificar la vida, puesto que una vez cese el gradiente, dichas estructuras desaparecen, por lo que se precisará de la colisión de dos sistemas morfodinámicos para que provoquen la emergencia del nivel superior teleodinámico, caracterizado por el mantenimiento y reproducción del propio sistema. Dicho nivel se encontrará dentro del ámbito entencional (el de los procesos que generan orden, con una circularidad propia cuya potencia causal no se localiza en ninguna materia física, sino en su propia organización dinámica).

Todas estas dinámicas organizativas se han sustentado sobre restricciones o ligaduras, entendidas, al igual que los conceptos de orden, organización o hábito, como una menor variedad y redundancia de atributos, una abstracción, una simplificación, una parsimonia. Por lo que, en definitiva, bajo esta visión se ha tratado de justificar que la abstracción mental que nos lleva a observar formas frecuentes asociadas a funciones en la realidad surge dentro de la misma circularidad dinámica por la que se rige nuestro mundo. Y, entre la intuición y el gozo de haberlo comprendido, finalmente hemos expuesto una selección de proyectos arquitectónicos, surgidos de pensar la realidad a partir de una serie de formas geométricas que frecuentemente observamos en la naturaleza, tras haber superado la selección fundamental, natural y, finalmente también, culta, al ser las más idóneas para cumplir funciones asociadas a ellas, como la de proteger por parte de la esfera, la de cubrir el espacio por el hexágono, la de empaquetar por la espiral, la de agarrar por la hélice, la de comunicar por la onda, la de recibir y emitir por la parábola, la de resistir por la catenaria, y la de colonizar por los fractales.

De entre todas ellas destacamos como obra culta arquitectónica diseñada teniendo como leitmotiv la búsqueda de la eficacia y la optimización formal la iglesia de La Colonia Güell, que Gaudí proyectará utilizando procedimientos empíricos, reproduciendo mecanismos naturales de autoorganización sometidos a su propio peso, para encontrar formas optimizadas catenarias. También las estructuras de Robert Le Ricolais basadas en el análisis de distintos modelos de organización de la materia viviente, fruto de las acciones físicas y mecánicas que actúan sobre ellas, como la viga en aplicación al concepto de repetición automórfica, o las estructuras de barras optimizadas basadas en el crecimiento celular fractal.

A mediados del siglo XX el desarrollo de programas de cálculo informáticos, junto con la diversificación de materiales, permitirá alcanzar otros niveles de complejidad edilicia, como los asumidos en obras de diseñadores como Félix Candela o Eladio Dieste, fruto del empleo de estructuras prefabricadas de doble curvatura de hormigón armado y de cerámica armada que, basadas en geometrías parabólicas o catenarias, se emplearán para cubrir grandes superficies. Por otra parte, Buckminster Fuller destacará por ser uno de los predecesores en la búsqueda de la optimización energética de la arquitectura, siendo la expresión “hacer lo máximo con lo mínimo” un compendio de su pensamiento. Basándose en este ideal, diseñará sus cúpulas y domos esféricos fruto de la optimización de la forma como mínima superficie que encierra un volumen dado, inspirándose en los sistemas geodésicos y en las estructuras geométricas de los esqueletos de los radiolarios estudiados por Haeckel y D’Arcy Thompson, en explotación de conceptos como *Synergetics*, mucho antes de que se definiese el concepto de sinergia en ciencia, o *Tensegrity* (tensión continua + compresión continua), por él ideado. Así mismo, pondrá en práctica el concepto de fractalidad en sus obras, al considerar que la arquitectura debe ser un reflejo de las leyes naturales, dando lugar a un universo dentro del universo.

Será a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando, como ya hemos citado, comiencen poco a poco a surgir las Teorías de Sistemas en el ámbito de las ciencias y los conceptos asociados al estudio de la complejidad, como los de azar, autoorganización, no linealidad, y fractalidad, pasando poco a poco también a ser difundidos en el ámbito del diseño arquitectónico, aunque mucho antes, tal y como hemos ido viendo, ya se venían empleando de forma metafórica o intuitiva muchos de ellos. También se producirá un vertiginoso avance en el desarrollo de programas de dibujo y cálculo, lo que permitirá trabajar con grandes volúmenes de datos, mejorando la rapidez de construcción, así como el intercambio de información entre los distintos gremios que intervienen en las obras.

En este período, arquitectos como Frei Otto retomarán la experimentación con modelos “form-finding” (tal y como ya hiciera a mediados del siglo XIX Gaudí al idear sus modelos funiculares), consistentes en procedimientos físicos con base en procesos de autoorganización de la materia sometidos a cargas, a fin de obtener una primera aproximación geométrica de la forma más eficaz para cumplir determinadas funciones, que posteriormente ajustará ingresando los datos extraídos en programas informáticos. Así, diseñará también, siempre influenciado por la búsqueda de la sostenibilidad, una gran variedad de modelos de tensoestructuras de membranas, redes de cables pretensados

con áreas mínimas, cáscaras comprimidas con forma inversa, estructuras ramificadas, etc., y métodos de montaje en obra donde emergerá de procesos no lineales la forma final.

Por último, en cuanto a la Arquitectura de la última década del siglo XX, bajo nuestro punto de vista, podemos decir que, en general, ha retomado el eslogan de Frank Lloyd Wright: “Así como es la vida es la forma”. Y caracterizándose por la presencia de la complejidad abordada desde diferentes puntos de vista, en evolutivo grado de subjetivación, ha ido pasando de una *visión conceptual formal superficial* creada para el observador, donde la valoración de la imagen como medio de transmisión de la arquitectura se veía acrecentada por la incorporación de los medios electrónicos y de comunicación dirigida de la sociedad actual de consumo, a una *conceptualización sistémica*, que gracias a los últimos avances informáticos, digitales y de software CAD ha focalizado su efectividad en el proceso de diseño y de ejecución de proyectos arquitectónicos, lo que ha permitido aproximar el concepto formal a la vida de sus habitantes y la conformación de su hábitat.

De modo que, como venimos diciendo a lo largo de esta investigación, el hombre contemporáneo asume la progresión de la incertidumbre y la complejidad de su naturaleza y de su pensamiento no-lineal, por lo que tanto el hacer como el vivir la arquitectura se deben entender como procesos dinámicos abiertos, que busquen el equilibrio entre el determinismo y la incertidumbre, entre la intención y el azar, y entre el orden y el caos, donde el factor tiempo intervenga en la creatividad del proceso mismo de proyectar. Así, tal y como explicamos en el capítulo III de nuestro proyecto,

la autopoiesis tiene la implicación de que todos los organismos forman parte de un sistema al cual también pertenece el ambiente que habitan. Tanto el ambiente como los mismos organismos configuran su rol (función) y su forma, en función de sus interacciones, es decir, se auto-configuran recíprocamente. La obra arquitectónica es un componente del sistema vital, y como tal, vinculada inherentemente con el proceso que configura. El diseño arquitectónico asume entonces el rol de un proceso configurador dentro del sistema vital, un sistema autopoyético que permite la generación de su propia estructura, una estructura congruente con el sistema mismo. [...] El entorno sociofísico, desde luego sumamente complejo, es el componente ambiental de este gran sistema vital autopoyético¹⁰⁰⁹.

