



# Segmentación manual y automática de imágenes radiológicas seccionales para resecciones pulmonares anatómicas con cirugía robótica

TESIS DOCTORAL

Manuela Martín Izquierdo



Directores:

Prof. Dr. Juan Antonio Juanes Méndez

Prof. Dr. Marcelo F. Jiménez López



VNIVERSIDAD  
D SALAMANCA

2024





VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA

D. JUAN ANTONIO JUANES MÉNDEZ y D. MARCELO FERNANDO JIMÉNEZ LÓPEZ, DOCTORES EN MEDICINA Y CIRUGÍA, PROFESORES DEL DEPARTAMENTO DE ANATOMÍA E HISTOLOGÍA HUMANAS Y EL DEPARTAMENTO DE MEDICINA Y CIRUGÍA, DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

CERTIFICAMOS:

Que el trabajo titulado "SEGMENTACIÓN MANUAL Y AUTOMÁTICA DE IMÁGENES RADIOLOGICAS SECCIONALES PARA RESECCIONES PULMONARES ANATÓMICAS CON CIRUGÍA ROBÓTICA", ha sido realizado por Dña. Manuela Martín Izquierdo, bajo nuestra dirección; reuniendo, a nuestro juicio, los requisitos y méritos suficientes para que la autora del mismo pueda optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca.

Fdo: Juan Antonio Juanes Méndez

Fdo: Marcelo F. Jiménez López



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Prólogo</b>	<b>9</b>
<b>Introducción</b>	<b>11</b>
1. La imagen médica .....	13
2. La radiómica.....	21
3. Softwares comerciales de tratamiento digital de imagen médica.....	23
4. Segmentación de imágenes médicas .....	26
5. Aplicaciones docentes de sistemas interactivos de visualización de estructuras anatomo radiológicas.....	27
6. Aplicaciones clínicas de la visión 3D. Técnicas innovadoras de abordaje quirúrgico robotizado .....	28
<b>Planteamiento del trabajo</b>	<b>33</b>
<b>Material y métodos</b>	<b>41</b>
1. Adquisición de imágenes seccionales .....	43
2. Segmentación de estructuras anatómicas, delimitación de regiones de interés (ROIs) y reconstrucción de modelos tridimensionales .....	52
3. Softwares empleados.....	55
4. Instalación de la aplicación.....	57
5. Encuestas de valoración .....	59
6. Procesamiento para la segmentación automática, desde secciones de Tomografía Computarizada.....	62
7. Abordaje quirúrgico robotizado a cavidad torácica .....	65
<b>Resultados</b>	<b>67</b>
1. Desarrollo informático con segmentaciones manuales desde Resonancias Magnéticas ...	83
2. Encuesta de valoración de los usuarios del programa informático .....	87
3. Abordaje quirúrgico robotizado.....	102
<b>Discusión</b>	<b>111</b>

<b>Conclusiones</b>	<b>129</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>133</b>
<b>Anexos</b>	<b>153</b>
36 Congreso Nacional de la Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM). 25-28 Mayo, 2022. Málaga.....	155
Students' Assessment of the Use of 3D Vision Technology Resources for Independent Learning.....	174
Impact of robot-assisted surgery and 3D vision systems with virtual reality on medical training.....	182
37 Congreso Nacional de la Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM). 22-25 Mayo, 2024. Barcelona.....	190

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero reconocimiento y agradecimiento a los profesores D. Juan Antonio Juanes Méndez, y D. Marcelo Jiménez López, por su magnífica dirección de este trabajo de Tesis Doctoral, y por las facilidades prestadas en los departamentos de Anatomía Humana, Cirugía y Radiología, donde se ha llevado a cabo gran parte de este trabajo.

Igualmente, quisiera extender este agradecimiento a Santiago González Izard, director de la empresa del parque científico de la Universidad de Salamanca ARSoft por su participación activa en la ejecución de este trabajo informático para el estudio tridimensional de las estructuras anatómicas de la del aparato respiratorio, mediante técnicas de realidad virtual.

Deseo mi gratitud a todos aquellos que de una forma u otra me han animado en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, así como a compañeros radiólogos del Servicio de Radiodiagnóstico del Hospital Clínico Universitario.

No puedo dejar de agradecer a mi esposo e hijos, que al igual que en todos los proyectos de mi vida, han estado ayudando y alentándome para que éste también llegara a buen fin.

A todos mis amigos que, de alguna manera, me alentaron y se interesaron para que esta Tesis fuera terminada.



# Prólogo

Como especialista en Radiodiagnóstico del Hospital Clínico Universitario de Salamanca, y profesora asociada del Departamento de Anatomía Humana, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Salamanca, se me ha brindado la posibilidad de poder empezar a realizar mis primeras incursiones en el terreno de la investigación y de la docencia.

Durante el desarrollo de mi carrera profesional, siempre he tenido especial interés por el área de la anatomía radiológica y su conocimiento a través de procedimientos tecnológicos que aportasen una mejor visualización de las estructuras anatómicas.

El contacto con el profesor de Anatomía Humana, Juan Antonio Juanes Méndez, director del grupo de investigación reconocido de la Universidad de Salamanca, VisualMed Systems, el cual trabaja en Sistemas de Visualización Médica Avanzada, se me planteó realizar un trabajo de Tesis Doctoral basado en el desarrollo tridimensional de estructuras anatómicas con técnicas de segmentación manual y automática, con fines tanto para la formación médica como para el diagnóstico clínico. Esto motivó mi atención hacia estos procedimientos tecnológicos dedicando todo el gran esfuerzo para el desarrollo de esta Tesis Doctoral, que hemos titulado "SEGMENTACIÓN MANUAL Y AUTOMÁTICA DE IMÁGENES RADIOLÓGICAS SECCIONALES PARA RESECCIONES PULMONARES ANATÓMICAS CON CIRUGÍA ROBÓTICA". Por tanto nuestro trabajo de Tesis Doctoral pretende utilizar las técnicas informáticas más innovadoras que nos permitan reconstruir estructuras anatómicas que constituyen el aparato respiratorio, desde secciones de resonancia magnética, que nos sean útiles para posibles intervenciones quirúrgicas robotizadas.

Actualmente, los avances tecnológicos ofrecen nuevas posibilidades metodológicas, nuevas formas de estudiar y aprender anatomía. La introducción de modelos digitales que permiten la representación de imágenes anatómicas tridimensionales a partir de las obtenidas de técnicas diagnósticas como la Resonancia Magnética y la Tomografía Computarizada, ha supuesto una forma novedosa de entender la Anatomía Humana.

Nuestro propósito con este trabajo de Tesis Doctoral que planteamos es poner al servicio de la formación médica una herramienta que permita la visualización y el análisis 3D de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio, con secciones simultáneas de resonancia magnética, en los tres planos del espacio (axial, sagital y coronal), para facilitar el estudio y la comprensión de las estructuras que componen esta región corporal, dotada de gran complejidad anatómica.



# Introducción

---



## 1. La imagen médica

El avance de la medicina ha ido de la mano del progreso en las diferentes técnicas de imagen y la aparición de nuevas tecnologías, y ha contribuido a un aumento de la esperanza de vida y una mejora de su calidad.

El aumento de la esperanza de vida se encuentra ligado a un mayor desarrollo de la medicina preventiva y a la mejora de las técnicas disponibles para el diagnóstico precoz de las diferentes patologías. Dentro de estas técnicas cobran especial relevancia las técnicas de imagen, que permiten realizar un diagnóstico precoz y con ello realizar los diferentes procedimientos terapéuticos.

La aparición de nuevos aparatos, facilitan la práctica clínica y mejoran la seguridad del paciente y del facultativo, es por ello que la radiología sigue beneficiándose de la innovación y los avances tecnológicos constantes (Lee y cols., 2018).

Todo ello nos va a permitir en este trabajo que presentamos valorar los avances referidos para obtener imágenes para el diagnóstico, pero también para el aprendizaje de la anatomía de forma didáctica e interactiva.

En este trabajo de Tesis Doctoral describiremos brevemente el estado actual y los últimos avances en las tecnologías de imágenes médicas, así como delinear áreas en las que se anticipan avances importantes en un futuro no muy lejano.

El término “imagen médica” agrupa el conjunto de técnicas empleadas para el estudio y descripción de los diferentes sistemas corporales en su representación con los distintos procedimientos de imagen empleados, o para el estudio de la ciencia médica (incluyendo el estudio de la anatomía normal y funcional).

El término “tecnología de imágenes médicas” tiene una definición amplia y abarca cualquier técnica que ayude a los profesionales médicos a ver el interior del cuerpo o áreas que no son visibles a simple vista.

Los datos de la imagen digital están formados por píxeles que corresponden a una parte de un objeto físico como resultado de las modalidades de imagen.

La visualización de estas estructuras puede ayudar en el diagnóstico de la enfermedad, la planificación del tratamiento y la ejecución del tratamiento, por ejemplo, mediante la intervención guiada por imágenes y monitorización y vigilancia de los pacientes.

La imagen médica ha avanzado de forma notable desde el descubrimiento de los rayos X hace 120 años por Roentgen en 1895. Hoy en día, los radiólogos pueden obtener imágenes del

cuerpo humano con gran detalle mediante la tomografía computarizada, la resonancia magnética, la tomografía por emisión de positrones, los ultrasonidos y otras modalidades.

Esta tecnología permite mejorar la detección, el diagnóstico y el seguimiento de las enfermedades, pero también conlleva riesgos. Muchas modalidades de diagnóstico por imagen exponen a los pacientes a radiaciones ionizantes (Padole y cols., 2015), lo que aumenta potencialmente el riesgo de desarrollar cáncer en el futuro, y el diagnóstico por imagen también puede estar asociado a posibles reacciones alérgicas o riesgos relacionados con el uso de agentes de contraste intravenosos (Scatiff y Morris, 2014).

Las imágenes radiográficas han avanzado mucho y los rayos X tradicionales están siendo reemplazados rápidamente por la **tomografía computarizada** (TC) (Figura 1), que combina la potencia del procesamiento por computadora con las imágenes de rayos X. Los escáneres de TC toman imágenes en tres planos diferentes. La propia tecnología de TC se ha perfeccionado a lo largo de los años. El grosor de los cortes de imagen se ha reducido y ha llegado la TC en espiral, lo que reduce drásticamente el tiempo de adquisición de imágenes (Nicolau y cols., 2018).

Las tomografías computarizadas obtienen representaciones visuales de secciones del cuerpo empleando las propiedades de atenuación de rayos x de las distintas partes de este, es un procedimiento rápido, indoloro y no invasivo. Los rayos x son producidos por un tubo de rayos x, atenuados por el paciente y medidos por un detector. Este proceso se repite en cantidad de ángulos, almacenando las medidas. Una vez se tienen suficientes medidas, es posible reconstruir la atenuación en cada punto del plano transversal escaneado (Seeram 2018; Fauzi y cols., 2010). Las imágenes obtenidas presentan los valores medidos en unidades Hounsfield (HU), definidos por la ecuación:

$$\text{Valor de la TC (HU)} = \mu - \mu_{\text{H}_2\text{O}} * 1000 \mu_{\text{H}_2\text{O}}$$



Figura 1. Equipo radiológico de Tomografía Computarizada

Las imágenes por **resonancia magnética (RM)** (Figura 2) surgieron a finales del siglo XX, en un momento en que las preocupaciones sobre la exposición a la radiación durante las imágenes médicas estaban en su punto máximo. Este sistema de imágenes utiliza campos magnéticos naturales para adquirir imágenes de las estructuras internas del cuerpo. Aunque inicialmente la RM tenía un uso diagnóstico limitado, las mejoras en el equipo han permitido que se convierta en la modalidad de imagen de elección para tejidos blandos y estructuras vasculares. Las máquinas de RM más nuevas son dispositivos compactos y abiertos que ya no hacen que los pacientes se sientan claustrofóbicos (Edelman, 2014; Giardino y cols. 2017).



Figura 2. Equipo radiológico de Resonancia Magnética

La resonancia magnética emplea la respuesta de los protones del cuerpo ante campos magnéticos externos para generar la imagen. Este proceso se realiza en dos partes, primero se manipula la orientación del spin del protón empleando un conjunto de campos magnéticos y después se miden cambios en la orientación del campo magnético del protón con un sensor inductivo aplicando una señal de radiofrecuencia.

Esta lectura, dependiendo de cómo se interprete, permite obtener imágenes potenciadas en T1 o en T2, que destacan distintos tejidos. Este procedimiento no emplea radiación y produce información más detallada que las tomografías computarizadas a cambio de ser un proceso más lento.

**La ecografía** es otra modalidad de diagnóstico por imágenes que no emplea radiación. Utiliza ondas sonoras reflejadas para obtener una imagen de los órganos internos. Una de las principales ventajas del ultrasonido es su portabilidad. Ha ganado una amplia aplicación médica, como exámenes a pie de cama, estudio de estructuras vasculares y obstetricia para evaluar la salud fetal (Cronnan, 2016).

Otras técnicas avanzadas de imágenes médicas han aprovechado el poder de los radioisótopos nucleares. La **tomografía por emisión de positrones (PET)** permite que las moléculas radiomarcadas, como la glucosa, sean absorbidas por los tejidos del cuerpo. Luego son detectados por sensores y su distribución proporciona pistas para el diagnóstico.

La introducción de medios de contraste ha llevado a la obtención de imágenes específicas del sitio, como la **angiografía por TC** (Figura 3) El material de contraste se inyecta en el torrente sanguíneo y las estructuras vasculares se pueden visualizar fácilmente. Esto ayuda a identificar anomalías vasculares y hemorragias.

También pueden utilizarse partículas marcadas que pueden ser absorbidas por ciertos tejidos, lo que ayuda en el diagnóstico. Por ejemplo, el tecnecio-99 se usa en la gammagrafía ósea y el yodo-131 se usa para estudiar el tejido tiroideo. A menudo, dos o más de las técnicas de imagen anteriores se combinan para dar al médico una idea definitiva de lo que está sucediendo en el cuerpo del paciente.

Todas las modalidades de la práctica radiológica se han convertido en digitales y, por tanto, manejan imágenes DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) (Figura 4).



Figura 3. Angio TC de arterias pulmonares



Figura 4. Estándar DICOM con el que se trabaja en los equipos radiológicos

En la era de la medicina basada en datos, el acceso rápido y la interpretación precisa de las imágenes médicas son cada vez más importantes. El sistema DICOM permite a los usuarios interactuar con los sistemas de comunicación y archivo de imágenes (PACS) de los hospitales para acceder a dichos datos (Yi y cols., 2021).

Los archivos de imágenes que cumplen con la parte del estándar DICOM se denominan generalmente "archivos de formato DICOM" o simplemente "archivos DICOM" y se representan como ".dcm". DICOM se diferencia de otros formatos de imagen en que agrupa la información en conjuntos de datos. Un archivo DICOM consta de una cabecera y de conjuntos de datos de imagen en un único archivo. La información de la cabecera se organiza como una serie constante y estandarizada de etiquetas. Al extraer los datos de estas etiquetas se puede acceder a información importante sobre los datos demográficos del paciente, los parámetros del estudio, etc. En aras de la confidencialidad del paciente, toda la información que pueda utilizarse para identificarlo debe eliminarse antes de que las imágenes DICOM se transmitan a través de una red con fines educativos o de otro tipo. Además del formato DICOM, el radiólogo se encuentra habitualmente con imágenes de varios formatos de archivo, como JPEG, TIFF, GIF y PNG. Cada formato tiene sus propias ventajas e inconvenientes, que deben tenerse en cuenta a la hora de archivar las imágenes, utilizarlas en archivos de enseñanza o enviarlas para su publicación.

El conocimiento de estos formatos ayuda al radiólogo a optimizar el archivo, la organización y la visualización de las imágenes (Varma, 2012).

A la hora de almacenar y transmitir archivos generados a través de estos estudios, se emplea el estándar DICOM que se expone a continuación.

DICOM es el estándar para transmisión y almacenamiento de imágenes y datos médicos entre hardware y software de propósito médico. Permite integrar sistemas médicos como escáneres, servidores, impresoras, PACS (*Picture Archiving and Communication Systems*). Podemos definir PACS como un sistema computarizado que permite el almacenaje de imágenes y su transmisión a través de una red informática (Haak y cols., 2015).

El análisis cuantitativo de los datos de imagen clínica es un área de investigación activa y prometedora para la medicina de precisión, la evaluación temprana de la respuesta al tratamiento y la caracterización objetiva de la enfermedad. La interoperabilidad, el intercambio de datos y la capacidad de extracción de datos son cada vez más importantes dado el crecimiento explosivo del número de métodos de análisis cuantitativo que se proponen.

El estándar DICOM está ampliamente adoptado para la obtención de imágenes y metadatos en radiología, aportando como avances para la valoración médica entre otros:

- Un estándar universal para la medicina digital, ya que todas las máquinas de adquisición de imagen médica producen imágenes DICOM, y se comunican a través de redes DICOM.
- Muy alta calidad de imagen. DICOM soporta 16 bits para almacenar tonalidades de gris, esto significa que puede almacenar 65536 tonalidades de gris distintas para imágenes monocromáticas. En comparación, los formatos típicos de imagen como JPEG están limitados a 256 valores.
- Soporte para una gran cantidad de parámetros asociados al estudio y al proceso de adquisición de imágenes. El formato DICOM, además de la imagen como tal, almacena in-

formación como puede ser la posición del paciente, su orientación, filtros aplicados, etc. Para nuestro estudio, por ejemplo, son de vital importancia los parámetros asociados a la distancia entre cada uno de los planos adquiridos en las resonancias o tomografías, ya que sin ellos sería imposible realizar una reconstrucción fiel a la realidad.

- **Codificación de la información.** Los archivos y mensajes DICOM almacenan la información en más de 2000 atributos estandarizados. Estos atributos permiten almacenar los parámetros mencionados anteriormente, información sobre el paciente y el estudio que se le está realizando, o incluso sobre el diagnóstico que se está llevando a cabo.
- **Funcionalidad e interfaz clara.** DICOM define interfaces muy concisas e independientes del tipo de aparato para hacer que el proceso de trabajar con equipos médicos a través de sus interfaces DICOM sea un proceso robusto y predecible que reduzca lo máximo posible la posibilidad de que aparezcan errores.

La tecnología de imágenes médicas ha progresado rápidamente a lo largo de los años. Esto no se ha limitado a las modalidades a través de las cuales se adquieren las imágenes. Se ha hecho un énfasis cada vez mayor en el **postprocesamiento** y en las formas más nuevas y avanzadas de compartir y almacenar imágenes médicas. La idea aquí es extraer el máximo beneficio de las tecnologías existentes y difundirlo al mayor número posible de personas. En el ámbito de las imágenes médicas de diagnóstico, los médicos ahora pueden manipular las imágenes para obtener mayores conocimientos e información del mismo conjunto de datos.

Con los diferentes tipos de dispositivos de imágenes que se emplean hoy en día y los datos únicos que producen, la integración y la facilidad de colaboración son de sumo interés para los institutos de salud y los usuarios finales. Casi todos los tipos de imágenes actuales se adquieren digitalmente y consisten en enormes archivos de datos. Un avance importante en este sentido ha sido la introducción del **PACS**. Es una plataforma que permite el almacenamiento y la visualización integrados de imágenes médicas de diversos dispositivos y sistemas. En el servidor PACS, las imágenes se almacenan principalmente en el formato DICOM (Figura 4).

Otra rama de la reconstrucción 3D es la **reconstrucción multiplanar**. Esta técnica constituye el proceso de obtener nuevos cortes de imágenes del modelo 3D reconstruido. Las nuevas secciones están en planos diferentes a los de los cortes que se adquirieron originalmente.

Hoy en día, el software de imágenes tiene múltiples funciones para ayudar a los profesionales de la salud a estudiar su región de interés en detalle. La tecnología de reconstrucción 3D permite a los médicos ver e interactuar con una réplica virtual de un órgano o estructura corporal. La imagen aparece en forma de holograma y los médicos pueden girar virtualmente la estructura, cortar secciones transversales e identificar puntos de referencia anatómicos vitales. Esta herramienta podría llegar a ser indispensable para planificar cirugías en el futuro.

La llegada de los TC de imagen multimodal que combinan la PET y la TC ha dado lugar a un nuevo paradigma en la visualización y presentación de imágenes que plantea nuevos retos en el software de interpretación de las estaciones de trabajo, la navegación por las imágenes y la comunicación. La esencia de la imagen multimodal es la capacidad de superponer la información de imágenes de diferentes modalidades de una manera visualmente convincente. Esto se consigue combinando datos funcionales y anatómicos en vistas multidimensionales mediante técnicas de codificación por colores que proporcionan pistas visuales sobre la distribución espacial de los datos de la imagen (Ratib y cols., 1997).

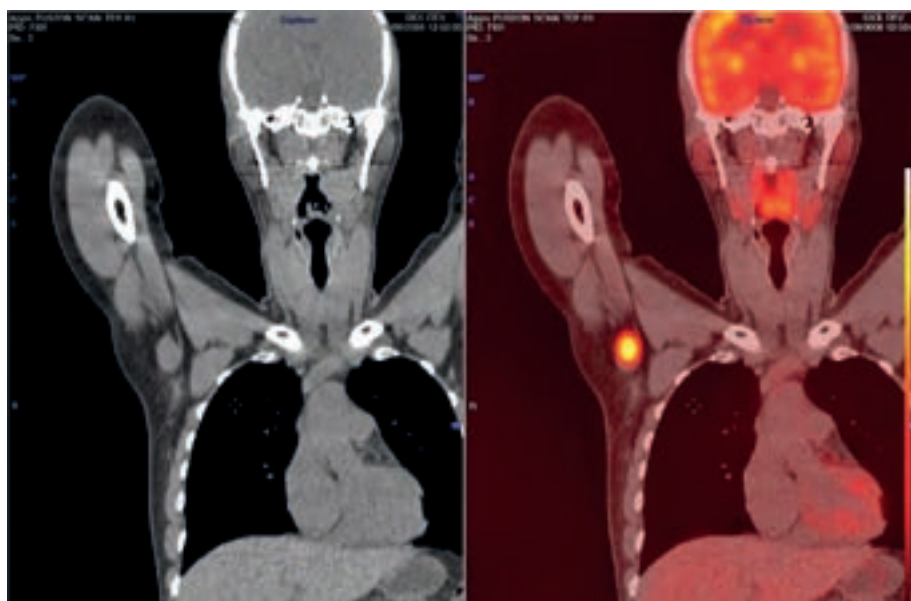


Figura 5. Fusión de imagen radiológica de TC y PET

En muchas aplicaciones DICOM hay disponible una herramienta avanzada de imágenes médicas llamada **fusión de imágenes**, que permite la fusión de dos o más conjuntos de datos de imágenes en un solo archivo. Esto puede combinar las ventajas de las diferentes modalidades de imágenes. Las técnicas de fusión de imágenes más frecuentes y útiles son la fusión de imágenes (Figura 5) PET/TC y PET/RM, que combinan las ventajas de la PET la tomografía computarizada y la resonancia magnética. La PET ayuda a identificar y localizar el área de interés (generalmente un área maligna o inflamada). La TC proporciona un excelente detalle anatómico de la extensión de la lesión, así como de los planos de tejido involucrados. La RM ayuda a lograr la resolución de los tejidos blandos. Cuando se combinan, hay un aumento notable en la sensibilidad y especificidad.

Los avances tecnológicos incluyen además el desarrollo de la informática médica que intercala la tecnología de la información y la asistencia sanitaria.

Con todo ello “la medicina de precisión” es uno de los enfoques emergentes para el tratamiento de los trastornos médicos, que tiene en cuenta la variabilidad individual de los factores genéticos y ambientales. De este modo, las intervenciones preventivas o terapéuticas pueden dirigirse a quienes más se benefician de ellas, maximizando los beneficios y minimizando los costes y las complicaciones.

La medicina de precisión goza de un reconocimiento cada vez mayor por parte de los médicos, los sistemas sanitarios, las empresas farmacéuticas, los pacientes y el gobierno. El diagnóstico por imagen desempeña un papel fundamental en la medicina de precisión, ya que incluye el cribado, el diagnóstico precoz, la orientación del tratamiento, la evaluación de la respuesta al tratamiento y la valoración de la probabilidad de recurrencia de la enfermedad (Giardino y cols., 2017).

Tradicionalmente, siempre se ha entendido que habría un “retraso” entre el momento en que se adquiere la imagen y el momento en que se interpreta. El retraso viene del tiempo que

se tarda en procesar y preparar la imagen, presentarla al radiólogo y luego el radiólogo ver cada sección de la imagen y aplicar sus conocimientos para interpretarla. Este retraso puede afectar significativamente los resultados clínicos, especialmente en situaciones de emergencia como los traumatismos, donde el tiempo es fundamental.

Hoy día, muchos sistemas de imágenes ofrecen resultados en “tiempo real”, lo que significa que el retraso entre la adquisición y la interpretación de las imágenes es mínimo o nulo. Los médicos pueden ver las imágenes en una pantalla mientras el paciente aún está en la unidad de imágenes. Esto no solo reduce el retraso, sino que tiene el beneficio adicional de ver los sistemas corporales en funcionamiento en tiempo real y, por lo tanto, evaluar su integridad funcional.

El futuro de las imágenes médicas pasa por la inteligencia artificial (IA) que hace referencia a la capacidad de las máquinas para simular la inteligencia humana.

La radiología ha experimentado una serie de desarrollos técnicos extremadamente importantes e influyentes en el pasado que han afectado a la forma en que se despliegan las imágenes médicas. La IA es potencialmente otro desarrollo de este tipo que introducirá cambios fundamentales en la práctica de la radiología. En este comentario se describe la evolución histórica de algunos de los principales cambios en radiología como telón de fondo de la forma en que la IA puede incorporarse a la práctica. Las nuevas capacidades potenciales que proporciona la IA ofrecen interesantes perspectivas para un uso más eficiente y eficaz de las imágenes médicas.

