



VNiVERSiDAD DE SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Tesis Doctoral

SOBRE LA MODELIZACIÓN Y LA COMPRENSIÓN CIENTÍFICAS

Un enfoque inferencial y dinámico aplicado al modelo
evo-devo *Polypterus* de la plasticidad fenotípica

Rodrigo A. López Orellana

Directora: Ana Cuevas Badallo

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE
ESTUDIOS DE LA
CIENCIA Y LA
TECNOLOGÍA
eCyt

Salamanca – Mayo de 2020

Imagen de portada: fósil de *Ichthyostega*, desde tomografía axial computarizada (μ CT scan data). Imagen de Pierce, Clack y Hutchinson (2012, 523).

A Sara

As natural selection acts by life and death,—by the preservation of individuals with any favourable variation, and by the destruction of those with any unfavourable deviation of structure,—I have sometimes felt much difficulty in understanding the origin of simple parts, of which the importance does not seem sufficient to cause the preservation of successively varying individuals. I have sometimes felt as much difficulty, though of a very different kind, on this head, as in the case of an organ as perfect and complex as the eye.

Charles Darwin, 1859

La primera y, en cierto sentido, más importante tarea de nuestro conocimiento consciente de la naturaleza consiste en capacitarnos para prever experiencias futuras, a fin de que podamos ordenar nuestra acción presente de acuerdo con esta previsión. Como base para la solución de esa tarea del conocimiento empleamos en toda circunstancia experiencias pasadas, adquiridas por observación casual o experimento intencionado. Pero el procedimiento, de que nos valemos siempre para inferir [Ableitung] el futuro del pasado y lograr así la previsión deseada, es el siguiente: nos hacemos simulacros internos [innere Scheinbilder; imágenes ficticias] o símbolos de los objetos externos; de manera que las consecuencias intelectualmente necesarias de los simulacros sean, en cada caso, los simulacros de las consecuencias naturalmente necesarias de los objetos simbolizados. Para que esta exigencia se pueda satisfacer, tienen que existir ciertas concordancias entre la naturaleza y nuestra mente. La experiencia nos enseña que la exigencia se puede satisfacer, y que por tanto tal concordancia de hecho existe. Si hemos tenido la suerte de inferir [abzuleiten] de toda la experiencia reunida hasta ahora simulacros de la índole requerida, podemos desarrollar en ellos en poco tiempo, como en modelos [como si fueran modelos; wie an Modellen], las consecuencias que aparecerán en el mundo externo recién al cabo de mucho tiempo, o como resultado de nuestra propia intervención; así podemos anticiparnos a los hechos y ajustar nuestras desiciones presentes a la comprensión [Einsicht] obtenida. Los simulacros [die Bilder] de que hablo son nuestras representaciones [Vorstellungen] de las cosas, tienen con las cosas un acuerdo [concordancia; correlación; Übereinstimmung] esencial, que consiste en el cumplimiento de la exigencia mencionada, pero para su propósito no hace falta que concuerden [übereinstimmen] con las cosas en nada más. De hecho, tampoco sabemos, ni tenemos medio alguno para averiguar, si nuestras representaciones de las cosas concuerdan con estas en algo más que no sea en esa relación fundamental.

Heinrich Rudolf Hertz, 1894, pp. 1-2
Traducción de Roberto Torretti (2016)

Agradecimientos

Este trabajo también está dedicado a mis hijos, David y Andrés; a mis padres, Saúl y María; y a mis hermanos, Javier, Mariel y Francisco. Gracias por todo su apoyo y cariño.

Además, le dedico esta tesis a Andrés Bobenrieth. Sin él, yo no hubiera llegado hasta aquí ni sería lo que he llegado a ser como profesional. Gracias por todo.

Agradezco a Ana Cuevas su excelente dirección y paciencia. No he podido tener una mejor directora de tesis. Con ella he aprendido el rigor filosófico, la exactitud en las palabras y la correcta síntesis en la investigación. Gracias por toda tu ayuda y entrega.

Esta tesis se la debo también a mi amigo biólogo David Cortés. Junto con él he trabajado, publicado y presentado en congresos internacionales parte importante de este trabajo y algunos de sus resultados. Muchas gracias por toda tu ayuda y guía en las cuestiones más difíciles de la biología. Te deseo lo mejor en tu carrera.

Agradezco a Juan Redmond su amistad, su ayuda incondicional, su guía y preocupación. Gran parte de esta tesis ha nacido de las discusiones, los intereses y el trabajo que hemos tenido y seguiremos teniendo juntos.

Agradezco también al profesor Carlos Verdugo toda su ayuda y precisas correcciones. Gracias maestro por su amistad y por encaminarme en la filosofía de las ciencias.

A Mara Manzano y Alfonso, por su cariño incommensurable. Gracias por su preocupación y atención. Por recibirnos como a hijos. Con ustedes hemos vivido algunos de los momentos más felices que hemos tenido aquí en Salamanca.

A Esther Palacios, Obdulia Torres y Andrei Moldovan por recibirme gratamente y por toda su ayuda en estos años. Los llevaré en mis recuerdos con mucho cariño.

A Diego Pinheiro, gran amigo y compañero de las batallas en el despacho, quemándonos las pestañas hasta tarde estudiando y escribiendo como buenos becarios. Después que partió junto a Renata, Salamanca no fue lo mismo. Espérame en Brasil con cachaça, coxinhas y tus brigadeiros.

Agradezco a mi buen amigo Daniel Álvarez su ayuda y gran compañía. Has sido un pilar para mí en este último tiempo. Si el destino nos termina separando de ciudad o país, espero no echarte de menos. Pero será difícil. Gracias por todo mi buen sibarita.

A Bralind Kiri, mi compañero de despacho y gran amigo. Excelentísimo Doctor. Gracias por tu buena compañía y enriquecedoras conversaciones. ¡Ahora nos toca ir a por la filosofía de la economía!

A mis grandes amigos del iECYT; especialmente al Doctor Víctor Aranda (polizón de nuestro Instituto), a Benedicto Acosta y a Elisa Calleja. Este último año que hemos pasado juntos ha sido fantástico, ha sido el mejor.

Finalmente, agradezco a todo el equipo de iECYT, y muy en especial a Santiago López y a Miguel Ángel Quintanilla. Estos años han sido de gran aprendizaje y de muchos frutos. Espero que en el futuro sigamos trabajando juntos.

Resumen

El objetivo de este trabajo es proponer un enfoque inferencial y dinámico de la modelización y la comprensión científicas, desde una perspectiva pragmática general, pero aplicado al campo de la biología evolutiva del desarrollo (evo-devo). Se afirma que la comprensión cumple un papel central en la práctica de la modelización, sobre todo en biología. A partir de su introducción y vinculación con los otros tres elementos centrales de la investigación científica, la experimentación, la explicación y la predicción (o retrodicción), se mostrará su relevancia epistémica para el caso del modelo evo-devo *Polypterus*. Se propone entonces i) un nuevo enfoque general y no referencialista de los modelos científicos, que está determinado principalmente por la noción de *uso*, y ii) una caracterización particular de un modelo evo-devo, como caso ejemplar.

Índice general

Índice de figuras	xv
Índice de cuadros	xvii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 El problema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Contexto y motivación	3
1.5 Contribución	8
Capítulo 2 Marco para un nuevo enfoque pragmatista de modelos	13
2.1 Introducción	14
2.2 La noción de ‘modelo’ de la concepción semanti- cista	15
2.3 Observaciones a la interpretación de Suppes . .	32
2.4 Representación, uso y distorsión	47
2.5 Modelos como instrumentos de mediación . . .	51
2.6 Modelos como herramientas o artefactos episté- micos	56
2.7 Nociones de experimentación y producción de fenómenos	69
2.8 Modelos como herramientas inferenciales	75

2.9 Consideraciones preliminares	81
Capítulo 3 Comprensión científica con modelos	83
3.1 Introducción	83
3.2 Representación: problemas centrales y condiciones de adecuación	87
3.3 Comprensión científica	90
3.4 Definición de uso de los modelos y razonamiento inferencial	104
3.5 Definición de comprensión efectiva	106
3.6 Volviendo a las representaciones matemáticas en biología	109
3.7 Conclusión	112
Capítulo 4 Aplicación del enfoque inferencial y dinámico	115
4.1 Introducción	115
4.2	118
4.3	119
4.4	130
4.5	133
4.6	137
4.7 Conclusión	139
Capítulo 5 Consideraciones finales	145
Referencias	155
Bibliografía consultada	196

Índice general

xiii

Índice alfabético

197

capítulo 1

Introducción

Contenido:

1.1	El problema	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivo específico	2
1.3	Hipótesis	2
1.4	Contexto y motivación	3
1.5	Contribución	8

1.1 El problema

Esta tesis aborda el problema acerca de cuál es la noción de representación científica que se ajusta correctamente a la práctica con modelos, particularmente en la biología, y que describe la manera específica en que estos se relacionan con los sistemas de fenómenos a los que se dirigen. Este es el hilo conductor de todo el trabajo. En este sentido, la tesis aborda un problema epistemológico; pretende hacer una contribución a la filosofía general de la ciencia y, particularmente, a la filosofía de la biología.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un nuevo enfoque pragmático acerca de la modelización y la comprensión científica que permita caracterizar cuál es efectivamente la función explicativa que tienen los modelos científicos, especialmente para ciencias como la biología. Este enfoque será calificado como '*inferencial y dinámico*'. Para cumplir de forma adecuada el objetivo, este nuevo enfoque será aplicado exclusivamente para un modelo de la biología evolutiva del desarrollo (evo-devo), el organismo-modelo *Polypterus*, que es usado para explicar el papel de la plasticidad del desarrollo en el origen evolutivo de los tetrápodos.

1.2.2 Objetivo específico

Delimitar la forma en que un modelo evo-devo se dirige al sistema de fenómenos que intenta representar y ofrecer algunos requisitos mínimos que debe cumplir para lograr una comprensión científica adecuada.

1.3 Hipótesis

Si se incluye la noción de comprensión, reconociendo su valor epistémico central y definiéndola en términos inferenciales (del razonamiento subrogativo), pragmáticos (a partir del

uso de modelos) y dinámicos (poniendo énfasis en la acción del agente), es posible abordar y caracterizar de mejor manera cuál es la función explicativa que tienen los modelos en las ciencias como la biología.

1.4 Contexto y motivación

La modelización, una de las principales prácticas científicas, consiste en la construcción y en el empleo de modelos. Los modelos son uno de los instrumentos de mayor valor para los científicos, están presentes en casi todos los niveles y dominios de su práctica de investigación; tienen una incuestionable utilidad, ‘ductilidad’ y variedad, que justifican la predilección que tienen los científicos por este tipo de herramientas. En filosofía de la ciencia, los modelos han sido un tópico de gran interés desde la década de los sesenta, a partir del surgimiento del enfoque semántico de las teorías científicas. Actualmente, la modelización científica ocupa un espacio importante en la agenda de la mayoría de los enfoques filosóficos sobre la ciencia, especialmente por su carácter dinámico y por las consecuencias que tienen los modelos —en general— para la comprensión del conocimiento científico en áreas ‘más complejas’ como la biología o la economía.

En este contexto, en el ámbito de las ciencias empíricas, una de las cuestiones más interesantes acerca de los modelos es que la pluralidad de significado y de usos que tienen hace bastante problemático poder dar una caracterización precisa del concepto. Los modelos científicos pueden ser: dibujos,

esquemas, mapas, gráficos, iconos, maquetas, prototipos, ecuaciones, sistemas de ecuaciones, simulaciones computacionales, organismos, grupos de organismos, etc. Esta lista abarca objetos tanto concretos como abstractos. A su vez, en la filosofía actual existe una gran variedad de enfoques con una gran variedad de propuestas al respecto que hace que la discusión sobre los modelos científicos sea muy extensa y fructífera, pero no por ello agotada (Cassini, 2013; Jones, 2005; Morrison, 2005).

La concepción filosófica dominante de los modelos científicos los ha entendido a partir del concepto de *representación científica* (Cassini, 2016): los modelos son *representaciones idealizadas* o *simplificadas* de los fenómenos. El concepto de representación tiene una larga tradición en filosofía, refiere a la forma en la que accedemos y conocemos el mundo. En efecto, dentro de las perspectivas contemporáneas del realismo científico se asume que la representación es la función más importante que tiene un modelo (cf. van Fraassen, 1980, 1987; Kitcher, 1993; Giere, 1988, 1999; Morrison, 1999; Suárez, 2019). Dicha función establece la relación de correspondencia entre la estructura de las teorías y la estructura de los fenómenos del mundo.

De esta manera se establece una estrecha pero confusa relación entre las nociones de modelo y representación. No es fácil poner los límites entre sus significaciones. En efecto, según Anjan Chakravartty (2010, 198), —atendiendo a las categorías de cosas a las que pertenecen— las representaciones científicas pueden ser:

1. *entidades abstractas*, como es el caso de los modelos teóricos;
2. *objetos concretos*, como diagramas, gráficos e ilustraciones; y
3. *procesos*, como las simulaciones por ordenador.