¹⁰⁰⁹ FLORES GUTIÉRREZ, A. “Del concepto formal a la conceptualización sistémica en el diseño arquitectónico”. *Contexto: Revista de la Facultad de Arquitectura Universidad Autónoma de Nuevo León*, Vol. 14. N.º 20, 2020, p. 120.

En resumen, desde una visión sistémica del diseño arquitectónico se pueden establecer los siguientes puntos:

- La vida puede ser entendida como un sistema holístico, siendo la arquitectura parte del mismo sistema.
- Bajo una consideración sistémica, el diseño arquitectónico es un proceso configuracional de una de las partes de ese sistema: el espacio habitable.
- El diseño arquitectónico es en sí mismo un sistema generador.
- El proceso de conceptualización debe definir al sistema generador en el diseño arquitectónico¹⁰¹⁰.

Al considerar el proceso integral de diseño como un proceso configurativo se hace indispensable no sólo una conceptualización sistémica orientada a la comprensión de sus componentes, sino también a la síntesis fruto de la interrelación entre sus elementos, la que da lugar a la metaestabilidad del sistema.

Por lo que si tenemos en cuenta esta dependencia de los sistemas vivos para con el medio ambiente en que se hallan inmersos, estamos hablando de ecología. La arquitectura que trabaja esta cuestión pensando en el futuro, y no remitiéndose a la apariencia estética de los edificios, sino a cómo funcionan y responden a sus entornos y circunstancias socioeconómicas cambiantes, se llama arquitectura ecológica bioclimática.

En éste ámbito de las arquitecturas ecológicas destacó en los años 90 el fenómeno *Eco-Tech*, teniendo como principales protagonistas a Norman Foster (1935-), Richard Rogers (1933-) y Renzo Piano (1937-), que apostaron por la construcción de edificios con una baja emisión de energía, la utilización de materiales tecnológicamente avanzados, aunque acordes con las materias primas naturales y de bajo consumo energético, apostando por las fuentes de energía naturales a modo de organismos que se transforman en función de las condiciones externas.

También, desde un punto de vista más subjetivo se produjo todo un imaginario ecológico con distintas estrategias a seguir, pero en general buscando la concienciación sobre el medio natural. Por ejemplo, estructuras como el Pabellón Blur Building de Diller Scofidio, para la Expo 2002 de Suiza, que mediante un sistema meteorológico inteligente crea un efecto sensorial corpóreo efímero para enfatizar la dialéctica entre lo artificial y lo natural; o las arquitecturas que pretenden integrar el paisaje natural en el entorno

¹⁰¹⁰ *Ibidem*, p. 120.

urbano, presentes en diversos proyectos de nombres como Norman Foster & Partners, o West 8.

En definitiva, a nuestro alrededor se están desarrollando nuevas tecnologías que tienen el potencial de frenar los efectos del cambio climático, de crear edificios y entornos más saludables, de diseñar edificios de manera más eficiente y de desarrollar estrategias urbanas que brinden un pedestal de equidad para todos los ciudadanos del mundo, puesto que

la Arquitectura es el espacio privilegiado en el que se articulan todas las variables culturales, sociales, antropológicas y políticas con las que las ciencias sociales y la arquitectura misma dialogan. Este nuevo espíritu científico permitirá una arquitectura más “ecologizante” [...] que busque formalizar una estética-ética perteneciente a la sociedad-mundo, en la que impone una conciencia muy aguda de los elementos aleatorios, las bifurcaciones, y la reflexión sobre la complejidad misma. Ahí convergen procesos complementarios que demandan la urgencia de un re-pensamiento¹⁰¹¹.

¹⁰¹¹ CASTELLANOS GARZÓN, G. “La arquitectura: una visión desde la complejidad. El pensamiento del espacio, un espacio para el pensamiento”. *Nodo: Arquitectura*, Vol. 10, N.º 9, 2015, p. 70.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos y libros

- AJDUKIEWICZ, K. *Introducción a la filosofía: epistemología y metafísica*. Madrid: Cátedra, 1986.
- ALONSO GARCÍA, E. *San Carlino. La máquina geométrica de Borromini*. Valladolid: Universidad de Valladolid, 2003.
- ALSINA, C. *La secta de los números. El teorema de Pitágoras*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2011.
- *Las mil caras de la belleza geométrica. Los poliedros*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2010.
- ÁLVAREZ FALCÓN, L. “Arquitectura y fenomenología. Sobre la arquitectura de la “indeterminación” del espacio”. *Eikasía: revista de filosofía*, N.º 47. 2013, pp. 813-836.
- ÁLVAREZ VILLAR, J. *La Clerecía de Salamanca*. Salamanca: Gruposa, 1999.
- ALLEN BROOKS, H. *Frank Lloyd Wright*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 1990.
- ANDALUZ, A, R. *Las armonías de la razón en Kant: Libertad, Sentimiento de lo Bello y Teleología de la naturaleza*. Salamanca: Publicaciones Universidad Pontificia de Salamanca, 2013.
- ARANA, J. *Los sótanos del universo: la determinación natural y sus mecanismos ocultos*. Madrid: Biblioteca Nueva, D. L. 2012.
- ARGAN, G. C. *Borromini*. Madrid: Xarait, 1987.
- ARHEIM, R. *El pensamiento visual*. Barcelona. Ediciones Paidós Ibérica, 1998.
- *Arte y percepción visual. Psicología del ojo creador*. Madrid: Alianza Editorial, 1979.
 - *Hacia una psicología del arte. Arte y entropía*. Madrid: Alianza Forma, 1980.
- ARTIGAS, M. *La mente del universo*. Pamplona: EUNSA, 2000.
- AYALA, F. J. *Darwin y el diseño inteligente. Creacionismo, cristianismo y evolución*. Madrid: Anaya, 2007.
- AZOFRA AGUSTÍN, E. “El desarrollo de los lenguajes del clasicismo en la arquitectura española de la segunda mitad del siglo XVIII. (el ejemplo de la arquitectura religiosa de Salamanca a través de las obras conservadas del arquitecto Juan de Sagarvinaga)”. *Salamanca: revista de estudios*, N.º 55, 2007, pp. 179-222.