En radiología, la promesa de la IA y su potencial para alterar la práctica del radiólogo suscitan gran entusiasmo y ansiedad.

La radiología ha servido a menudo de puerta de entrada para los avances tecnológicos médicos, y la IA probablemente no será diferente.

En el contexto de las imágenes médicas, se puede entrenar a la IA para detectar anomalías en el tejido humano, lo que ayuda tanto en el diagnóstico de enfermedades como en el seguimiento de su tratamiento. Hay tres maneras en las que la IA puede ayudar a los radiólogos. La IA puede examinar enormes conjuntos de datos de imágenes e información de pacientes a velocidades sobrehumanas. Esto puede agilizar los flujos de trabajo. En segundo lugar, se puede entrenar a la IA para detectar anomalías que son demasiado pequeñas para discernirlas a simple vista. Esto puede mejorar la precisión del diagnóstico. En tercer lugar, la IA se puede utilizar para recuperar exploraciones de imágenes anteriores del registro médico electrónico de un paciente y, a continuación, compararlas con los resultados de las exploraciones más recientes del paciente. Otros aspectos del registro médico electrónico del paciente, como cualquier historial médico pertinente, también se pueden recuperar y utilizar para facilitar el diagnóstico.

El éxito del uso de la inteligencia artificial con fines de diagnóstico ha impulsado la aplicación del análisis de imágenes del cáncer basado en la IA para abordar otras necesidades clínicas más complejas. En esta perspectiva, analizamos la próxima generación de retos en la toma de decisiones clínicas que las herramientas de IA pueden resolver utilizando imágenes radiológicas, como el pronóstico del resultado en múltiples cánceres, la predicción de la respuesta a diversas modalidades de tratamiento, la discriminación de los factores de confusión del tratamiento benigno de la verdadera progresión, la identificación de patrones de respuesta

inusuales y la predicción del perfil mutacional y molecular de los tumores. Describimos la evolución y las oportunidades de la IA en las imágenes oncológicas, centrándonos en los enfoques radiómicos artesanales y las representaciones derivadas del aprendizaje profundo, con ejemplos de su aplicación para el apoyo a la toma de decisiones. También abordamos los retos a los que se enfrenta el camino hacia la adopción clínica, incluyendo la curación y anotación de datos, la interpretabilidad y las cuestiones de regulación y reembolso. Esperamos desmitificar la IA en radiología para los médicos ayudándoles a comprender sus limitaciones y desafíos, así como las oportunidades que ofrece como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el tratamiento del cáncer (Bera y cols. 2022).

Las tecnologías y aplicaciones de **aprendizaje profundo** demuestran uno de los próximos avances más importantes en radiología. El impacto y la influencia de estas tecnologías en la adquisición de imágenes y la elaboración de informes podrían cambiar la práctica clínica diaria. El objetivo de esta revisión es presentar las tecnologías actuales de aprendizaje profundo, centrándose en la reconstrucción de imágenes de resonancia magnética. La primera parte de este manuscrito se centra en los principios técnicos básicos necesarios para la reconstrucción de imágenes con aprendizaje profundo. La segunda parte destaca la traslación de estas técnicas a la práctica clínica. La tercera parte esboza los diferentes aspectos de las técnicas de reconstrucción de imágenes, y presenta una revisión de la literatura actual en relación con la reconstrucción de imágenes y el post-procesamiento de imágenes en RM. Los prometedores resultados de los estudios más recientes indican que el aprendizaje profundo será un actor importante en la radiología en los próximos años. Además del apoyo a la toma de decisiones y al diagnóstico, las principales ventajas de las técnicas de reconstrucción de imágenes de resonancia magnética con aprendizaje profundo están relacionadas con la reducción del tiempo de adquisición y la mejora de la calidad de la imagen. La implementación de estas técnicas puede ser la solución para aliviar la disponibilidad limitada de escáneres mediante la aceleración del flujo de trabajo. Cabe suponer que esta tecnología disruptiva cambiará las rutinas diarias y los flujos de trabajo de forma permanente.

## 2. La radiómica

Históricamente, la imagen médica ha sido una modalidad cualitativa o semicuantitativa. Es difícil cuantificar lo que se ve en una imagen y convertirlo en resultados predictivos valiosos. Gracias a los avances en el hardware informático y en los algoritmos de aprendizaje automático, los ordenadores están haciendo grandes progresos en la obtención de información cuantitativa de las imágenes y su correlación con los resultados. La radiómica, en sus dos formas, "artesanal y profunda", es un campo emergente que traduce las imágenes médicas en datos cuantitativos para obtener información biológica y permitir la elaboración de perfiles fenotípicos radiológicos para el diagnóstico, el teragnóstico, el apoyo a la toma de decisiones y el seguimiento. La radiómica artesanal es un proceso de varias etapas en el que se extraen de las radiografías características basadas en la forma, la intensidad de los píxeles y la textura. Dentro de esta revisión, describimos los pasos: comenzando con los datos cuantitativos de las imágenes, cómo se pueden extraer, cómo correlacionarlos con los resultados clínicos y biológicos, lo que resulta en modelos que se pueden utilizar para hacer predicciones, como la supervivencia, o para la detección y la clasificación utilizada en el diagnóstico. Se discute la aplicación del aprendizaje profundo, el segundo brazo de la radiómica, y su lugar en el flujo de

trabajo de la radiómica, junto con sus ventajas y desventajas. Para ilustrar mejor las tecnologías que se utilizan, ofrecemos aplicaciones clínicas del mundo real de la radiómica en oncología, mostrando la investigación sobre las aplicaciones de la radiómica, así como cubriendo sus limitaciones y su dirección futura.

Aunque el uso de la visualización avanzada en radiología es fundamental para el diagnóstico y la comunicación con los médicos remitentes, existe una necesidad insatisfecha de representar las imágenes DICOM como modelos impresos tridimensionales (3D) capaces de proporcionar tanto información táctil como de profundidad tangible sobre los estados anatómicos y patológicos. Los modelos impresos tridimensionales, ya arraigados en las ciencias no médicas, están siendo rápidamente adoptados en la medicina y en la comunidad de profanos. La incorporación de la impresión en 3D a partir de imágenes generadas e interpretadas por radiólogos presenta retos particulares, como la formación, los materiales y equipos, y las directrices. Los costes totales de un laboratorio de impresión 3D deben equilibrarse con los beneficios clínicos. Se espera que el número de modelos impresos en 3D generados a partir de imágenes DICOM para planificar intervenciones y fabricar implantes crezca exponencialmente. Los radiólogos deberían, como mínimo, estar familiarizados con la impresión 3D en lo que respecta a su campo, incluidos los tipos de tecnologías de impresión 3D y los materiales utilizados para crear modelos anatómicos impresos en 3D, las aplicaciones publicadas de los modelos hasta la fecha y los beneficios clínicos en radiología (Mitrousias y cols., 2018).

Las tecnologías de impresión tridimensional forman parte de los procesos de fabricación aditiva y se utilizan para fabricar un modelo físico 3D a partir de un modelo de diseño digital asistido por ordenador según la forma y el tamaño requeridos (Figura 6). Estas tecnologías se utilizan ahora para aplicaciones avanzadas de radiología al proporcionar toda la información a través de un modelo físico en 3D. Proporciona innovación en radiología para aplicaciones clínicas, planificación de tratamientos, simulación de procedimientos y educación médica y del paciente. Los avances radiológicos se han realizado en el diagnóstico y la comunicación a través de técnicas de imagen digital médica como la tomografía computarizada, la resonancia magnética. Estas imágenes se convierten en imágenes digitales y comunicaciones en medicina en formato de archivo de lenguaje triangulado estándar, fácilmente imprimible en tecnologías de impresión 3D. Este modelo 3D proporciona información en profundidad sobre estados patológicos y anatómicos. Es útil para crear nuevas oportunidades relacionadas con la atención al paciente.

Las recientes innovaciones en el proceso y aplicación de objetos impresos en 3D vienen dadas a partir de datos de imágenes médicas

Los datos para los modelos médicos impresos en 3D pueden obtenerse a partir de la tomografía computarizada, la resonancia magnética y los ultrasonidos utilizando el software Data Imaging and Communications in Medicine. Las imágenes de datos se procesan mediante herramientas de segmentación y generación de mallas y se convierten en un archivo de lenguaje de teselación estándar (STL) para su impresión. Las tecnologías de impresión 3D incluyen la estereolitografía, la sinterización selectiva por láser, la inyección de tinta y el modelado por deposición fundida. Los modelos impresos en 3D se han utilizado para la planificación preoperatoria de cirugías complejas, la creación de prótesis personalizadas y en la educación y formación de los médicos.

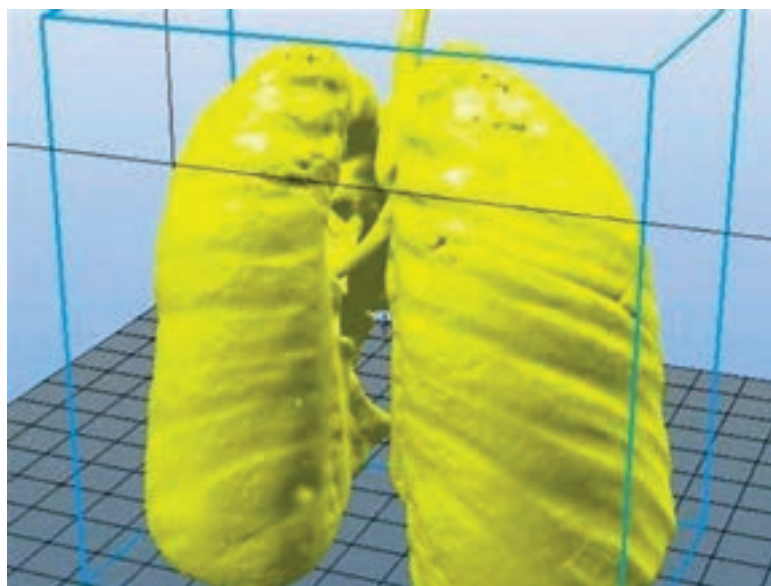


Figura 6. Modelo anatómico impreso en 3D, obtenido desde reconstrucción con Tomografía Computarizada

La impresión 3D ofrece muchas ventajas con respecto a la fabricación tradicional, entre las que se incluyen la capacidad de crear objetos con estructuras internas complejas, una mayor versatilidad y personalización, y menos requisitos de espacio.

Cuando se combina con las imágenes médicas, la impresión 3D abre nuevas oportunidades en el avance de la medicina. Las aplicaciones clínicas de esta tecnología emergente se están investigando activamente en muchos campos de la medicina. La capacidad de generar modelos 3D a partir de los datos de los pacientes permite a los médicos crear prótesis e implantes personalizados, visualizar mejor las patologías complicadas y enseñar a los alumnos como nunca antes (Marro y cols., 2016).

### 3. Softwares comerciales de tratamiento digital de imagen médica

En el campo de la radiología, la manipulación y el postprocesamiento de imágenes es cada vez más importante. En consecuencia, se necesitan herramientas informáticas sofisticadas que combinen software y hardware para procesar las imágenes médicas. En radiología, las estaciones de trabajo gráficas permiten a sus usuarios procesar, revisar, analizar, comunicar e intercambiar imágenes digitales multidimensionales adquiridas con diferentes dispositivos radiológicos de captación de imágenes. Estos dispositivos radiológicos son básicamente el TC la RM el PET, etc. Sin embargo, los programas incluidos en estas estaciones de trabajo tienen un coste elevado que depende siempre del proveedor de software y está siempre sujeto a sus normas y requisitos.

En la actualidad, existen sofisticadas aplicaciones que permiten visualizar imágenes médicas e incluso manipularlas (Figura 7). Estas aplicaciones informáticas son de gran interés, tanto desde el punto de vista docente como radiológico. Además, algunas de estas aplicaciones se conocen como software libre de código abierto porque son gratuitas y el código fuente es de libre acceso, por lo que se puede obtener fácilmente incluso en ordenadores personales.



Figura 7. Ejemplos de diferentes softwares comerciales que existen para el tratamiento de imágenes radiológicas

Dos ejemplos de software libre de código abierto son Osirix Lite® y 3D Slicer®. Sin embargo, este último grupo de aplicaciones gratuitas tiene limitaciones en su uso (Mujika, 2018).

**Osirix** es un software de navegación y visualización de imágenes multidimensionales para la visualización e interpretación de grandes conjuntos de imágenes multidimensionales y multi-modales, como los estudios combinados de PET-TC.



En el diseño del software se ha prestado especial atención a la adaptación de la interfaz de usuario a las tareas específicas y complejas de navegación por grandes conjuntos de datos de imágenes.

El programa puede adaptarse fácilmente a tareas muy específicas que requieren un número limitado de funciones, añadiendo y eliminando herramientas de la barra de herramientas del programa y evitando un número abrumador de herramientas y funciones innecesarias.

El programa OsiriX ofrece todas las funciones básicas de manipulación de imágenes de zoom, desplazamiento, ajuste de intensidad y filtrado con un rendimiento en tiempo real. Otras funciones adicionales, como la proyección multiplanar, los filtros y los ajustes de grosor de corte variable, el renderizado de volúmenes, las proyecciones de intensidad mínima y máxima, y el renderizado de superficies también son accesibles en tiempo casi real, dependiendo del hardware utilizado, así como del número de cortes a reconstruir. En esencia, las manipulaciones de imagen más básicas son procesadas en paralelo por la unidad de procesamiento gráfico de vídeo (GPU) y, por tanto, el rendimiento no depende de la unidad de procesamiento del ordenador (CPU).

OsiriX parece ser el único programa capaz de realizar todas las operaciones consideradas, de forma similar a una estación de trabajo equipada con software propio, permitiendo el análisis y la interpretación de las imágenes de forma sencilla e intuitiva. OsiriX es una estación de trabajo DICOM PACS para imágenes médicas y un software para el procesamiento de imágenes para la investigación médica, imágenes funcionales, imágenes 3D, microscopía confocal e imágenes moleculares. Esta aplicación es también una buena herramienta para las actividades de enseñanza porque facilita la consecución de los objetivos de aprendizaje entre los estudiantes y otros especialistas.

**3D Slicer** es una aplicación de software libre de código abierto para la computación de imágenes médicas. Como herramienta de investigación clínica, 3D Slicer es similar a una estación de trabajo de radiología que admite visualizaciones versátiles, pero también proporciona funcionalidades avanzadas como la segmentación y el registro automatizados para una variedad de dominios de aplicación. A diferencia de una estación de trabajo radiológica típica, 3D Slicer es gratuito y no está vinculado a un hardware específico (Fedorov y cols., 2012).



Como plataforma de programación, 3D Slicer facilita la traducción y evaluación de los nuevos métodos cuantitativos al permitir al investigador biomédico centrarse en la implementación del algoritmo, y proporcionar abstracciones para las tareas comunes de comunicación de datos, visualización y desarrollo de la interfaz de usuario. En comparación con otras herramientas que proporcionan aspectos de esta funcionalidad, 3D Slicer es totalmente de código abierto (Fedorov y cols., 2012).

#### 4. Segmentación de imágenes médicas

La segmentación de imágenes basada en imágenes médicas es el uso de la tecnología de procesamiento de imágenes por ordenador para analizar y procesar imágenes 2D o 3D con el fin de lograr la segmentación, la extracción, la reconstrucción tridimensional (Figura 8) (Olabarriaga y Smeulders, 2001; Mishra y cols., 2008; Malmberg y cols., 2017; Hu y cols., 2018).

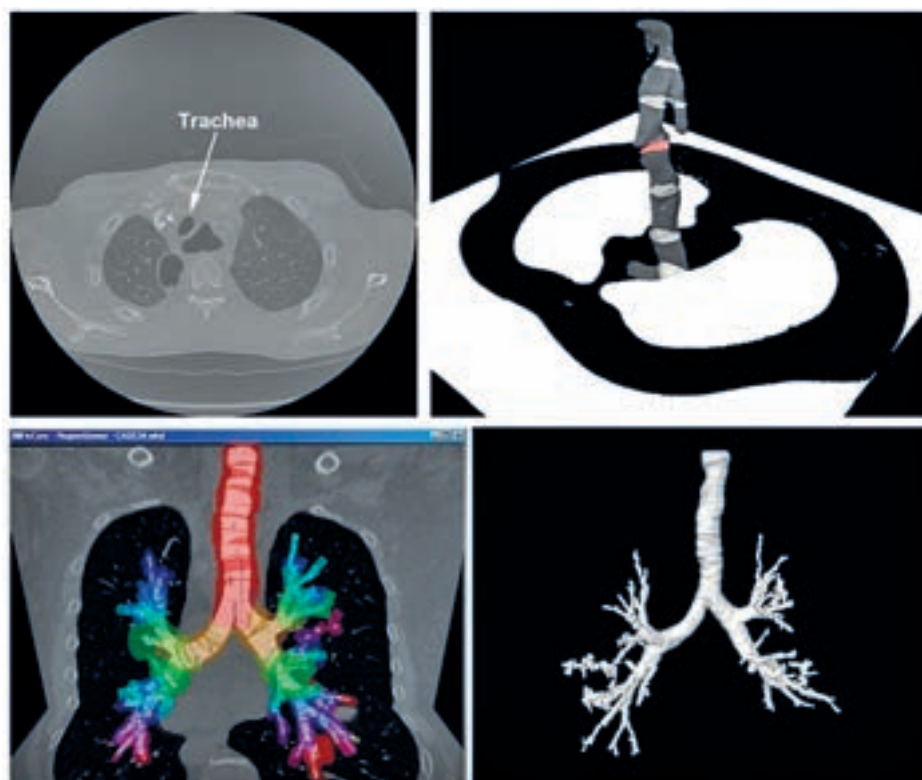


Figura 8. Segmentación de una estructura anatómica desde secciones seriadas de Tomografía Computarizada, para su reconstrucción 3D

Divide la imagen en varias regiones en función de la similitud o la diferencia entre ellas. Los médicos pueden realizar un análisis cualitativo o incluso cuantitativo de las lesiones y otras regiones de interés mediante este método, lo que mejora en gran medida la precisión y la fiabilidad del diagnóstico médico.

El análisis de imágenes médicas, los rasgos y las mediciones también pueden utilizarse para la segmentación de regiones con el fin de extraer estructuras significativas y, posteriormente, interpretar el resultado utilizando métodos de clasificación y modelos basados en el conocimiento.

El problema es cómo extraer la imagen y clasificar el resultado de la extracción en un patrón similar para luego identificar y comprender qué partes del cuerpo humano están afectadas por una enfermedad específica a partir del resultado de la clasificación de la imagen.

La segmentación de las estructuras de interés es una tarea importante en el análisis de imágenes médicas. No sólo es un importante paso de preprocesamiento para mejorar la clasificación y el diagnóstico posteriores, sino que también es relevante para la planificación del tratamiento y la evaluación de la respuesta terapéutica. La segmentación automática tiene muchas ventajas en comparación con la laboriosa segmentación manual, que adolece de un sesgo entre lectores y una baja reproducibilidad, por lo que se investiga ampliamente.

Mientras que los primeros sistemas de segmentación utilizaban enfoques de crecimiento de regiones, clustering y aprendizaje automático tradicional basados en características manuales, los enfoques de aprendizaje profundo dominan ahora el estado del arte en la segmentación de imágenes médicas.

La arquitectura más conocida para la segmentación de imágenes médicas es la U-Net, propuesta originalmente para la segmentación de estructuras neuronales en pilas de microscopía electrónica y la segmentación de células en imágenes de microscopía óptica. Las U-Nets y sus modificaciones son las arquitecturas más avanzadas en muchas tareas de segmentación.

## 5. Aplicaciones docentes de sistemas interactivos de visualización de estructuras anatómicas radiológicas

La anatomía humana es la ciencia que estudia las estructuras del organismo, constituye una disciplina fundamental en la formación sanitaria de todas las titulaciones de las Ciencias de la Salud, ya que proporciona los conocimientos necesarios sobre la estructura del cuerpo humano.

A lo largo de los años para el estudio de la Anatomía Humana se han realizado numerosas aportaciones visuales para el conocimiento del cuerpo humano (disecciones cadavéricas, Atlas, reconstrucciones planimétricas).

La proliferación de las técnicas de diagnóstico por imagen, como son la Tomografía computarizada y la Resonancia Magnética, han permitido estudiar el cuerpo humano en el individuo vivo de una forma más real.

Por otra parte, la irrupción de las tecnologías de la información y comunicación han proporcionado la aparición de nuevos recursos metodológicos de enseñanza y aprendizaje (Figura 9) (Darras y cols., 2018, Fang y cols., 2017, Govsa y cols., 2017, Moore y cols., 2017, Smit y cols., 2017, González Domínguez y cols., 2016; Drapkin y cols., 2015; Mavar-Haramija y cols., 2015; Juanes y cols., 2014; DeNotaris y cols., 2013; Nowinski y cols., 2013; Sora y cols., 2011; Larson y cols., 2010).

La incorporación de las tecnologías en la formación académica de los alumnos está fomentando una actitud activa en el alumno, convirtiéndolo en el protagonista de su propio aprendizaje.

La posibilidad de construir imágenes anatómicas tridimensionales a partir de las obtenidas por las técnicas radiológicas permite un aprendizaje más dinámico, y supone un gran avance no solo para la enseñanza y aprendizaje de la anatomía humana, sino también para el diagnóstico clínico.



Figura 9. Ejemplo de uno de los softwares comerciales más utilizado en docencia de la anatomía humana, el programa Visible Body

Es evidente que las nuevas generaciones de estudiantes universitarios están cada vez más familiarizadas con los medios digitales, aprovechando la enorme potencialidad que ofrecen hoy en día las distintas tecnologías en la trasmisión de conocimientos y la predisposición de los estudiantes actuales a incorporar en sus estudios metodologías y recursos más innovadores sustentados en los avances tecnológicos (Astudillo y cols., 2018; Sáez López, 2018; Guerrero, 2014; Juanes y Ruisoto, 2014; Belloch, 2012; Morrisey, 2010; Vázquez y cols., 2007).

Los avances tecnológicos han introducido nuevos y valiosos conceptos en los modelos de aprendizaje.

Los desarrollos tecnológicos convierten al estudiante en protagonista directo de su proceso de aprendizaje.

En el área de las ciencias de la salud y especialmente en Medicina, la enseñanza de la anatomía está a la vanguardia de la integración de metodologías tecnológicas innovadoras en sus planes de estudio. (Clunie y cols., 2018).

El gran potencial de las tecnologías, unido al vertiginoso desarrollo de las técnicas de diagnóstico por imagen (Tomografía Computarizada y Resonancia Magnética), ha abierto nuevas fuentes de aprendizaje, complementarias a la metodología tradicional, es por ello que en el campo educativo y especialmente en la formación médica la tendencia indica una evolución en paralelo de ambas.

En definitiva, el binomio educación-tecnología será uno de los pilares básicos para el desarrollo, crecimiento y progreso de la sociedad.

## 6. Aplicaciones clínicas de la visión 3D. Técnicas innovadoras de abordaje quirúrgico robotizado

La resonancia magnética puede proporcionar una visualización tridimensional de alta calidad de la anatomía del objetivo, del tejido circundante y de la instrumentación, pero existen

importantes retos a la hora de aprovecharla para guiar eficazmente los procedimientos de intervención. Entre los retos se encuentran el fuerte campo magnético estático, los gradientes de campo magnético que cambian rápidamente, los pulsos de radiofrecuencia de alta potencia, la sensibilidad al ruido eléctrico y el espacio limitado para operar dentro del orificio del escáner.

La resonancia magnética presenta una serie de ventajas con respecto a otras modalidades de imagen médica, como la ausencia de radiación ionizante, el excelente contraste de los tejidos blandos, que permite visualizar tumores y otras características que no son fácilmente visibles con otras modalidades, las verdaderas capacidades de imagen en 3D, incluida la capacidad de obtener imágenes con una geometría de plano de exploración arbitraria o de realizar imágenes volumétricas, y la capacidad de detección multimodal, incluida la difusión, el contraste dinámico, el flujo sanguíneo, la oxigenación de la sangre, la temperatura y el seguimiento de biomarcadores.

El uso de asistentes robóticos dentro de la sala de resonancia magnética, junto con el paciente durante la obtención de imágenes, permite la obtención de imágenes de resonancia magnética intraoperatoria (iMRI) para guiar una intervención quirúrgica en un bucle cerrado que puede incluir el seguimiento de la deformación del tejido y el movimiento del objetivo, la localización de la instrumentación y la supervisión de la administración de la terapia.

Con el uso clínico cada vez más extendido de la RM, los sistemas robóticos compatibles con la RM han sido anunciados como un nuevo enfoque para ayudar a los procedimientos de intervención y permitir a los médicos tratar a los pacientes con mayor precisión y eficacia. El despliegue de sistemas robóticos sinergiza la capacidad visual de la RM y la capacidad de manipulación de la asistencia robótica, lo que da lugar a una arquitectura quirúrgica de bucle cerrado.



Figura 10. Intervención quirúrgica pulmonar con robot DaVinci

Los robots quirúrgicos han sido ampliamente investigados para una amplia gama de procedimientos quirúrgicos debido a las ventajas de la mejora de la precisión, la capacidad de detección, el escalado de movimiento y la reducción de temblores, por nombrar algunas (Figura 10).

Aunque la enfermedad o patología subyacente puede ser la misma en todos los pacientes, el enfoque de la intervención para tratarla puede variar significativamente entre ellos. Esto es especialmente cierto en el caso de las intervenciones endovasculares, en las que cada caso plantea sus propios retos. De ahí que sea fundamental desarrollar sistemas robóticos quirúrgicos específicos para cada paciente a fin de maximizar las ventajas de la cirugía asistida por robot.

La fabricación de robots específicos para cada paciente puede ser un reto para procedimientos complejos y, además, el tiempo necesario para construirlos puede ser un desafío. Para superar este reto, la fabricación aditiva, es decir, la impresión en 3D, es una solución prometedora. La impresión en 3D permite fabricar piezas complejas con precisión y eficacia. Aunque las técnicas de impresión en 3D se han investigado para aplicaciones médicas generales, los robots quirúrgicos específicos para pacientes están actualmente en sus inicios.