Definiciones como la de Chakravartty hacen caso a la amplia gama de herramientas con las cuales los científicos representan el mundo: ecuaciones, fluogramas, fotografías, gráficos, diagramas, árboles de afinidad, imágenes por resonancia magnética, simulaciones computacionales, teorías, modelos, entre muchas otras. Pero en filosofía no existe un acuerdo filosófico de lo que pueda ser la representación en las ciencias empíricas. Las elucidaciones sobre el concepto de representación apelan a distintos tipos de relaciones entre modelos y fenómenos, como ‘simplificación’, ‘idealización’, ‘abstracción’, ‘aproximación’, ‘distorsión’, y ‘ficcionalidad’, entre otras; lo que redunda en la falta de una teoría más acabada sobre el uso y el proceso de modelización científica.

En ciencias empíricas como la biología —o en ciencias sociales como la economía— la manera en cómo los modelos representan los fenómenos es actualmente un ámbito de rica discusión filosófica, cuyo fin es vislumbrar cuál es la función explicativa distintiva que tienen los modelos. En biología es muy difícil contar con leyes científicas genuinas que sustenten sus explicaciones, por lo que se recurre a la construcción y el uso de modelos para la elaboración de explicaciones teóricas. Esto hace que sea

muy difícil aplicar las caracterizaciones estándar que se han dado —normativamente— en filosofía de la ciencia. Los esquemas explicativos, como el de cobertura legal clásico y los axiomáticos de los estructuralistas —basados en la reconstrucción teórica bajo el método de satisfacción de los axiomas de una estructura— no se ajustan del todo al uso regular que se hace de los modelos en biología (como se verá en el siguiente capítulo).

El presente trabajo solo se centra en la *representación con modelos*, es decir, se ocupa de comprender la propia práctica de la modelización científica. Para que esta tarea sea abarcable, este trabajo solo se centrará en modelos del campo de la biología, circunscribiéndose en un enfoque pragmático específico. Además, el interés no es elaborar una descripción detallada de los múltiples enfoques sobre modelos científicos que se han desarrollado en filosofía, desde Patrick Suppes (1960; 1962) o Max Blanck (1962) hasta Mauricio Suárez (2016) o Tarja Knuuttila (2018); esa es una tarea bastante larga y que suscita otro tipo de investigación. Más bien, el propósito es esbozar una perspectiva general sobre la modelización y la explicación desde un enfoque pragmático e inferencial, aplicado a modelos en biología.

Paralelamente a este contexto de la representación y de la modelización en ciencias, en las últimas dos décadas, ha surgido en epistemología una perspectiva que rescata a la *comprensión* e intenta ponerla en el foco principal, al considerar que tiene un papel fundamental en la actividad del conocimiento científico. La tradición filosófica ha entendido a la epistemología —básicamente— como el estudio

del conocimiento. Específicamente, dentro de la filosofía de la ciencia, la comprensión ha quedado apartada por sus aspectos psicológicos y ha sido ignorada en toda justificación y caracterización del conocimiento científico. Sin embargo, nuevos enfoques pragmatistas del conocimiento sugieren que la comprensión parece ser una acción central cuando dirigimos el pensamiento hacia el mundo que nos rodea. Es más, sugieren que tendría un valor epistémico superior al del propio conocimiento: podemos tener conocimiento de algo sin llegar a comprenderlo, así que la comprensión exige una aptitud mayor que justifica su interés epistemológico (Baumberger et al., 2017, 3). Además, dentro de esta perspectiva se concibe que el objetivo primordial de la investigación científica es comprender el mundo, y no la mera recopilación de datos o de conocimientos. De esta manera, muchos suponen una distinción clara pero una integración esencial entre ambas acciones intelectuales (cfr. Kvanvig, 2003, 2009; Regt y Dieks, 2005; Grimm, 2012; entre otros).

Pero ya el pragmatismo americano intentó abordar esta integración. En este trabajo se seguirá una idea, que puede ser rastreada hasta Charles Sanders Peirce, la cual señala que la comprensión es un tipo de *inferencia* que puede ser traducida como el *acto de formular hipótesis* (Peirce, 1998, CP 5.288; CP 5.298; CP 5.349). Dentro de la discusión de la modelización esto tiene mucho sentido, la comprensión podría ser asociada al tipo de razonamiento que permiten los modelos científicos, esto es, si es entendida como un acto inferencial de un agente (el científico). Entendida en base a esa *agencialidad*, la comprensión se involucraría en la

manera en que relacionamos los modelos con los fenómenos a los cuales se dirigen.

La motivación principal de este trabajo es entonces abrir la perspectiva acerca de los modelos, de tal manera que permita limitar el dominio de la representación, el énfasis exagerado en la explicación científica y la conexión impuesta entre leyes y explicación teórica (Cooper, 1996; Diéguéz, 2013). Con ello se podría esclarecer mejor la función que cumplen los modelos y reconocer la pluralidad de sus usos (Nersessian, 1999). En las últimas dos décadas se han desarrollado concepciones no-representacionistas e inferencialistas muy sugerentes, como respuestas a las dificultades que presentan, especialmente, las perspectivas que insisten en las caracterizaciones formales y representacionistas de la modelización (MacLeod y Nersessian, 2015; Knuutila, 2011). En trabajo intenta aportar elementos para enriquecer la discusión acerca de los modelos y la representación en dicho contexto, a partir de la noción de comprensión.

1.5 Contribución

En los capítulos que siguen a continuación, la contribución filosófica de este trabajo tiene el siguiente recorrido:

CAPÍTULO 2.

Se especifica el marco teórico general que es el punto de partida y la fundamentación de la propuesta inferencial y dinámica sobre la modelización científica que aquí se

defiende. Esta fundamentación comienza con la exposición de la noción básica de ‘modelo’ (Tarski, 1935, 1944; Suppes, 1960) que configura a la principal concepción representacionista de las teorías científicas, esto es, la *concepción semanticista*. Esta exposición se ofrece para desarrollar una crítica contra el semanticismo en tres ejes principales: i) la semántica estática; ii) las condiciones restrictivas y el lenguaje para la axiomatización de teorías; y iii) la revisión de las nociones de ‘sistema axiomático’, ‘sistema formal’ y ‘método axiomático’. Esta crítica forma parte del motivo original de esta investigación por el cual se abandona toda perspectiva representacionista de los modelos científicos (y teorías), es decir, cualquier visión que sustente sus relaciones con los sistemas de fenómenos reales en términos de similitud o isomorfía —o cualquier tipo de homomorfía—. La idea es, más bien, partir de una revisión de cómo los modelos han sido construidos y cómo efectivamente son manipulados para comprender los fenómenos.

Posteriormente, se desarrollan algunas de las ideas centrales de la perspectiva pragmática de la modelización: representación como acción o como uso; distorsión; modelos como instrumentos de mediación; modelos como herramientas o artefactos epistémicos; representación indirecta; experimentación y producción de fenómenos; y modelos como herramientas inferenciales. De esta manera, los autores directamente involucrados son: Bas C. van Fraassen (2008); Mary S. Morgan y Margaret Morrison (1999b); Nancy Cartwright, Towfic Shomar y Mauricio Suárez (1995; Suárez y Cartwright, 2008); Peter Godfrey-Smith (2006); Tarja

Knuuttila (2011; 2014; 2018); Robert (2000); Uskali Mäki (2009); y Mauricio Suárez (2004).

Este marco pragmatista permitirá la introducción de la noción de comprensión, en el tercer capítulo, como parte del proceso de explicación científica y como uno de los elementos epistémicos centrales que configuran el conocimiento científico general. Por supuesto, esta idea no es nueva pero sí lo es la forma en la que se caracteriza aquí la comprensión.

CAPÍTULO 3.

El objetivo de este capítulo es desarrollar el enfoque inferencial y dinámico de la modelización y comprensión científicas, con el propósito de responder a las siguientes dos preguntas relacionadas, que son el hilo conductor de este trabajo: i) ¿cuál es la manera en que los modelos se relacionan con sus sistemas-diana?; y ii) ¿cuál es la noción de representación que se ajusta correctamente a la práctica de modelización científica?

Como uno de los objetivos principales de la modelización es proporcionar explicaciones acerca de los fenómenos que intentan representar —especialmente en biología—, la inclusión de la comprensión y de los aspectos inferenciales del conocimiento responde al interés de ampliar la perspectiva de la representación y de la explicación con modelos. Siguiendo a de Henk W. Regt et al. (2009) y a Catherine Z. Elgin (2009), se defiende que 1) la comprensión tiene un valor epistémico en sí misma, y 2) que explicación y comprensión están vinculadas y forman parte de un

grupo de acciones centrales que configuran la práctica y el conocimiento científico a partir de modelos. Este grupo de acciones se muestran —al final de capítulo— en un esquema tetrádico y dinámico: explicación-comprensión-experimentación-modelización.

CAPÍTULO 4.

En este capítulo se aplica el enfoque defendido a un caso evo-devo en concreto: al modelo evo-devo *Polypterus* de la plasticidad fenotípica en el origen de los primeros tetrápodos. Este modelo fue ofrecido por los biólogos Emily Standen, Trina Y. Du y Hans C. E. Larsson en el año 2014, en la revista *Nature*. Este modelo resulta muy ejemplar, con él se quiere mostrar la importancia filosófica de la inclusión de la comprensión, definida aquí en términos inferenciales, para la caracterización de la práctica de modelización en biología. Además, permite un mejor abordaje de los aspectos más complejos que se involucran en las explicaciones de los fenómenos biológicos.

Se explica entonces el modelo y se analiza a partir de la relación experimento-modelo-explicación-comprensión (*tétrada*). El análisis del modelo muestra cómo la evo-devo presenta un problema explicativo, centrado en la carencia descriptiva de los mecanismos de asimilación genética para garantizar la validez de las inferencias en términos macroevolutivos, a partir de conclusiones experimentales locales. Sin embargo, aquí se defiende que con la integración entre comprensión y explicación este tipo de modelos sí comporta un valor epistémico importante y, por lo tanto,

estos modelos pueden ser considerados —sin problema— dentro del corpus teórico de la biología evolutiva.

Desde una caracterización esquemática, que aquí es llamada ‘Círculo de comprensión efectiva de un modelo evo-devo’, se mostrará la forma en que este modelo resulta un aporte interesante en términos macroevolutivos. Para ello, se ofrecen cuatro criterios epistemológicos que debe cumplir todo modelo evo-devo para permitir una comprensión científica efectiva.

CAPÍTULO 5.

Junto con una resumida recapitulación global de los temas principales de este trabajo, en este último capítulo se ofrecen algunas consideraciones filosóficas, con el fin de especificar las extensiones que este enfoque podría tener en investigaciones futuras.

capítulo 5

Consideraciones finales

El hilo conductor de este trabajo ha sido el problema acerca de cuál es la noción de representación científica que se ajusta correctamente a la práctica con modelos y que describe la manera específica en que estos se relacionan con sus sistemas-diana. Esta sigue siendo una pregunta filosófica básica pero igualmente problemática acerca del conocimiento y la modelización científica.

En el primer capítulo se ha presentado el objetivo general de este trabajo: elaborar un nuevo enfoque pragmático, inferencial y dinámico, acerca de la modelización y la comprensión científica que permita caracterizar cuál es efectivamente la función explicativa que tienen los modelos. Este objetivo ha sido cumplido con la aplicación del nuevo enfoque —en el capítulo 4— a un caso concreto de la biología evolutiva del desarrollo con un organismo-modelo, el *Polypterus*, que fue usado para explicar el papel de la plasticidad del desarrollo en el origen evolutivo de los tetrápodos.

Además, el objetivo específico de este trabajo ha sido delimitar la manera en que un modelo evo-devo se dirige a su sistema-diana y también ofrecer algunos requisitos mínimos

que debe cumplir un modelo de este tipo para que, a partir de él, se pueda lograr una comprensión científica adecuada.

La hipótesis de la que se ha partido ha sido que la noción de comprensión permitiría abordar y caracterizar de mejor manera cuál es la función explicativa que tienen los modelos científicos, especialmente en biología.

También, en el primer capítulo se ha planteado la tesis central de que la noción de comprensión definida a partir del razonamiento subrogativo (es decir, en términos inferenciales), del uso de modelos (en términos pragmáticos) y a partir de su *agencialidad* y dinamismo (en términos de la acción y de los intereses del agente), permite caracterizar mejor la modelización científica y definir cuál es la función explicativa que tiene un modelo; especialmente el tipo de modelos que aquí se ha tratado.

En el capítulo 2 se ha desarrollado el marco teórico que sustenta la propuesta inferencial y dinámica. Se ha expuesto la noción básica de ‘modelo’ de la *concepción semanticista*, para luego desarrollar una crítica contra este semanticismo en tres ejes principales: i) la semántica estática; ii) las condiciones restrictivas y el lenguaje para la axiomatización de teorías; y iii) la revisión de las nociones de ‘sistema axiomático’, ‘sistema formal’ y ‘método axiomático’. Estos tres puntos se han ofrecido como argumentos para distanciarse de cualquier concepción de la relación entre modelos y sus sistemas-diana en términos de isomorfía —o cualquier tipo de homomorfía—.

Las ideas de base del marco pragmatista para el nuevo enfoque han sido: la representación como acción o como

uso; la distorsión de la representación; los modelos como instrumentos de mediación; los modelos como herramientas o artefactos epistémicos; la representación indirecta; la experimentación y la producción de fenómenos; y los modelos como herramientas inferenciales. A partir de estas ideas, en el capítulo 3 se introduce y caracteriza la noción de comprensión como parte del proceso de explicación científica y como uno de los elementos epistémicos centrales que configuran el conocimiento científico general. Esta definición tiene por base la noción de *uso*:

El sujeto S comprende M , que trata acerca de f , cuando *usa* M para un propósito determinado.