- AZOFRA AGUSTÍN, E y RUPÉREZ ALMAJANO, M.^a. N. *El arte en la Salamanca Contemporánea*. 2009.
- BACHELARD, G. *La poética del espacio*. Madrid: Fondo de cultura económica, 1994.
- BAHAMÓN, A. *Analogías entre el mundo animal y la arquitectura contemporánea*. Barcelona: Parramón, 2007.
- BAK, P. y CHEN, K. “Criticalidad autoorganizada”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp.18-25.
- BANFI, A. *Filosofía del arte*. Barcelona: Ediciones Península, historia, ciencia y sociedad, 205, 1987.
- BARABÁSI, A-L. y BONABEAU, E. “Redes sin escala”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp. 26-35.
- BASCOMPTE, J. y JORDANO, P. “Redes mutualistas de especies”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp. 60-69.
- BATTISTI, E. *Renacimiento y Barroco*. Madrid: Cátedra, 1990.
- BENEVOLO, L. *Historia de la arquitectura moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1987.
- *Introducción a la arquitectura*. Madrid: Celeste, 1994.
- BENSE, M. *Estética de la información*. Madrid: Alberto Corazón editor, 1972.
- BERGÓS MASSÓ, J. *Gaudí. El hombre y la obra*. Barcelona: Universidad Politécnica, 1974.
- BERGSON, H. *Memoria y vida*. Madrid: Alianza, 1977.
- BERTALANFFY, L. V. *Perspectivas en la Teoría General de Sistemas: estudios científicos y filosóficos*. Madrid: Alianza, 1982.
- BINIMELIS, M. I. *Una nueva manera de ver el mundo. La geometría fractal*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2012.
- BLUNT, A. *Borromini*. Madrid: Alianza Forma, 1982 (1987 imp.).
- *Teoría de las artes en Italia: 1450-1600*. Madrid: Cátedra, 1985.
- BONET CORREA, A. *Figuras, modelos e imágenes en los tratadistas españoles*. Madrid: Alianza Editorial, 1993.
- BONNER, J. *La evolución de la cultura en los animales*. Madrid: Alianza Editorial, 1982.
- BORRÁS, G. *Cómo y que investigar en historia del arte*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2001.
- BORSI, S. *Borromini*. Firenze: Giunti, 2000.
- BOULEAU, C. *Tramas: la geometría secreta de los pintores*. Madrid: Akal, 1996.
- BOULLÉE, E. L. *Arquitectura. Ensayo sobre el arte*. Introducción de Carlos Sambricio.

- Barcelona: Gustavo Gili, 1985.
- BRANDI, C. *Teoría de la restauración*. Madrid: Alianza Editorial, 1995.
- BROADBEND, G. *Diseño arquitectónico. Arquitectura y ciencias humanas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.
- BRONOWSKI, J. *Los orígenes del conocimiento y la imaginación*. Barcelona: Gedisa Editorial, 1997.
- BROOKS PFEIFFER, B. *Frank Lloyd Wright (1867-1959). Construir para la democracia*. Madrid: Taschen, 2004.
- CALABRESE, O. *La era neobarroca*. Madrid: Cátedra, 1989.
- CALATRAVA, J. *Arte, arquitectura y estética del siglo XVIII*. Madrid: Akal. 1987.
- CALVO, F. *El arte contemporáneo*. Madrid: Taurus Pensamiento, 2001.
- CALVO, T. *Aristóteles. Metafísica*. Madrid: Editorial Gredos, 1994.
- CAPITEL, A. *Metamorfosis de los monumentos y teorías de la restauración*. Madrid: Alianza Forma, 1988.
- CAPONI, G. “Geoffroy Saint-Hilaire y el Problema de las Condiciones de Existencia”. *Limite: Revista Interdisciplinaria de Filosofía y Psicología*. Vol. 11, N.º 36, 2016, pp. 1-13.
- CAPRA, F. *La trama de la vida*. Barcelona. Anagrama, 1999.
- CARPINTERO, H. *La psicología de la forma. Historia de las ideas psicológicas*. Madrid: Pirámide, 2003.
- CASINI, P. *Naturaleza*. Barcelona: Editorial Labor, S.A, 1977.
- CASSIER, E. *Esencia y efecto del concepto de símbolo*. México: Fondo de Cultura Económica, 1975.
- *Rousseau, Kant, Goethe: filosofía y cultura en la Europa del Siglo de las Luces*. Madrid: Fondo de Cultura Económica, 2007.
- CASTELLANOS GARZÓN, G. “La arquitectura: una visión desde la complejidad. El pensamiento del espacio, un espacio para el pensamiento”. *Nodo: Arquitectura*, Vol. 10, N.º 9, 2015, pp. 58-72.
- CASTEX, J. *Renacimiento, barroco y clasicismo. Historia de la arquitectura, 1420-1720*. Madrid: Akal, 1994.
- CENDERERO, C. O. *Geología. Curso Elemental de Historia Natural*. Talleres Tipográficos J. Martínez. Santander, 1916.
- CERVERO SÁNCHEZ, N. “Rafael Leoz. Vivienda experimental en Torrejón de Ardoz”. *Estoa*, Vol. 9, N.º 18, 2020, pp. 67-77.

- CLEARY, R. *Frank Lloyd Wright*. Bilbao: Museo Guggenheim de Bilbao, 2010.
- COLOMBO, M. *Frank Lloyd Wright. Maestros de la Arquitectura*. Barcelona: Salvat, 2010.
- COLQUHOUN, A. *Modernidad y tradición clásica*. Madrid: Júcar, 1991.
- COLLINS, P. *Los ideales de la arquitectura moderna: su evolución (1750-1950)*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2001.
- CORBALÁN, F. *La proporción áurea. El lenguaje matemático de la belleza*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2010.
- CORDON, F. *Introducción al origen y evolución de la vida*. Madrid: Taurus. 1958.
- CRAVINO, A. “Renacimiento, Manierismo, Barroco”. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, N.º 37, 2011, p. 85-105.
- CRUTCHFIELD, J. P.; DOYNE FARMER, J.; PACKARD, N. H. y SHAW, R. “Caos”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp. 6-17.
- DAHAN-GAIDA, L. “La forma en acto. Morfogénesis y ciencias de lo viviente en Paul Valéry”. *Arbor: Ciencia, Pensamiento y Cultura*, Vol. 194, N.º 790, 2018, pp. 1-10.
- DAL, F. C. *Frank Lloyd Wright y El Museo Guggenheim. El tiempo y el arquitecto*. Madrid: Adaba Ediciones, 2011.
- DARWIN, C. *El origen de las especies, por medio de la selección natural*. Estudio preliminar de Juan Comas. México: UNAM, 1959.
- DE FUSCO, R. *Historia de la arquitectura contemporánea*. Madrid: Celeste, 1997.
- DEACON, T. W. *Naturaleza incompleta. Cómo la mente emergió de la materia*. Barcelona: Tusquets. 2013.
- DELBRÜCK, M. *Mente y materia: ensayo de epistemología evolutiva*. Madrid: Alianza Editorial, 1989.
- DELEUZE, G. *El pliegue. Leibniz y el Barroco*. Barcelona: Paidós, 1989.
- DERRIDA, J. *Introducción a “El origen de la geometría” de Husserl*. Buenos Aires: Bordes Manantial, 2000.
- DESCARTES, R. *Discurso del método*. Madrid: Tecnos Editorial, 1994.
- DESIDERI, P.; NERVI, P. L. y POSITANO, G. *Pier Luigi Nervi*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- DOBZHANSKY, T. *et al. Evolución*. Barcelona: Omega, 1993.
- DOMÍNGUEZ, A. “La Ética de Spinoza. Fundamentos y significado”. Actas del Congreso Internacional. Almagro. *Ediciones de la Universidad de Castilla-la*