La neurocirugía guiada por resonancia magnética no sólo representa un reto técnico, sino una transformación de la coordinación convencional entre manos y ojos a operaciones de navegación interactivas. En el futuro, las imágenes basadas en la multimodalidad se fusionarán en un único modelo, en el que la anatomía y los cambios patológicos se distinguirán e integrarán a la vez en el mismo marco intuitivo.

Los objetivos a largo plazo de mejorar los procedimientos quirúrgicos y los resultados correspondientes, reducir los costes y lograr un uso amplio pueden alcanzarse con un enfoque doble:

1. Mejorar la presentación de la información de las imágenes preoperatorias e intraoperatorias en tiempo real.
2. Integrar la tecnología de imagen y tratamiento en los sistemas de administración de terapias.

El desarrollo tecnológico se ha centrado recientemente en la mejora de nuestra capacidad para comprender y aplicar las imágenes médicas y los sistemas de imagen. Entre las áreas de investigación activa se encuentran el procesamiento de imágenes, el análisis de imágenes basado en modelos, la deformación de modelos, el registro en tiempo real, la obtención de imágenes en 3D (las llamadas "cuatro dimensiones") en tiempo real y la integración y presentación de información de imágenes y sensores en el quirófano.

Entre los elementos clave de la matriz técnica también se encuentran las plataformas de visualización y presentación y el software relacionado para la información y la presentación, la comprensión de imágenes basada en modelos, el uso de clústeres informáticos para acelerar el cálculo (es decir, algoritmos con cálculo particionado para optimizar el rendimiento), y dispositivos y sistemas avanzados para el seguimiento de dispositivos 3D (navegación).

Las aplicaciones clínicas actuales están incorporando con éxito información basada en imágenes en tiempo real y/o continuamente actualizada para la visualización directa intraoperatoria. Además de utilizar los sistemas de imagen tradicionales durante la cirugía, prevemos un uso optimizado de la tecnología de marcadores moleculares, medidas directas de caracterización de los

tejidos (es decir, mediciones ópticas y/o imágenes) y la integración de la próxima generación de dispositivos quirúrgicos y terapéuticos (incluidos los sistemas robóticos guiados por imágenes). Aunque esperamos que los principales impulsos clínicos de la terapia guiada por RM sigan siendo la neurocirugía, con la posible incorporación de otras áreas como la cirugía ortopédica, de cabeza, cuello y columna vertebral, también prevemos un mayor uso de los métodos de ablación térmica focal guiados por imagen (por ejemplo, láser, crioablación, ultrasonido focalizado de alta intensidad). Al validar la eficacia de la terapia guiada por RM en procedimientos clínicos específicos y perfeccionar al mismo tiempo la tecnología que la sustenta, esperamos que muchos neurocirujanos acaben adoptando la RM como su opción de imagen intraoperatoria.

Está claro que la RM intraoperatoria ofrece varias ventajas palpables. Las más importantes son la mejora de los resultados médicos, la reducción de la duración de la hospitalización y la realización de procedimientos mejores y más rápidos con menos complicaciones. Sin embargo, algunos obstáculos económicos y prácticos impiden el uso a gran escala de la RM intraoperatoria. Aunque se ha realizado un esfuerzo técnico concertado para aumentar la relación beneficio/coste mediante la recopilación de información más precisa, el diseño de dispositivos de tratamiento más localizados y menos invasivos, y el desarrollo de mejores métodos para orientar y posicionar los efectores finales de la terapia, es necesario seguir investigando. De hecho, el impulso para mejorar y actualizar la tecnología es continuo. Concretamente, en el contexto de la representación en tiempo real de la anatomía del paciente, hemos mejorado la calidad y la utilidad de la información presentada al cirujano, lo que, a su vez, contribuye a obtener resultados quirúrgicos más satisfactorios.

También podemos esperar mejoras en los sistemas de imagen intraoperatoria, así como un mayor uso de sensores no relacionados con la imagen y de la robótica para facilitar un uso más generalizado de la RM intraoperatoria.

Otra especialidad donde se están utilizando las reconstrucciones 3D para asistir la cirugía robótica es en Urología y en concreto en las nefrectomías parciales asistidas por robótica.

El desarrollo de un enfoque médico y quirúrgico personalizado y específico para cada paciente se está convirtiendo en objeto de una intensa investigación. En la cirugía oncológica renal, en la que la comprensión clara de la anatomía quirúrgica específica de cada caso se considera un punto clave para optimizar los resultados perioperatorios, esta filosofía ha adquirido una importancia creciente. Recientemente, los importantes avances en las tecnologías de modelado virtual en 3D han alimentado el interés por su aplicación en el campo de la cirugía robótica mínimamente invasiva para los tumores renales.

El uso de modelos virtuales 3D ha sido probado en diferentes escenarios, incluyendo la indicación y planificación quirúrgica, la guía intraoperatoria y el entrenamiento. Actualmente se dispone de varios estudios sobre la aplicación de esta tecnología para la planificación quirúrgica, demostrando el impacto en los resultados clínicos como la recuperación de la función renal, mientras que las experiencias relativas a su aplicación intraoperatoria para la navegación son todavía experimentales.

Una de las últimas innovaciones en este campo es el desarrollo de programas informáticos especializados capaces de superponer automáticamente los modelos virtuales 3D a la anatomía real, para realizar procedimientos de realidad aumentada.



## Planteamiento del trabajo



La visión tridimensional (3D) de estructuras anatómicas desempeña un papel fundamental en el aprendizaje de la anatomía humana debido a su capacidad para proporcionar una comprensión más completa y profunda de la organización y relación de las estructuras en el cuerpo humano.

La anatomía humana es inherentemente tridimensional, lo que significa que las estructuras anatómicas se entrelazan en un espacio tridimensional. La visión 3D permite a los estudiantes ver y comprender la disposición real de las estructuras en el cuerpo, lo que facilita la comprensión de cómo interactúan entre sí.

La visión 3D permite a los estudiantes ver las estructuras en su contexto anatómico natural. Esto es esencial para comprender las relaciones espaciales entre órganos, tejidos y sistemas, lo que es crucial para la práctica clínica y la cirugía.

La anatomía humana puede variar significativamente de persona a persona. La visión 3D permite a los estudiantes explorar esta variabilidad de manera más efectiva al observar modelos tridimensionales de diferentes anatomías, lo que les prepara mejor para enfrentar casos clínicos diversos.

La anatomía es una disciplina que a menudo implica conceptos y estructuras complejas. La visión 3D puede ayudar a simplificar la comprensión de estos conceptos al permitir que los estudiantes descompongan estructuras tridimensionales en componentes más manejables.

La visión 3D crea una experiencia de aprendizaje más memorable al permitir que los estudiantes vean y manipulen estructuras anatómicas desde diferentes ángulos y perspectivas. Esto puede ayudar en la retención de información a largo plazo.

Los modelos 3D de anatomía humana pueden utilizarse para la práctica de procedimientos médicos y quirúrgicos antes de realizarlos en pacientes reales. Esto mejora la destreza y la seguridad de los estudiantes en un entorno controlado.

La visión 3D también es valiosa para el diagnóstico médico, ya que permite a los profesionales de la salud visualizar y analizar patologías y anomalías anatómicas en detalle antes de tomar decisiones clínicas importantes.

Los avances en la tecnología, como la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA), han llevado la visión 3D de anatomía humana a un nivel superior. Estas tecnologías permiten a los estudiantes interactuar de manera más inmersiva con modelos anatómicos tridimensionales, lo que enriquece aún más su experiencia de aprendizaje.

Por tanto, ante estas breves apreciaciones previas podemos señalar que la visión 3D de estructuras anatómicas en el aprendizaje de la anatomía humana es esencial para compren-

der la complejidad y la variabilidad de la anatomía del cuerpo humano. Facilita la comprensión de las relaciones espaciales, mejora la retención de información y prepara a los estudiantes de ciencias de la salud para su futura práctica clínica. Además, las tecnologías avanzadas han ampliado las posibilidades de aprendizaje interactivo y la simulación práctica en este campo (Perandini y cols., 2010; García Fenoll, 2010; Tierny, 2015; Malmberg, y cols., 2017; Figueiredo y cols., 2018).

Existen programas informáticos docentes de visión en 3D diseñados específicamente para el estudio de estructuras anatómicas del aparato respiratorio. Estos programas son valiosos recursos para estudiantes y profesionales de la salud que desean aprender y enseñar anatomía de manera efectiva. Entre los programas más destacados podemos señalar los siguientes:

- **Visible Body:** el cual ofrece una suite de productos, incluido "Human Anatomy Atlas", que proporciona modelos 3D altamente detallados del cuerpo humano, incluyendo el aparato respiratorio. Permite a los usuarios explorar, desmontar y estudiar las estructuras anatómicas de manera interactiva.
- **Complete Anatomy:** este software permite explorar el cuerpo humano en 3D con una representación detallada de las estructuras anatómicas, incluyendo el sistema respiratorio. Los usuarios pueden desmontar las estructuras, realizar disecciones virtuales y acceder a contenido educativo complementario.
- **Primal Pictures:** ofrece "Anatomy & Physiology Online", que incluye modelos 3D interactivos del cuerpo humano, incluyendo el sistema respiratorio. Los usuarios pueden explorar las estructuras en detalle y acceder a información educativa adicional.
- **Zygote Body:** anteriormente conocido como Google Body, es una herramienta en línea que proporciona modelos 3D del cuerpo humano. Los usuarios pueden seleccionar sistemas específicos, como el respiratorio, y explorar las estructuras con gran detalle.
- **BioDigital Human:** este programa permite explorar el cuerpo humano en 3D y ofrece una amplia variedad de recursos educativos interactivos. Incluye modelos precisos del sistema respiratorio que los usuarios pueden manipular y estudiar.
- **Biodigital Anatomy:** es una herramienta en línea que ofrece modelos 3D del cuerpo humano, incluyendo el sistema respiratorio. Los usuarios pueden explorar las estructuras, agregar y quitar capas anatómicas, y acceder a descripciones detalladas.

Esta lista de programas informáticos puede ser aún más extensa, pero sin duda estos que hemos señalado son los más relevantes en la actualidad. Estos programas docentes de visión en 3D son útiles para el aprendizaje interactivo de la anatomía del aparato respiratorio y otras estructuras del cuerpo humano. Permiten a los estudiantes y educadores explorar las estructuras en detalle, realizar disecciones virtuales y mejorar su comprensión de la anatomía de manera efectiva.

Por otra parte, en los últimos años empieza a tener fuerza en la docencia las tecnologías de realidad virtual. La utilización de recursos tecnológicos con realidad virtual y visión 3D para el aprendizaje de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio es fundamental para mejorar la comprensión y la habilidad de interpretación de imágenes radiológicas, así como para preparar a los estudiantes y profesionales de la salud para el abordaje quirúrgico robotizado. Estas aplicaciones tecnológicas en la docencia de la formación médica constituyen un entorno

Inmersivo de aprendizaje donde los estudiantes pueden explorar las estructuras respiratorias tridimensionales de manera interactiva y realista. Pueden “sumergirse” en el interior del cuerpo humano. Los modelos 3D de alta resolución permiten una exploración detallada de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio, incluyendo bronquios, pulmones, tráquea y vasos sanguíneos, lo que facilita la comprensión de su ubicación y relación. Los estudiantes pueden manipular y desmontar las estructuras a su propio ritmo, lo que facilita la comprensión de las relaciones espaciales y las diferencias anatómicas entre individuos.

Es de gran importancia el conocimiento anatómico para la posterior interpretación de imágenes radiológicas de tomografía computarizada y resonancia magnética. El conocimiento anatómico sólido permite a los profesionales de la salud interpretar imágenes radiológicas con mayor precisión (Abildgaard y cols., 2010; Robison y cols., 2011; Blum y cols., 2012; Johnson y cols., 2016; Tabernerico Rico y cols., 2017; Boonbrahm y cols., 2018; Adams y cols., 2019). Saber cómo se ven las estructuras en 3D ayuda a identificar anomalías y patologías con mayor facilidad. Comprender la ubicación de las estructuras, permite a los radiólogos marcar con precisión las áreas de interés en las imágenes, lo que es crucial para el diagnóstico y la planificación del tratamiento. Un conocimiento anatómico sólido disminuye la posibilidad de errores en la interpretación de imágenes, lo que es crítico para la seguridad del paciente.

Además, la visualización en 3D de las estructuras anatómicas permite a los facultativos la preparación para el Abordaje Quirúrgico Robotizado; pudiendo llevar a cabo una planificación quirúrgica previamente de forma precisa.

La RV y la visión 3D permiten a los cirujanos practicar la planificación quirúrgica en un entorno virtual. Pueden simular procedimientos de abordaje respiratorio y comprender cómo se relacionan las estructuras antes de la cirugía real. Los sistemas de RV pueden proporcionar un entrenamiento realista en cirugía robótica, permitiendo a los cirujanos practicar movimientos precisos y coordinación con robots quirúrgicos antes de operar a pacientes reales. De esta forma, la preparación a través de procedimientos de RV puede reducir los riesgos quirúrgicos al mejorar la familiaridad del cirujano con la anatomía específica del paciente y el funcionamiento del robot quirúrgico.

En resumen, la utilización de RV y visión 3D en la enseñanza de la anatomía no solo mejora la comprensión de las estructuras, sino que también prepara a los profesionales de la salud para interpretar imágenes radiológicas con precisión y llevar a cabo procedimientos quirúrgicos robotizados de manera más segura y efectiva. Estas tecnologías desempeñan un papel crucial en la formación y la práctica clínica avanzada en el campo de la medicina respiratoria.

Para llevar a cabo reconstrucciones en tres dimensiones de estructuras anatómicas, desde secciones seriadas de RM y TC, es preciso llevar a cabo técnicas de segmentación de las estructuras morfológicas a reconstruir (Gamsu et al., 1983; Webb y cols., 1984; Thompson and Stanford, 2000; Venkatesh y cols., 2001; Abildgaard y cols., 2010).

La segmentación de estructuras anatómicas desde secciones seriadas de imágenes en formato DICOM de Tomografía Computarizada y Resonancia Magnética es un proceso esencial en la medicina y la investigación médica. Esta tarea se puede realizar de dos formas principales: manual y automática.

1. *Segmentación Manual*: la segmentación manual implica que un profesional de la salud o un investigador identifica y delimita las estructuras de interés en cada corte de la imagen de manera individual. Esto se hace tradicionalmente utilizando software especializado

que permite dibujar contornos alrededor de las estructuras, como órganos, tumores o vasos sanguíneos. Aunque es preciso y controlado, este enfoque es laborioso y consume tiempo, lo que lo hace menos eficiente y propenso a errores humanos.

2. *Segmentación Automática*: la segmentación automática utiliza algoritmos computacionales avanzados para identificar y delimitar las estructuras de interés en las imágenes DICOM de TC y RM. Estos algoritmos pueden basarse en diversas técnicas, como el umbralado, la detección de bordes, el aprendizaje profundo (redes neuronales convolucionales) y la segmentación basada en regiones. A medida que la inteligencia artificial y el aprendizaje automático avanzan, estos métodos automáticos se han vuelto más precisos y rápidos. Sin embargo, su rendimiento aún puede variar según la complejidad de las estructuras y la calidad de las imágenes. Ambos enfoques tienen sus ventajas y desventajas. La segmentación manual es precisa, pero requiere tiempo y esfuerzo humano, mientras que la segmentación automática es más rápida, pero puede requerir ajustes y validación manual. En la práctica clínica y la investigación médica, a menudo se utiliza una combinación de ambos métodos para lograr resultados precisos y eficientes en la extracción de información anatómica de imágenes de TC y RM.

Nuestro cuerpo y sus estructuras son inherentemente tridimensionales. Ver estas estructuras en 3D permite a los estudiantes comprender su forma, tamaño y relaciones espaciales de manera mucho más precisa que a través de imágenes bidimensionales. Como ha quedado reflejado al inicio de este planteamiento del trabajo, la visualización en 3D permite a los estudiantes contextualizar las estructuras en su posición y relación con otras estructuras del cuerpo. Esto facilita la comprensión de la anatomía en un contexto más realista. Los estudios han demostrado que las representaciones en 3D ayudan a mejorar la retención del conocimiento. Los estudiantes tienden a recordar mejor las estructuras cuando las han explorado en tres dimensiones.

Estas consideraciones que hemos señalado previamente nos han orientado hacia la reconstrucción tridimensional de estructuras anatómicas del aparato respiratorio debido a sus beneficios potenciales en la investigación médica, la planificación de procedimientos clínicos y la educación médica.

Por tanto, nos hemos planteado las siguientes preguntas:

¿La reconstrucción tridimensional de estructuras anatómicas del aparato respiratorio mejora el estudio de su morfología?

¿En qué medida la visualización tridimensional de las vías respiratorias y los pulmones podría ayudar en la planificación de procedimientos quirúrgicos, como la resección de tumores pulmonares con abordajes quirúrgico robotizados?

¿Cuáles son las ventajas de utilizar modelos 3D del aparato respiratorio para la simulación y el entrenamiento de procedimientos médicos, y cómo podrían contribuir a la formación de médicos y cirujanos?

¿Qué tecnologías y herramientas son más adecuadas para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio?

¿Cómo podría la reconstrucción tridimensional de estructuras anatómicas del aparato respiratorio contribuir a la comprensión e identificación radiológica de patologías respiratorias?

Estas preguntas específicas nos ayudarán a evaluar la conveniencia y los beneficios de realizar reconstrucciones 3D de estructuras anatómicas del aparato respiratorio en el ámbito médico y académico.

Teniendo en cuenta estas consideraciones previas se plantea un trabajo de Tesis Doctoral que nos permita el desarrollo de un sistema informático integrado, basado en técnicas avanzadas de imágenes médicas (TC y RM), visión 3D y abordaje quirúrgico robotizado, pretende mejorar significativamente la enseñanza de la anatomía del aparato respiratorio, proporcionando a los estudiantes una comprensión más profunda y precisa, lo que a su vez se traducirá en una mejora en la capacidad de planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos respiratorios. Por ello, con nuestro trabajo de Tesis Doctoral buscamos los siguientes objetivos:

### Objetivo General

Se pretende desarrollar un sistema informático interdisciplinario integrando tecnologías de imágenes médicas, visión 3D y robótica quirúrgica en una plataforma educativa. Con ello se busca mejorar la comprensión de la anatomía del aparato respiratorio que facilite a los estudiantes una comprensión tridimensional detallada de la anatomía de este sistema corporal. Por otra parte, pretendemos con este trabajo fomentar la habilidad en la planificación quirúrgica con técnicas robotizadas, que permitan la identificación de las estructuras anatómicas. Con ello, además, se persigue que los estudiantes puedan llevar a cabo la práctica de planificaciones de procedimientos quirúrgicos respiratorios de manera realista y segura; optimizando la ejecución de procedimientos quirúrgicos. De esta forma, se busca capacitar a los estudiantes para llevar a cabo procedimientos quirúrgicos respiratorios de manera más precisa y eficiente.

Entre los Objetivos Específicos destacamos los siguientes:

1. Desarrollar un banco de datos de imágenes médicas, tanto de TAC como de RM de alta calidad del aparato respiratorio humano.
2. Crear modelos 3D interactivos de las estructuras respiratorias para una visualización más detallada y en cualquier posición espacial, embebidas dentro de las imágenes radiológicas.
3. Implementar un sistema de planificación quirúrgica que permita a los estudiantes practicar procedimientos virtuales; integrando un sistema de abordaje quirúrgico robotizado.
4. Evaluar el impacto educativo, mediante encuestas de satisfacción efectuadas a los alumnos; para evaluar la eficacia de estos recursos tecnológicos en la mejora del conocimiento y las habilidades de los estudiantes en anatomía y cirugía.



## Material y métodos



## 1. Adquisición de imágenes seccionales

Para la adquisición de las imágenes radiológicas se exploró a un paciente de 40 años de edad, sin patología manifiesta, que sirvieron de adiestramiento y reconocimiento para la reconstrucción posterior de las estructuras anatómicas a estudio.

La exploración radiológica se llevó a cabo, previo consentimiento informado y sin remuneración económica por su participación, en los servicios de radiodiagnóstico del Hospital Clínico Universitario de Salamanca.

Además, se emplearon secciones de cadáver, procedentes del *Visible Human Project*.

Se hicieron disecciones de cadáver para su correlación tridimensional tras la reconstrucción 3D de nuestro desarrollo informático docente.

a.- Para las **imágenes de Resonancia Magnética** se obtuvieron imágenes de alta resolución potenciadas en diferentes secuencias, T1, T2 y en densidad protónica (DP) en los tres planos ortogonales (axial, coronal y sagital) de la región torácica para el estudio anatómico global del aparato respiratorio (Figuras 11, 12, 13 y 14).

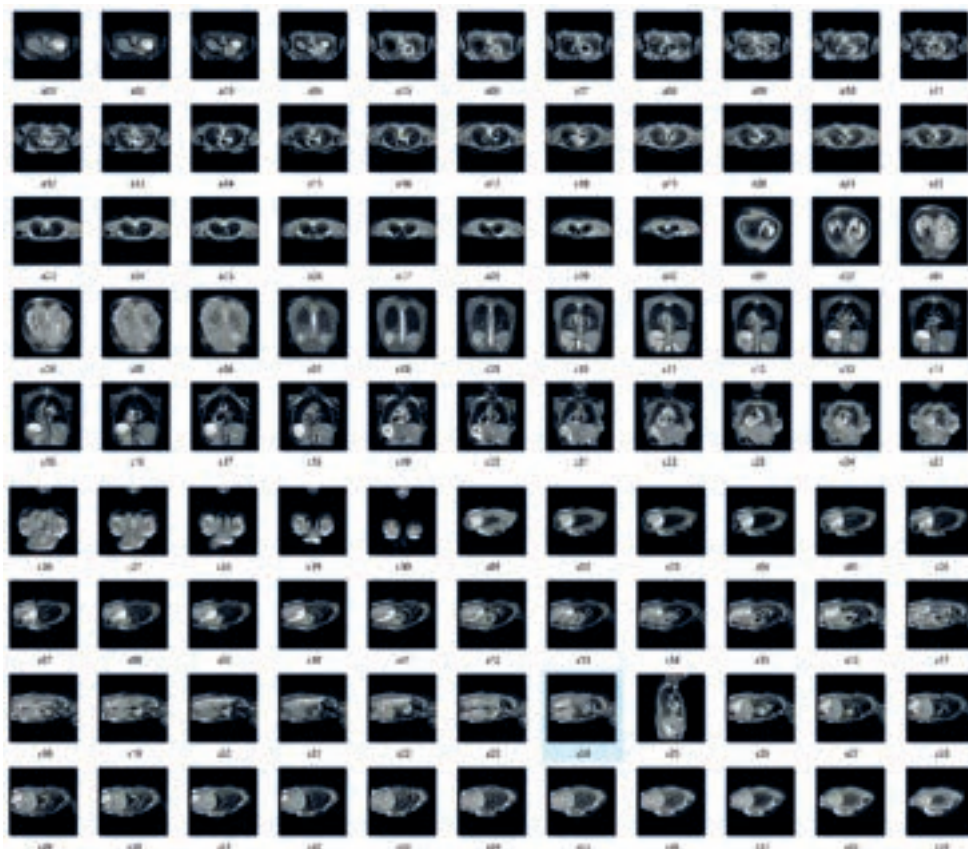


Figura 11. Secciones seriadas de RM en los tres planos del espacio (axiales, coronales y sagitales)

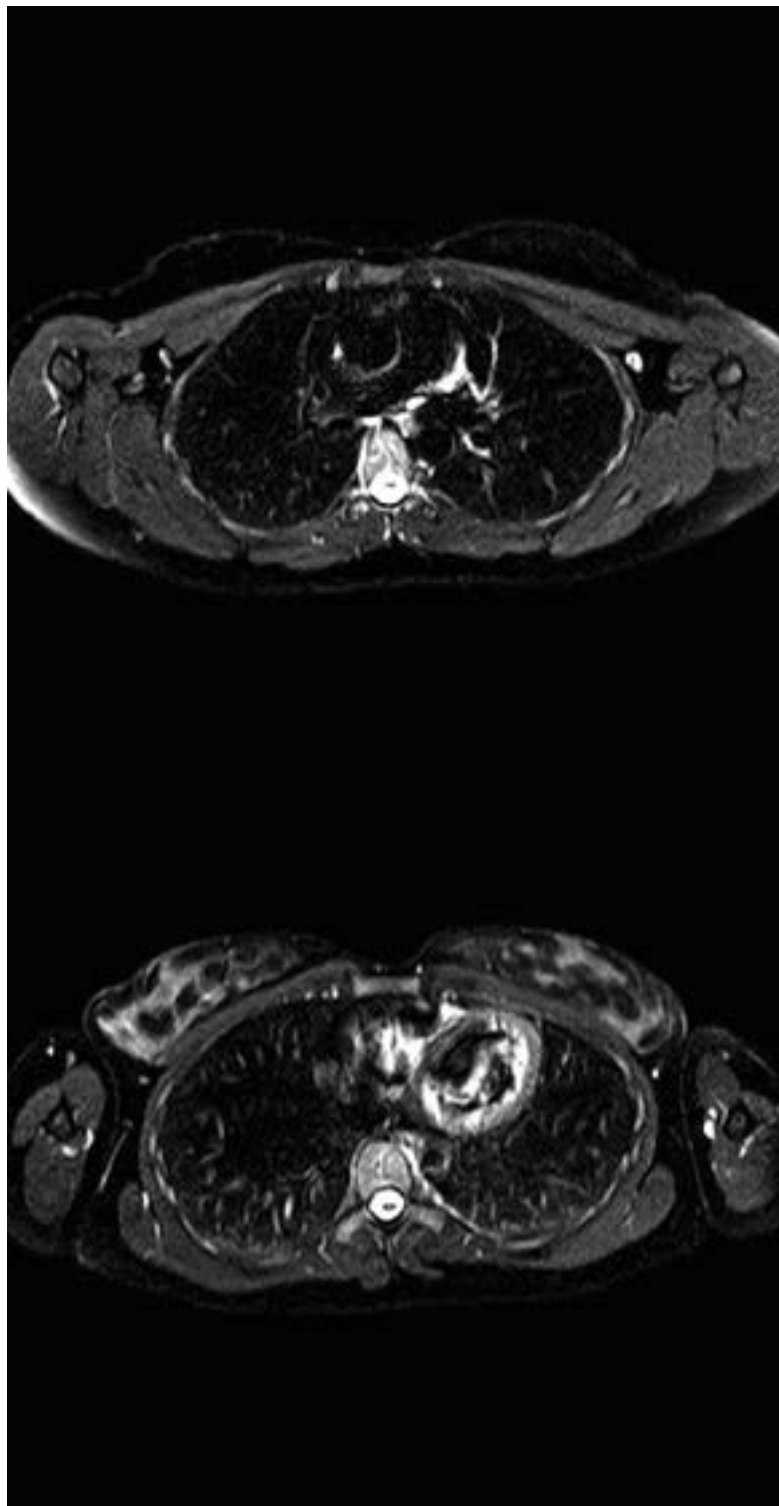


Figura 12. Ejemplos de secciones axiales de RM empleadas en nuestro estudio para segmentación manual