Poniéndose énfasis entonces en la *agencialidad* de la modelización, ‘*uso de un modelo*’ ha quedado definido de la siguiente manera:

- i. un sujeto S usa un modelo M para *apuntar* a un sistema-diana SD (a un sistema de fenómenos); y
- ii. para generar hipótesis (inferencias subrogativas) sobre el SD a partir de M .

Así, la comprensión científica o ‘efectiva’ ha quedado caracterizada entonces de la siguiente manera:

Ce: El sujeto S comprende efectivamente un sistema de fenómenos SD a partir de un modelo M , que apunta a SD , cuando *usa* M generando subrogativamente hipótesis, cuyas consecuencias le permiten manipular M y, a partir de acciones o procesos de control, generar un nuevo sistema de fenómenos SD' .

Por consiguiente, se ha defendido que 1) la comprensión tiene un valor epistémico en sí misma, y 2) que explicación y comprensión están vinculadas y forman parte de un grupo de acciones y objetivos centrales que configuran la práctica y el conocimiento científico a partir de modelos, que se ha representado en un esquema tetrádico y dinámico entre explicación-comprensión-experimentación-modelización.

En el capítulo 4 se ha aplicado el nuevo enfoque al modelo evo-devo *Polypterus*, con el que se ha podido mostrar la importancia filosófica de la inclusión de la comprensión para la caracterización de la práctica de modelización en biología; además, con este modelo se han abordado los aspectos más complejos involucrados en las explicaciones evo-devo. El tipo de relación explicativa entre *Polypterus* y los fenómenos involucrados en el origen de los primeros tetrápodos se ha caracterizado en el esquema llamado ‘Círculo de comprensión efectiva de un modelo evo-devo’; basado en el modelo tetrádico experimento-modelo-explicación-comprensión presentado en el capítulo 3.

Bajo esa caracterización, el modelo ha resultado un aporte interesante en términos macroevolutivos, a pesar de que presenta un problema explicativo dada la carencia descriptiva de los mecanismos de asimilación genética para garantizar la validez de las hipótesis macroevolutivas, basadas en las conclusiones experimentales locales con *Polypterus*. Aquí se ha afirmado que el modelo puede ser considerado sin problema dentro del corpus teórico de la biología evolutiva, gracias a la integración entre comprensión-explicación y el valor epistémico reconocido

a la comprensión. La plasticidad fenotípica que se intenta explicar con el experimento, observada en el organismo-modelo (*función local*), parece desempeñar un papel o rol causal decisivo en la aparición de los cambios evolutivos a gran escala (*función general*), lo que sugiere cuestiones interesantes para la Síntesis Moderna. Estas cuestiones solo han sido anunciadas, pero requieren de un análisis muchísimo mayor, tanto filosófico como estrictamente biológico —que puede ser desarrollado en el futuro—.

Para abordar el problema del salto explicativo de la segunda hipótesis de Standen, Du y Larson, “la plasticidad fenotípica, como respuesta a estreses ambientales rápidos y sostenidos, podría facilitar el cambio macroevolutivo” (2014, 57), se ha distinguido —analíticamente— entre *plasticidad fenotípica ontogenética o local* (PFO) y *plasticidad fenotípica filogenética o a gran escala* (PFF), con el fin de comprender mejor el fenómeno específico, el rol de la selección natural en él y evitar así interpretaciones ontológicas inadecuadas a partir de las inferencia desde conclusiones ontogenéticas a filogenéticas con un solo experimento. El esquema del ‘Círculo de la comprensión efectiva de un modelo evo-devo’ intenta dar cuenta de esto. Por supuesto, los mecanismos de asimilación genética son un tema aún muy complejo y de larga discusión. El análisis del modelo en cuestión no ha pretendido solucionar el problema, pero sí proponer algunos puntos interesantes para la discusión.

Además, los cuatro criterios que se han ofrecido como exigencias mínimas para la comprensión con modelos en evo-devo son un intento de delimitar el tipo de comprensión y de

representación científicas adecuado. Respecto del problema de la representación, puede resultar muy sugerente que la ‘homología’ pretendida por Standen, Du y Larson queda reducida a la analogía y al tipo de comparación de los rasgos debidamente seleccionados que quedan ser configuradas y justificadas simplemente por el experimento (criterio número i.). Todo lo que interesa del modelo es lo que pueda inferirse y ser relevante a partir del mismo modelo y siendo coherente con el experimento y el macro-modelo evolutivo (criterios ii. iii.), pero no con el propósito de proporcionar una explicación definitiva, sino solo con la intención de tener una mejor comprensión de la historia evolutiva y de la teoría de la evolución, en términos generales (criterio iv.). Un modelo de este tipo nos permite una mejor comprensión de esos fenómenos y *nada más*, no se supone ontológicamente nada más a partir de él.

Finalmente, es necesario señalar que un enfoque inferencial (como el que aquí se ha defendido), en estricto rigor, no añade nada nuevo acerca de la representación en relación al razonamiento subrogativo (*subrogate reasoning*): tanto los enfoques representacionistas como los inferencialistas sostienen que un modelo es el *sustituto* del sistema-diana al que se dirige. La diferencia está en que la perspectiva inferencialista pondrá al razonamiento subrogativo delante de la representación. Esto es, que lo más interesante de un modelo es que actúa como sustituto de su sistema-diana en función de dirigir el razonamiento a la consecución de hipótesis sobre los fenómenos en cuestión (*inferencias subrogativas*). Esto es lo que defiende, principalmente, Mauricio Suárez (2004; 2016). El enfoque que aquí se ha defendido refuerza

esta idea. En efecto, la función principal de un modelo no es la representación o la elaboración de una ‘imagen’ o de un ‘espejo’ de los fenómenos. El conocimiento a partir de modelos no tiene este objetivo. Los objetivos (e intenciones) de un agente cognitivo especifican la función principal que tendrá un modelo, es decir, un modelo es primeramente un modelo ‘para algo’ y solo posteriormente podemos decir que se configura como un modelo ‘de algo’. La *tétrada* que se ha ofrecido en el capítulo 3 intenta representar esta cuestión. En definitiva, la representación debe entenderse simplemente a partir de para qué o con qué intenciones es usado un modelo. Desde esta perspectiva pragmática, en palabras de Roberto Torretti (2016)¹, “el modelo no tiene que parecerse en algo más al objeto [fenómeno] ni a su devenir; ni hay ventaja alguna en una semejanza que rebase los límites señalados. Un modelo científico no es un retrato o reflejo fiel de la realidad modelada”. Los modelos son buenas y funcionales herramientas con las cuales los científicos pueden comprender y dirigirse al mundo, y que les permiten relacionar dinámicamente observaciones actuales con observaciones futuras o del pasado con cierto grado de éxito, “si las predicciones (o retrodicciones) basadas en el modelo concuerdan de alguna manera con el desarrollo efectivo de los procesos modelados” (Torretti, 2016).

A pesar de la pluralidad de funcionalidades que tienen los modelos, la tarea primordial de un modelo como herramienta epistémica es *comprender los fenómenos*; generalmente,

¹Conferencia titulada “Modelos”, de la Cátedra UDP, no publicada pero registrada en vídeo (ver referencia). Agradezco al profesor Roberto Torretti por compartir conmigo este documento y por sus aclaraciones.

las acciones que se realizan con o a partir del modelo van encaminadas a esa comprensión. Esta cuestión es muy asumida por los científicos. Recurriendo ahora a un ejemplo de la física, Torretti (2016) muestra que esta idea aparece como una cuestión fundamental en las *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light* de 1904 de William Thomson (Lord Kelvin), que él remarca en varios pasajes como el siguiente:

Nunca estoy satisfecho hasta que he construido un modelo mecánico del objeto que estoy estudiando. Si tengo éxito en hacer uno, lo entiendo; de lo contrario, no lo hago. Es por esto que no puedo captar [*grasp*] la teoría electromagnética de la luz. Deseo comprender la luz lo más completamente posible, pero sin introducir cosas que comprendo aún menos. Por lo tanto, me aferro a la dinámica simple porque allí puedo encontrar un modelo, pero no en la teoría electromagnética. (Thomson, 1904, 270)²

Por supuesto, Lord Kelvin está pensando en un modelo mecánico, un artilugio físico, no en un modelo abstracto. Pero lo mismo se aplica para un modelo matemático u

²“I am never content until I have constructed a mechanical model of the object that I am studying. If I succeed in making one, I understand; otherwise, I do not. Hence I cannot grasp the electromagnetic theory of light. I wish to understand light as fully as possible, without introducing things that I understand still less. Therefore I hold fast to simple dynamics for there, but not in the electromagnetic theory, I can find a model.”

otro altamente idealizado³. Lo importante es señalar la importancia que ha tenido la comprensión de los fenómenos, como éxito de logro cognitivo, para los científicos desde el inicio de la ciencia moderna. El mismo Torretti, en una conferencia citada anteriormente y titulada ‘Modelos’ (2016), recordando las palabras de Lord Kelvin, señala que la piedra de toque para decidir si comprendemos o no un fenómeno físico es nuestra aptitud para construir un modelo.

Ahora, volvamos a la *tétrada* del capítulo 3:



³Según Torretti (2016), el propio Lord Kelvin alababa el modelo mecánico de la inducción electromagnética de J. C. Maxwell (1861) como modelo perfecto del fenómeno del electromagnetismo, altamente instructivo y como un paso hacia una teoría electromagnética definitiva. Este modelo es una idealización o abstracción pura, una ‘fantasía pictórica literaria’ en palabras de Torretti, que permite comprender y determinar —desde un punto de vista mecánico— qué tensiones o movimientos de un medio son capaces de producir los fenómenos mecánicos observados, donde se supone que todos los cuerpos están sumidos en el llamado ‘éter’.

En este trabajo se ha sugerido que la noción de comprensión permite sostener las demás acciones involucradas en la práctica científica, que se han señalado gráficamente. Sin embargo, falta en este trabajo especificar la forma en que cada una de las acciones dinámicas de la práctica científica se relacionan particularmente con la comprensión y la modelización. Este podría ser su punto más débil. Especialmente respecto de las acciones de su punto *B*, la predicción y retrodicción. Por su puesto, se pretende que esta tarea sea desarrollada a futuro; puede resultar muy interesante filosóficamente, en especial para la discusión sobre los límites de la experimentación y la predicción en biología. En este trabajo solo se ha analizado, brevemente, cómo la comprensión posibilita la corrección de modelos matemáticos metapoblacionales (capítulo 2, sección 2.6) para mejorar la predicción en función de la incorporación de mayor ‘carga empírica’. Además, se ha analizado el problema y consecuencias del salto o vacío explicativo con el modelo *Polypterus* a partir de la retrodicción evolutiva del origen de los tetrápodos apoyada con un solo experimento. Pero la relación entre comprensión y predicción-retrodiccción reviste un mayor análisis y puede ser interesante extenderla a otros modelos evo-devo o a modelos en epigenética, o a modelos de ciencias como los de la economía, por ejemplo.

Por ahora, el objetivo del trabajo parece haber sido cumplido. Dentro del marco pragmático en el que se desenvuelve, este enfoque ha abordado el problema de la comprensión y de la representación con modelos de tal manera que ha señalado algunas ideas que se espera que puedan aportar a la discusión dentro de la filosofía general de la ciencia, la epistemología y la filosofía de la biología.

Referencias

- Allen, C., & Bekoff, M. (1995). Function, natural design, and animal behavior: Philosophical and ethological considerations. *Perspectives in Ethology*, 11, 1–46.
- Amin, N., Womble, M., Ledon-Rettig, C., Hull, M., Dickinson, A., & Nascone-Yoder, N. (2015). Budgett's frog (*lepidobatrachus laevis*): a new amphibian embryo for developmental biology. *Developmental Biology*, 405(2), 291–303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2015.06.007>
- Amundson, R., & Lauder, G. V. (1994). Function without purpose: The uses of causal role function in evolutionary biology. *Biology & Philosophy*, 9(4), 443–469.
- Aristotle. (1960). *Posterior Analytics. Topica* (Vol. 391). Harvard: Harvard University Press.
- Ayala, F. J. (1970). Teleological explanations in evolutionary biology. *Philosophy of Science*, 37(1), 1–15.
- Balzer, W., Moulines, C. U., & Sneed, J. D. (1987). *An Architectonic for Science. The Structuralist Program* (Vol. 186). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Baumberger, C., Beisbart, C., & Brun, G. (2017). What is understanding? An overview of recent debates in epistemology and philosophy of science. In S. R. Grimm, C. Baumberger, & A. S. (Eds.), *Explaining understanding. new perspectives from epistemology and philosophy of science* (pp. 1–34). New York and London: Routledge.
- Bianchi, F., & Squazzoni, F. (2015). Agent-based models in sociology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 7(4), 284–306.