- Mancha*, 1992, pp. 83-85.
- DURÁN ALLIMANT, R. y ESPINOZA LOLAS, R. “Zubiri y Prigogine: Ciencia, Pensamiento y Cultura”. Vol. 192-780, 2016, <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2016.780n4004>.
- DUTTON, D. *El instinto del arte. Belleza, placer y evolución humana*. Barcelona: Paidós Ibérica, 2010.
- ECO, U. *La estructura ausente*. Barcelona: Lumen, 1989.
- ESPERON, J. L. “Organic design in home furnishings. Charles Eames-Eero Saarinen, historia diseño industrial”. 2013. En <http://historia-disenio-industrial.blogspot.com/2013/10/charles-y-ray-eames-organic-design-in.html>.
- ESTÉVEZ, A.T. *Gaudí*. Madrid: Susaeta Ediciones, 2001.
- FATÁS, G. Y BORRÁS, M. G. *Diccionario de términos de arte y elementos de arqueología, heráldica y numismática*. Madrid: Alianza Editorial, 1992.
- FERNÁNDEZ, A. A. *Velada memoria. De las intenciones del enigma en el arte y la arquitectura*. Madrid: COAM, 1990.
- FERNÁNDEZ, M. “Los tratados del orden Salomónico. Juan Ricci, Juan Caramuel y Guarino Guarini en la arquitectura novohispana”. Vol. 7, N.º 7, 2008, pp. 13-43.
- FERRARI, A. *Océanos secretos*. Madrid: Espasa Calpe, 2006.
- FERRER, M. *Borges y la nada*. London: Támesis, D.L. 1971.
- FILLER, M. *La arquitectura moderna y sus creadores. De Frank Lloyd Wright a Frank Gehry*. Barcelona: Alba Editorial, 2012.
- FLORES GUTIÉRREZ, A. “Del concepto formal a la conceptualización sistémica en el diseño arquitectónico”. *Contexto: Revista de la Facultad de Arquitectura Universidad Autónoma de Nuevo León*, Vol. 14. N.º 20, 2020, pp. 115-123.
- FOCILLON, H. *La vida de las formas y elogio de la mano*. Madrid: Xarait Ediciones, 1983.
- FONTANA CABEZAS, J. F. *Diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. Tesis Doctoral presentada en el Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Universidad Politécnica de Alicante, 2012. En: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/26859>.
- FRANCASTEL, P. *Arte, arquitectura y estética en el siglo XVIII*. Madrid: Akal, 1987.
- G. PINO, F. “Centro Multiusos en Mannheim: Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha”. *Rita: Revista Indexada de Textos Académicos*, N.º 5, 2016, pp. 106-113.

- GARCÍA VELARDE, M. y FAIREN LE LAY, V. “Estructuras disipativas, algunas nociones básicas (1)”. *El Basilisco: Revista de materialismo filosófico*, N. °10, 1980, pp. 8-13.
- GHYKA, M. C. *El número de oro. I. Los ritmos. II. Los ritos*. Barcelona: Poseidón, 1978.
- *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las Artes*. Barcelona: Poseidón, 1983.
- GIEDION, S. *El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial, 1981.
- *Espacio. Tiempo y arquitectura (el futuro de la nueva tradición)*. Barcelona: Hoepli, S.L, 1955.
- GIRALT-MIRACLE, D. *Gaudí. La búsqueda de la forma. Espacio, geometría, estructura y construcción*. Barcelona: Lunweg Editores, 2002.
- GOMBRICH, E. H. *Arte e ilusión*. Nueva York: Universidad de Nueva York, Phaidon Press Limited, 2002.
- *El sentido del orden*. Nueva York: Universidad de Nueva York-Phaidon Press Limited, 2004.
- GONDRA, J. M. *La psicología de la Gestalt. Historia de la psicología. Introducción del pensamiento psicológico moderno. Volumen II: Escuelas, teorías y sistemas contemporáneos*. Madrid: Síntesis, 1998.
- GONZÁLEZ DE ÁVILA, M. “El saber de la imagen”. *Revista Occidente*, N.º 422-423, 2016 (Ejemplar dedicado a: Metáfora y ciencia), pp. 58-72.
- *Semiótica. La experiencia del sentido a través del arte y de la literatura*. Madrid: Abada, 2021.
- GONZÁLEZ IGLESIAS, J. A. “Lo Inteligible y lo bello”. *Diario El PAÍS: Babelia*, 2016.
- GONZÁLEZ LISORGE, A. “Del empirismo a la invención: cálculo y proyecto en la arquitectura moderna”. *P+C: Proyecto y Ciudad: revista de arquitectura*, N.º 8, 2017, pp. 111-122.
- GONZÁLEZ, M.^a. ZULENY “Sigfried Giedion y Espacio, tiempo y Arquitectura”. Una reflexión sobre historiografía arquitectónica del siglo XX”. EACRV, FAU, UCV, 2008. En: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-complutense-madrid/arquitectura-y-modernidad/apuntes/resenasigfriedgiedionespaciotiempo-y-arquitectura-reflexionhistoriografia-arq-s-xx/6705773/view>.
- GÖSSEL, P. *Frank Lloyd Wright*. Nuremberg: Taschen, 1994.
- GRAU, C. *Borges y la arquitectura*. Madrid: Ediciones Cátedra, 1989.