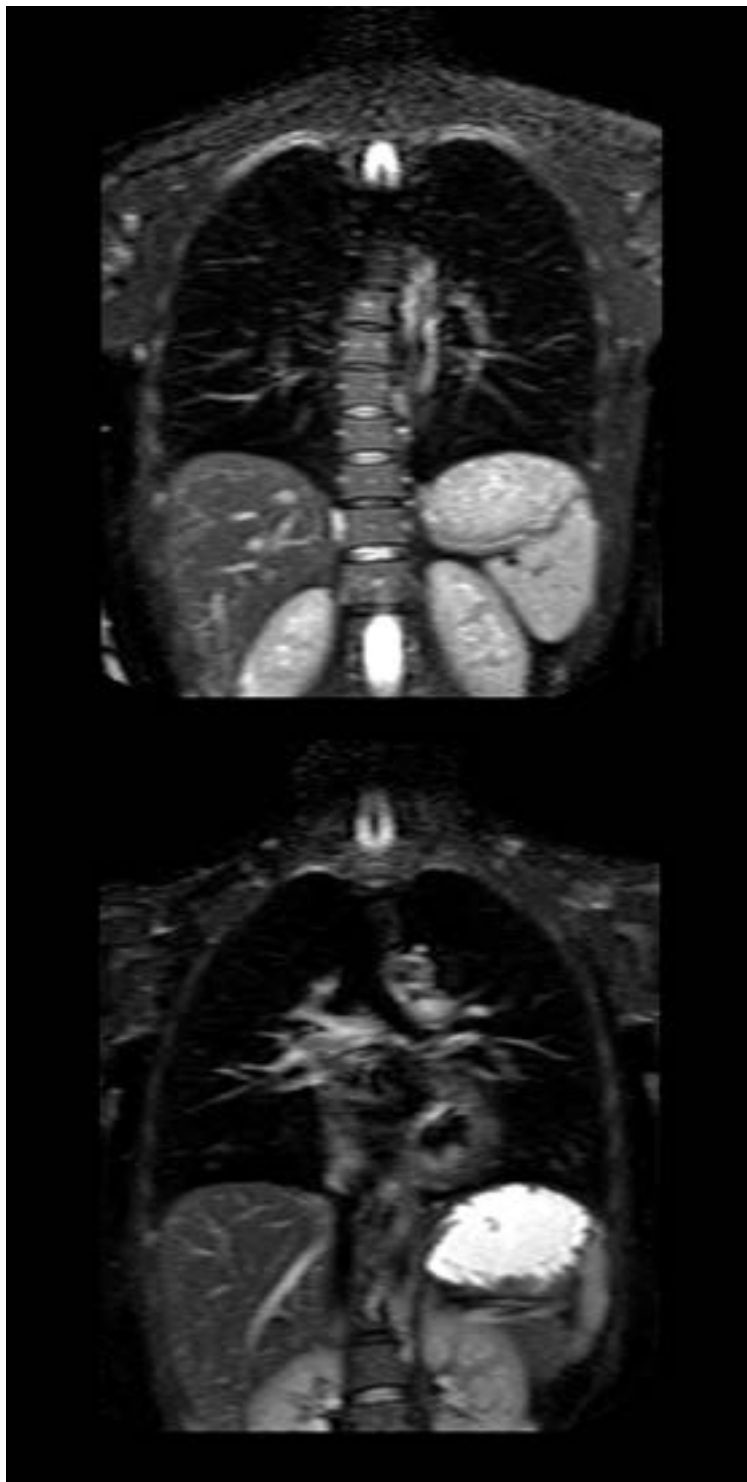


Figura 13. Ejemplos de secciones coronales de RM empleadas en nuestro estudio para segmentación manual

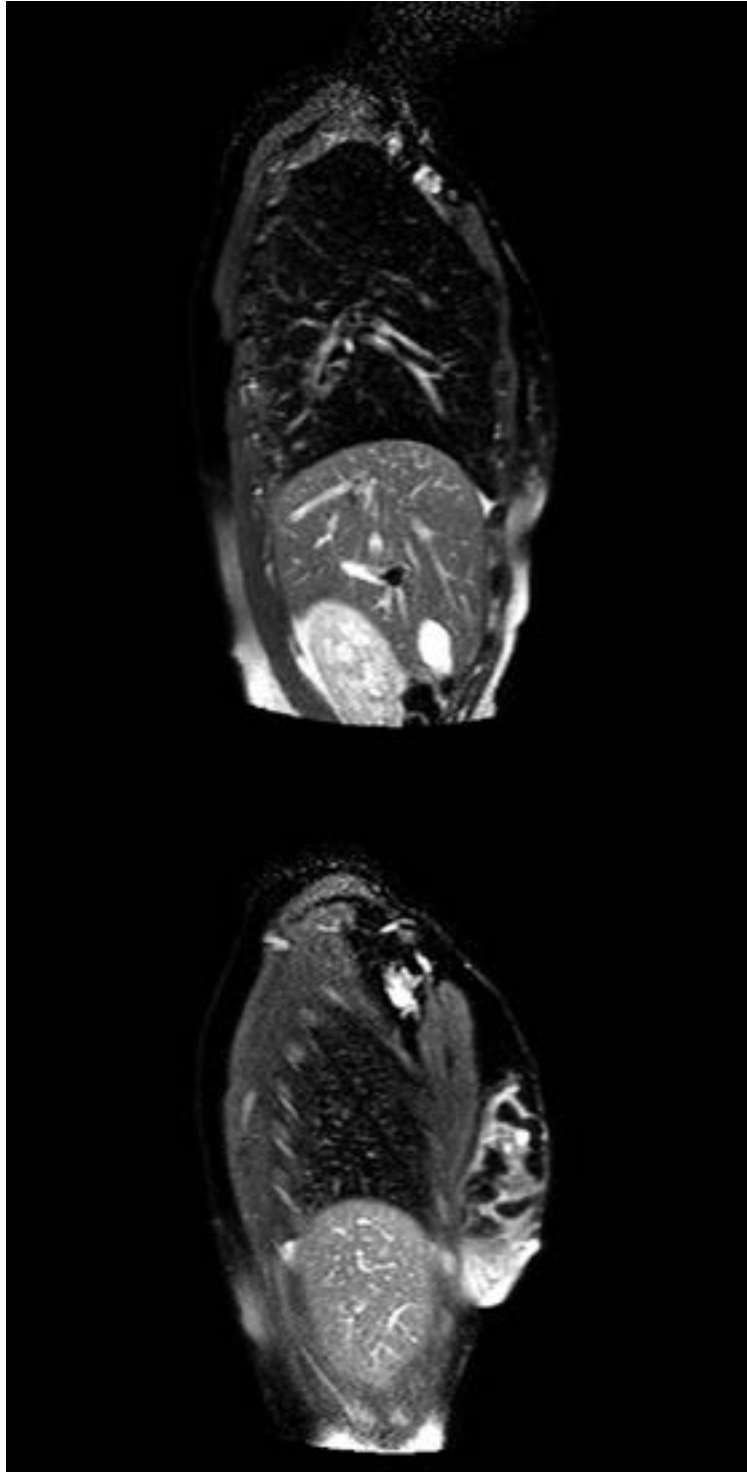


Figura 14. Ejemplos de secciones sagitales de RM empleadas en nuestro estudio para segmentación manual

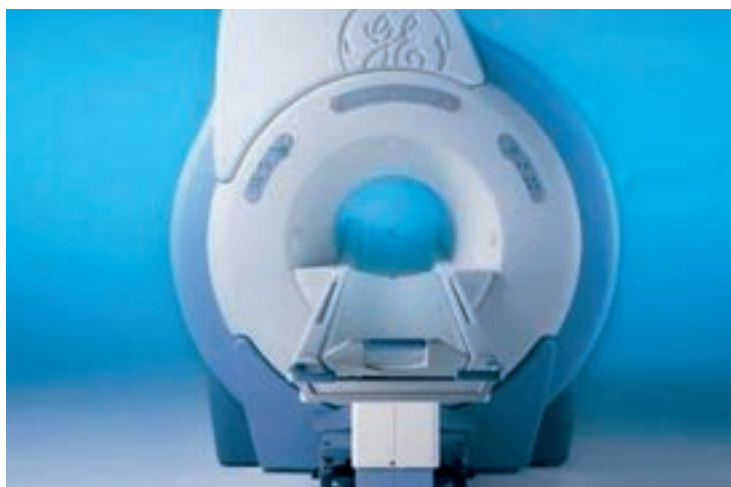


Figura 15. Equipo de Resonancia Magnética, marca General Electric

No obstante, para el procedimiento informático únicamente se adquirieron imágenes de alta resolución, con un espaciado de 0.5 mm, potenciadas en DP (densidad protónica), de la región torácica. Se utilizó un equipo de 1.5 Teslas (marca Signa General & Electric) (Figura 15). Se obtuvieron tres RM ortogonales, cada una en un plano espacial diferente (Figuras 16, 17 y 18).

El protocolo de adquisición ha consistido en secuencias 2D de la región torácica con los siguientes parámetros comunes a las tres orientaciones: repetition time (TR) = 3220; echo time (TE) = 14; 3-mm slice thickness; matrix = 512 x 512; flip angle = 150°. Los parámetros de adquisición específicos a cada orientación fueron: planos axial y sagital: slice spacing = 3.6 mm; pixel spacing = 0.547mm x 0.547mm; plano coronal: slice spacing = 4.8 mm; pixel spacing = 0.586mm x 0.586mm.

A partir de los ficheros raw data DICOM se reconstruyó, para cada orientación, un volumen DP, que fue salvado en formato ANALYZE 7.5 mediante el software de libre distribución MRIcro (Nottingham, UK).

Una secuencia flash-3D de la misma región fue también adquirida (repetition time = 19; echo time = 3.25; 2-mm slice thickness; matrix = 256 x 256; flip angle = 90°; pixel spacing = 0.156mm x 0.156mm, resultando en un volumen de 256x104x256 slices)

Esta image-volume ha sido exclusivamente utilizada para la verificación de las estructuras identificadas en la DP

Con la finalidad de homogeneizar al máximo las dimensiones entre los tres volúmenes, éstos fueron alineados, tomando como referencia el adquirido en el plano axial. Seguidamente se redimensionaron, aplicando un filtro Lanczos, resultando en un volumen axial de 600x560x30 slices (voxelsize= 0.5x0.5x3.5mm<sup>3</sup>), un volumen sagital de 30x560x560 slices (voxelsize 3.5x0.5x0.5mm<sup>3</sup>) y un volumen coronal de 600x28x560 slices (voxelsize 0.5x5.0x0.5 mm<sup>3</sup>). De cada uno de estos volúmenes se exportaron imágenes en formato PNG para su representación en un visor 3D (ver la sección visualización y renderización).

Así mismo, para facilitar la fase de modelización, los 3 volúmenes fueron redimensionamientos (*reslicing*), obteniéndose imágenes isotrópicas con vóxeles de 1 mm, es decir, con vóxeles que poseen el mismo tamaño en todas las dimensiones.

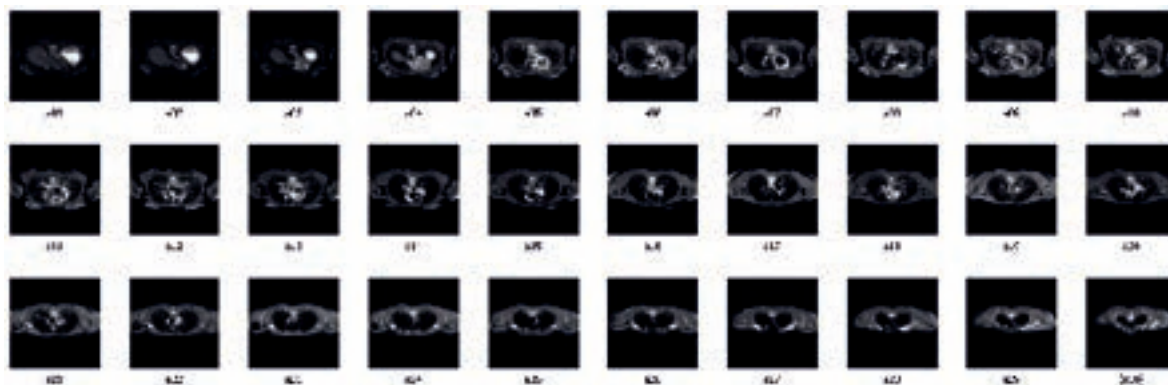


Figura 16. Secciones axiales seriadas de Resonancia Magnética, de la región torácica

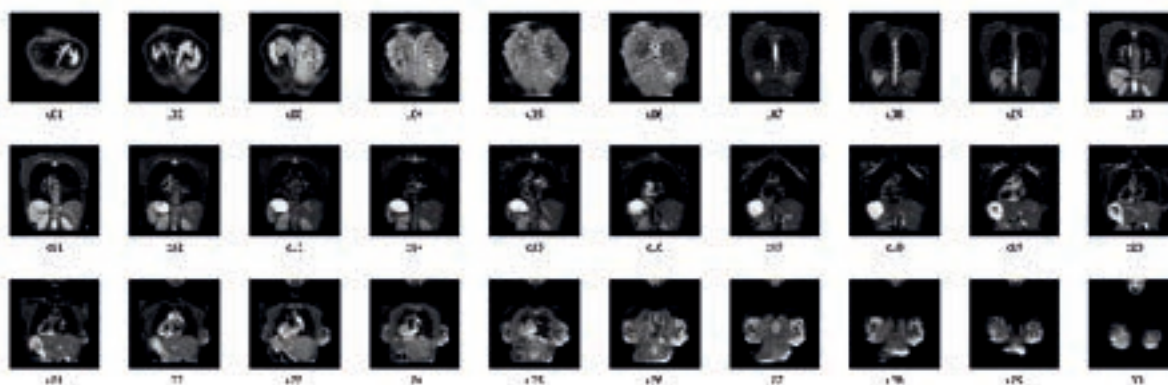


Figura 17. Secciones coronales seriadas de Resonancia Magnética, de la región torácica

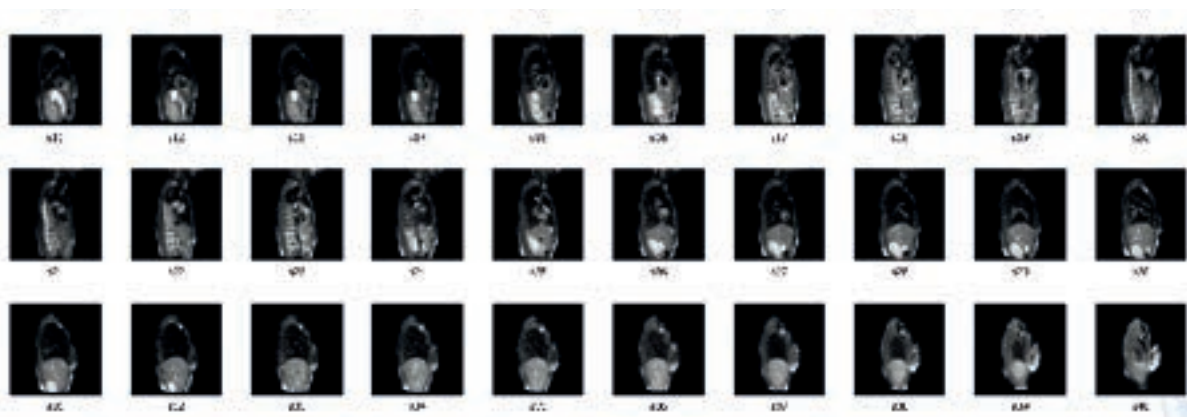


Figura 18. Secciones sagitales seriadas de Resonancia Magnética, de la región torácica

**b.- Para las imágenes de Tomografía Computarizada.** Para los estudios con Tomografía Computarizada se empleó un equipo de energía Dual, (Figura 19) la cual utiliza 2 niveles de energía generados por el tubo de Rayos X o por el uso combinado de dos tubos, que permite analizar tejidos o materiales de diferente densidad en el cuerpo (Figuras 20, 21 y 22).



Figura 19. Equipo de Tomografía Computarizada Dual de General Electric

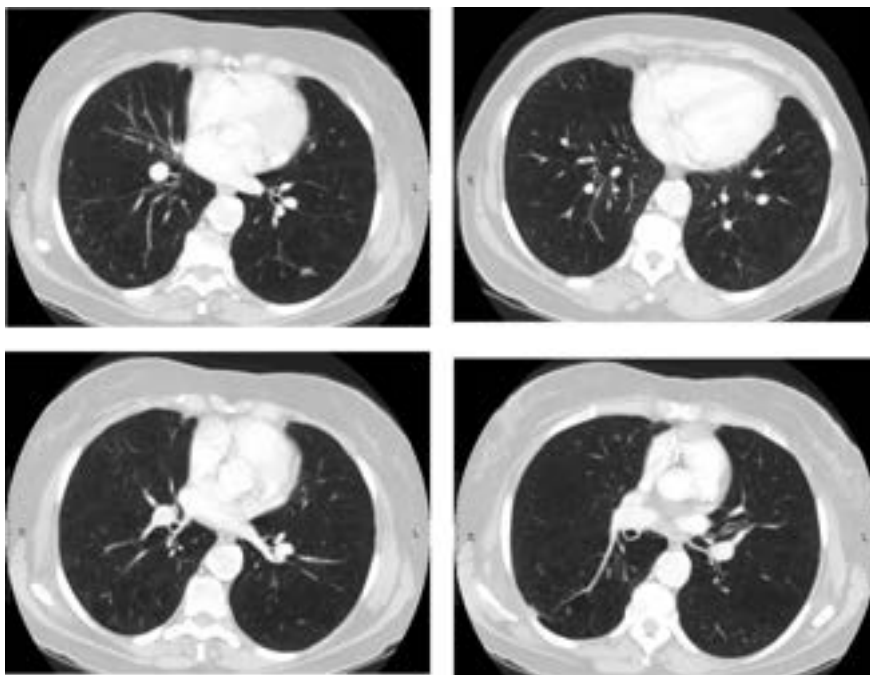


Figura 20. Secciones axiales de TC para la reconstrucción automática de estructuras del aparato respiratorio

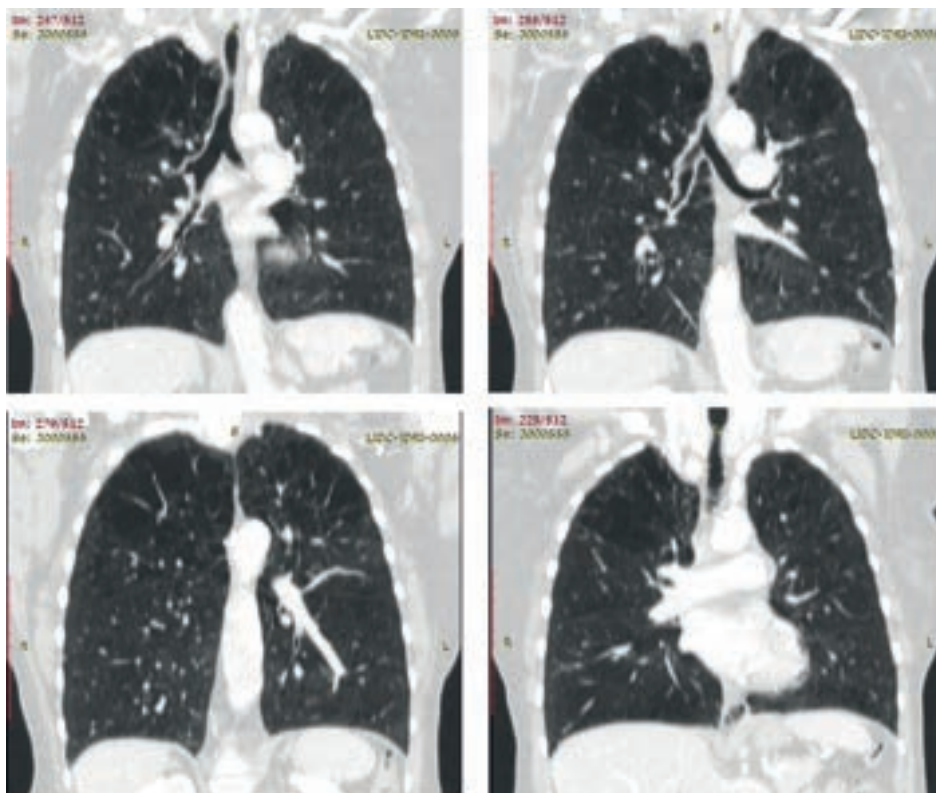


Figura 21. Secciones coroneales de TC para la reconstrucción automática de estructuras del aparato respiratorio

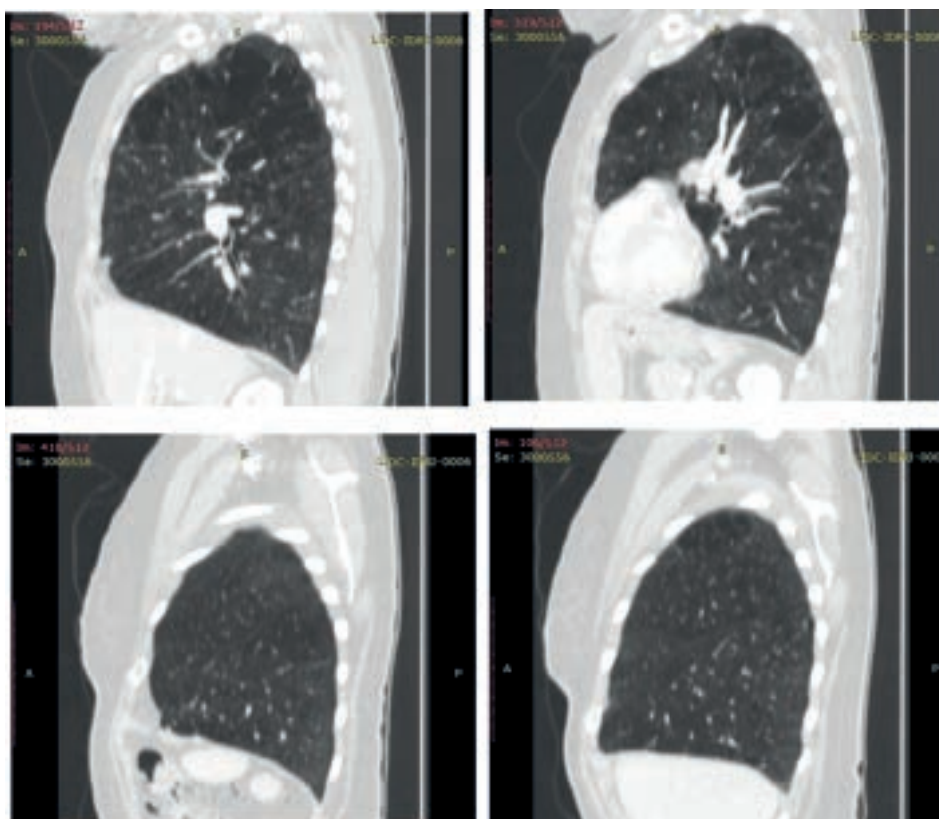


Figura 22. Secciones sagitales de TC para la reconstrucción automática de estructuras del aparato respiratorio

c.- Además, se utilizaron múltiples **secciones axiales** de 0,33 mm de espesor, de alta resolución, procedentes del **cadáver** de una mujer de 59 años, con un tamaño original de 576 x 768 px, obtenidas a partir del *Visible Human Male CD Version 2.0* de la *Nacional Library of Medicine* de EEUU, bajo licencia autorizada número HW1 020645 para uso con fines docentes y de investigación (Figuras 23 y 24).