- Blanck, M. (1962). *Models and Metaphors*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Bloom, B. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives. The Classification of Educational Goals*. Michigan: Longmans.
- Booth, M. J., Restrepo Schild, V., Downs, F. G., & Bayley, H. (2017). Functional aqueous droplet networks. *Molecular BioSystems*, 13(9), 1658–1691. doi: 10.1039/C7MB00192D
- Braillard, P.-A., & Malaterre, C. (Eds.). (2015a). *Explanation in Biology. An Enquiry into the Diversity of Explanatory Patterns* (Vol. 11). Dordrecht: Springer.
- Braillard, P.-A., & Malaterre, C. (2015b). Explanation in biology: An introduction. In P.-A. Braillard & C. Malaterre (Eds.), *Explanation in Biology. An Enquiry into the Diversity of Explanatory Patterns in the Life Sciences* (Vol. 11, pp. 1–28). Dordrecht: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9822-8>
- Caponi, G. (2010). Análisis funcionales y explicaciones seleccionales en biología. una crítica de la concepción etiológica del concepto de función. *Ideas y Valores*, 59(143), 51–72.
- Carnap, R. (1956). The methodological character of theoretical concepts. In H. Feigl & M. Scriven (Eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Vol. 1). Minnesota: University of Minnesota Press.
- Cartwright, N., Shomar, T., & Suárez, M. (1995). The tool box of science. Tools for the building of models with a superconductivity example. *Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities*, 44, 137–149.
- Cassini, A. (2013). *El juego de los principios. Una introducción al método axiomático*. Buenos Aires: A-Z Editora.

- Cassini, A. (2016). Modelos científicos. *Diccionario Interdisciplinar Austral (DIA)*. Retrieved from <http://dia.austral.edu.ar/Modelos>
- Cellucci, C. (1993a). From closed to open systems. In J. Czermak (Ed.), *Proceedings of the 15th international wittgenstein symposium* (pp. 206–220). Wien: Hölder-Pichler-Tempky.
- Cellucci, C. (1993b). Gli scopi della logica matematica. In *Peano e i fondamenti della matematica. atti del convegno modena 22-24 ottobre 1991* (pp. 73–138). Modena: Mucchi.
- Cellucci, C. (2017). *Rethinking Knowledge. The Heuristic View* (Vol. 4). Cham: Springer.
- Chakravartty, A. (2010). Informational versus functional theories of scientific representation. *Synthese*, (172), 197–213. doi: <https://doi.org/10.1007/s11229-009-9502-3>
- Coleman, W. (1971). *Biology in the Nineteenth Century. Problems of Form, Function, and Transformation*. New York: John Wiley.
- Cooper, G. (1996). Theoretical modeling and biological laws. *Philosophy of Science*, 63, S28-S35.
- Cuevas, A. (2016). *Organización y estructura del conocimiento científico*. Buenos Aires: Eudeba.
- Cummins, R. (1975). Functional analysis. *The Journal of Philosophy*, 72(20), 741–765. doi: <https://doi.org/10.2307/2024640>
- da Costa, N. C. A., & French, S. (2003). *Science and Partial Truth. A Unitary Approach to Models and Scientific Reasoning*. New York: Oxford University Press.
- D'Agostini, F. (2000). *Analíticos y continentales. Guía de la filosofía de los últimos treinta años*. Madrid: Ediciones Cátedra.

- Dalla Chiara, M. L., & Toraldo di Francia, G. (1973). A logical analysis of physical theories. *Rivista di Nuovo Cimento*, 2(3), 1–20.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or, the preservation of favoured races in the struggle for life*. London: John Murray.
- de Regt, H. W. (2009). Understanding and scientific explanation. In H. W. de Regt, S. Leonelli, & K. Eigner (Eds.), *Scientific understanding. philosophical perspectives* (pp. 21–42). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- de Regt, H. W., & Dieks, D. (2005). A contextual approach to scientific understanding. *Synthese*, 144(1), 13–170. doi: <https://doi.org/10.1007/s11229-005-5000-4>
- de Regt, H. W., Leonelli, S., & Eigner, K. (2009). Focusing on scientific understanding. In H. W. de Regt, S. Leonelli, & K. Eigner (Eds.), *Scientific Understanding. Philosophical Perspectives* (pp. 1–17). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Dewey, J. (1933). *How We Think. A Restatement of the Relation of Reflective Thinking to the Educative Process*. Lexington, Massachusetts: D. C. Heath and Company.
- Dewey, J. (1944). *Democracy and Education*. New York: Free Press.
- Diéguez, A. (2013). La función explicativa de los modelos en biología. *Contrastes. Revista Internacional de Filosofía*, (18), 41–54.
- Diéguez, A. (2017). Modelos falsos en la ciencia: un valioso recurso para la comprensión de los fenómenos. *Metatheoria*, 8(1), 95–105.
- Díez, J. A., & Moulines, C. U. (2016). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona: Editorial Ariel.

- Droysen, J. G. (1868). *Grundriß der historik*. Leipzig: Verlag von Veit.
- Ehrenreich, I. M., & Pfennig, D. (2015). Genetic assimilation: a review of its potential proximate causes and evolutionary consequences. *Annals of Botany*, 117(5), 769–779. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcv130>
- Elgin, C. Z. (2009). Is understanding factive? In A. Haddock, A. Millar, & D. Pritchard (Eds.), *Epistemic Value* (pp. 322–329). Oxford University Press.
- Elgin, C. Z. (2016). From knowledge to understanding. In S. Hetherington (Ed.), *Epistemology futures* (pp. 199–215). New York: Oxford University Press.
- Falk, R. (2000). The gene. A concept in tension. In P. J. Beurton, R. Falk, & H.-J. Rheinberge (Eds.), *The Concept of the Gene in Development and Evolution. Historical and Epistemological Perspectives* (pp. 317–348). Cambridge: Cambridge University Press.
- Fernandes, D. P. (2017). *Logical Systems: On the Concept, Expressive Power and Expressiveness Characterizations* (Unpublished doctoral dissertation). Instituto de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología, Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Frigg, R. (2006). Scientific representation and the semantic view of theories. *Theoria*, 21(1), 49–65. doi: <http://dx.doi.org/10.1387/theoria.553>
- Frigg, R., & Hartmann, S. (2018). Models in science. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved from <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/>
- Frigg, R., & Nguyen, J. (2016). Scientific representation. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved from <https://plato.stanford.edu/archives/>

`win2018/entries/scientific-representation`

- Gadamer, H.-G. (1960). *Wahrheit und methode. grundzüge einer philosophischen hermeneutik.* Tübingen: J. C. B. Mohr.
- Giere, R. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach.* Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. (1999). *Science without Laws.* Chicago: University of Chicago Press.
- Godfrey-Smith, P. (2006). The strategy of model-based science. *Biology and Philosophy*, 21(5), 725–740. doi: <https://doi.org/10.1007/s10539-006-9054-6>
- Gosline, W. A. (1977). The structure and function of the dermal pectoral girdle in bony fishes with the particular reference to ostariophysines. *Journal of the Zoological Society of London*, (183), 329–338. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1977.tb04191.x>
- Gradzielski, M. (2003). Vesicles and vesicle gels. Structure and dynamics of formation. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15(19), R655–R697. doi: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/19/202>
- Grimm, S. R. (2012). The value of understanding. *Philosophy Compass*, 7(2), 103–117. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2011.00460.x>
- Grimm, S. R. (2017). Understanding and transparency. In S. R. Grimm, C. Baumberger, & A. S. (Eds.), *Explaining understanding. new perspectives from epistemology and philosophy of science* (pp. 212–229). New York and London: Routledge.
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanski, I. (1998). Metapopulation dynamics. *Nature*, 396(6706),

- 41–49. doi: [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(89\)90061-X](https://doi.org/10.1016/0169-5347(89)90061-X)
- Hedström, P., & Manzo, G. (2015). Recent trends in agent-based computational research: A brief introduction. *Sociological Methods & Research*, 44(2), 179–85.
- Hegselmann, R., & Krause, U. (2002). Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis, and simulation. *Journal of artificial societies and social simulation*, 5(3), 1–33.
- Hempel, C. G. (1962). *Deductive-Nomological vs. Statistical Explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Hempel, C. G. (1970). On the ‘standard conception’ of scientific theories. In M. Radner & S. Winokur (Eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Vol. IV «Analyses of Theories and Methods of Physics and Psychology»). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Hertz, H. (1894). *Die Prinzipien der Mechanik. In Neuen Zusammenhange Dargestellt*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Hodges, W. (2014). Tarski’s truth definitions. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved 16/10/2017, from <https://plato.stanford.edu/entries/tarski-truth/>
- Huberty, C. J., & Petoskey, M. D. (2000). Multivariate analysis of variance and covariance. In H. E. A. Tinsley & S. D. Brown (Eds.), *Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling* (pp. 183–208). San Diego, California: Academic Press.
- Jones, M. R. (2005). Idealization and abstraction: a framework. In M. R. Jones & N. Cartwright (Eds.), *Idealization XII: Correcting the Model. Idealization and Abstraction in the Sciencies* (pp. 173–218). Amsterdam and New York:

- Rodopi.
- Keiff, L. (2009). Dialogical logic. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved 26/11/2017, from <http://plato.stanford.edu/entries/logic-dialogical/>
- Kitcher, P. (1981). Explanatory unification. *Philosophy of Science*, 48(4), 507–531.
- Kitcher, P. (1989). Explanatory unification and the causal structure of the world. In P. Kitcher & W. Salmon (Eds.), *Scientific Explanation* (pp. 410–505). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Kitcher, P. (1993). *The Advancement of Science. Science without Legend, Objectivity without Illusions*. Oxford: Oxford University Press.
- Klassen, W., Creech, J. F., & Bell, A. (1970). The potential for genetic suppression of insect populations by their adaptations to climate. *Miscellaneous Publication, USDA*, 1178, 1-77.
- Klein, D., Marx, J., & Fischbach, K. (2018). Agent-based modeling in social science history and philosophy: An introduction. *Historical Social Research*, 43(1), 243–258. doi: <https://doi.org/10.12759/hsr.43.2018.1.7-27>
- Klimovsky, G., & Boido, G. (2005). *Las desventuras del conocimiento matemático*. Buenos Aires: A-Z Editora.
- Knuuttila, T. (2011). Modelling and representing: An artefactual approach to model-based representation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42(2), 262–271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2010.11.034>
- Knuuttila, T. (2014). Reflexivity, representation, and the possibility of constructivist realism. In M. C. Galavotti, S. Hartmann, M. Weber, D. Gonzalez W. Dieks, & T. Uebe (Eds.), *New directions in the philosophy of science* (Vol. 5, p. 297-312). Dordrecht: Springer.

- Knuuttila, T., & García-Deister, V. (2018). Modelling gene regulation: (De)compositional and template-based strategies. *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, In Press. doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2017.11.002>
- Knuuttila, T., & Merz, M. (2009). Understanding by modeling. An objectual approach. In H. W. de Regt, S. Leonelli, & K. Eigner (Eds.), *Scientific Understanding. Philosophical Perspectives* (pp. 146–168). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Kvanvig, J. (2003). *The Value of Knowledge and the Pursuit of Understanding*. New York: Cambridge University Press.
- Kvanvig, J. (2005). Truth is not the primary epistemic goal. In M. Steup & E. Sosa (Eds.), *Contemporary Debates in Epistemology* (pp. 285–296). Malden: Blackwell.
- Kvanvig, J. (2009). The value of understanding. In A. Haddock, A. Millar, & D. Pritchard (Eds.), *Epistemic Value* (pp. 95–111). New York: Oxford University Press.
- Laurance, W. F. (2008). Theory meets reality: How habitat fragmentation research has transcended island biogeographic theory. *Biological Conservation*, 141(7), 1731–1744. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.05.011>
- Leonelli, S. (2009). Understanding in biology: The impure nature of biological knowledge. In H. W. de Regt, S. Leonelli, & K. Eigner (Eds.), *Scientific Understanding. Philosophical Perspectives* (pp. 189–209). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Levins, R. (1969). Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *Bulletin of the Entomological Society of America*, 15(3), 237–240. doi: <https://doi.org/10.1093/besa/15.3.237>
- Levins, R. (1970). Extinction. In M. Desternhaber (Ed.), *Some mathematical problems in biology. lectures on mathematics*

- in the life sciences* (Vol. 1, pp. 77–107). Providence, Rhode Island: American Mathematical Society.
- Loeb, J. (1899). On the nature of the process of fertilization and the artificial production of normal larvae (Plutei) from the unfertilized eggs of the sea urchin. *American Journal of Physiology*, (3), 135–138.
- Loeb, J. (1905). *Studies in General Physiology*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Loeb, J. (1912). *The mechanistic conception of life. biological essays*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Loison, L. (2019). Canalization and genetic assimilation: Reassessing the radicality of the Waddingtonian concept of inheritance of acquired characters. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 88, 4–13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.semcd.2018.05.009>
- London, F., & London, H. (1935). The electromagnetic equations of the supraconductor. *Proceedings of the Royal Society A*, 149(866), 71–88. doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0048>
- Lopez-Orellana, R. (2019). El enfoque epistemológico de David Hilbert: el a priori del conocimiento y el papel de la lógica en la fundamentación de la ciencia. *Principia. An International Journal of Epistemology*, 23(2), 279–308.
- Lopez-Orellana, R., & Cortés-García, D. (2019). On understanding and modeling in evo-devo. An analysis of the Polypterus model of phenotypic plasticity. In A. Neponuceno Fernández, L. Magnani, F. Salguero-Lamillar, C. Barés-Gómez, & M. Fontaine (Eds.), *Model-Based Reasoning in Science and Technology. Inferential Models for Logic, Language, Cognition and Computation* (Vol. 49, pp. 138–152). Cham: Springer International Publishing.
- Lorenz, K. (2010). *Logic, Language and Method. On Polarities*

- in Human Experience*. New York: De Gruyter.
- Lorenzano, P. (2008). Lo a priori constitutivo en la ciencia y las leyes (y teorías) científicas. *Revista de Filosofía*, 33(2), 21–48.
- Lorenzano, P. (2013). The semantic conception and the structuralist view of theories: A critique of suppe's criticisms. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 44(4), 600–607. doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2013.09.001>
- Love, A. C. (2007). Functional homology and homology of function: biological concepts and philosophical consequences. *Biology & Philosophy*, 22(5), 691–708. doi: <https://doi.org/10.1007/s10539-007-9093-7>
- MacLeod, M., & Nersessian, N. J. (2015). Modeling systems-level dynamics: Understanding without mechanistic explanation in integrative systems biology. *Studies in History and Philosophy of Science Part C*, 49, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2014.10.004>
- Mäki, U. (2009). MISSing the world. models as isolations and credible surrogate systems. *Erkenn*(70), 29–43. doi: <https://doi.org/10.1007/s10670-008-9135-9>
- Martin-Löf, P. (1996). On the Meanings of the Logical Constants and the Justifications of the Logical Laws. *Nordic Journal of Philosophical Logic*, 1(1), 11–60.
- Maxwell, J. C. (1861). On physical lines of force. *Philosophical Magazine*, 90, 1–23. doi: <https://doi.org/10.1080/14786431003659180>
- McMullin, E. (1985). Galilean idealization. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16(3), 247–273.
- Morgan, M. S. (1999). Learning from models. In M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 347–388). Cambridge: Cambridge University Press.