- GREGOTTI, V. *Desde el interior de la arquitectura*. Barcelona: Península, 1993.
- GRILLO, A. *La Arquitectura y la Naturaleza Compleja: Arquitectura, Ciencia y Mimesis a finales del siglo XX*. Tesis Doctoral presentada en el Departament de Composició Arquitectónica. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. En: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6087>.
- GUTIÉRREZ, R. y DIESTE, E. *Arquitectura latinoamericana del siglo XX*. Madrid: Lunwerg, 1998.
- HAMBLIM, J. W. *El templo de Salomón: historia del mito*. Madrid: Akal, 2008.
- HARTT, F. *Arte. Historia de la pintura, escultura y arquitectura*. Madrid: Akal, 1985.
- HEINZ, T. A. *Frank Lloyd Wright*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- HEISENBERG, H. (et al.). *Cuestiones cuánticas: escritos místicos de los físicos más famosos del mundo*. Barcelona: Editorial Kairós, 2007.
- HEYDENREICH, L. *Arquitectura en Italia: 1400-1600*. Madrid: Cátedra, 2007.
- HILDEBRAND, A. V. y PEÑA AGUADO, M.^a I. *El problema de la forma en la obra de arte*. Madrid: La balsa de la medusa, Visor, 1989.
- HITCHCOCK, H.-R. *Arquitectura de los siglos XIX y XX*. Madrid: Cátedra, 1985.
- HONOUR, H. *Neoclasicismo*. Madrid: Xarait, 1982.
- HOWARD E, G. *Darwin sobre el hombre. Un estudio de psicológico de la creatividad científica*. Madrid: Alianza Editorial, 1984.
- INSTITUTO DE CULTURA-MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE LA CIUDADELLA. *Los otros arquitectos*. Barcelona. Gustavo Gili, 2003.
- JACOB, F. *El ratón, la mosca y el hombre*. Barcelona: Crítica, D.L. 1998.
- *La lógica de lo viviente. Una historia de la herencia*. Barcelona: Tusquets, 1999.
- JAY, S. *La estructura de la teoría de la evolución. EL gran debate de las ciencias de la vida. La obra definitiva de un pensador crucial*. Barcelona: Tusquets, 2004.
- JIMÉNEZ, J. *Cuerpo y Tiempo. La imagen de la Metamorfosis*, Barcelona: Destino, 1993.
- JÚAREZ CHICOTE, A. “A propósito de Robert Le Ricolais”. *Arquitectos*, N.º 141, 1996, pp.72-76. En: <http://oa.upm.es/48057/>
- “El arte de construir con agujeros. Reflexiones en torno a Robert Le Ricolais”. *Circo*. N.º 39, *Circo*, Madrid, 1996, pp. 1-12. En: http://oa.upm.es/48058/1/1996_agujeros_AJC.pdf
- JUNG, C. *Arquetipos e inconsciente colectivo*. Buenos Aires: Paidós, 1984.

- *El hombre y sus símbolos*. Barcelona: Caralt Editor, 1984.
- KANT, I.; BOROWSKI, L. E. y VILLACAÑAS, J. L. “Crítica de la razón pura. Prolegómenos a toda metafísica futura. Relato de la vida y el carácter de Inmanuel Kant” por Ludwing Ernst Borowski. Estudio introductorio por José Luís Villacañas. *Gredos*, 2010.
- KAUFMANN, E. *La arquitectura de la Ilustración. Barroco y postbarroco en Inglaterra, Italia y Francia*. Barcelona: Gustavo Gili, 1974.
- *Tres arquitectos revolucionarios, Boullée, Ledoux y Lequeu*. Barcelona: Gustavo Gili, 1980.
- *De Ledoux a le Corbusier. Origen y desarrollo de la arquitectura autónoma*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- *Investigaciones. Complejidad, autoorganización y nuevas leyes para una biología general*. Barcelona: Tusquets, 2003.
- KERÉNYI, K. *Arquetipos y símbolos colectivos*. Barcelona: Anthropos, 1994.
- KULTERMANN, U. *La arquitectura contemporánea*. Barcelona: Labor, 1969.
- LACOSTA, M. “13 Principios de la Complejidad”. 2013.
<https://axonometrica.blog/2013/09/16/13-principios-de-la-complejidad/>
- LAMARCK, J. B. *Filosofía Zoológica*. Barcelona: Alta Fulla. 1986.
- LAMPÉREZ, V. *Historia de la arquitectura cristiana española en la edad media*. Vol. II. Valladolid: Ámbito ediciones, 1999.
- LARSON, E. J. *Evolución, la asombrosa historia de una teoría científica*. 1ª ed. Castellano. Barcelona: Debate, 2006.
- LAUGHLIN, R. *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*. Buenos Aires: Katz, 2007.
- LECOURT, D. *Para una crítica de la epistemología*. Madrid: Siglo veintiuno, 1980.
- LEIBNIZ G. H. *Discurso de metafísica*. Versión, introducción y notas de Julián Marías. Barcelona: Atalaya, 1994.
- LEYRA, A. M. *La mirada creadora. De la experiencia artística a la filosofía*. Barcelona: Península, 1993.
- LÓPEZ ANIORTE. I. *Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Alicante, 2019.
- LÓPEZ-CÉSAR, I. y ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J. “Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales”. *Estoa: Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, Vol. 7, N.º 13, 2018, pp. 7-22.

- LÓPEZ-FANJUL DÍEZ DEL CORRAL, M. “Sir John Soane, arquitecto de colecciones. Su Casa-museo”. *Museos. es*, N.º 3, 2007, p. 122-129. Disponible en: <http://www.mcu.es/museos/MC/MES/index.html>. (Consulta 20/08/2013).
- LORENZ, K. *La otra cara del espejo: Ensayo para una historia natural del ser humano*. Barcelona, Plaza y Janés, 1973.
- LUIGI, L. P. *La vida emergente. De los orígenes químicos a la biología sintética*. Barcelona: Tusquets, 2010.
- LUNA, J. J. *Durero. Los grandes genios del arte*. Madrid: Unidad Editorial, 2005.
- LURIÉ, D. y WAGENSBERG, J. “Termodinámica de la evolución biológica”. *Revista Investigación y ciencia*. Marzo 1979. N.º 30. ISSN:0210-136X. p.p. 82-93.
- LLORENTE DÍAZ, M. *El saber de la arquitectura y de las artes*. Barcelona: Ediciones UPC, 2000.
- MACCARTER, R. *Frank Lloyd Wright Architect*. Londres: Phaidon. 1997.
- MADEC, P. *Boullée*. Madrid: Akal, 1997.
- MANDELBROT, B. *La geometría fractal en la naturaleza*. Barcelona: Tusquets Editores, 2000.
- *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona: Tusquets, 1988.
- MARCHÁN, S. *Real/Virtual en la estética y la teoría de las artes*. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica, 2006.
- MARGALEF, J. B. *La percepción, desarrollo cognitivo y artes visuales*. Barcelona: Anthropos, 1987.
- MARGULIS, L. y SAGAN, D. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets, 1996.
- MARÍN, A. M.^a y BARLUENGA BADIOLA, G. “Eladio Dieste y la cerámica armada. La forma de lo resistente”. *Arquitecturas del Sur*, Vol. 32, N.º 45, 2014, pp. 90-103.
- MARINA, J. A. *Teoría de la inteligencia creadora*. Barcelona: Editorial Anagrama, 1993.
- MARTÍN, A. N. *La visión y la idea. Origen y derivas de la paideia romántica*. Madrid: Avarigani Editores, 2012.
- MARTÍNEZ MIGUÉLEZ, M. “Paradigmas emergentes y ciencias de la complejidad”. *Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, N.º 65, 2011, págs. 45-80.
- MARTÍNEZ, G. F. *Muerte y sociedad en la España de los Austrias*. Colección monografías N.º 30. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla la Mancha, 2000.