Figura 23. Visible Human Project, de la Biblioteca Médica nacional de los Estados Unidos

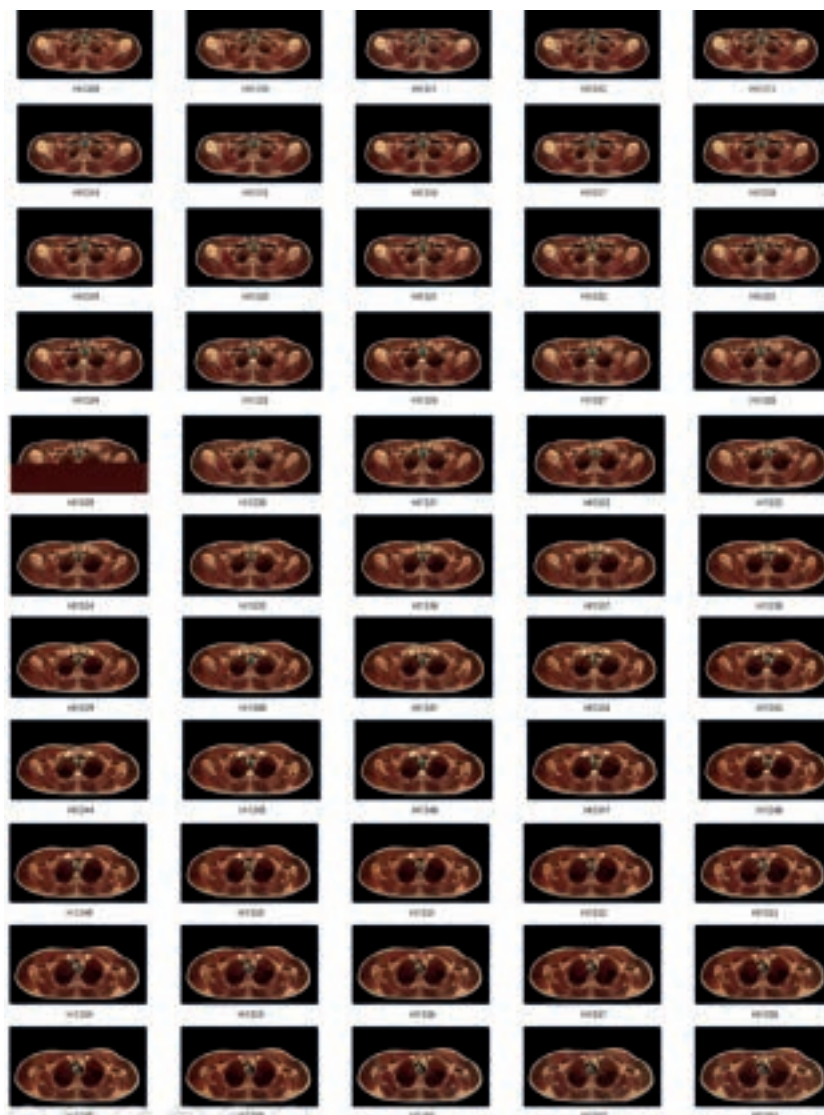


Figura 24. Secciones axiales seriadas de cadáver. Tomadas del Visible Human Project

## 2. Segmentación de estructuras anatómicas, delimitación de regiones de interés (ROIs) y reconstrucción de modelos tridimensionales

La segmentación y delimitación de las ROIs consistió en la subdivisión de cada imagen anatómica adquirida en regiones homogéneas. En nuestro caso se usó un kit de herramientas de aplicaciones de interacción de imágenes médicas que se desarrolló para ayudar a la manipulación de datos, registro y la segmentación.

Utilizamos el software Amira, el cual constituye una plataforma para la visualización, el procesamiento y el análisis de datos 3D y 4D. Este software ha sido desarrollado por Thermo Fisher Scientific en colaboración con el Zuse Institute Berlin (ZIB), y distribuido comercialmente por Thermo Fisher Scientific.



La segmentación se basó en la delimitación manual empleando el software Amira y la supervisión por parte de unos observadores expertos (anatomistas, radiólogos y cirujanos torácicos), aportándole más robustez que otros métodos de segmentación automática disponibles a través de algoritmos. Se procedió a la detección de bordes relativos a las diferentes estructuras anatómicas en base a su forma, tamaño y localización. Un buen proceso de detección de bordes facilita la elaboración de las fronteras de las estructuras 3D a modelar, con lo que el reconocimiento de objetos se facilita. Precisamente, dado que el cambio de intensidad o borde entre muchas de las estructuras que nos ocupan es difícilmente perceptible por la falta de nitidez en sus límites, empleamos estrategias de segmentación manuales, en vez de algoritmos de segmentación automáticos. El suavizado de bordes sí se realizó de forma automática, a través del módulo de Amira correspondiente, basándose en el promediado de los píxeles de una región.

El correcto etiquetado requiere cuidar la forma en la que se hayan escrito los nombres, incluyendo mayúsculas y minúsculas y asegurarse de que se hayan incluido todas ellas. Para ello, se creó un campo de etiquetado (*LabelField*) para cada uno de los conjuntos de datos con la lista completa de estructuras en orden jerárquico y a los que se les asignó un color diferente.

El proceso de segmentación fue muy laborioso y exigente en cuanto a consumo de tiempo, al realizarse de forma individual para cada conjunto de datos y bajo la supervisión de un anatomista, radiólogo y cirujanos torácicos. Los diferentes componentes se identificaron en las imágenes radiológicas, para su posterior labelado manual con diferentes códigos de colores mediante el software Amira.

Para la visualización de volúmenes en ordenadores convencionales se requirió un paso previo que consistió en la extracción de la superficie. Este paso redujo significativamente el peso de los datos y como resultado, también los tiempos de procesamiento requeridos para su visualización. Consistió en crear representaciones intermedias de la superficie en forma de

mallas poligonales, asociadas a las estructuras anatómicas seleccionadas, que contenían la información a partir de la cual se renderizaron las imágenes (Figura 25). En nuestro caso los elementos empleados para la composición de la superficie fueron estructuras poligonales.

Por otra parte, se realinearon las regiones de interés (ROIs) en los tres planos de referencia. La alineación supuso la incorporación de los diferentes conjuntos de datos originales, adquiridos desde diferentes orientaciones, a un sistema de coordenadas común. El registro consistió en la comparación y ajuste de la posición y orientación de los conjuntos de datos correspondientes a las imágenes, hasta que la información mutua de los conjuntos de datos se maximiza.

A partir de cada una de las regiones de interés resultantes se obtuvo un modelo de superficie compuesto por una malla mediante el procedimiento de marching cubes. A los modelos se aplicaron algoritmos de decimación para simplificarlos y suavizarlos. Finalmente se exportaron a formato DirectX.

Las imágenes seccionales y todos los modelos 3D de superficie obtenidos en la fase anterior, fueron visualizados en un visor específicamente desarrollado para esta aplicación informática, programado en Visual C++ y que incluye controles DirectX para la renderización de imágenes y modelos de malla poligonal.

El renderizado del volumen, consistió en la visualización de datos volumétricos a partir de imágenes correspondientes a las diferentes estructuras anatómicas, mediante la aplicación de color y textura.

El renderizado directo del volumen consistió en la visualización directa de la superficie de una estructura anatómica a partir de los datos del volumen. En este caso, la visualización resultó de la aplicación de un sofisticado algoritmo denominado *Proyección de Máxima Intensidad*, según el cual, se asignan parámetros de emisión y absorción de luz a cada punto del volumen. Esta simulación del paso de luz a través del volumen, hace posible mostrar los datos desde cualquier dirección sin construir modelos poligonales intermedios.

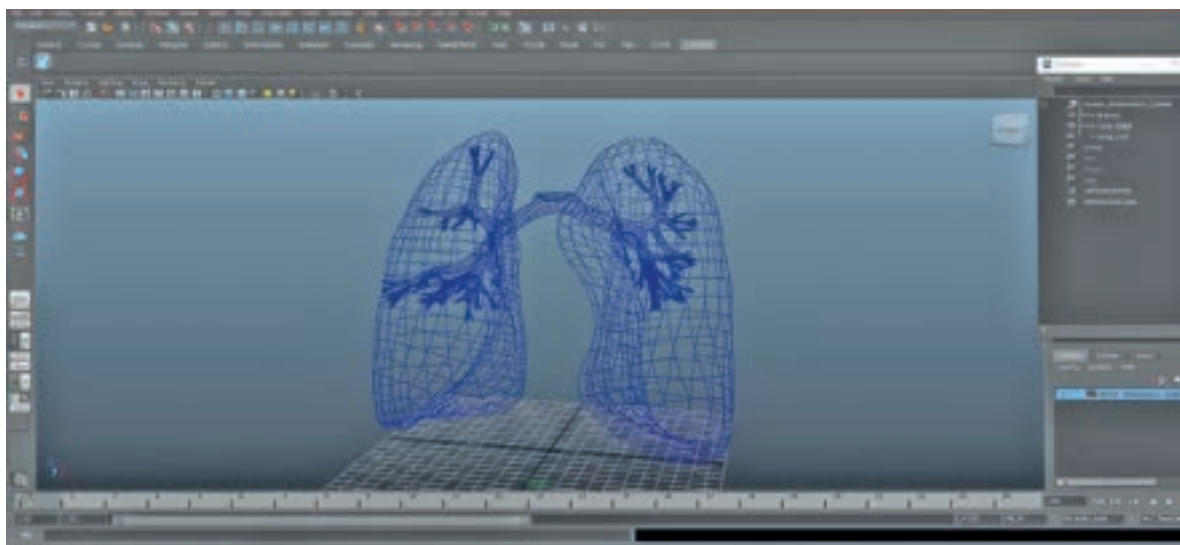


Figura 25. Modelado alámbrico o en malla poligonal, desde el software Amira

El algoritmo utilizado fue *Marching Cubes* que permitió la extracción de mallas poligonales de una isosuperficie a partir de vóxeles. Requiere dividir el espacio en vóxeles formados por los valores de intensidad de los 8 vértices del vóxel, correspondientes a los datos volumétricos originales (Figura 26).

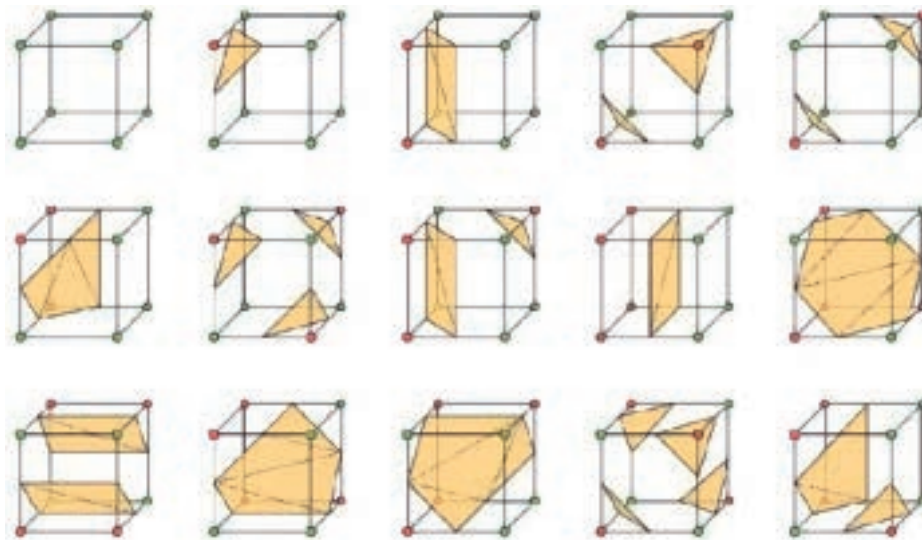


Figura 26. Generación de los modelos anatómicos en malla a partir del algoritmo *Marching Cubes*

El procedimiento de elaboración de modelos en malla a partir del algoritmo *Marching Cubes* fue seguido de la aplicación de determinados algoritmos con la intención de simplificarlos y suavizarlos (Figura 27).

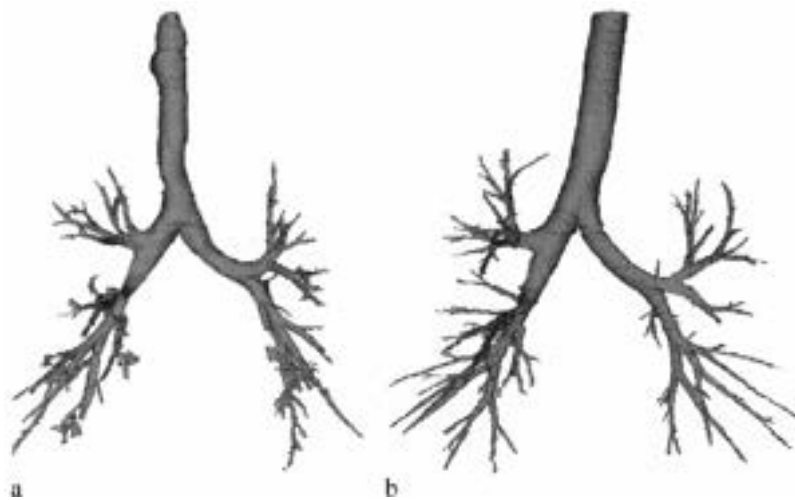


Figura 27. Aplicación de algoritmos para la simplificación y suavizado de bordes

El guiado visual acompañó todo el proceso, lo que requirió de la visualización simultánea del modelo de superficie y de los planos de la imagen de referencia. Finalmente, se obtuvo un fichero en formato DirectX del modelo de superficie definitivo de las estructuras anatómicas a reconstruir.

Mediante el software Amira, se llevó a cabo todo el proceso de segmentación, edición de superficies, suavizado libre de intersecciones, registro, creación de modelos poligonales y mallas volumétricas necesarias para la simulación avanzada de los volúmenes reconstruidos y el renderizado final.

### 3. Softwares empleados

Para la generación volumétrica no probabilística de estructuras anatómicas se utilizó *Amira*®. Es un software de animación en 3D que proporciona un conjunto completo de funciones creativas con herramientas para realizar animación, modelado, simulación, renderización, rastreo de movimiento y composición dentro de una plataforma de producción sumamente ampliable. *Amira*® ayuda a cumplir los exigentes requisitos de producción con herramientas específicas para creación de efectos visuales, desarrollo de juegos, posproducción y otros proyectos de animación en 3D.

La aplicación informática está desarrollada para plataformas Windows y programada en Visual C++, el cual, como entorno integrado de desarrollo, nos permitió realizar una programación orientada a objetos (POO) bajo los lenguajes de programación C, C++ y C++/CLI, conjuntamente con el sistema de desarrollo SDK (también denominado API, Application Programming Interface) de Windows.



Visual C++ nos permitió el desarrollo y la depuración de código escrito para las API's de Microsoft Windows, DirectX y tecnología Microsoft .NET Framework.

Por otra parte, al tratarse de un entorno integrado, Visual C++ utiliza otras herramientas complementarias de desarrollo:

Editor orientado a la codificación C/C++.

Compilador/Enlazador incremental, que aceleró el proceso de construcción de nuestro desarrollo informático.

Depurador visual, que modifica el contenido de variables y áreas de memoria.

Visor de datos (browser) que permitió fácilmente controlar dependencias y referencias a funciones, datos, etc. Además, se visualiza la jerarquía de las clases utilizadas en el programa.

Herramientas adicionales como un analizador de ventanas (Spy ++ ) o un trazador de funciones MFC (Microsoft Foundation Classes), el cual es una implementación que utiliza el API (Application Programming Interface) encapsulando todas las estructuras y llamadas a funciones en objetos fáciles de utilizar. En este sentido y, basándose en la potencia de la MFC, Visual C++ se convierte así en un generador de programas C++ para Windows.

Visual C++ incluye además la librería de clases MFC que nos permitió crear y gestionar de manera intuitiva componentes típicos de Windows.

De esta manera, el lenguaje de programación que hemos utilizado para esta aplicación informática, es compatible en la mayor parte de su código con este lenguaje, a la vez que su sintaxis es exactamente igual.

Para crear cualquier programa con Visual C++ comenzamos creando un proyecto para él, codificando y añadiendo los módulos necesarios a dicho proyecto, y definiendo los recursos asociados.

En Visual C++, la construcción de nuestro procedimiento informático se inscribe dentro del concepto de proyecto (workspace). Un proyecto define los pasos a seguir para alcanzar la construcción de un objetivo (un programa, una DLL, etc.), en realidad es un

concepto análogo a lo que se conoce como "makefile" en otros entornos típicos de desarrollo en C. En realidad, Visual C++ genera para cada proyecto dos ficheros que lo definen, el fichero de workspace (con extensión *wsp*) y un makefile (con extensión *mak*) estándar que permitiría la utilización del mismo proyecto en otro entorno distinto.

Desde el punto de vista funcional, el proyecto contiene referencias a cada uno de los ficheros fuentes (C/C++, con extensiones *c* y *cpp* respectivamente), objetos, librerías o ficheros de recursos (extensión *rc*) que se deben utilizar para construir el objetivo final del proyecto.

Nuestro desarrollo informático, tiene además estas características:

- No utiliza navegador.
- Emplea estándares de manera que la información puede ser visualizada y tratada en las mismas condiciones, con las mismas funciones y con el mismo aspecto en cualquier ordenador.
- El acceso no será restringido ni selectivo.
- Incluye como elemento básico una interface gráfica común, con un único punto de acceso, de manera que en ella se integran los diferentes elementos multimedia que constituyen el procedimiento tecnológico: textos, imágenes, animaciones, etc.
- Realiza la presentación de la información en formato hipermedia.

#### 4. Instalación de la aplicación

El procedimiento tecnológico de visualización se ha diseñado para formato CD y para su instalación en ordenadores con los siguientes requisitos del sistema (Figura 28):

*Hardware (mínimo):*

- Pantalla de 1280 x 800 con tarjeta de vídeo a 512 MB o superior.
- Procesador de 1 GHz o superior.
- 1 GB de memoria RAM.
- 1 GB de espacio libre en el disco duro.
- Unidad de DVD-ROM o CD-ROM.



Figura 28. Equipo informático con las características técnicas de hardware necesarios

*Hardware (Recomendado):*

- Pantalla de 1280 x 800 con tarjeta de video a 1 GB o superior.
- Procesador de 1.2 GHz o superior.
- 2 GB de memoria RAM.
- 2 GB de espacio libre en disco duro.
- Unidad de DVD-ROM o CD-ROM.

*Software:*

- Sistema operativo Windows XP, Vista o Windows 7, 32 y 64 bits.
- Software de Direct 9.0 o superior.
- Microsoft. NET Framework 3.0 o superior.
- Adobe Acrobat Reader 5.0 o superior.
- Adobe Flash Player 10.0 o superior.

Para las representaciones de las segmentaciones automáticas, se desarrollaron mediante el software Unity 3D, el cual presenta una serie de rutinas de programación que permiten el funcionamiento de un entorno interactivo. Unity 3D es un motor de desarrollo informático multiplataforma que permite crear aplicaciones interactivas en 2D y 3D. Es conocido por su versatilidad y capacidad para desarrollar contenido para una amplia gama de dispositivos, incluyendo PC, consolas, dispositivos móviles y, especialmente, experiencias de realidad virtual. Unity proporciona un entorno de desarrollo visual con una interfaz de usuario intuitiva que facilita la creación y edición de contenido.

El lenguaje de programación utilizado con Unity fue C++, a través de la API (Application Programming Interface) de complementos de scripting (Unity Native Plugin) para mejorar el rendimiento; es decir, se trata de un pequeño lenguaje de programación cuyo código se inserta dentro de páginas HTML. Permiten hacer prototipos de programas, automatizar tareas repetitivas e interactuar con el sistema operativo y el usuario.

Una de las principales razones de utilizar el lenguaje C++ en Unity 3D fue mejorar el rendimiento, ya que permite un control más preciso sobre la gestión de la memoria y el rendimiento de la aplicación.

Como gafas de RV utilizamos las HT Vive (Figura 29), con una resolución de 2160x1200 (1080x1200 por ojo); con un campo de visión de 110 grados. Utilizan estaciones base (Lighthouse) para un seguimiento preciso del movimiento y controladores. Estas gafas además, ofrecen capacidades de seguimiento de movimiento en un área grande (room-scale), lo que permite a los usuarios moverse físicamente en el espacio virtual.



Figura 29. Modelo de gafa de RV, marca HTVive

También fueron empleadas las gafas Oculus Go (Figura 30). con un peso muy ligero de 530 gramos, utilizan una pantalla LCD con una resolución de 1.920 x 1.832 con colores muy naturales. Estas gafas disponen del procesador Snapdragon XR2, lo que le dan una velocidad de procesamiento rápida.



Figura 30. gafas de RV Oculus Go

## 5. Encuestas de valoración

La encuesta elaborada para los alumnos (Figura 31) se centró exclusivamente en el propio desarrollo informático, intentando valorar la eficacia y satisfacción de los usuarios que manejaron el programa docente sobre la anatomía radiológica del aparato respiratorio. La encuesta se desarrolló empleando la herramienta "Formularios" de Google (Figura 32).

Las preguntas a considerar fueron las siguientes:

1. La instalación del software fue...
2. ¿Con qué frecuencia se bloquea el software?
3. ¿Qué grado de satisfacción tiene con el software empleado?
4. La ayuda para complementar el estudio que aporta el software es:
5. La visión tridimensional de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio le facilita una mejor comprensión y análisis de cada una de ellas.
6. Considera este procedimiento tecnológico mejor que muchos atlas anatómicos para el estudio morfológico de la anatomía del aparato respiratorio.
7. El contenido incorporado en el programa informático es suficiente para su formación académica, siendo bastante completo e ilustrativo.

8. Mediante la tecnología de visión tridimensional utilizada ha empleado menos tiempo para el aprendizaje de la anatomía del aparato respiratorio, respecto a otros métodos tradicionales (uso de libros ilustrados, clases teóricas, prácticas, videos, etc...).
9. Considera esta tecnología de visión de visión 3D interactiva un buen recurso docente complementario para el proceso de enseñanza y aprendizaje.
10. Desde el punto de vista de presentación visual, ¿cómo evaluaría los contenidos visualizados?
11. La navegación por el programa es muy intuitiva y presenta un desarrollo metodológico que motiva su aprendizaje de forma ágil y sencilla.
12. Los comentarios explicativos breves y concisos que aparecen en la pantalla le ayudan a comprender mejor la anatomía del aparato respiratorio, así como a afianzar su conocimiento.
13. La interfaz del programa es intuitiva y de fácil manejo.
14. Cómo considera la aportación de este material docente complementario a la formación médica para el estudio del aparato respiratorio.
15. Recomendaría a otros compañeros estos desarrollos informáticos para el aprendizaje y estudio de la Anatomía y Radiología del aparato respiratorio.

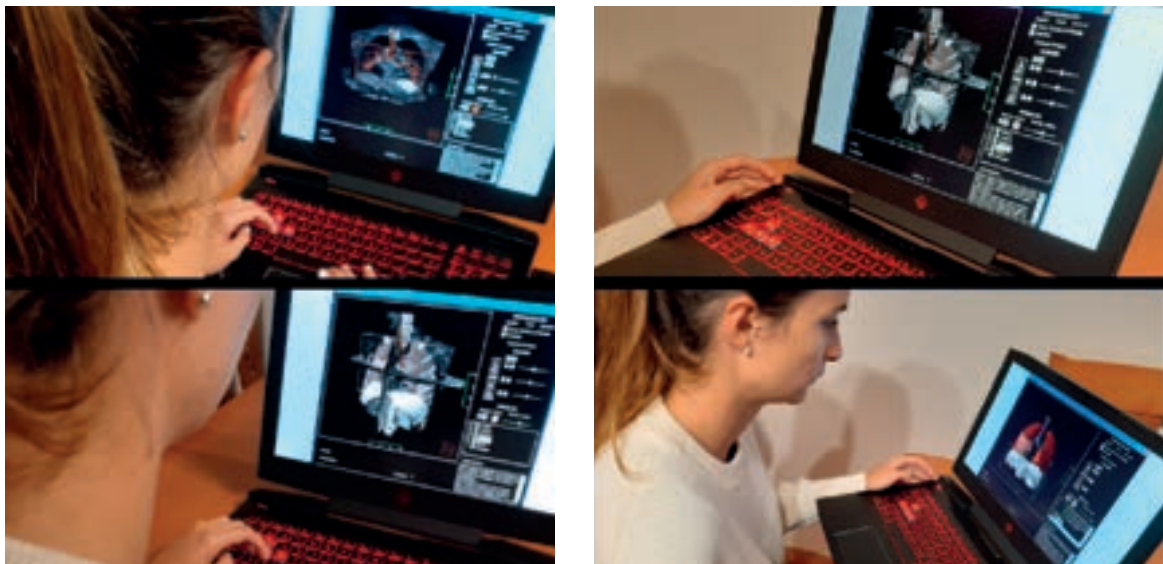


Figura 31. Valoración del software por parte de los alumnos

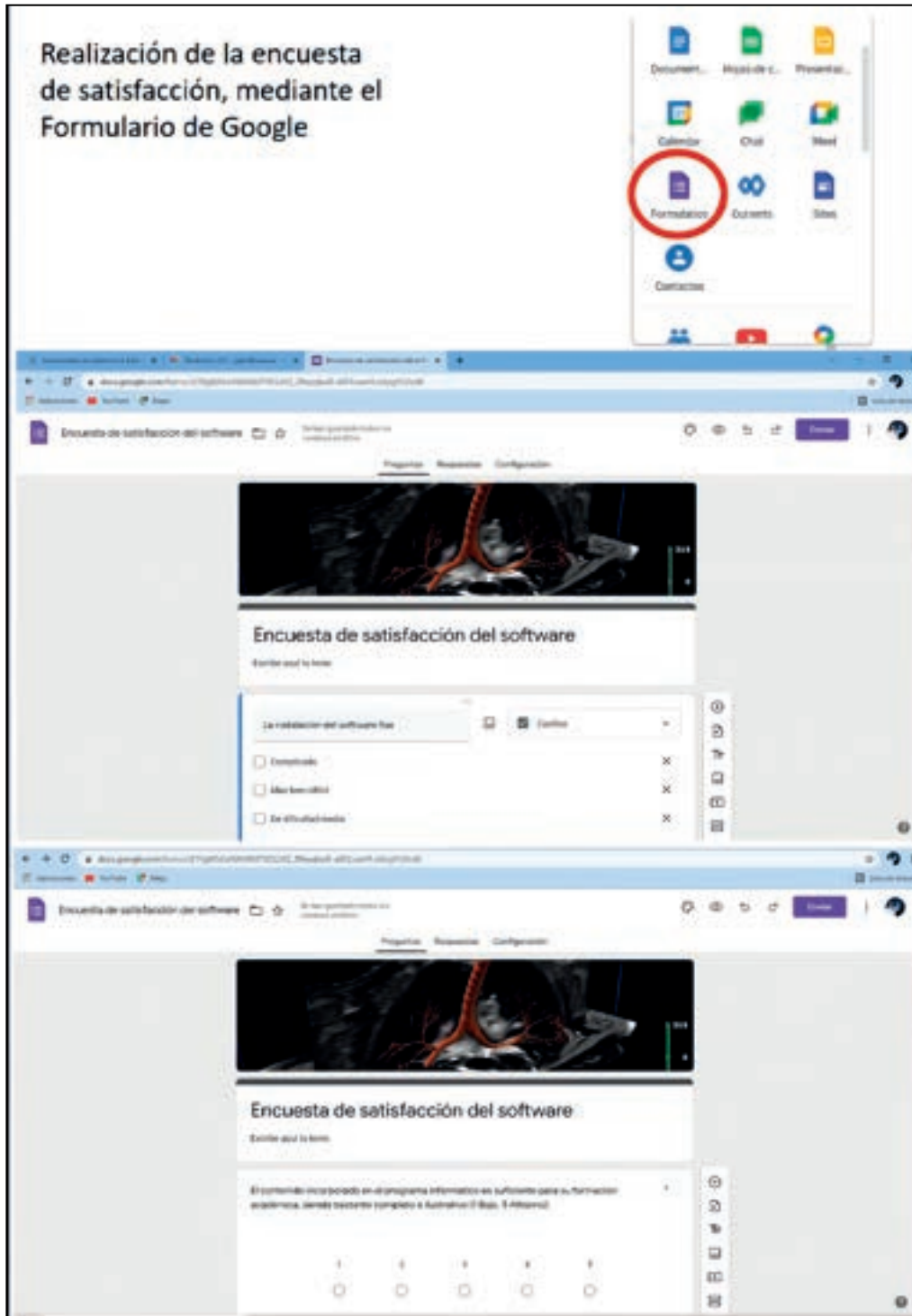


Figura 32. Desarrollo de la encuesta de satisfacción a través de la herramienta de Google "Formularios"

## 6. Procesamiento para la segmentación automática, desde secciones de Tomografía Computarizada

Describiremos en este apartado de nuestra Tesis Doctoral el procedimiento de segmentación automática llevado a cabo, de determinadas estructuras anatómicas del aparato respiratorio, desde las secciones seriadas DICOM (Figura 33) para posteriormente generar unos mallados 3D de las estructuras segmentadas, para que puedan ser visualizados con técnicas de Realidad Virtual (RV).