- Morrison, M. (1999). Models as autonomous agents. In M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 38–65). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, M. (2005). Approximating the real: the role of idealization in physical theory. In M. R. Jones & N. Cartwright (Eds.), *Idealization XII: Correcting the Model. Idealization and Abstraction in the Sciencies* (pp. 145–172). Amsterdam and New York: Rodopi.
- Morrison, M., & Morgan, M. S. (1999a). Introduction. In M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 1–9). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, M., & Morgan, M. S. (1999b). Models as mediating instruments. In M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 10–37). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morselli, M. (1984). *Amedeo Avogadro: A Scientific Biography*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Moulines, C. U. (1978). Forma y función de los principios-guía en las teorías físicas. *Crítica*, 10, 59–88.
- Mueller, P., Rudin, D., Ti Tien, H., & et al. (1962). Re-constitution of cell membrane structure in vitro and its transformation into an excitable system. *Nature*, (194), 979–980. doi: <https://doi.org/10.1038/194979a0>
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. In L. Magnani, N. J. Nersessian, & P. Thagard (Eds.), *Model-B Reasoning in Scientific Discovery* (pp. 5–22). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Newman, M. P. (2017). Theoretical understanding in science. *British Journal for the Philosophy of Science*, 68(2), 571–

- 595.
- Ortiz, A., Bailey, S. E., Schwartz, G. T., Hublin, J.-J., & Skinner, M. M. (2018). Models of tooth development and the origin of hominoid molar diversity. *Science Advances*, 4(4), 1–6. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar2334>
- Pauly, P. J. (1987). *Controlling Life. Jacques Loeb and the Engineering Ideal in Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Peirce, C. S. (1998). *The Essential Peirce. Selected Philosophical Writings (1893–1913)* (Vol. 2; T. P. E. Project, Ed.). Indiana: Indiana University Press.
- Peterson, E. L. (2011). The excluded philosophy of evo-devo? Revisiting C. H. Waddington's failed attempt to embed Alfred North Whitehead's 'organicism' in evolutionary biology. *History and Philosophy of the Life Sciences*, 33(3), 301–320.
- Pierce, S. E., Clack, J. A., & Hutchinson, J. R. (2012). Three-dimensional limb joint mobility in the early tetrapod Ichthyostega. *Nature*, 486(7404), 523–526. doi: <https://doi.org/10.1038/nature11124>
- Plato. (1973). *Theaetetus*. Oxford: Oxford University Press.
- Pritchard, D. (2007). The value of knowledge. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved from <http://plato.stanford.edu/entries/knowledge-value/>
- Pritchard, D. (2008). Knowing the answer, understanding, and epistemic value. *Grazer Philosophische Studien*, 77(1), 325–339. doi: <https://doi.org/10.1163/18756735-90000852>
- Pritchard, D. (2010). Knowledge and understanding. In A. Millar & A. Haddock (Eds.), *The Nature and Value of Knowledge: Three Investigations* (pp. 3–90). New York: Oxford University Press.

- Rahman, S., & Clerboud, N. (2013). Constructive type theory and the dialogical approach to meaning. *The Baltic International Yearbook of Cognition, Logic and Communication*, 8, 1–72.
- Rahman, S., McConaughey, Z., Klev, A., & Clerboud, N. (2018). *Immanent Reasoning or Equality in Action. A Plaidoyer for the Play Level* (Vol. 18). Dordrecht: Springer International Publishing.
- Redmond, J., & Lopez-Orellana, R. (2018a). Lógica clásica y esquizofrenia: por una semántica lúdica. *Revista de Filosofía*, 74, 214–241.
- Redmond, J., & Lopez-Orellana, R. (2018b). Revisando las prácticas científicas de galileo. In G. Salatino, G. Cuadrado, & L. E. Gómez (Eds.), *Creatividad, investigación y lógica transcurativa* (pp. 345–354). Mendoza: Facultad Regional Mendoza Universidad Tecnológica Nacional.
- Redmond, J., Valladares, D. L., & Lopez-Orellana, R. (2017). Modelizaciones galileanas y objetos ideales. In G. Cuadrado & L. E. Gómez (Eds.), *Ciencias de la ingeniería en el siglo xxi. Nuevos enfoques en su lógica, enseñanza y práctica* (pp. 51–61). Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional.
- Santesmases, M. J. (2002). ¿Artificio o naturaleza? Los experimentos en la historia de la biología. *Theoria*, 17(2), 265–289.
- Smith, S. R. L., T. M. (2007). *Ecología*. Madrid: Pearson Educación.
- Sneed, J. D. (1971). *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Dordrecht: D. Reidel.
- Squazzoni, F. (2010). The impact of agent-based models in the social sciences after 15 years of incursions. *History of Economic Idea*, 18(2), 197–233.
- Standen, E. M., Du, T. Y., & Larsson, H. C. E. (2014).

- Developmental plasticity and the origin of tetrapods. *Nature*, 513(7516), 54–58. doi: <https://doi.org/10.1038/nature13708>
- Stegmüller, W. (1970). *Theorie und Erfahrung* (Vol. 2). Berlin: Springer-Verlag.
- Stegmüller, W. (1973). *Theorienstrukturen und Theoriendynamik. Zweiter Halbband Theorienstrukturen und Theoriendynamik* (Vol. 2/2). Berlin: Springer-Verlag.
- Stoljar, D., & Damnjanovic, N. (2010). The deflationary theory of truth. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved from <https://plato.stanford.edu/entries/truth-deflationary/>
- Suárez, M. (2003). Scientific representation: against similarity and isomorphism. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17(3), 225–244.
- Suárez, M. (2004). An inferential conception of scientific representation. *Philosophy of Science*, 71(5), 767–779.
- Suárez, M. (2016). Representation in science. In P. Humphreys (Ed.), *Oxford Handbook of the Philosophy of Science* (pp. 440–459). Oxford: Oxford University Press.
- Suárez, M. (2019). *Filosofía de la ciencia. Historia y práctica*. Madrid: Tecnos.
- Suárez, M., & Cartwright, N. (2008). Theories: Tools versus models. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, (39), 62–81.
- Sugden, R. (2000). Credible worlds: the status of theoretical models in economics. *Journal of Economic Methodology*, 7(1), 1–31. doi: <https://doi.org/10.1080/135017800362220>
- Suppe, F. (1989). *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*. Chicago: University of Illinois Press.

- Suppes, P. (1954). Some remarks on problems and methods in the philosophy of science. *Philosophy of Science*, 21(3), 242–248.
- Suppes, P. (1957). *Introduction to Logic*. London: Van Nostrand Reinhold Company.
- Suppes, P. (1960). A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences. *Synthese*, 12(2/3), 287–301.
- Suppes, P. (1962). Models of data. In E. Nagel, P. Suppes, & A. Tarski (Eds.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress* (pp. 252–261). Stanford: Stanford University Press.
- Suppes, P. (1970). *Set-Theoretical Structures in Science*. Stanford: Stanford University Press.
- Suppes, P. (1974). The axiomatic method in the empirical sciences. In L. Henkin (Ed.), *Proceedings of the Tarski Symposium* (Vol. XXV, pp. 465–479). Providence: American Mathematical Society.
- Suppes, P. (1989). Representation theory and the analysis of structure. *Philosophia Naturalis*, 25, 254–268.
- Suppes, P. (1993). *Models and Methods in the Philosophy of Science. Selected Essays*. Dordrecht: Kluwer.
- Tarski, A. (1935). Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen. *Studia Philosophica*, (1), 261–405.
- Tarski, A. (1936). Über den Begriff der logischen Folgerungber. In *Actes du congrès international de philosophie scientifique. sorbonne, paris, 1935* (Vol. VII: Logique, pp. 1–11). Paris: Hermann & Cie, Éditeurs.
- Tarski, A. (1944). The semantic conception of truth and the foundations of semantics. *Philosophy and Phenomenological Research*, (4), 341–376.

- Tarski, A. (1977). *Introducción a la lógica y a la metodología de las ciencias deductivas*. Madrid: Espasa-Calpe.
- Tarski, A. (1983). The concept of truth in formalized languages. In J. Corcoran (Ed.), *Logic, Semantics, Metamathematics* (pp. 152–278). Indianapolis: Hackett Publishing.
- The University of Utah, C. A. M. (2016). *Electron microscopy tutorial*. The University of Utah. Retrieved 17/08/2019, from <https://advanced-microscopy.utah.edu/education/electron-micro/index.html>
- Thomson, W. (1904). *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. London: C. J. Clay and Sons, Cambridge University Press Warehouse.
- Torretti, R. (1990). *Creative Understanding. Philosophical Reflections on Physics*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Torretti, R. (2016). *Modelos. Conferencia en Cátedra Udp*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=MkGup_ii5U
- Trimble, W. S., Cowan, D. M., & Scheller, R. H. (1988). Vamp-1: a synaptic vesicle-associated integral membrane protein. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85(12), 4538–4542. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.85.12.4538>
- Tschaplinski, A. (2008). *Knowledge and Self-Knowledge in Plato's Theaetetus*. Lanham: Lexington Books.
- van Benthem, J. (1994). General dynamic logic. In *What is a Logical System* (pp. 107–140). Oxford: Clarendon Press.
- van Benthem, J. (2014). *Logic in Games*. Massachusetts: MIT Press.
- van Fraassen, B. C. (1980). *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.

- van Fraassen, B. C. (1987). The semantic approach to scientific theories. In N. J. Nersessian (Ed.), *The Process of Science. Contemporary Philosophical Approaches to Understanding Scientific Practice* (pp. 105–124). Lancaster: Kluwer Academic Publishers.
- van Fraassen, B. C. (2008). *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*. Oxford: Clarendon Press.
- von Wright, G. H. (1971). *Explanation and Understanding*. London: Routledge and Kegan Paul Ltd.
- Waddington, C. H. (1942). Canalization of development and the inheritance of acquired characters. *Nature*, 150(563–565), 563–565. doi: <https://doi.org/10.1038/150563a0>
- Waddington, C. H. (1953). Genetic assimilation of an acquired character. *Evolution*, 7(2), 118–126. doi: <https://doi.org/10.2307/2405747>
- Waddington, C. H. (1961). Genetic assimilation. *Advances in Genetics*, 10(C), 257–293. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2660\(08\)60119-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2660(08)60119-4)
- West-Eberhard, M. J. (2003). *Developmental Plasticity and Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Wilhelm, B. C., Du, T. Y., Standen, E. M., & Larsson, H. C. E. (2015). Polypterus and the evolution of fish pectoral musculature. *Journal of Anatomy*, 226(6), 511–522. doi: <https://doi.org/10.1111/joa.12302>
- Wilkenfeld, D. A. (2013). Understanding as representation manipulability. *Synthese*, 190(6), 997–1016. doi: <https://doi.org/10.1007/s11229-011-0055-x>
- Woodward, J. (2013). *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*. New York: Oxford University Press.
- Worrall, J. (1989). Structural realism: The best of both worlds? *Dialectica*, 43, 99–124. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1744-6493.1989.tb00830.x>

- 8361.1989.tb00933.x
- Zagzebski, L. (2001). Recovering understanding. In M. Steup (Ed.), *Knowledge, Truth, and Duty: Essays on Epistemic Justification, Responsibility, and Virtue* (pp. 235–256). New York: Oxford University Press.
- Zagzebski, L. (2009). *On Epistemology*. Belmont, CA: Wadsworth.