- MAYNARD, J. *La construcción de la vida. Genes, embriones y evolución*. Barcelona: Crítica, 2000.
- MELÉNDEZ-HEVIA, E. *La selección natural y la termodinámica en la evolución biológica: del origen de la vida al cáncer*. La Laguna: Universidad de la Laguna, 2001.
- MELOGNO, P. *Elementos de historia de la ciencia*. Uruguay: Colecciones Manuales didácticos. 2011.
- MIRCEA, E. *El mito del eterno retorno. Arquetipos y repetición*. Madrid: Alianza, 1994.
- MONSERRAT, J. *El cementerio marino*. Madrid: Alianza, 1987.
- *Epistemología evolutiva y teoría de la ciencia*. Madrid: UPCM, 1984.
 - *La rebelión de las formas. O cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Barcelona: Tusquets, 2007.^[1]_[SEP]
- MONTANER MARTORELL, J. M.^a. “Hacia una teoría de las formas. Teorías y obras de la arquitectura del siglo XX”. *DC PAPERS: revista de crítica y teoría de la Arquitectura*, N.º 3, 1999, pp. 113-122.
- MONTANER, J. M. *Después del movimiento moderno. Arquitectura del Siglo XX*. Barcelona: Gustavo Gili, 1993.
- *La modernidad superada. Arquitectura, arte y pensamiento del siglo XX*. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.
- MORIN, E. “La epistemología de la complejidad”. *Gazeta de antropología*, N.º 20, 2004.
- MÜLLER, L. *El ornamento icónico y la arquitectura 1400-1600*. Madrid: Ensayos Arte Cátedra, 1985.
- MUNTAÑOLA, J. *Documentos de arquitectura. Arquitectura española de los años 80*. Almería: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental, 1990.
- *La arquitectura de los 70*. Barcelona: Oikos-Tau, 1980.
 - *Poética y arquitectura. Una lectura de la arquitectura postmoderna*. Barcelona: Anagrama, 1981.
- NAVARRO DE ZUVILLAGA, J. *Forma y Representación. Un análisis geométrico*. Madrid: Akal, 2008.
- NAVARRO, F. *Historia del Arte. El Barroco*. El País. Madrid: Editorial Salvat, 2005.
- NORBERG-SCHULZ, C. *Existencia. Espacio y Arquitectura*, Barcelona: Blume, 1975.
- OCHOA, C. y BARAHONA ECHEVARRÍA, A. “El debate entre Cuvier y Geoffroy, y el origen de la homología y la analogía”. *Ludus vitalis: revista de filosofía de las ciencias de la vida*, Vol. 17, N.º 32, 2009, pp. 37-54.

- PANOFSKY, E. *Arquitectura gótica y pensamiento escolástico*. Madrid: La Piqueta, 1986.
- *Arquitectura, modernidad, conocimiento*. Barcelona: Anagrama, 2001.
 - *Renacimiento y renacimientos en el arte occidental*. Madrid: Alianza, 1975.
- PEARSON, D. *Arquitectura orgánica moderna. Un nuevo camino para el diseño urbano rural*. Barcelona: Art Blume, 2002.
- PERMANYER, L. y LEVICK, M. *El Modernismo. Gaudí*. Barcelona: Ediciones Poligrafía, 1996.
- PERONA, J. J. *La utopía antigua de Piranesi*. Murcia: Universidad de Murcia, 1986.
- PFEFFER, P. *Los continentes. Asia*, Barcelona: Seix Barral, 1972.
- PIAGET, J. *Introducción a la epistemología genética. I. El pensamiento matemático*. México: Paidós, 1987.
- PIGNATARI, D. *Semiótica del arte y de la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1983.
- PIN, V. *El drama de la ciudad ideal*. Madrid: Taurus, 1995.
- PIÑÓN, H. *El formalismo esencial en la arquitectura moderna*. Barcelona: Ediciones UPC, 2008.
- POPPER, K. R. “Selección natural y la emergencia de la mente”. *Teorema: Revista internacional de filosofía*, Vol. 10, N.º 2-3, 1980, pp. 191-214.
- PORTOGHESI, P. *El ángel de la historia. Teorías y lenguajes de la arquitectura*. Madrid: Hermann Blume, 1985.
- PRECKLER, A. M. *Historia del arte universal de los siglos XIX y XX. Arquitectura, pintura y escultura del siglo XIX. Arquitectura del siglo XX. Tomo I*. Madrid: Editorial Complutense, 2003.
- PRIGOGINE, I. *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*. Madrid: Tusquets, 1988.
- *El fin de las certidumbres*. Madrid: Santillana/Taurus, 1997.
 - *Entre el tiempo y la eternidad*. Madrid: Alianza, 1990.
 - *La Nueva Alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza editorial, 1990.
- PT BAMBOO PURE, “Bucles de bambú. Campus y escuela Green School, Bali (Indonesia)”. *Arquitectura Viva*, N.º 137, 2011, pp. 50-53.
- QUERALTO, R. *Karl Popper, de la epistemología a la metafísica*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones, 1996.