Figura 33. Estaciones gráficas de trabajo para la manipulación de las imágenes radiológicas

Para la implementación de la plataforma de Realidad Virtual utilizamos el software Unity3D, el cual es un potente motor de videojuegos multiplataforma utilizado en una gran cantidad de videojuegos. Ofrece también una potente plataforma para creación de aplicaciones orientadas a la industria, la educación, y la medicina. Se ha elegido Unity3D para el diseño de nuestra aplicación debido a su potente motor de renderizado 3D, su soporte para tecnologías RV y su sistema multiplataforma integrado.



Figura 34. Software Unity empleado en nuestro estudio. Es un potente motor multiplataforma creado por Unity Technologies. Disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, Mac OS, Linux

Por otra parte, empleamos el software Vuforia ya que actualmente es uno de los SDK (*Software Development Kit* –kit de desarrollo de software–) de Realidad Aumentada más utilizados, debido a su tecnología de visión artificial, seguimiento de marcadores y su soporte a varias plataformas.



Figura 35. Software de tecnología avanzada Vuforia, empleado en nuestro estudio, para crear visiones tridimensionales interactivas

Debido a todas estas características Vuforia se presenta como la solución más completa en estos momentos a la hora de implementar nuestras funciones de visualización en realidad aumentada. No obstante, el uso de Vuforia se corresponde únicamente a la primera fase de nuestro desarrollo, ya que todo el módulo de Realidad Aumentada se adaptó para utilizar ARCore, SDK de Realidad Virtual de Google. ARCore (Figura 36) es un nuevo SDK de Google que permite a los desarrolladores crear aplicaciones de RV.



Figura 36. Herramienta ARCore. Esta aplicación se ejecuta en Google Play Servicios de AR (Arcore), que es proporcionada por Google LLC y regida por la Política de privacidad de Google

De cara al desarrollo de la aplicación en Realidad Virtual hemos elegido los kits de desarrollo que proporcionan Oculus VR y HTC Vive. En ambos casos se trata de soluciones potentes en la industria VR con sistemas altamente probados en el mercado.

Se ha elegido Oculus GO (Figura 30) por su ligereza, versatilidad e inmediatez a la hora de acceder a los contenidos, lo que permite al médico visualizar los modelos utilizando esta tecnología sin precisar de un espacio preestablecido ni restrictivo.

No obstante, HTC Vive (Figuras 37 y 38) ofrece una interacción más profunda y una mayor resolución de imagen, lo que habilita su uso en el campo científico permitiendo una mayor fidelidad a la hora de realizar un diagnóstico. Además, el hecho de que las gafas HTC Vive estén conectadas a un ordenador, aumenta la potencia de procesamiento y renderizado, por lo que se puede trabajar con modelos 3D con una mayor carga poligonal y con volúmenes con un número mayor de voxels, aumentado de esta forma la calidad de visualización de las imágenes médicas en 3D.



Figura 37. Modelo de gafas HTC Vive, utilizadas en nuestro desarrollo, con controladores VR inalámbricos para introducirnos de forma más activa en la experiencia de realidad virtual



Figura 38. Prueba del desarrollo con las gafas HTC Vive. El usuario puede manejar las imágenes tridimensionales que visualiza en cualquier posición espacial

Para el diseño de arquitectura se ha utilizado el patrón MVC (Modelo-vista-controlador) por sus ideas de reutilización de código debido a que ha resultado ser muy conveniente. Se trata de un patrón de arquitectura de software, que separa los datos y principalmente lo que es la lógica de una aplicación de su representación y el módulo encargado de gestionar los procesos.

Para la gestión de los modelos se ha usado el patrón de diseño Factory Method para definir dos tipos de acceso a los datos. El patrón de diseño Factory Method consiste en utilizar una clase constructora abstracta con unos cuantos métodos definidos y otros abstractos: el dedicado a la construcción de objetos de un subtipo de un tipo determinado.

Todos los datos accesibles por nuestra aplicación son almacenados actualmente en un servidor Cloud mediante una estructura de ficheros que sitúa de forma ordenada los modelos generados, los DICOMs recibidos por el sistema y las capturas realizadas. Las rutas relativas a estos archivos, junto con los datos de pacientes, doctores etc. son referenciados por una base de datos relacional que permite un acceso consistente por medio de WebServices.

## 7. Abordaje quirúrgico robotizado a cavidad torácica

Las ventajas de la cirugía torácica asistida con el robot Da Vinci (Figura 39) son impactantes. Gracias a este abordaje mínimamente invasivo, las intervenciones que hasta hace poco requerían de largas hospitalizaciones, hoy se realizan en forma casi ambulatoria, con menos complicaciones y prácticamente sin dolor.

Este robot permite al cirujano acceder a los órganos alojados en el tórax mediante pequeñas incisiones por las cuales se coloca la cámara de alta resolución en 3D y los brazos robóticos y gracias a ellos se pueden realizar procedimientos quirúrgicos complejos disminuyendo el dolor post operatorio, las complicaciones y la estancia hospitalaria y logrando finalmente una recuperación óptima.

La cirugía robótica Da Vinci es un procedimiento quirúrgico de última generación, en la que se combina la técnica toracoscópica convencional con tecnología robótica de alta precisión gracias a los 4 brazos robóticos que son cómodamente comandados por el cirujano desde la consola quirúrgica y utilizando además una imagen 3D inmersiva de alta definición. Los brazos robóticos cuentan con una articulación que otorga la misma capacidad de movimientos que la muñeca humana, por lo que el cirujano puede realizar procedimientos complejos con precisión y seguridad.

Gracias a la cirugía robótica, actualmente se pueden realizar cirugías complejas en forma mínimamente invasiva, lo que se traduce en menor trauma en el tórax, menor dolor, menos complicaciones y menor estancia hospitalaria.

El robot Da Vinci está compuesto por una consola de diseño ergonómico para el cirujano, un carro con cuatro brazos robóticos, un sistema de visualización de alto desempeño y los instrumentos patentados EndoWrist.

En la consola Da Vinci, el cirujano opera cómodamente sentado y con una imagen tridimensional ampliada del interior del cuerpo (Figura 40). Para practicar la operación, el cirujano utiliza los controles maestros que permiten realizar todos los movimientos de los instrumentos. El robot Da Vinci sostiene hasta tres instrumentos EndoWrist y una cámara de visión tridimensional. Existe una amplia variedad de instrumentos disponibles para ayudar al cirujano a realizar las tareas quirúrgicas especializadas con precisión y control (Figura 41).



Figura 39. Robot Da Vinci. Sus brazos permiten una amplia capacidad de movimientos, y una visualización de alta definición



Figura 40. Manipulación del robot Da Vinci, para una intervención quirúrgica



Figura 41. Instrumentos EndoWrist incorporados al robot Da Vinci, para intervenciones quirúrgicas

## Resultados

---



Para la descripción de nuestros resultados, llevaremos a cabo un análisis conjunto de la morfología del aparato respiratorio, mediante las técnicas de imagen utilizadas, las imágenes seccionales de cadáver y abordaje quirúrgico con el robot Da Vinci. Todo ello se irá mostrando con imágenes de las técnicas radiológicas empleadas en este estudio, así como las estructuras anatómicas reconstruidas en 3D, que hemos elaborado, desde las imágenes seccionales, para nuestro entorno informático.

La anatomía radiológica del aparato respiratorio se puede visualizar y estudiar con técnicas de diagnóstico por imagen como la resonancia magnética y tomografía computarizada, dos técnicas que ofrecen diferentes perspectivas y detalles anatómicos. Presentaremos una descripción morfológica de la anatomía del aparato respiratorio en ambas modalidades, y llevaremos a cabo una correlación anatómica con imágenes de cadáver e imágenes de cirugía robótica; con el fin de presentar un análisis morfológico en conjunto de las estructuras del aparato respiratorio.

Mediante la técnica de RM hemos llevado a cabo todo el procedimiento de segmentación manual de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio; sirviéndonos para el desarrollo tecnológico de un programa informático de visión 3D. La visión 3D desempeña un papel fundamental en la formación médica y en el diagnóstico clínico, ya que proporciona una representación más precisa y realista de las estructuras anatómicas y patológicas.

La descripción morfológica del aparato respiratorio desde el punto de vista radiológico utilizando la tomografía computarizada y la resonancia magnética proporciona una visión detallada de las estructuras anatómicas clave, lo que nos permite poder llevar a cabo el proceso de segmentación de las estructuras anatómicas implicadas en el aparato respiratorio.

La RM proporciona información detallada sobre los tejidos blandos circundantes, lo que permite la detección de masas o inflamación que puedan afectar los cartílagos laríngeos, tráquea, bronquios, y parénquima pulmonar (Figuras 42 y 43).



Figura 42. Sección coronal de Resonancia Magnética. Se visualiza en este corte la división de la tráquea en sus bronquios principales

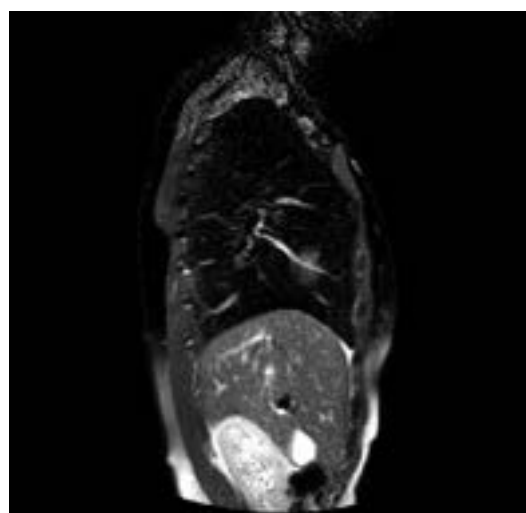


Figura 43. Sección sagital de Resonancia Magnética. Se visualizan en este corte las divisiones de los bronquios segmentarios

Con Tomografía Computarizada, se aprecia el cartílago tiroides como una estructura radiopaca prominente, ubicada anteriormente en la laringe. Su contorno y densidad son normales, sin signos de erosión o irregularidades.

En la RM, el cartílago tiroides se visualiza como una estructura hipointensa en imágenes ponderadas en T1 y T2. Estas densidades permiten diferenciar la estructura anatómica para llevar a cabo el proceso de segmentación manual, y poder así llevar a cabo una reconstrucción 3D que nos permita valorar la anatomía de estos cartílagos de una forma íntegra y en cualquier posición espacial como se pueden apreciar en las figuras 44 y 45.



Figura 44. Visualización de cartílagos laríngeos en 3D embebidos en las secciones de Resonancia Magnética



Figura 45. Detalle de cartílagos laríngeos en 3D embebidos en las secciones de Resonancia magnética.  
Diseción de los cartílagos tiroides y cricoides

En el cartílago tiroides destacan un asta menor, que se articula con las carillas laterales del cartílago cricoides y forman la articulación cricotiroidea. Y un asta tiroidea superior, conectada con el extremo posterior del asta mayor del hueso hioides mediante el ligamento tiroiideo.

El cartílago cricoides es visible en la TC como una estructura radiopaca en forma de anillo, justo inferior al cartílago tiroides. Se evalúa su simetría y morfología. En las imágenes de RM, el cartílago cricoides se presenta como una estructura hipointensa. Se verifica su morfología y señal, prestando atención a la simetría entre los lados derecho e izquierdo.

Los cartílagos aritenoides, ubicados en la parte posterior de la laringe, son identificables con cierta complejidad en las imágenes de TC. Aunque los cartílagos aritenoides son mejormente apreciables en la RM, por su pequeño tamaño hemos evitado su reconstrucción 3D: Se evaluó su señal y posición en relación con otras estructuras laríngeas.

En la RM, la **tráquea** y los **bronquios** aparecen como estructuras tubulares con señal de baja intensidad en las imágenes ponderadas en T1 y T2. (Figura 42). Mediante esta técnica diagnóstica por imagen fue más sencillo llevar a cabo el proceso de segmentación y su reconstrucción 3D como se aprecia en las figuras 46 y 47).

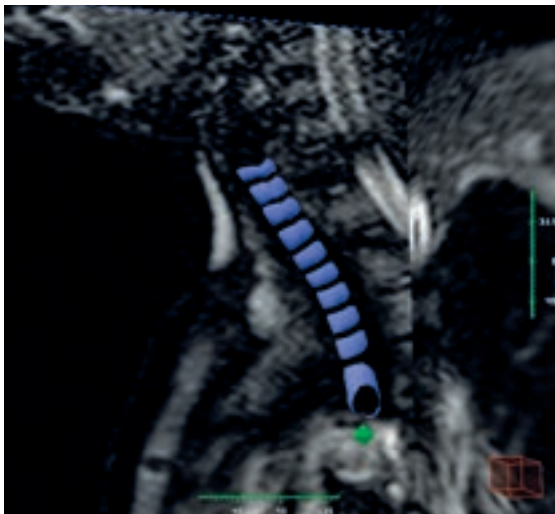


Figura 46. Visualización de cartílagos traqueales en 3D embebidos en las secciones de Resonancia Magnética

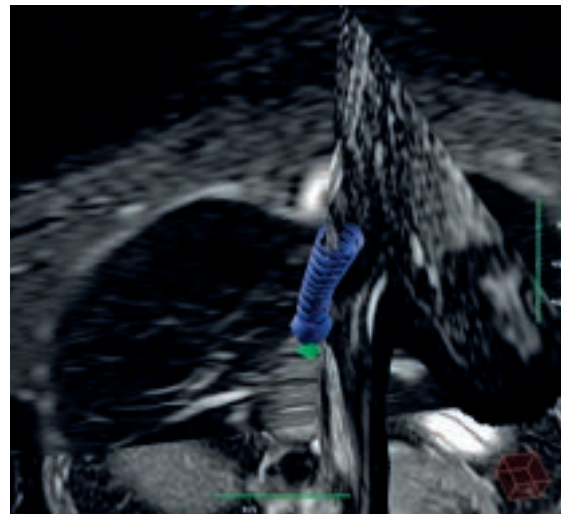


Figura 47. Visualización de cartílagos traqueales en 3D embebidos en las secciones de Resonancia Magnética

La tráquea se encuentra en posición central, rodeada por el tejido pulmonar de menor señal. Tiene una longitud aproximadamente de unos 12 cm, presenta su extremo superior aproximadamente a la altura de la sexta o séptima vértebra cervical y su extremo inferior a la tercera o cuarta vértebra dorsal (Figura 48).

Se dirige oblicuamente de arriba abajo y de delante atrás así es que se aparta progresivamente de la superficie cutánea y el intervalo que la separa de la piel es de unos 18 mm en su extremo superior y de 45 mm a nivel de la horquilla esternal y de 7 cm en su extremo inferior

desde su origen hasta su bifurcación de la tráquea sigue un trayecto bastante regularmente pero a veces puede presentar una ligera flexión flexuosa sobre todo en los individuos de alguna edad pero las curvaturas que presentan en estos casos son por lo general poco acentuadas y se borran cuando la cabeza se halla en extensión.



Figura 48. Visualización anatómica de la tráquea y sus divisiones en bronquios principales, e imagen reconstruida en 3D embebida en secciones de RM laríngeos (tiroides y cricoides) embebidos en las secciones de Resonancia Magnética

En la TC, la tráquea es visible como una estructura tubular central con densidad de aire en su interior, rodeada de tejido pulmonar de menor densidad.

Los bronquios principales derecho e izquierdo son ramificaciones de la tráquea. En la TC, aparecen como estructuras tubulares con densidad de aire y se dividen en bronquios secundarios hacia los pulmones.

El Bronquio principal derecho se divide en:

- ▶ Bronquio del lóbulo superior derecho.
  - Bronquio segmentario anterior.
  - Bronquio segmentario apical.
  - Bronquio segmentario posterior.
- ▶ Bronquio intermediario (3-4 cm):
  - Bronquio del lóbulo medio.
    - Bronquio segmentario medial.
    - Bronquio segmentario lateral.
  - Bronquio del lóbulo inferior derecho.
    - Bronquio del segmento apical.
    - Bronquio del segmento basal anterior.
    - Bronquio del segmento basal medial.
    - Bronquio del segmento basal lateral.
    - Bronquio del segmento basal posterior.

▶ Bronquio principal izquierdo se divide en:

- Bronquio del lóbulo superior derecho se subdivide en dos:
  - Subdivisión superior:
    - Bronquio del segmento apicoposterior.
    - Bronquio del segmento posterior.
  - Bronquio de la llingula:
    - Rama superior.
    - Rama inferior.
- Bronquio del lóbulo inferior izquierdo.
- Bronquio del segmento apical.
- Bronquio del segmento basal anteromedial.
- Bronquio del segmento basal lateral.
- Bronquio del segmento basal posterior.

Los bronquios segmentarios se dividen en 2-3 ramas, llamadas bronquios subsegmentarios. Éstos a su vez se dividen en bronquios y bronquiolos.

El bronquio intralobulillar se divide 5-6 veces y las últimas ramificaciones reciben el nombre de bronquiolos terminales. Éstos se ensanchan formando el conducto alveolar, que tras sucesivas divisiones da los alveolos.

Los **pulmones** se visualizan en la RM como estructuras llenas de aire, lo que las hace aparecer con una señal baja en las imágenes ponderadas en T1 y T2. Los diferentes lóbulos y segmentos pulmonares pueden ser identificados. En la RM, los vasos pulmonares pueden observarse como estructuras tubulares con señal moderada a baja en las imágenes. La RM es especialmente útil para evaluar anomalías vasculares y la perfusión pulmonar. Esta técnica de imagen fue óptima para las reconstrucciones 3D que se muestran en las siguientes imágenes (Figuras 49, 50, 51, 52).

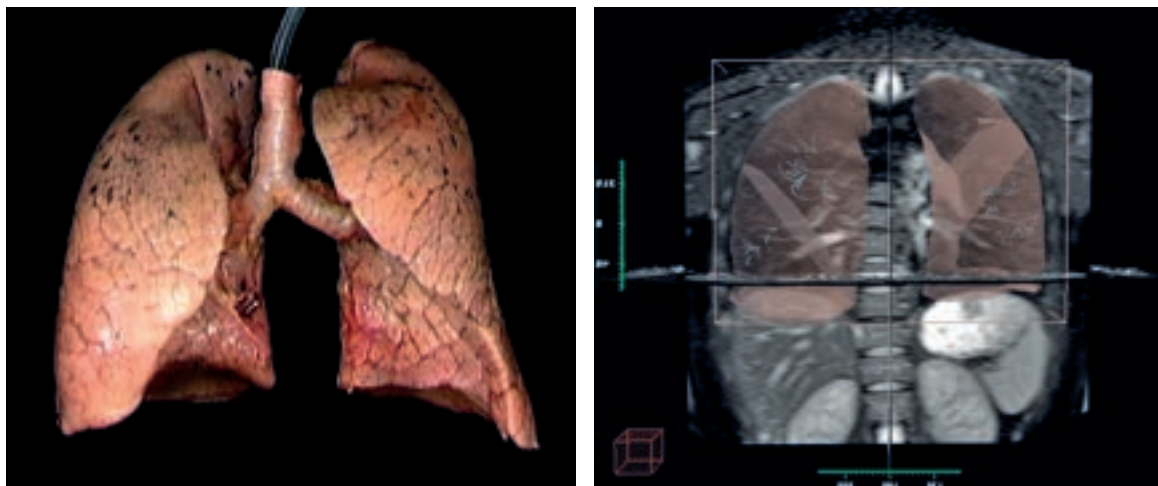


Figura 49. Visualización del pulmón en 3D embebidos en las secciones de Resonancia Magnética. La visión por transparencia nos permite ver estructuras vecinas



Figura 50. Disección anatómica de los pulmones y visualización del pulmón en 3D embebidos en las secciones de Resonancia Magnética en los tres planos del espacio (coronal, sagital y axial).

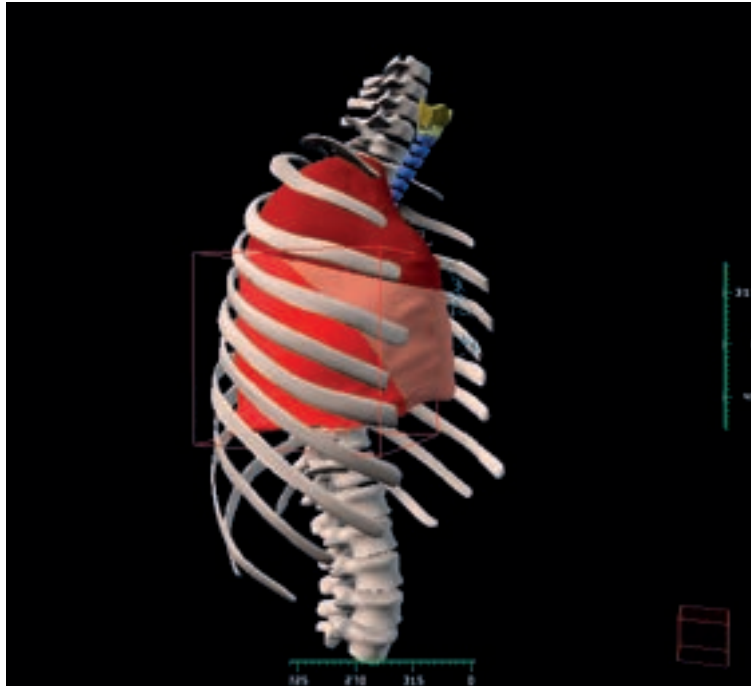


Figura 51. Visualización en 3D del pulmón derecho, dentro de la parrilla costal.

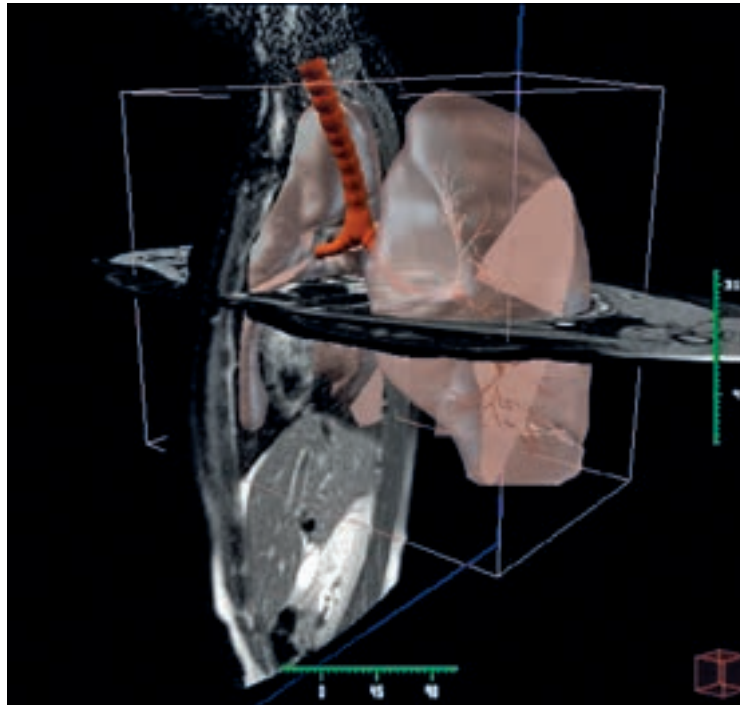


Figura 52. Visualización en 3D de los pulmones, con transparencia para valorar el árbol bronquial de su interior

El mediastino, que contiene estructuras como el corazón, los grandes vasos, los ganglios linfáticos y el esófago, se visualiza en la RM como una región con diferentes señales dependiendo de los tejidos presentes.

Los hilios pulmonares, (Figura 52) donde se encuentran los bronquios y los vasos pulmonares, pueden ser identificados en la RM como áreas de transición entre los tejidos pulmonares y vasculares.