Bibliografía consultada

- Ayala, F. J., & Arp, R. (Eds.) (2010). *Contemporary Debates in Philosophy of Biology*. Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Aliseda, A. (2006). *Abductive Reasoning. Logical Investigations into Discovery and Explanations*. Synthese Library. Studies in Epistemology, Logic, Methodology, and Philosophy of Science (vol. 330). Dordrecht: Springer.
- Allen, C., Bekoff, M., & Lauder, G. (Eds.) (1998). *Nature's Purposes: Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ankeny, R. A. (2003). Wormy logic: Model organisms as case-based reasoning. In A. N. H. Creager, E. Lunbeck, & N. Wise (Eds.), *Science without laws: Model systems, cases, exemplary narratives* (pp. 46–58). Chapel Hill, NC: Duke University Press.
- Arcangeli, M. (2017). Thought experiments in model-based reasoning. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 463–493). Cham: Springer.
- Bailer-Jones, D. (1999). Tracing the development of models in the philosophy of science. In L. Magnani, N. Nersessian, & P. Thagard, *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery* (pp. 23–40). Boston, MA: Springer US.
doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4813-3_2
- Bailer-Jones, D. (2003). When scientific models represent. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17(1), 59–74. doi: <https://doi.org/10.1080/02698590305238>

- Bailer-Jones, D. (2009). *Scientific Models in the Philosophy of Science*. Pittsburgh: Pittsburgh University Press.
- Balzer, W., & Sneed, J. D. (1977). Generalized net structures of empirical theories I. *Studia Logica*, 36, 195–211.
doi: <https://doi.org/10.1007/BF02121266>
- Balzer, W., & Sneed, J. D. (1978). Generalized net structures of empirical theories II. *Studia Logica*, 37, 167–194.
doi: <https://doi.org/10.1007/BF02124803>
- Baron, S., & Colyvan, M. (2016). Time enough for explanation. *Journal of Philosophy*, 113(2), 61–88.
- Batterman, R. (2009). Idealization and modeling. *Synthese*, 169(3), 427–446, doi: 10.1007/s11229-008-9436-1
- Beatty, J. (1987). On behalf of the semantic view. *Biology and Philosophy*, 2, 17–23. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00127560>
- Beatty, J. (1997). Why do biologists argue like they do? *Philosophy of Science*, 64, S432–S443.
- Beckner, M. (1969). Function and teleology. *Journal of the History of Biology*, 2(1), 151–64.
- Black, M. (1962). *Models and Metaphors*. Ithaca: Cornell University Press.
- Blalock, H. (1961). *Causal Inferences in Nonexperimental Research*. Chapel Hill: The University of North Carolina Press.
- Boesch, B. (2017). There is a special problem of scientific representation. *Philosophy of Science*, 84(5), 970–981.
doi: <https://doi.org/10.1086/693989>
- Bokulich, A. (2017). Models and explanation. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 103–118). Cham: Springer.
- Bolinska, A. (2013). Epistemic representation, informativeness and the aim of faithful representation. *Synthese*, 190(2),

- 219–234, doi: <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0143-6>
- Boutilier, C., & Becher, V. (1995). Abduction as belief revision. *Artificial Intelligence*, 77(1), 43–94. doi: [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(94\)00025-V](https://doi.org/10.1016/0004-3702(94)00025-V)
- Brandon, R. (1990). *Adaptation and Environment*. Princeton: Princeton University Press.
- Brandon, R., & Carson, S. (1996). The indeterministic character of evolutionary theory. *Philosophy of Science*, 63, 315–337.
- Braillard, P.-A., & Malaterre, C. (Ed.) (2015). *Explanation in Biology. An Enquiry into the Diversity of Explanatory Patterns in the Life Sciences*. History, Philosophy and Theory of the Life Sciences (vol. 11). Dordrecht: Springer.
- Bueno, O., & Colyvan, M. (2011). An Inferential Conception of the Application of Mathematics. *Nous*, 45(2), 345–374. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1468-0068.2010.00772.x>
- Bueno, O., & French, S. (2011). How theories represent. *British Journal for the Philosophy of Science*, 62(4), 857–894. doi: <https://doi.org/10.1093/bjps/axr010>
- Caamaño Alegre, M. (2012). Pragmatic continuities in empirical science. Some examples from the history of astronomy. In O. Pombo, S. Rahman, J. M. Torres, & J. Symon (Eds.), *Special Sciences and the Unity of Science*. Logic, Epistemology and the Unity of Science (vol. 24, 5–18). Dordrecht: Springer.
- Caamaño Alegre, M. (2015). Prácticas, contextos y racionalidad epistémica. *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 47(139), 93–118.
- Caamaño Alegre, M. (2015). Theory success: Some evaluative clues. *Philosophia Scientiae*, 19(1), 71–84.

- Caamaño Alegre, M. (2018). Hacia una noción más robusta de adecuación empírica. *Artefactos*, 7(2), 165–184.
- Canfield, J. (1964). Teleological explanations in biology. *British Journal for the Philosophy of Science*, 14 (56), 285–295.
- Capra, F., & Luisi, P. L. (2014). *The Systems View of Life. A Unifying Vision*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cartwright, N. (1999). *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cassini, A. (2011). Modelos, mapas y representaciones científicas. In L. Dutra, H. De Araújo y A. Meyer Luz (Eds.), *Temas de filosofía do conhecimento*, Col. Rumos da Epistemología (vol. 11, pp. 141-156). Florianópolis: NEL/UFSC.
- Cassini, A. (2018). Models without target. *ArtefaCToS*, 7(2), 185–209.
- Cellucci, C. (2008). The nature of mathematical explanation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 39, 202–210.
- Cellucci, C. (2014). Mathematical beauty, understanding, discovery. *Foundations of Science*, 20, 339–355.
- Cerezo, M. (2003). Isomorfismo y proyección en el *Tractatus*. In J. J. Acero, L. Flores, & A. Flórez, *Viejos y Nuevos Pensamientos. Ensayos sobre la Filosofía de Wittgenstein* (pp. 31–48). Granada: Ed. Comares.
- Chakravartty, A. (2001). The semantic or model-theoretic view of theories and scientific realism. *Synthese*, 127(3), 325–345. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010359521312>
- Chang, H. (2004). *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. New York: Oxford University Press.

- Clarke, S., & Timothy, D. L. (Eds.) (2002). *Recent Themes in the Philosophy of Science. Scientific Realism and Commonsense*. Dordrecht: Springer.
- Colyvan, M., & Ginzburg, L. R. (2003). Laws of nature and laws of ecology. *Oikos*, 101(3), 649–653. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12349.x>
- Contessa, G. (2007). Scientific representation, interpretation, and surrogate reasoning. *Philosophy of Science*, 74(1), 48–68. doi: <https://doi.org/10.1086/519478>
- Correia, F., & Schneider, B. (Eds.) (2012). *Metaphysical Grounding: Understanding the Structure of Reality*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cruce, P., & Papineau, D. (2002). Scientific Realism without Reference. In M. Marsonet (Ed.), *The Problem of Realism*. Aldershot: Ashgate Publishing Co.
- Cummins, R. (1975). Functional analysis. *Journal of Philosophy*, 72(20), 741–64.
- Darden, L. (2007). Mechanisms and models. In D. Hull, & M. Ruse (Eds.), *Cambridge Companion to the Philosophy of Biology* (pp. 139–159). Cambridge: Cambridge University Press.
- Dawkins, R. (1982). *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press.
- de Chadarevian, S., & Hopwood, N. (Eds.) (2004). *Models: The third dimension of science*. Stanford: Stanford University Press.
- de Regt, H. W. (2004). Discussion note: Making sense of understanding. *Philosophy of Science*, 71, 98–109. doi: <https://doi.org/10.1086/381415>
- Diéguez, A. (2005). Realismo y antirrealismo en la filosofía de la biología. *Ludus Vitalis*, XIII(23), 49–71.

- Dobzhansky, T. (1973). Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *American Biology Teacher*, 35(3), 125–129.
- Dupré, J. (1993). *The disorder of things: Metaphysical foundations of the disunity of science*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Elgin, M., & Sober, E. (2002). Cartwright on explanation and idealization. *Erkenntnis*, 57(3), 441–450. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1021502932490>
- Ereshefsky, M. (1998). Species pluralism and anti-realism. *Philosophy of Science*, 65, 103–120.
- Ereshefsky, M. (2001). *The Poverty of the Linnaean Hierarchy: A Philosophical Study of Biological Taxonomy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ereshefsky, M. (2007). Foundational issues concerning taxa and taxon names. *Systematic Biology*, 56, 295–301.
- Felline, L. (2018). Mechanisms meet structural explanation. *Synthese*, 195(1), 99–114.
- French, S. (2014). *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford: Oxford University Press.
- French, S., & Krauze, D. (2006). *Identity in Physics: A Historical Philosophical, and Formal Analysis*. Oxford: Oxford University Press.
- French, S., & Ladyman, J. (1999). Reinflating the semantic approach. *International Studies in the Philosophy of Science*, 13(2), 103–121.
- French, S., & Saatsi, J. (2006). Realism about structure: the semantic view and nonlinguistic representations. *Philosophy of Science*, 73(5), 548–559. doi: <https://doi.org/10.1086/518325>

- Frigg, R. (2006). Scientific representation and the semantic view of theories. *Theoria*, 21(1), 49–65. doi: <http://dx.doi.org/10.1387/theoria.553>
- Frigg, R., & Nguyen, J. (2016). The fiction view of models reloaded. *The Monist*, 99(3), 225–242. doi: 10.1093/monist/onw002
- Frigg, R., & Nguyen, J. (2017). Models and representation. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 99–102). Cham: Springer.
- Futuyma, D. J. (1998). *Evolutionary Biology*. Sunderland, MA: Sinauer.
- Garvey, B. (2007). *Philosophy of Biology*. Stocksfield: Acumen.
- Gelfert, A. (2016). *How to Do Science with Models: A Philosophical Primer*. Cham: Springer.
- Gelfert, A. (2017). The Ontology of models. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 5–23). Cham: Springer.
- Giere, R. N. (1997). *Understanding Scientific Reasoning*. Fourth Edition. New York: Harcourt Brace.
- Giere, R. N. (2006). Perspectival pluralism. In S. Kellert, H. Longino, & K. Waters (Eds.), *Scientific pluralism* (pp. 26–41). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Giere, R. N. (2006). *Scientific Perspectivism*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Gilbert, W. (1991). Towards a paradigm shift in biology. *Nature*, 349, 99. doi: <https://doi.org/10.1038/349099a0>
- Gilbert, S. F. (2003). *Developmental Biology*. Sunderland, MA: Sinauer.
- Gilbert, S. F. (2009). The adequacy of model systems for evo-devo: Modeling the formation of organisms/ modeling the formation of society. In A. Barberousse, M. Morange, & T. Pradeu (Eds.), *Mapping the Future of Biology*:

- Gould, S. J. (1977). *Ontogeny and Phylogeny*. Cambridge, MA: Belknap.
- Gould, S. J. (2002). *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Gould, S. J., & Vrba, E. (1982). Exaptation. A Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology*, 8(1), 4–15.
- Griffiths, P. E., & Gray, R. (1994). Developmental systems and evolutionary explanation. *Journal of Philosophy*, 91(6), 277–304.
- Griffiths, P. E., & Gray, R. (2001). Darwinism and developmental systems. In S. Oyama, P. Griffiths, & R. Gray (Eds.), *Cycles of Contingency: Developmental Systems and Evolution* (pp. 195–218). Cambridge, MA: MIT Press.
- Griffiths, P. E., & Gray, R. (2004). The developmental systems perspective: Organism-environment systems as units of evolution. In K. Preston, & M. Pigliucci (Eds.), *The Evolutionary Biology of Complex Phenotypes* (pp. 409–431). Oxford: Oxford University Press.
- Griffiths, P. E., & Neumann-Held, E. (1999). The many faces of the gene. *BioScience*, 49(8), 656–662.
- Griffiths, P. E., & Stotz, K. (2013). *Genetics and Philosophy: An Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Grimm, S. R. (2006). Is understanding a species of knowledge? *British Journal for the Philosophy of Science*, 57(3), 515–535. doi: <https://doi.org/10.1093/bjps/axl015>
- Gingras, Y. (2001). What did mathematics do to physics? *History of Science*, 39, 383–416.
- Gooding, D. (1990). *Experiment and the making of meaning*. Dordrecht: Kluwer.
- Evolving Concepts and Theories (pp. 57–68). Dordrecht: Springer.

- Hahlweg, K., & Hooker, C. A. (Ed.) (1989). *Issues in Evolutionary Epistemology*. Albany, NY: SUNY Press.
- Hamblin, C. L. (1971). Mathematical models of dialogue. *Theoria*, 37(2), 130–155.
- Hafner, J., & Mancosu, P. (2005). The varieties of mathematical explanation. In P. Mancosu et al. (Eds.), *Visualization, Explanation and Reasoning Styles in Mathematics* (pp. 215–250). Berlin: Springer.
- Hafner, J., & Mancosu, P. (2008). Beyond Unification. In P. Mancosu (Ed.), *The Philosophy of Mathematical Practice* (pp. 151–178). Oxford: Oxford University Press.
- Harman, G. H. (1965). The Inference to the Best Explanation. *Philosophical Review*, 74(1), 88–95.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation*. New York: The Free Press.
- Hewitt, C. (1991). Open information system semantics for distributed artificial intelligence. *Artificial Intelligence*, (47), 79–106.
- Higevord, J. (Ed.) (1994). *Physics and Our View of the World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hughes, R. I. G. (1997). Models and representation. *Philosophy of Science*, 64, S325–S336.
- Huitema, B. E. (2011). *The Analysis of Covariance and Alternatives Statistical Methods for Experiments, Quasi-Experiments, and Single-Case Studies*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Hull, D. L., & Ruse, M. (Eds.) (1998). *The Philosophy of Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Jablonka, E. (2002) Information: Its interpretation, its inheritance, and its sharing. *Philosophy of Science*, 69(4), 578–605.