- RAMÍREZ, J. A. *Cinco lecciones sobre arquitectura y utopía*. Málaga: Departamento de Historia del Arte de la Universidad de Málaga, 1981.
- *Cómo escribir sobre arte y arquitectura*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2005.
 - *Construcciones ilusorias (Arquitecturas descritas, arquitecturas pintadas)*. Madrid: Alianza Editorial, 1983.
 - *Dios arquitecto: J. B. Villalpando y el templo de salomón*. Madrid: Ediciones Siruela, 1994.
 - *Edificios y sueños (ensayos sobre arquitectura y utopía)*. Málaga: Universidad de Málaga y Salamanca, 1983.
 - *La metáfora de la colmena: de Gaudí a Le Corbusier*. Madrid: Ediciones Siruela, 1998.
 - *Tendencias del arte, arte de tendencias a principios del siglo XXI*. Madrid: Ensayos Arte Cátedra, 2004.
- RAYMOND, B. *Historia de la estética*. México D.F. Fondo de Cultura Económica, 1993.
- REALE, G. y ANTISERI, D. *Historia del pensamiento filosófico y científico. Tomo II. Del humanismo a Kant*. Barcelona: Herder, 1995.
- RIEGL, A. *Problemas de estilo. Fundamentos para una historia de la ornamentación*. Barcelona: Gustavo Gili, 1980 (1893).
- RODRÍGUEZ, F. *La inteligencia en la naturaleza. Del relojero ciego al ajuste fino del universo*. Madrid: Biblioteca Nueva, 2012.
- RÚA GARCÍA, M. *Centro Niemeyer. Complejo Internacional de la Cultura. Proceso Constructivo*. Oviedo: Síntesis Arquitectura, 2013.
- RUSKIN, J. *Las siete lámparas de la arquitectura*. Buenos Aires: Librería “El Ateneo” Editorial, 1965.
- RYKWERT, J. *Los primeros modernos: los arquitectos del siglo XVIII*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- SAMPEDRO, J. *Deconstruyendo a Darwin. Los enigmas de la evolución a la luz de la nueva genética*. Barcelona: Editorial Planeta, 2002.
- SÁNCHEZ GARDUÑO, F. “Sobre la teoría morfogenética de Turing”. En: https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2.955e3700e06db01f.353630352e706466.pdf, pp.77-112.
- SANDOVAL, A. G. *Observar. Interpretar. Expresar*. Santander: Sandoval, 2002.

- SARMIENTO CAMPOS, J. A. “Autopoiesis, bucles, emergencia, variedades topológicas y una conjetura sobre la consciencia humana”. *ARBOR: Ciencia, Pensamiento y Cultura*. Vol. CLXXXV738, 2009.
- SCRUTON, R. *La estética de la arquitectura*. Madrid: Alianza Forma, 1985.
- SCHNEIDER, E. *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, ecología y evolución*. Barcelona: Tusquets. 2009.
- SCHRÖDINGER, E. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets, 2001.
- SEDLMAYR, H. *Épocas y obras artísticas*. Madrid: Ediciones Rialp, 1965.
- SENET-JOSA, J. “François Jacob. La lógica de lo viviente y la historia de la biología”. *Triunfo*, Vol. 37, N.º 619, 1974, pp. 30-34.
- SOLANA RUIZ, J. L. *Con Edgar Morin, por un pensamiento complejo: implicaciones interdisciplinarias*. Madrid. Universidad Internacional de Andalucía: Akal, 2005.
- SOLÉ, R. V., COROMINAS MURTRA, B. y FORTUNY, J. “Lenguaje, redes y evolución”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp. 78-83.
- SOLÉ, V. R., BASCOMPTE, J., DELGADO, J. LUQUE, B. y MANRUBIA, C. S, “Complejidad en la frontera del caos”. *Los monográficos de Investigación y Ciencia*, 2019, N.º 95, pp. 52-59.
- SONTAG, S. *Contra la interpretación*. Barcelona: Seix Barral, 1969.
- SPINOZA, B. *Ética demostrada según el orden geométrico*. Traducción, Introducción y notas de Vidal Peña García. Notas y epílogo de Gabriel Albiac. Madrid: Tecnos, 2007.
- STEVEN, B. S. *Spinoza y el libro de la vida. Libertad y redención ética*. Madrid: Biblioteca Nueva, 2007.
- TAFURI, M. *La arquitectura del humanismo*. Madrid: Xarait Ediciones, 1982.
- *La esfera y el laberinto. Vanguardias y arquitectura de Piranesi a los años setenta*. Barcelona: Gustavo Gili, 1984.
 - *Retórica y experimentalismo. Ensayos sobre la arquitectura de los siglos XVI y XVII*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1978.
 - *Sobre el renacimiento: principios, ciudades, arquitectos*. Madrid: Cátedra, 1995.
 - *Teorías e historia de la arquitectura: hacia una nueva concepción del espacio arquitectónico*. Barcelona: Laia, 1972.

- TARTARKIEWICZ, W. *Historia de seis ideas. Arte, belleza, forma, creatividad, mimesis, experiencia estética*. Traducción de Francisco Rodríguez Martín. Madrid: Editorial Tecnos, 2001.
- *Historia de seis ideas. Arte, belleza, forma, creatividad, mimesis, experiencia estética*. Madrid: Tecnos, 2015.
- TAYLOR, R. *Arquitectura y magia: consideraciones sobre la idea de El Escorial*. Madrid: Siruela, 1992.
- TEMPLADO, J. *Historia de las teorías evolucionistas*. Madrid: Alhambra. 1974.
- THOM, R. *Esbozo de una semiología. Física aristotélica y teoría de las catástrofes*. Barcelona: Gedisa, 1990.
- *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*. Barcelona: Gedisa, 2008.
 - *Parábolas y catástrofes. Entrevista sobre matemática, ciencia y filosofía*. Barcelona: Tusquets, 1993.
- THOMPSON, D. A. *Sobre el crecimiento y la forma*. Madrid: Akal, 2011.
- TRIADO, J. R. *Gaudí. Genios del Arte*. Madrid: Susaeta, 2000.
- ULLMANN, H. F. *Neoclasicismo y Romanticismo: Arquitectura, escultura, pintura, dibujo*. Colonia: Ullmann & Könemann, 2007.
- VALÉRY, P. *Eupalinos o el arquitecto*. Madrid: Colegio oficial de arquitectos técnicos de Madrid, 1982.
- VELÁZQUEZ FERNÁNDEZ, H. “Autoorganización, complejidad y naturaleza: hacia una revaloración de la forma aristotélica”. *Eikasia: revista de filosofía*, N.º 43, 2012, págs. 197-205.
- VENTURI, R. *Complejidad y contradicción en la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.
- VERCELLONE, F. *Más allá de la belleza*. Madrid: Biblioteca Nueva, 2013.
- VERNEAUX, R. *Epistemología general o crítica del conocimiento*. Barcelona: Herder, 1977.
- VIDLER, A. *Ledoux*. Madrid: Akal, 1994.
- VIGOUROUX, R. *La fábrica de lo bello*. Barcelona: Prensa Ibérica, 1996.
- VV. AA. *John Soane*. Londres: AcademyEditions/St. Martin's Press, 1983.
- WAGENSBERG, J. “Las tres selecciones (fundamental, natural y artificial)”. *Monografías Humanitas*, N.º 3, 2004, pp. 5-12.
- *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets, 1994.