Los pulmones se observan como estructuras con densidad de aire en la TC debido al aire contenido en los alvéolos. Los lóbulos y segmentos pulmonares pueden ser identificados y evaluados.

Los vasos sanguíneos que irrigan los pulmones, como las arterias y venas pulmonares, se visualizan en la TC como estructuras tubulares con densidad moderada a alta. Pueden identificarse las arterias pulmonares principales y sus ramificaciones.

Los hilios pulmonares son las regiones donde los bronquios y los vasos pulmonares ingresan y salen de los pulmones. En la TC, estas áreas pueden observarse como regiones de transición entre los tejidos pulmonares y los vasos.

La elección entre TC y RM para la evaluación del aparato respiratorio depende de diversos factores clínicos, como la pregunta médica específica, la disponibilidad de las modalidades de imagen y la necesidad de evaluar estructuras y patologías particulares. Ambas modalidades complementan la comprensión de la morfología y el funcionamiento del aparato respiratorio desde una perspectiva radiológica.

Los desarrollos tecnológicos basados en técnicas de visión 3D de estructuras anatómicas y técnicas de visión estereoscópica con gafas de realidad virtual están transformando la forma en que se lleva a cabo la formación médica. Estas tecnologías aportan una serie de beneficios significativos para la educación y capacitación de profesionales de la salud.

Para la visualización y manipulación mediante realidad virtual de los modelos 3D producido por los resultados radiológicos se ha diseñado la aplicación multiplataforma. Construida sobre Unity y usando la tecnología Vuforia de realidad virtual nos proporciona un entorno fácilmente usable para el facultativo en el que se podrá realizar de forma sencilla la consulta y el diagnóstico sobre el modelo 3D generado a partir de los resultados radiológicos (Figuras 53 y 54).

Con esta tecnología podremos situar los elementos virtuales del sistema en el mundo real consiguiendo una interacción más ligera utilizando las propias manos. Esto implica que el cirujano podrá estar trabajando en el quirófano con unas gafas como las citadas y situar, simplemente con gestos manuales, diferentes contenidos alrededor del paciente, desde el modelo 3D de la zona anatómica objeto de la cirugía, hasta las imágenes médicas y los resultados del estudio quirúrgico realizado. Para visualizar los diferentes elementos virtuales simplemente tendrá que desviar la mirada a la zona donde previamente los ha situado.

Una interfaz sencilla dirige al usuario a la visualización con realidad virtual del modelo deseado (Figura 55). La escena de visualización, correspondiente a la última imagen, implementa las funciones de escalado, rotación y coloreado para poder realizar un análisis minucioso del modelo que pueda llevar a cabo un diagnóstico por parte del médico (Figuras 56, 57 y 58).



Figura 53. Facultativo manejando la aplicación virtual para la visualización de imágenes 3D



Figura 54. Facultativo manejando la aplicación virtual para la visualización de imágenes 3D

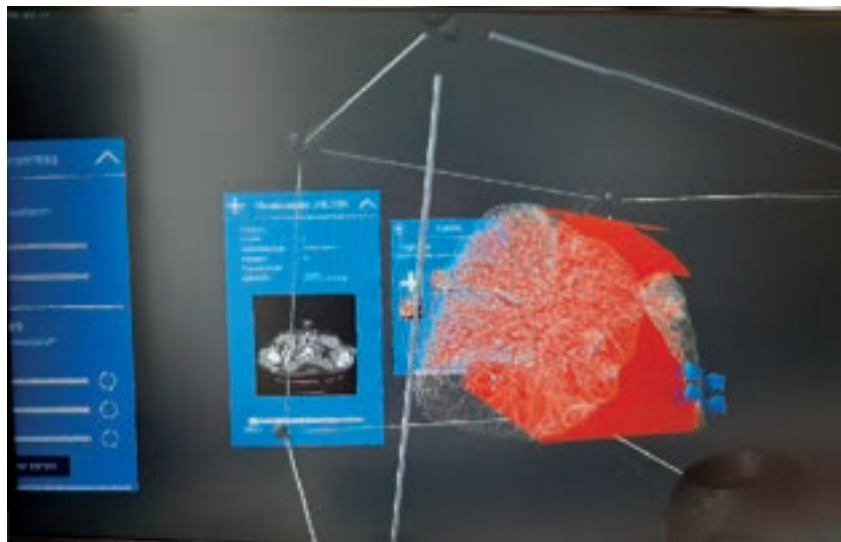


Figura 55. Interface de trabajo del entorno virtual para la visualización de imágenes 3D

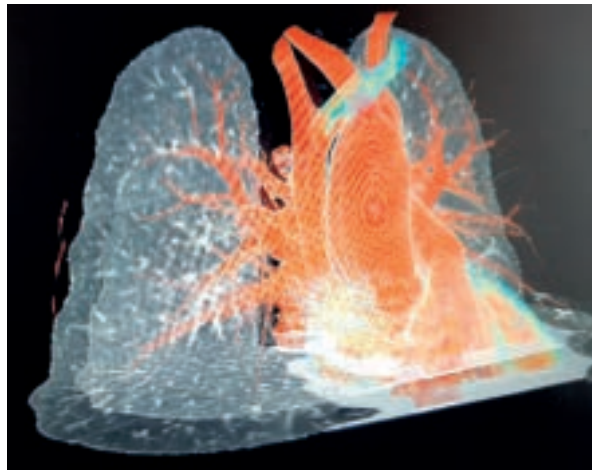


Figura 56. Visualización de pulmones y vasos del entorno virtual

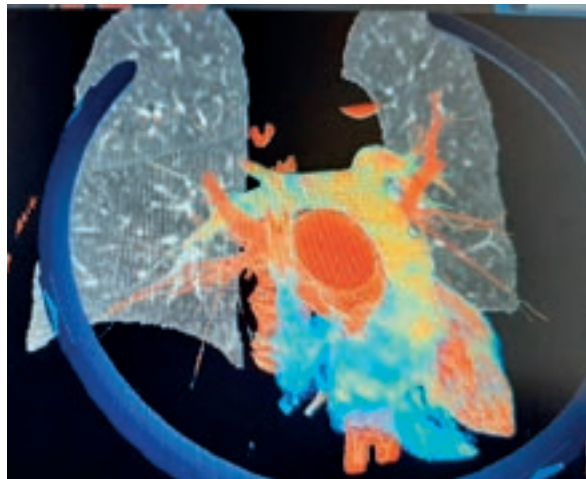


Figura 57. Visualización del entorno virtual que maneja el usuario con diferentes cortes



Figura 58. El desarrollo tecnológico permite trabajar con transparencias, lo que facilita visualizar el interior del parénquima pulmonar

Para poder realizar un análisis extensivo del modelo obtenido de forma automática a partir de las imágenes médicas, es necesario implementar la herramienta de corte (Figura 59). De esta forma podremos estudiar su interior y aislar zonas de interés.

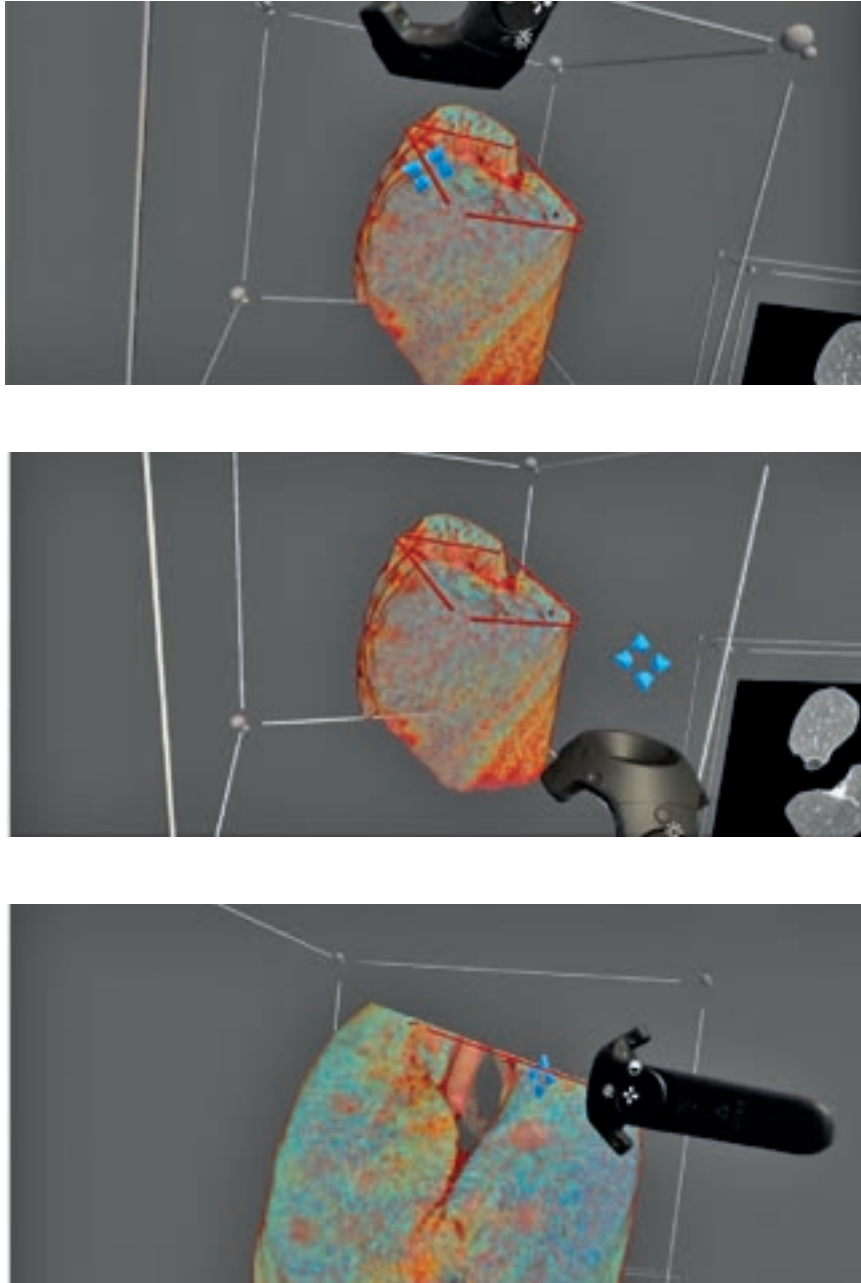


Figura 59. Visualización del parénquima pulmonar. El usuario puede practicar los cortes seriados sobre el modelo 3D

El proceso de corte se basa en un sistema de corte versátil que permite el corte múltiple de modelos 3D mediante shaders. Con esto se consigue no modificar el modelo original y permitir deshacer los cambios de los cortes de forma eficiente (Figuras 60, 61 y 62).

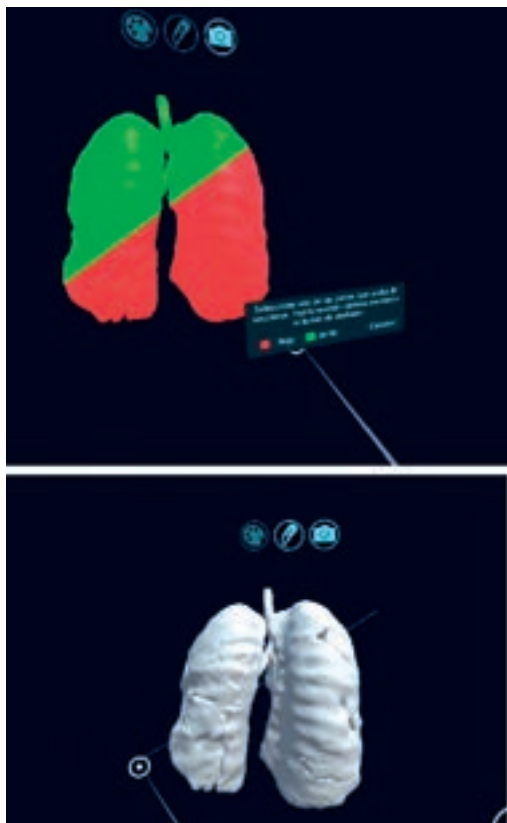


Figura 60. Imagen que ilustra la sección de corte del modelo 3D elegida por el usuario

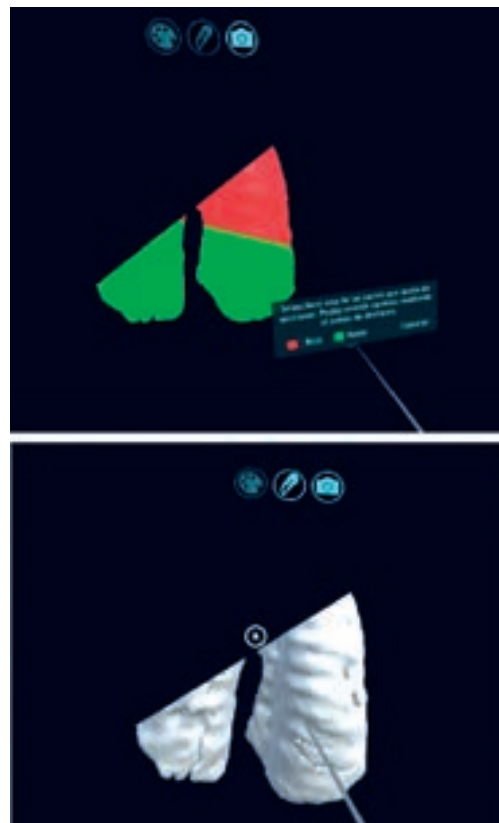


Figura 61. Imagen que ilustra la sección de corte del modelo 3D elegida por el usuario

A la hora de que el facultativo realice diagnósticos sobre los modelos se habilitó una funcionalidad de anotaciones sobre capturas. De esta forma se permite al médico organizar sus conclusiones al analizar el modelo anatómico.

Este desarrollo tecnológico generado aprovecha la potencia de interacción de usuario e inmersión que proporciona la tecnología de la realidad virtual. De esta forma la manipulación del modelo se vuelve más fácil e intuitiva haciendo más cómodo el posible diagnóstico. Nuestro propósito para futuras versiones es conseguir que el profesional médico puede llegar a introducirse dentro del modelo 3D para estudiarlo como si navegara por su interior.

Esta interacción del desarrollo tecnológico la hemos implementado tanto para el sistema de gafas de realidad virtual HT Vive (figura 63), como para las gafas Modelo Oculus Go.

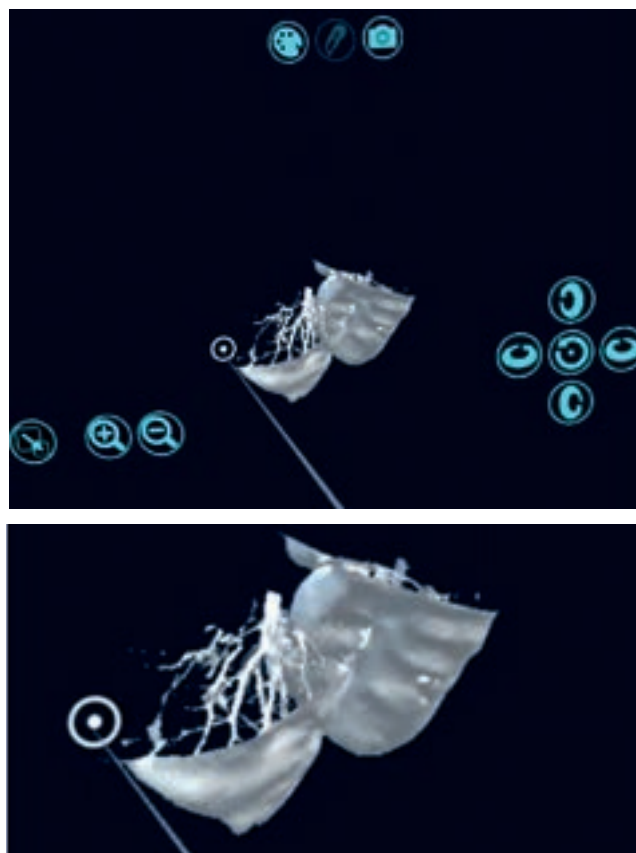


Figura 62. Visualización final tras el corte del modelo 3D elegido por el usuario.



Figura 63. Modelo de una de las gafas HT Vive utilizadas para este entorno virtual de visualización 3D.

El tiempo de procesamiento del algoritmo de segmentación automática por resultado ha sido de una media de 3 minutos, con un procesador Intel i5 9600K que contiene 6 núcleos que pueden trabajar a una frecuencia máxima de 4,6GHz y con una memoria caché L3 de 9MB, acompañado de una memoria RAM de 8 GB a 2400 MHz.

Se emplearon varios filtrados de la región segmentada del pulmón con venas y arterias, visualizada con VTK a través de ITK-Jupyter-Widgets. Se ha utilizado un mapa de color y se ha filtrado de tal forma que se aprecien venas y arterias de mayor a menor escala de Hounsfield. Al ser la visualización de un conjunto de voxels y no de todo el conjunto gracias a la segmentación automática previa, realizar filtrados de unidades Hounsfield no requiere mucha potencia computacional, de forma que este filtrado se puede llevar a cabo en tiempo real en dispositivos con menor capacidad de procesamiento y renderizado que un PC, como son unas gafas de realidad virtual.

El trabajo realizado hasta la actualidad, supone un salto cualitativo en cuanto al estudio de resultados radiológicos se refiere, principalmente por dos puntos importantes. En primer lugar, introducimos la posibilidad de la utilización de la segmentación automática en el trabajo diario de los profesionales médicos, y en segundo lugar, permitimos la visualización y manipulación de los modelos 3D de forma industrializada mediante tecnologías de Realidad Virtual. Hasta el momento, han sido numerosos los casos en los que se diseñan sistemas para visualizar un modelo 3D concreto con estas técnicas, sin embargo, el futuro de estas tecnologías en el sector médico no está en su utilización para casos concretos, sino en ser utilizables para todos los resultados radiológicos realizados a los pacientes. El propósito de nuestro trabajo ha sido llevar el potencial de la Realidad Virtual al entorno hospitalario.

En el futuro los médicos y radiólogos dejarán de tener que estudiar las imágenes médicas utilizando haces de luz que las atraviesen para su correcta visualización: se empleará la Realidad Virtual. Lo cierto es que en las últimas décadas no se ha avanzado demasiado en lo que a la visualización de imágenes médicas se refiere; han habido muchos avances en cuanto a potencia de las máquinas de radiodiagnóstico, los softwares de análisis de imágenes y las workstations disponibles, pero no se ha producido un cambio disruptivo que aproveche los avances de las últimas tecnologías aparecidas durante el Siglo XXI.

Este trabajo pretende dar a conocer un cambio disruptivo, que permita a los profesionales trabajar con las imágenes médicas aprovechando las tecnologías de Realidad Virtual sin necesidad de pesados periodos de formación y transición ni grandes inversiones económicas.

## 1. Desarrollo informático con segmentaciones manuales desde Resonancias Magnéticas

Presentamos seguidamente el procedimiento tecnológico desarrollado, analizando cada una de las opciones y posibilidades de visualización que ofrece nuestra herramienta informática.

### Control de visualización:

Existen tres perspectivas predefinidas por nuestro programa para observar la composición que aparece representada en el visor anatómico, que pueden seleccionarse mediante unos botones que aparecen en el control de visualización (Figura 64): sagital (enfoca la imagen del visor anatómico desde el lateral), axial (lo vemos desde arriba) y coronal (presenta una visión frontal), que posteriormente pueden ser modificadas por el usuario al mover mediante el ratón el modelo 3D, la imagen seccional o el conjunto de ambas.

La escena representada en el visor anatómico, tras realizar las modificaciones (rotaciones, traslaciones o zoom) que el usuario desee, puede ser almacenada como una imagen en un fichero con formato bitmap (.bmp), mediante la opción "capturar imagen" para compartirla o estudiarla posteriormente.

Mediante la opción de textos técnicos que puede seleccionarse en este menú, aparece información técnica de la imagen de RM.

### Control de planos:

La sección "Planos" (Figura 64) contiene los controles necesarios para manejar las secciones de RM presentadas en el visor. En la parte superior derecha de la ventana de control de planos, vemos dos casillas en las que podemos seleccionar que imágenes queremos utilizar, de cadáver o de RM.

Existen tres planos de orientación: axial (horizontal), sagital (lateral) y coronal (frontal) (Figura 65). Cada plano, al activar su visualización, posee una barra de desplazamiento que permite cambiar la altura del corte en el plano concreto que estamos manipulando y un control de selección para activar o desactivar su visibilidad. También se puede cambiar la posición del plano seleccionado moviendo el cursor horizontalmente sobre el visor mientras se pulsa Mayúsculas, sin mantener pulsado ningún botón del ratón. El último plano desplazado aparece enmarcado en el color azul.



Figura 64. Panel de control de la aplicación informática, en ella se dividen en tres opciones: Visualización, planos de corte y modelos 3D



Figura 65. Interface de usuario de la aplicación informática desarrollada.

El icono que simula una cuadrícula, permite la aparición de cuadros de 1-10 mm (el tamaño depende del que el usuario desee aplicar), para poder medir estructuras, puesto que los modelos 3D están realizados a escala.

### Control de los modelos 3D de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio:

La sección "Modelos" controla las estructuras anatómicas representadas mediante modelos tridimensionales (3D) (Figura 66 y 67).

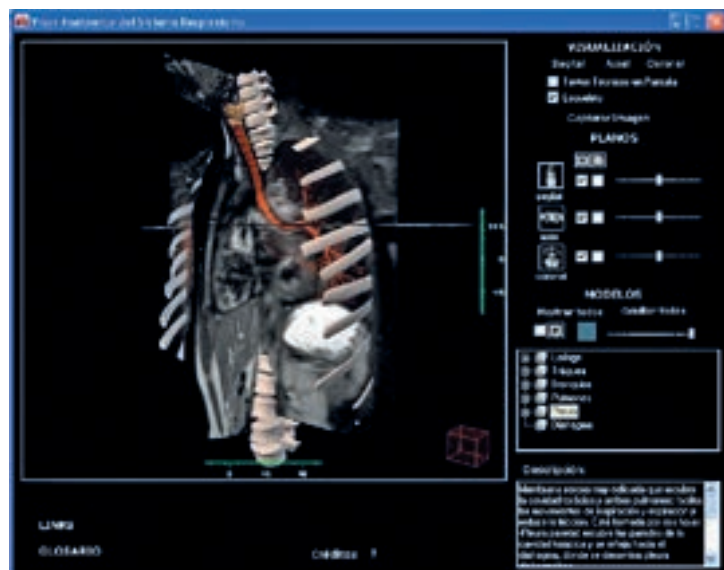


Figura 66. Visor anatómico con diferentes opciones de visualización.

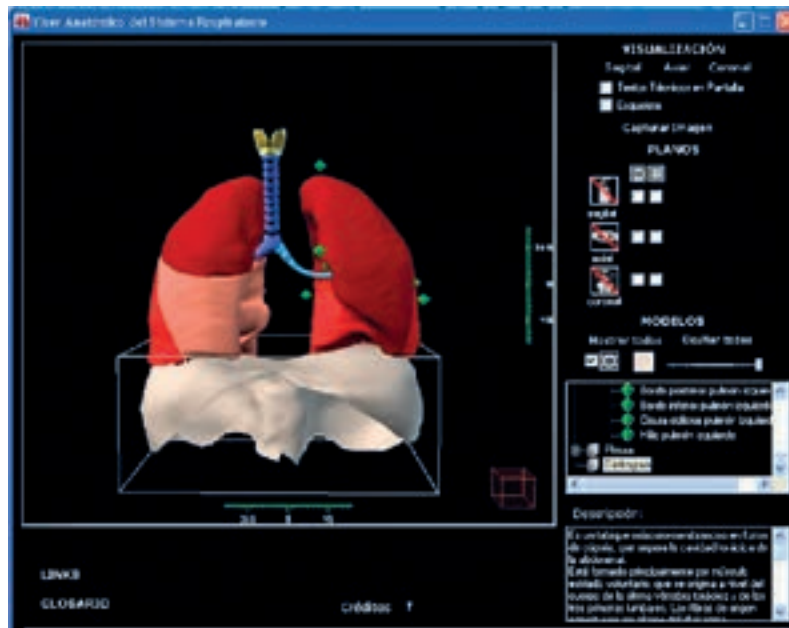


Figura 67. La aplicación permite modificar colores de las estructuras anatómicas.

Seleccionando sobre el color podremos modificarlo y asignar el que más le guste al usuario.

El cuadro de selección visible permite activar o desactivar la visibilidad del modelo seleccionado, que aparecerá en color rojo en el visor tridimensional. Al igual que podemos activar o desactivar la visibilidad del conjunto de modelos 3D.

La barra transversa que aparece junto al rótulo "Transparencia", facilita la visualización del conjunto de estructuras al poder determinar el grado de translucidez (si queremos o no, ver a través de ese modelo 3D).

En la ventana "Árbol" podremos seleccionar/deseleccionar los modelos de forma independiente e ir visualizándolos según la selección, abriendo las distintas ramas para ver las estructuras (modelos 3D) disponibles y su relación jerárquica.

El cuadro de texto inferior muestra una pequeña descripción anatómica de cada estructura seleccionada, siempre que tengamos algún modelo anatómico seleccionado, si no, aparece carente de información.

La aplicación informática se ha diseñado de manera que permita manejar a voluntad todas las opciones que ofrece, lo que se traduce en una auténtica interacción con el programa, evitando que el usuario se convierta en un mero espectador.