- Jablonka, E., & Lamb, M. (2005). *Evolution in Four Dimensions*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Keller, E. F. (2000). Models of and models for: Theory and practice in contemporary biology. *Philosophy of Science*, 67, S72–S86. doi: <https://doi.org/10.1086/392810>
- Keller, E. F. (2003). Models, simulation, and ‘computer experiments.’ In H. Radder (Ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation* (pp. 198–215). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Kitcher, P. (2001). *Science, Truth, and Democracy*. Oxford: Oxford University Press.
- Klein, U. (2003). *Experiments, models, paper tools: Cultures of organic chemistry in the nineteenth century*. Stanford: Stanford University Press.
- Kuhn, D., Amsel, E., & O’Longhin, M. (1988). *The Development of Scientific Thinking Skills*. London: Academic Press.
- Kukla, A. (2000). *Social Constructivism and the Philosophy of Science*. London and New York: Routledge.
- Ladymian, J. (1998). What is Structural Realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 409–424.
- Latour, B. (1987). *Science in action*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Laubichler, M., & Müller, G. B. (Eds.) (2007). *Modeling Biology: Structures, Behavior, Evolution*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Laudan, L. (1977). *Progress and Its Problems*. Berkeley: University of California Press.
- Laudan, L. (1980). Why was the logic of discovery abandoned? In T. Nickles (Ed.), *Scientific Discovery* (Volume I, pp. 173–183). Dordrecht: D. Reidel.

- Lenhard, J. (2006). Surprised by a nanowire: Simulation, control, and understanding. *Philosophy of Science*, 73(5), 605–616. doi: <https://doi.org/10.1086/518330>
- Leonelli, S. (2007). What is in a model? Using theoretical and material models to develop intelligible theories. In M. D. Laubichler, & G. B. Muller (Eds.), *Modeling Biology: Structures, Behavior, Evolution* (pp. 15–36). Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Leplin, J. (Ed.) (1984). *Scientific Realism*. Berkeley: University of California Press.
- Leplin, J. (1987). The bearing of discovery on justification. *Canadian Journal of Philosophy*, 17, 805–14.
- Lewens, T. (2005). *Organisms and Artifacts: Design in Nature and Elsewhere*. Cambridge, MA: Bradford Books.
- Lewontin, R. (1983). Gene, organism and environment. In D. S. Bendall (Ed.), *Evolution from Molecules to Man* (pp. 273–85). Cambridge: Cambridge University Press.
- Longino, H. (2001). *The Fate of Knowledge*. Princeton: Princeton University Press.
- López-Moratalla, N., & Cerezo, M. (2011). The Self-construction of a Living Organism. In Terzis, G., & Arp, R., *Information and Living Systems: Philosophical and Scientific Perspectives* (pp. 177–204). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Lutz, S. (2017). What was the syntax-semantics debate in the philosophy of science about? *Philosophy and Phenomenological Research*, 95(2), 319–352. doi: <https://doi.org/10.1111/phpr.12221>
- Magnani, L. (2000). *Abduction, Reason, and Science: Processes of Discovery and Explanation*. Dordrecht: Kluwer.
- Magnani, L., Nersessian, N. J., & Thagard, P. (Eds.) (1999). *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

- Mäki, U. (2002). Symposium on explanations and social ontology 2: Explanatory ecumenism and economics imperialism. *Economics and Philosophy*, 18(2), 235–257. doi: <https://doi.org/10.1017/S0266267102002031>
- Mäki, U. (2005). Models are experiments, experiments are models. *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 303–315. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/13501780500086255>
- Marcos, A. (2012). Biología sistémica y filosofía de la naturaleza. *Eikasia. Revista de Filosofía*, (43), pp. 95–110.
- Marcos, A. (2017). Filosofía de la Biología. *Diccionario Interdisciplinar Austral (DIA)*. Retrieved from http://dia.austral.edu.ar/Filosofia_de_la_biologia
- Marcos, A., & Arp, R. (2013). Information in the Biological Sciences. In K. Kampourakis (ed.), *The Philosophy of Biology. History, Philosophy and Theory of the Life Sciences* (vol. 1, pp. 511–547). Dordrecht: Springer.
- Marcos, A., & Folguera, G. (2013). El concepto de especie y los cambios teóricos en biología. *Ludus Vitalis*, XXI(39), 1–25.
- Marcos, A., & y Folguera, G. (2013). La extensión de la síntesis biológica y sus implicaciones para la noción de especie. *Contrastes. Revista Internacional de Filosofía*, (18), pp. 69–82.
- Maynard Smith, J. (2000). The concept of information in biology. *Philosophy of Science*, 67(2), 177–194.
- Maynard Smith, J., & Szathmáry, E. (1995). *The Major Transitions in Evolution*. New York: Freeman.
- Mayr, E. (1988). *Toward a New Philosophy of Biology: Observations of an Evolutionist*. Cambridge, MA: Belknap.
- McMullin, E. (1985). Galilean idealization. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3), 247–273. doi: [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(85\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0039-3681(85)90003-2)

- Meltzoff, A. N. (1995). Understanding the intentions of others: Reenactment of intended acts by 18 month-old children. *Developmental Psychology*, (319), 838–50.
- Merz, M. (1999). Multiplex and unfolding: Computer simulation in particle physics. *Science in Context*, 12(2), 293–316. doi: <https://doi.org/10.1017/S0269889700003434>
- Miller, A. (2003). The significance of semantic realism. *Synthese*, 136(2), 191–217.
- Mishler, B., & M. Donoghue, M. (1982). Species Concepts: A Case for Pluralism. *Systematic Zoology*, 31(4), 491–503.
- Mitchell, S. (2003). *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Morgan, M. S. (2005). Experiments versus models: New phenomena, inference, and surprise. *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 317–329.
- Morrison, M. (2000). *Unifying scientific theories: Physical concepts and mathematical structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, M. (2015). *Reconstructing Reality: Models, Mathematics, and Simulations*. New York: Oxford University Press.
- Moulines, C. U. (1996). Las ideas básicas del estructuralismo metacentífico. *Revista de Filosofía*, IX(16), 93–104.
- Moulines, C. U. (2000). Is there genuinely scientific progress? In A. Jonkisz, & L. Koj (Eds.), *On Comparing and Evaluating Scientific Theories* (pp. 173–197). Amsterdam/Atlanta: Rodopi.
- Moulines, C. U. (2016). Patrick Suppes: A Profile. *Journal of General Philosophy of Science*, 47, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1007/s10838-016-9323-2>

- Moulines, C. U. (2016). Relaciones interteóricas en perspectiva diacrónica. *Revista de Humanidades de Valparaíso*, (8), 147–162. doi: <https://doi.org/10.22370/rhv.2016.8.502>
- Nersessian, N. J. (1995). Should physicists preach what they practice? Constructive modeling in doing and learning physics. *Science and Education*, (4), 203–226.
- Nepomuceno-Fernández, A., Soler-Toscano, F., & Velázquez-Quesada, F. R. (2017). Abductive reasoning in dynamic epistemic logic. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 269–293). Cham: Springer.
- Nersessian, N. J. (1998). Kuhn and the cognitive revolution. *Configurations*, (6), 87–120.
- Nersessian, N. J., & McLeod, M. (2017). Models and simulations. In L. Magnani, & T. Bertolotti (Eds.), *Springer Handbook of Model-Based Science* (pp. 119–132). Cham: Springer.
- Nguyen, J. (2016). On the pragmatic equivalence between representing data and phenomena. *Philosophy of Science*, 83(2), 171–191.
- Niiniluoto, I. (1988). Analogy and similarity in scientific reasoning. In D. H. Helman (Ed.), *Analogical Reasoning: Perspectives of Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Philosophy* (pp. 271–298). Dordrecht: Kluwer.
- Orzack, S. H., & Sober, E. (Eds.) (2001). *Adaptationism and Optimality*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Parker, W. S. (2015). Getting (even more) serious about similarity. *Biology and Philosophy*, 30(2), 267–276.
- Perini, L. (2010). Scientific representation and the semiotics of pictures. In P. D. Magnus, & J. Busch (Eds.), *New Waves in the Philosophy of Science* (pp. 131–154). New York: Macmillan.

- Pero, F., & Suárez, M. (2016). Varieties of misrepresentation and homomorphism. *European Journal for Philosophy of Science*, 6(1), 71–90.
- Pittendrigh, C. S. (1958). Adaptation, natural selection and behavior. In A. Roe, & G. G. Simpson (Eds.), *Behavior and Evolution* (390–416). New Haven: Yale University Press.
- Popper, K. R. (1972). *Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*. Oxford: Clarendon Press.
- Popper, K. R. (1995). *A World of Propensities*. Bristol: Thoemmes Press.
- Poznic, M. (2016). Representation and similarity: Suárez on necessary and sufficient conditions of scientific representation. *Journal for General Philosophy of Science*, 47(2), 331–347.
- Psillos, S. (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. London, New York: Routledge.
- Psillos, S. (2001). Is structural realism possible? *Philosophy of Science*, 68(3), S13–S24.
- Putnam, H. (1980). Models and reality. *Journal of Symbolic Logic*, 45(3), 464–482.
- Radder, H. (Ed.) (2003). *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Radick, G. (2000). Two explanations of evolutionary progress. *Biology and Philosophy*, 15(4), 475–91. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1006609532691>
- Reichenbach, H. (1938). *Experience and Prediction. An Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Reichenbach, H. (1954). *Nomological statements and Admissible Operations*. Amsterdam: North Holland.

- Rheinberger, H.-J. (1992). Experiment, difference, and writing, part 1. Tracing protein synthesis. *Studies in History and Philosophy of Science*, 23(2), 305–331. doi: [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(92\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0039-3681(92)90037-7)
- Rheinberger, H.-J. (1993). Experiment and orientation: Early systems of in vitro protein synthesis. *Journal of the History of Biology*, 26(3), 443–471. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01062057>
- Ridley, M. (2003). *Evolution*. Oxford: Blackwell.
- Rorty, R. (1980). *Philosophy and the Mirror of Nature*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rosenberg, A. (1978). The supervenience of biological concepts. *Philosophy of Science*, 45, 368–386.
- Rosenberg, A. (1983). Fitness. *Journal of Philosophy*, 80, 457–473.
- Rosenberg, A. (1994). *Instrumental Biology, or the Disunity of Science*. Chicago: University of Chicago Press.
- Rückert, H. (2011). *Dialogues as a dynamic framework for logic*, London: College Publications.
- Rudner, R. S. (1966). *Philosophy of Social Science*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Ruse, M. (1970). Are there laws in biology? *Australasian Journal of Philosophy*, 48(2), 234–246. doi: <https://doi.org/10.1080/00048407012341201>
- Ruse, M. (1973). *The Philosophy of Biology*. London: Hutchinson.
- Saatsi, J. (2016). Models, idealisations, and realism. In E. Ippoliti, F. Sterpetti, & T. Nickles (Eds.), *Models and Inferences in Science*, Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics Series (vol. 25, pp. 173–189). Cham: Springer.

- Salmon, W., & Wolters, G. (Ed.) (1994). *Logic, Language, and the Structure of Scientific Theories*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Sarkar, S., & Plutynski, A. (2008). *A Companion to the Philosophy of Biology*. Oxford: Blackwell.
- Schaffner, K. F. (1980). Theory structures in the biomedical sciences. *The Journal of Medicine and Philosophy*, 5(1), 57–97. doi: <https://doi.org/10.1093/jmp/5.1.57>
- Schaffner, K. F. (1993). *Discovery and Explanations in Biology and Medicine*. Chicago: University of Chicago Press.
- Schaffner, K. F. (2008). Theories, models, and equations in biology: the heuristic search for emergent simplifications in neurobiology. *Philosophy of Science*, 75(5), 1008–1021. doi: <https://doi.org/10.1086/594542>
- Schank, R. C. (1986). *Explanation Patterns: Understanding Mechanically and Creatively*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Schank, R. C., & Riesbeck, C. K. (1981). *Inside Computer Understanding*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Schank, R. C., Kass, A., & Riesbeck, C. K. (1994). *Inside Case-Based Explanation*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Skelton, P. (Ed.) (1993). *Evolution: A Biological and Palaeontological Approach*. Wokingham: Addison-Wesley.
- Smart, J. J. C. (1963). *Philosophy and Scientific Realism*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Sober, E. (1984). *The Nature of Selection: Evolutionary Theory in Philosophical Focus*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Sober, E. (1993). *Philosophy of Biology*. Boulder: Westview Press.
- Sober, E. (1997). Two outbreaks of lawlessness in recent philosophy of biology. *Philosophy of Science*, 64, S458–S467. doi: <https://doi.org/10.1086/392622>

- Sober, E. (Ed.) (2006). *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Sommerhoff, G. (1950). *Analytical Biology*. London: Oxford University Press.
- Spencer, H. (1864). *The Principles of Biology* (Volume 1). London, Edinburgh: Williams and Norgate.
- Stegmüller, W. (1978). A combined approach to the dynamics of theories. *Theory and Decision*, 9, 39–75. <https://doi.org/10.1007/BF00138119>
- Stegmüller, W. (1979). The structuralist view: survey, recent development and answers to some criticisms. In I. Niiniluoto, & R. Tuomela, R. (Ed.), *The logic and epistemology of scientific change* (Acta Philosophica Fennica 30) (pp. 113–129). Amsterdam: North-Holland.
- Sterelny, K. (2009). Novelty, plasticity and niche construction: The influence of phenotypic variation on evolution. In A. Barberousse, M. Morange, & T. Pradeu (Eds.), *Mapping the Future of Biology: Evolving Concepts and Theories* (pp. 93–110). Dordrecht: Springer.
- Sterelny, K. (2011). Evolvability revisited. In B. Calcott, & K. Sterelny (Eds.), *The Major Transitions Revisited* (pp. 83–100). Cambridge, MA: MIT Press.
- Suárez, M. (2009). *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*. New York: Routledge.
- Suárez, M. (2015). Deflationary representation, inference, and practice. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 49, 36–47.
- Sugden, R. (2002). Credible worlds: The status of theoretical models in economics. In U. Mäki (Ed.), *Fact and fiction in economics. Models, realism and social construction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sugden, R. (2009). Credible worlds, capacities and mechanisms. *Erkenntnis*(70), 3–27.