- WIEBENSON, D. *Los tratados de la arquitectura. De Alberti a Ledoux*. Madrid: HermannBlume, 1982.
- WILCZEK, F. *El mundo como una obra de arte. En busca del diseño profundo de la naturaleza*. Barcelona: Editorial Planeta, 2016.
- WILLIAMS, C. *Los orígenes de la forma*. Barcelona: Gustavo Gili, 1984.
- WITTKOWER, R. *Arte y arquitectura en Italia: 1600 1750*. Madrid: Cátedra. 2007.
- WÖLFFLIN, H. *Conceptos fundamentales de la Historia del Arte*. Madrid: Espasa Calpe. 1961.
- WRIGHT, F. Ll. *Testamento*. Buenos Aires: Compañía General Fabril Editora, 1961.
- ZAGAL, H. *Ensayos de metafísica, ética y poética. Los argumentos de Aristóteles*. Pamplona: EUNSA, 2008.
- ZELLINI, P. *Breve historia del infinito*. Madrid: Siruela, 1991.
- ZEVI, B. *El lenguaje moderno de la arquitectura*. Barcelona: Poseidón, D.L. 1978.
- *Frank Lloyd Wright*. Barcelona: Gustavo Gili, 1988.
 - *Historia de la arquitectura moderna*. Barcelona: Poseidón, D.L. 1980.
 - *Saber ver la arquitectura*. Barcelona: Poseidón, 1981.
- ZUBIRI, X. *Estructura dinámica de la realidad*. Madrid: Alianza Editorial, 1989.

Recursos web

<http://educale.com>

<http://phy6.org>

<http://wikipedia.org>

<http://www.Apuntesdearquitecturadigital.com>

<http://www.alarmy.es>

<http://www.bubblemania.fr/es/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekín-chine/>

<http://www.Casualidaddiseño.blogspot.com>

<http://www.centros5.pntc.es>

<http://www.conicasparábola.blogspot.com>

<http://www.dreamstime.com>.

<http://www.dublin.es>

<http://www.epsilon.es>

<http://www.es.wikiarquitectura.com>.

<http://www.esmaload.wordpress.com>
<http://www.espilones.com>
<http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/montevideo-shopping-center/>
<http://www.freepik.es>
<http://www.IGraffcaracas.es>
<http://www.lasupergalaxia.wordpress.com>
<http://www.microrespuestas.com>
<http://www.minube.com>
<http://www.neofronteras.com/especiales.es>
<http://www.sanatatak.com/view/drop-citynin-oykusu>
<http://www.soane.org>
<http://www.taringa.net>
<http://www.timerime.com>
<http://www.todointeressante.com>
<http://www.viajarsi.com>
<http://www.wiquiarkitectura.com/building/japan-pavillion-expo-2000-hannover/>
<http://www.zvihecker.com/#projects>
http://www.zvihecker.com/projects/synagogue_in_the_negev_desert-60-1.html#13
<https://unavidamoderna.tumblr.com/post/38719984684/capilla-de-los-misioneros-del-esp%C3%ADritu-santo.jpeg>
<https://www.archdaily.com/158000/ad-classics-cosmic-rays-pavilion-felix-candela/5107fb9db3fc4b272000008f-ad-classics-cosmic-rays-pavilion-felix-candela-image>
<https://www.cosmicinspirocloud.com/post/143957890998/felix-candela-la-jacaranda-nightclub-acapulco>
<https://www.designboom.com/architecture/frei-otto-a-life-of-research-construction-and-inspiration-detail-book-report-06-02-2015/>
<https://www.pinterest.es/pin/437764026260512993/>
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>
https://www.urbipedia.org/hoja/Restaurante_Los_Manantiales
<https://arquitecturaviva.com/obras/centro-nacional-de-natacion-pekín-7>
<https://arquitecturaviva.com/obras/viviendas-sociales-izola>

<https://arquitecturayempresa.es/noticia/de-la-arquitectura-cristalina-la-deconstruccion-zvi-hecker>

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-japon-expo-2000-en-hannover/>

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-de-la-twa-aeropuerto-john-f-kennedy/>

https://es.wikipedia.org/wiki/Qu%C3%ADmica_de_fullerenos

<https://pxhere.com/es/photo/1595785>

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/16128/RodriguezCancela_Daniel_TFG_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/16128/RodriguezCancela_Daniel_TFG_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

<https://spa.architecturaldesignschool.com/interviewwithzvihecker>.

<https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>

<https://tecne.com/arquitectura/centro-oscar-niemeyer/>.

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12194/DPA%2015_26%20MART%C3%8D.pdf

<https://wikimedia.org/>

https://www.abc.es/ciencia/abci-esta-extrana-criatura-forma-globo-ocular-201911042045_noticia.html.

<https://www.architecturaldigest.com/gallery/famous-architecture-seen-from-outer-space>.

<https://www.architectural-review.com/archive/church-at-atlantida-uruguay-by-eladio-dieste>.

<https://www.augi.com/articles/detail/mimic-a-master-builder-a-tribute-to-felix-candela>

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-45019575>.

<https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>

<https://www.milenio.com/opinion/martin-bonfil-olivera/la-ciencia-por-gusto/escutoides-el-dia-que-los-biologos-sorprendieron-a-los-fisicos>.

<https://www.pinterest.es/pin/538039486708679951/>.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-285062/clasicos-de-arquitectura-pabellon-philips-expo-58-le-corbusier-and-iannis>

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/23Icc23de39.pdf?sequence=23&isAllowed=y>.

http://www.zvihecker.com/projects/heinz_galinski_schule-110-1.html

http://www.zvihecker.com/projects/ramot_housing-113-1.html#1

<https://newtonexcelbach.com/2010/09/06/the-eden->

<https://www.disenoyarquitectura.net/2011/01/planta-de-embotellado-bacardi-de-felix>

<http://arquitecturazonacero.blogspot.com/2013/10/eladio-dieste-escritos-y-obras-1943-1996.html>.

<https://ayudahispano-3000.blogspot.com/2015/03/biologia-biologia-sistemica.html>

<http://baulitoadelrte.blogspot.com/2016/09/gaudi-y-la-geometria.html>

https://elpais.com/elpais/2019/04/15/del_tirador_a_la_ciudad/1555319612_448277.html

<https://francis.naukas.com/2019/07/18/escutoides-para-rellenar-el-espacio-delaunay-lofts/>.

http://www.zvihecker.com/projects/project_titel-30-1.html#4