- Swartz, N. (1995). The neo-Humean perspective: laws as regularities. In F. Weinert (Ed.), *Laws of Nature. Essays on the Philosophical, Scientific and Historical Dimensions* (pp. 67–91). Berlin: de Gruyter.
- Swoyer, C. (1991). Structural representation and surrogate reasoning. *Synthese*, 87(3), 449–508. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00499820>
- Thompson, P. (1989). *The Structure of Biological Theories*. New York: State University of New York Press.
- Thomson-Jones, M. (2012). Modeling without mathematics. *Philosophy of Science*, 79(5), 761–772. doi: <https://doi.org/10.1086/667876>
- Toon, A. (2012). *Models as Make-Believe: Imagination, Fiction, and Scientific Representation*. Basingtoke: Palgrave Macmillan.
- Trout, J. D. (2002). Scientific explanation and the sense of understanding. *Philosophy of Science*, 69(2), 212–233. doi: <https://doi.org/10.1086/341050>
- Ubbink, J. B (1960). Model, description and knowledge. *Synthese*, 12(2), 302–19.
- Vaihinger, H. (1924). *The Philosophy of ‘as If’: A System of the Theoretical, Practical, and Religious Fictions of Mankind*. London: Kegan Paul.
- Van Bouwel, J. (2004). Explanatory pluralism in economics: Against the mainstream? *Philosophical Explorations*, 7(3), 299–315.
- Van Eemeren, F., & Grootendorst, R. (2004). *A systematic theory of argumentation: the pragma-dialectical approach*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Fraassen, Bas. C. (2008). *Laws and Symmetry*. Oxford: Clarendon Press.

- Waddington, C. H. (1962). *New Patterns in Genetics and Development*. New York: Columbia University Press.
- Waddington, C. H. (1975). *The Evolution of an Evolutionist*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- Walton, D. (2004). *Abductive Reasoning*. Tuscaloosa, Alabama: University of Alabama Press.
- Walton, D. (2007). Dialogical models of explanation. In *Explanation-Aware Computing: Papers from the 2007 AAAI Workshop*, Association for the Advancement of Artificial Intelligence, Technical Report WS-07-06, AAAI Press (pp.1–9).
- Weisberg, M. (2007). Three kinds of idealization. *Journal of Philosophy*, 104(12), 639–659.
- Weisberg, M. (2013). *Simulations and Similarity: Using Models to Understand the World*. New York: Oxford University Press.
- Wigner, E. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13, 1–14.
- Williams, G. (1966). *Adaptation and natural selection*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Williams, M. B. (1970). Deducing the consequences of evolution: a mathematical model. *Journal of Theoretical Biology*, 29(3), 343–385. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(70\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0022-5193(70)90103-7)
- Winsberg, E. (2001). Simulations, models and theories: complex physical systems and their representations. *Philosophy of Science*, 68(3), S442–S454.
- Winsberg, E. (2010). *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago: University of Chicago Press.
- Winther, R. G. (2016). The structure of scientific theories. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Retrieved from

- <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/structure-scientific-theories/>
- Wright, L. (1973). Functions. *The Philosophical Review*, 82(2): 139–168.
- Woodward, J. (2002). There is no such thing as a ceteris paribus law. *Erkenntnis*, 57(3), 303–328.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21(2), 179–217.
doi: [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80022-6](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80022-6)

Índice alfabético

- acción(es), 33, 34, 48, 58, 60, 70, 73, 77, 84, 98, 99, 101, 103, 107, 108, 110–113, 147
agencialidad, 7, 113, 146, 147
Allen and Bekoff, 118, 155
Amin et al., 142, 155
Amundson and Lauder, 118, 155
Aristotle, 42, 91, 155
artefacto(s)
 epistémicos, 67
asimilación genética, 120, 132–134, 139, 149
axiomas, 17
Ayala, 118, 155
Balzer et al., 16, 17, 155
Baumberger et al., 7, 91, 97, 155
Bianchi and Squazzoni, 113, 155
Blanck, 6, 155
Bloom, 93–98, 108, 156
Booth et al., 55, 156
Braillard and Malaterre, 85, 118, 156
Caponi, 118, 119, 156
Carnap, 17, 156
Cartwright et al., 9, 56–58, 61, 74, 84, 156
Cassini, 4, 38, 61, 82, 85, 156
Cellucci, 34, 40–47, 157
Chakravartty, 4, 157
Coleman, 73, 157
comprensión, 55, 57, 79, 81, 82, 86, 87, 89, 90, 98–101, 103, 134, 135, 140–142
comprensión efectiva, 107, 108, 111, 135–137, 143
concepción semanticista, 14–16, 18, 19, 31, 32, 34, 37–40, 52, 81
familia semanticista, 16, 53
semanticistas, 15, 22, 37, 45, 46, 53
conocimiento, 3, 26, 33, 39, 42, 44, 53, 56–60, 69, 72, 73, 76, 79, 80, 88, 98–102, 108,

- 113, 116, 137, 139,
140
- control, 70, 72, 73, 107, 108,
110, 111, 123, 127,
147
- Cooper, 8, 157
- Cuevas, 31, 157
- Cummins, 119, 141, 157
- D'Agostini, 91, 157
- Díez and Moulines, 17, 18,
26, 27, 29, 35, 158
- da Costa and French, 16,
17, 39, 40, 157
- Dalla Chiara and Toraldo di
Francia, 17, 157
- Darwin, 102, 158
- de Regt, 102, 158
- de Regt and Dieks, 7, 86,
98, 100, 158
- de Regt et al., 10, 86, 92,
99, 100, 102, 158
- definición de uso de un
modelo, 105, 110,
147
- Dewey, 93, 96, 158
- Diéguez, 8, 63, 158
- distorsión, 48–50, 61
- Droysen, 90, 158
- Ehrenreich and Pfennig,
133, 159
- Elgin, 10, 92, 98, 101, 103,
108, 159
- estado cognitivo, 98, 101,
102
- evo-devo, 116, 117, 120,
138–141
- modelo(s) evo-devo,
117, 135–138, 142
- experimentación, 52, 70, 73,
81, 86, 99, 101, 109,
112, 116
- experimento(s), 62, 69, 70,
72–74, 81, 103, 104,
108, 115, 118, 134,
137
- función de un
experimento, 70
- explicación, 6, 18, 39, 55,
60, 74, 84–86, 99,
101–103, 111–113,
130, 140, 141
- Falk, 116, 159
- Fernandes, 38, 159
- Frigg, 27, 159
- Frigg and Hartmann, 50,
61, 83, 159
- Frigg and Nguyen, 64, 83,
87, 88, 90, 106, 159
- Gadamer, 92, 160
- Giere, 4, 16, 160
- Godfrey-Smith, 9, 59, 61,
160
- Gosline, 126, 160

- Gradzielski, 55, 160
Grimm, 7, 91, 97, 160

Hacking, 70–72, 160
Hanski, 64, 160
Hedström and Manzo, 113, 161

Hegselmann and Krause, 113, 161
Hempel, 17, 36, 161
Hertz, 161
Hodges, 19, 161
Huberty and Petoskey, 126, 161

inferencia(s), 34, 41, 42, 75–80, 101, 105, 106, 108, 111, 113, 129–131, 133–136, 141, 147, 149
información, 53, 77, 80, 98, 99, 101, 104, 108, 109
interacción, 33, 113, 117, 139

Jones, 4, 161

Keiff, 34, 162
Kitcher, 4, 85, 118, 162
Klassen et al., 111, 162
Klein et al., 113, 162
Klimovsky and Boido, 37, 162

Knuuttila, 8, 10, 60–62, 68, 69, 82, 162
Knuuttila and García-Deister, 6, 10, 162
Knuuttila and Merz, 84, 100, 163
Kvanvig, 7, 98, 163

Laurance, 67, 163
Leonelli, 85, 103, 163
Levins, 66, 163
Loeb, 73, 164
Loison, 133, 164
London and London, 56, 57, 164
Lopez-Orellana, 38, 40, 44, 164
Lopez-Orellana and Cortés-García, 107, 122, 131, 164
Lorenz, 34, 164
Lorenzano, 16, 27, 37, 39, 165
Love, 140, 165

Mäki, 10, 75, 76, 104, 165
método axiomático, 35
MacLeod and Nersessian, 8, 165
manipulación, 41, 51, 53, 54, 68, 70, 71, 73, 74, 81, 86, 102, 103, 110, 111, 123, 126

- Martin-Löf, 34, 165
 Maxwell, 153, 165
 McMullin, 50, 61, 165
 modelización, 3, 6, 15, 34,
 47, 59, 68–70, 77,
 78, 81, 84, 86, 89,
 101, 109, 112, 116,
 135
 modelo(s), 3, 4
 como artefactos, 61, 69
 como herramientas, 56
 como herramientas
 inferenciales, 75, 76
 como instrumentos, 51,
 52
 función de, 4
 noción básica de, 16
 pluralidad de, 3
 significado, 3
 usos de, 3, 16
 Morgan, 51, 73, 165
 Morrison, 4, 74, 165, 166
 Morrison and Morgan, 9,
 39, 51–53, 58, 60,
 74, 84, 166
 Morselli, 28, 166
 Moulines, 38, 166
 Mueller et al., 53, 166

 Nersessian, 8, 166
 Newman, 100, 166

 Ortiz et al., 142, 167

 Pauly, 73, 167
 Peirce, 7, 93, 94, 167
 Peterson, 116, 167
 Pierce et al., 167
 plasticidad del desarrollo,
 119, 121, 129–131,
 134
 plasticidad fenotípica, 71,
 117, 119, 135, 137,
 139, 143
 Plato, 91, 167
 Polypterus, 116, 118, 121,
 123, 126, 127, 129,
 133–137
 predicción, 64, 111, 113,
 131, 138
 Pritchard, 98, 167
 proceso(s), 5, 33, 41–43, 45,
 53, 54, 59, 73, 84,
 98, 104, 107–111,
 119, 139, 147
 producción de fenómenos,
 69, 85, 86, 113
 producción del
 conocimiento, 39,
 72, 100

 Rahman and Clerbout, 34,
 167
 Rahman et al., 34, 168
 Redmond and
 Lopez-Orellana, 34,
 41, 61, 168

- Redmond et al., 50, 88, 168
representación, 4, 6, 15, 16,
23, 25, 42, 46, 90
retrodicción, 113

Santesmases, 70, 168
Smith, 64, 168
Sneed, 16, 168
Squazzoni, 113, 168
Standen et al., 11, 119–121,
123, 125–132, 149,
168
Stegmüller, 16, 169
Stoljar and Damnjanovic,
78, 169
Suárez, 4, 6, 10, 75, 77, 78,
80, 84, 89, 105–107,
136, 142, 150, 169
Suárez and Cartwright, 9,
56–58, 169
Sugden, 10, 75, 76, 142, 169
Suppe, 17, 169
Suppes, 6, 9, 15, 16, 25–28,
30, 169, 170

Tarski, 9, 15, 19–22, 24,
170, 171
teoría(s), 16, 17, 56, 57
The University of Utah, 54,
171
Thomson, 152, 171
Torretti, 31, 37, 151–153,
171
Trimble et al., 54, 171
Tschemplik, 91, 171
uso(s), 20, 25, 30, 33, 48,
49, 51, 52, 57–59,
68, 69, 79, 81, 82,
86, 100, 102–105,
108–110

van Benthem, 33, 41, 48,
171
van Fraassen, 4, 9, 16, 46,
48, 49, 61, 171, 172
von Wright, 91, 172

Waddington, 132, 172
West-Eberhard, 121, 130,
172
Wilhelm et al., 122, 172
Wilkenfeld, 100, 172
Woodward, 85, 172
Worrall, 16, 172

Zagzebski, 98, 173