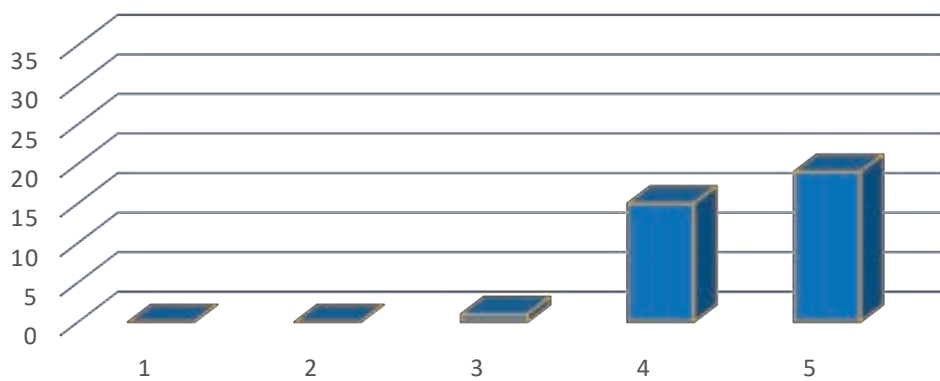
Constituye una herramienta docente, rigurosamente cuidada y elaborada, que pretende facilitar el conocimiento y comprensión de esta región corporal, al posibilitar el análisis de las estructuras anatómicas que la componen en tres dimensiones y desde cualquier posición espacial.

## 2. Encuesta de valoración de los usuarios del programa informático

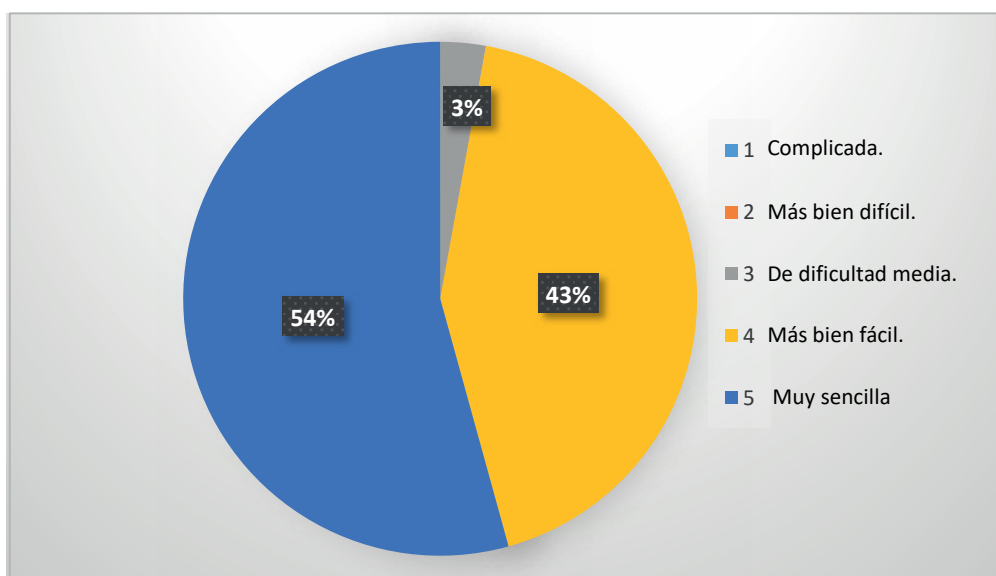
Los resultados obtenidos de la encuesta llevada a cabo sobre la valoración del software de anatomía radiológica de estructuras morfológicas que forman parte del aparato respiratorio, muestran datos muy positivos en cuanto a la satisfacción y aprendizaje mediante la utilización de esta herramienta tecnológica.

Los alumnos destacan positivamente el software desarrollado, señalando un 43% de los encuestados, que su instalación fue fácil y un 54% muy sencilla (Gráfica 1), y que prácticamente el 100% de los usuarios han señalado que la aplicación no se bloquea nunca o casi nunca (Gráfica 2).

### A.- La instalación del software fue



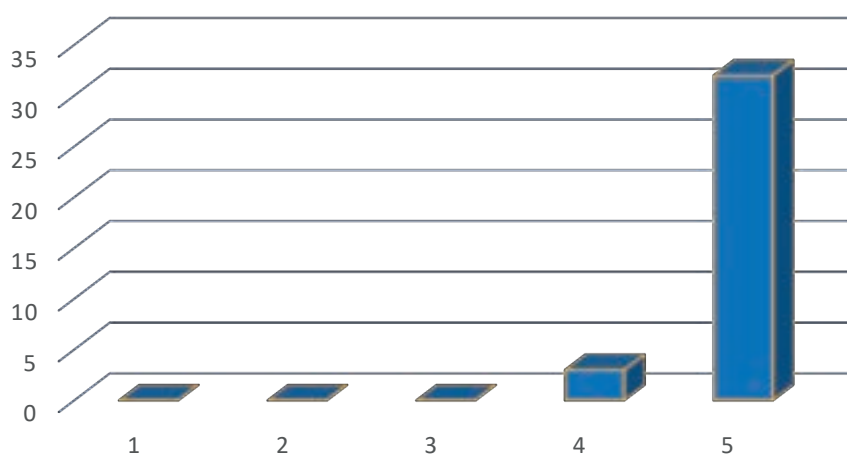
1. Complicada. 2. Más bien difícil. 3. De dificultad media. 4. Más bien fácil. 5. Muy sencilla



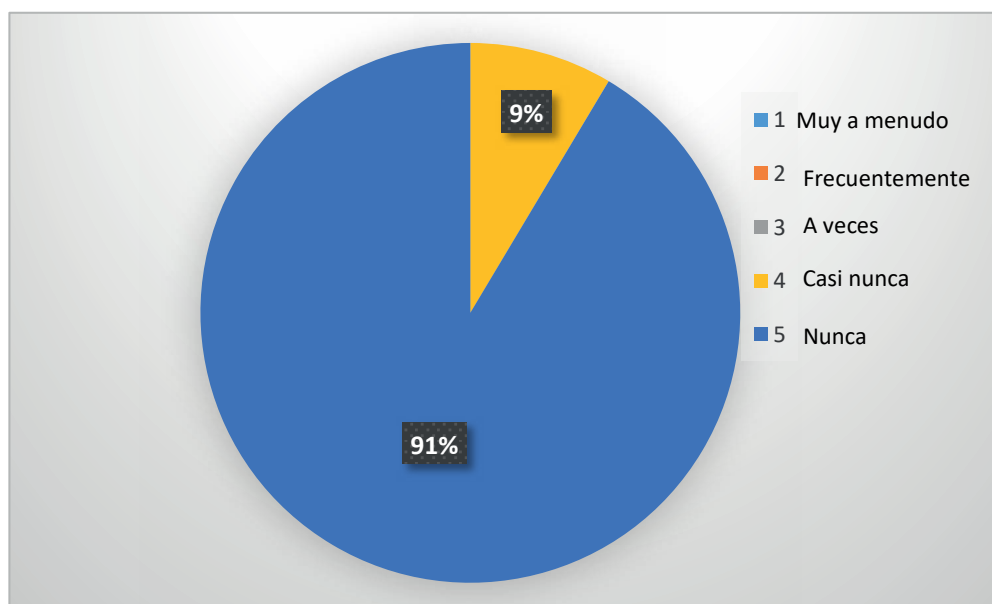
La navegación por el programa es muy intuitiva (Gráfica 3). Por otra parte, la visión 3D de las estructuras anatómicas facilita su comprensión y estudio (Gráfica 4).

Los comentarios explicativos breves de las estructuras anatómicas que se visualizan, son bien valorados (Gráfica 5), y la interfaz del programa es muy intuitiva y de fácil manejo, respuesta dada por casi el 100% de los usuarios (Gráfica 6).

### B.- Con qué frecuencia se bloquea el software

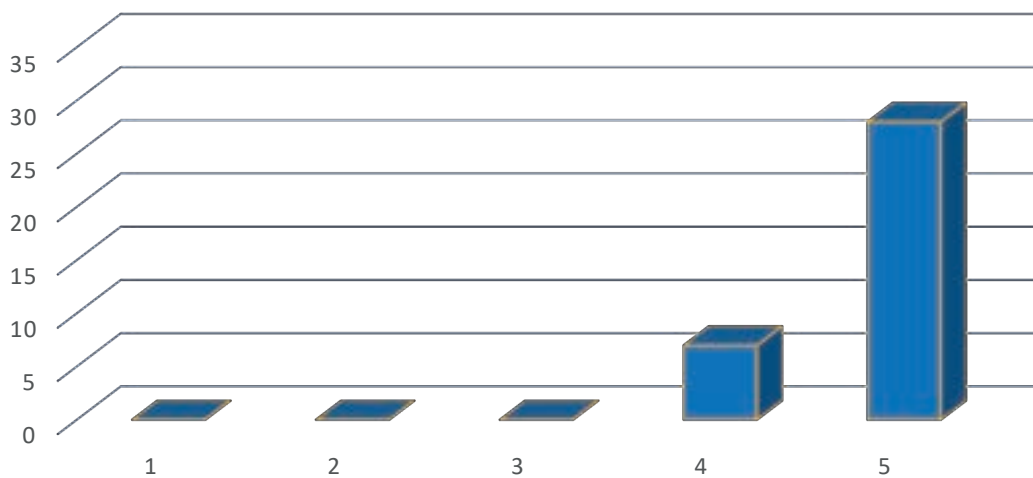


1. Muy a menudo. 2. Frecuentemente. 3. A veces. 4. Casi nunca. 5. Nunca.

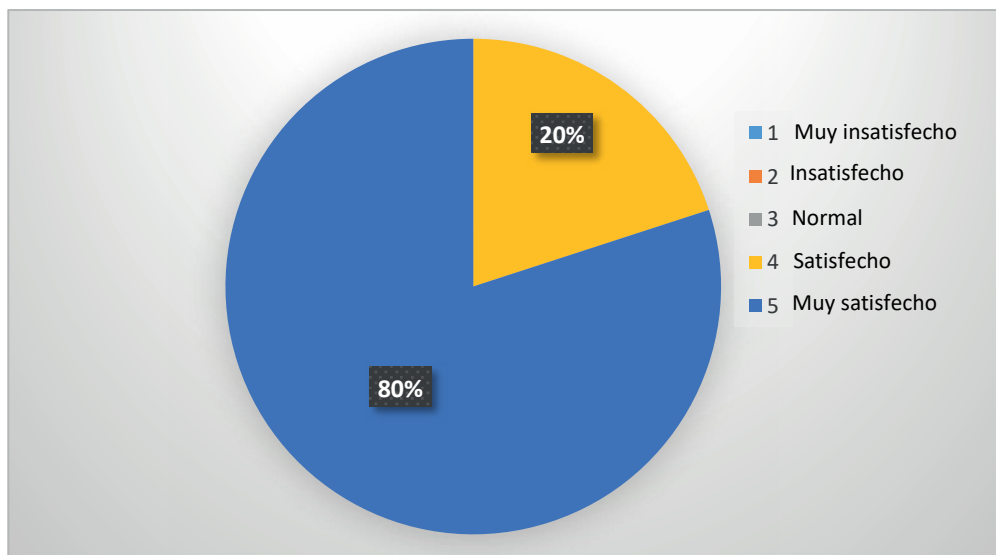


Desde el punto de vista docente destaca la alta valoración como buen recurso didáctico complementario para el estudio. Un buen grupo de encuestados señalaron que esta herramienta supone un buen medio que supera a muchos atlas anatómo-radiológicos que son estáticos. La presentación visual de los contenidos es muy atractiva, siendo por tanto muy bien valorada por los estudiantes.

### C.- ¿Qué grado de satisfacción tiene con el software empleado?

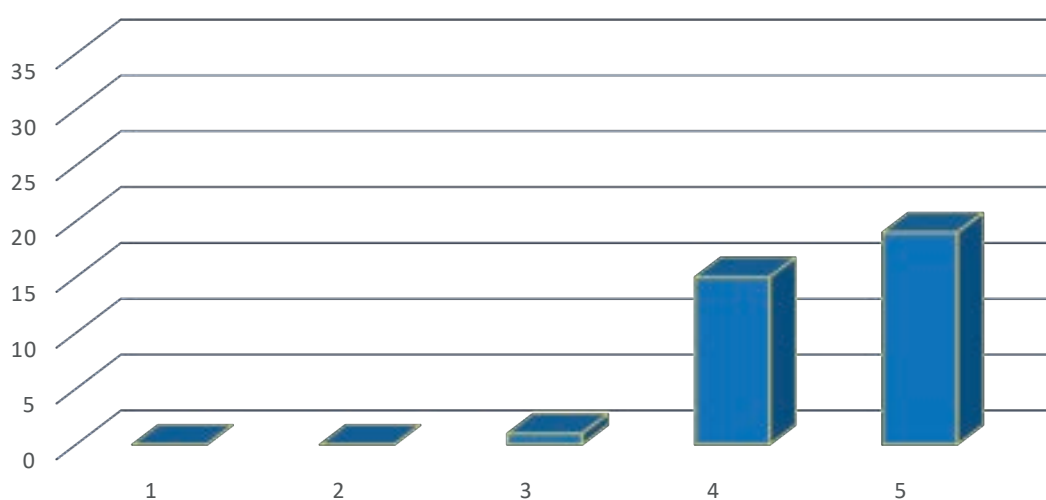


1. Muy insatisfecho. 2. Insatisfecho. 3. Normal. 4. Satisfecho. 5. Muy satisfecho.

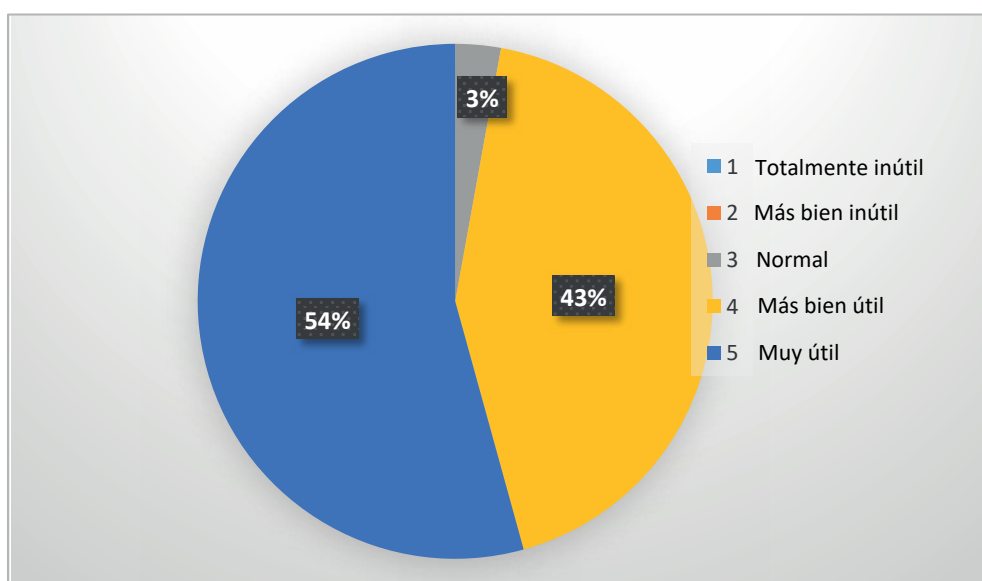


Tras los datos obtenidos podemos señalar que la utilización de entornos tecnológicos de visualización 3D para la formación en el campo de la anatomía humana, constituye una nueva fuente de oportunidades para los procesos de enseñanza-aprendizaje. Ofrecen una representación tridimensional de los órganos y estructuras, permitiendo visualizar los mismos desde distintos ángulos y distancias, facilitando la comprensión de conceptos complejos. Son intuitivos y resultan atractivos para los estudiantes, lo que proporciona una motivación más para el aprendizaje de los estudiantes.

#### D.- La ayuda para complementar el estudio que aporta el software es:



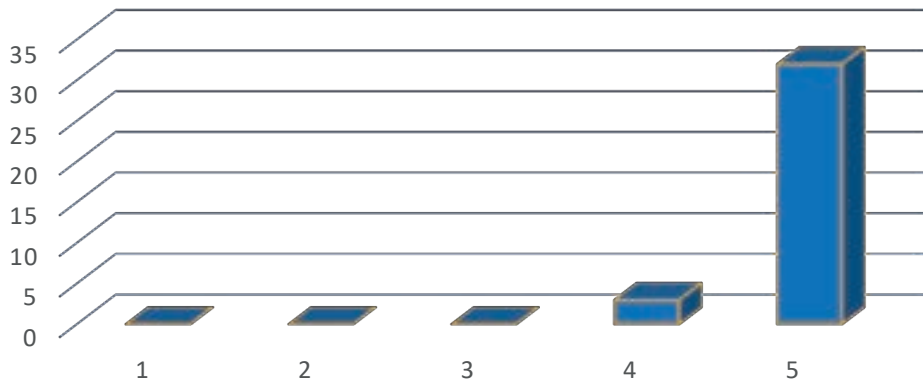
1. Totalmente inútil. 2. Mas bien inútil. 3. Normal. 4. Mas bien útil. 5. Muy útil.



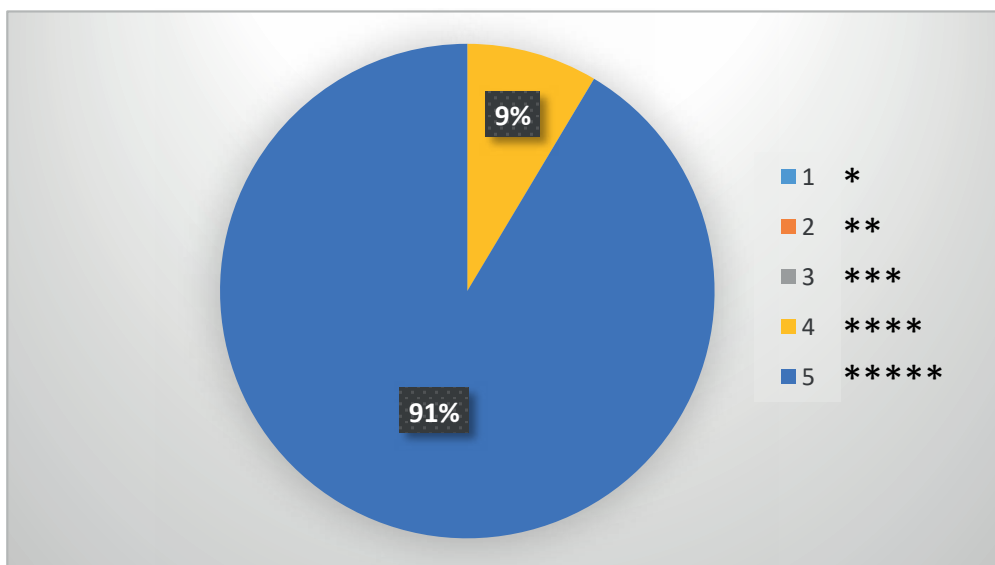
Los estudiantes que manejaron la herramienta informática desarrollada, han considerado que constituye un diseño informático muy innovador, que facilita el estudio, comprensión y aprendizaje de estructuras anatómicas.

Su presentación atractiva, dinámica, visual y animada facilita la adquisición de los conocimientos morfológicos necesarios y fundamentales sobre el aparato respiratorio.

### E.- La visión tridimensional de las estructuras del aparato respiratorio le facilita una mejor comprensión y análisis de cada una de ellas

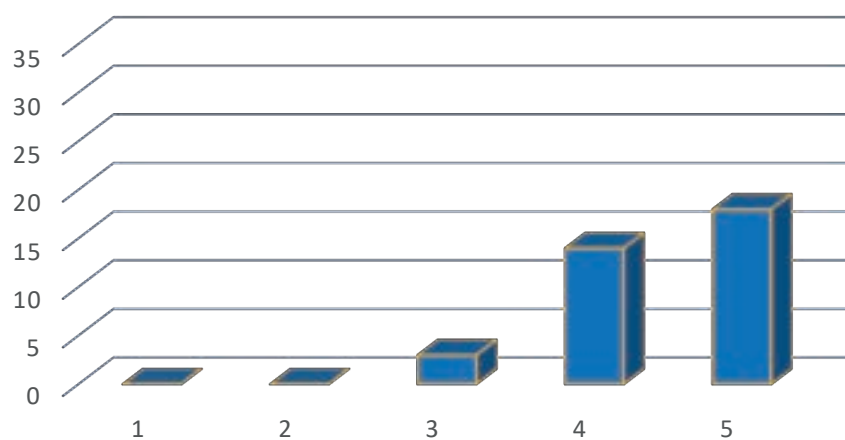


1 Baja. 5 Altísima.

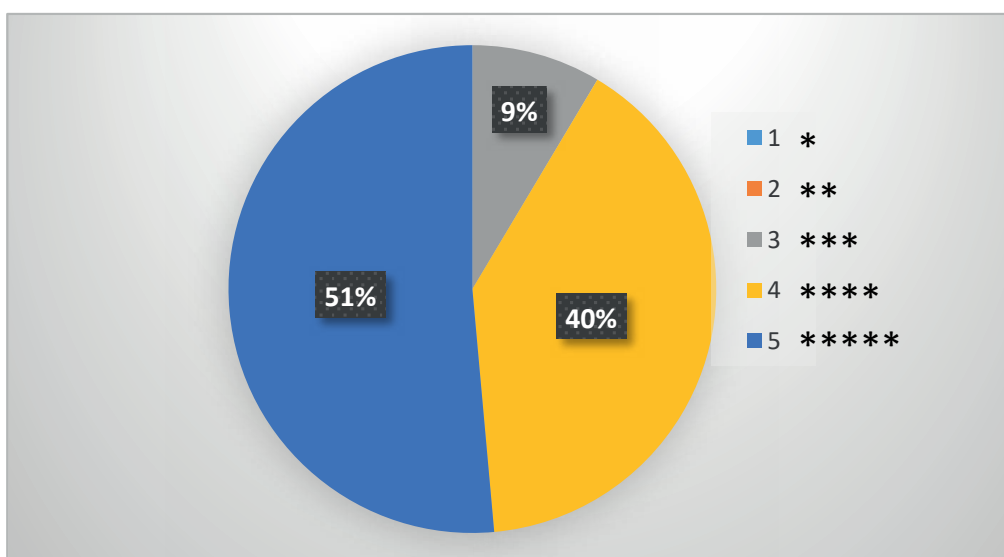


Nuestro desarrollo informático, está controlado totalmente por el usuario (estudiante). Es él quien decide la forma de visualizar las imágenes y en la posición espacial que desee, por lo que consideramos que nuestra aplicación informática constituye una verdadera herramienta docente en la que existe una interacción entre el ordenador y el usuario, evitando así, en la medida de lo posible, que este último se convierta en un mero espectador.

**F.- Considera este procedimiento tecnológico mejor que muchos atlas anatómicos para el estudio morfológico de la anatomía del aparato respiratorio**

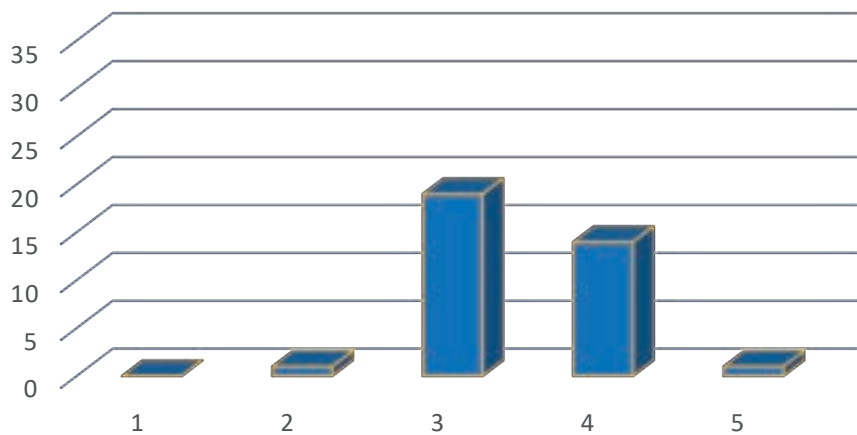


1 Baja. 5 Altísima.

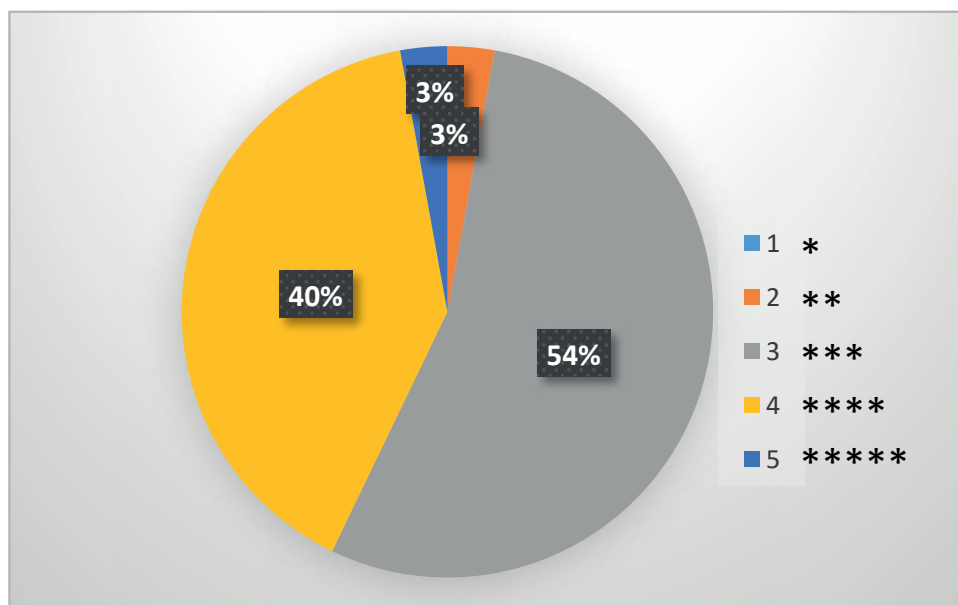


La introducción de estas herramientas tecnológicas didácticas en la docencia enriquece de manera considerable el proceso de enseñanza-aprendizaje. Aprender interactuando con la información, motiva y proporciona a los estudiantes a una actitud activa para un aprendizaje autónomo y significativo.

**G.- El contenido incorporado en el programa informático es suficiente para su formación académica, siendo bastante completo e ilustrativo:**



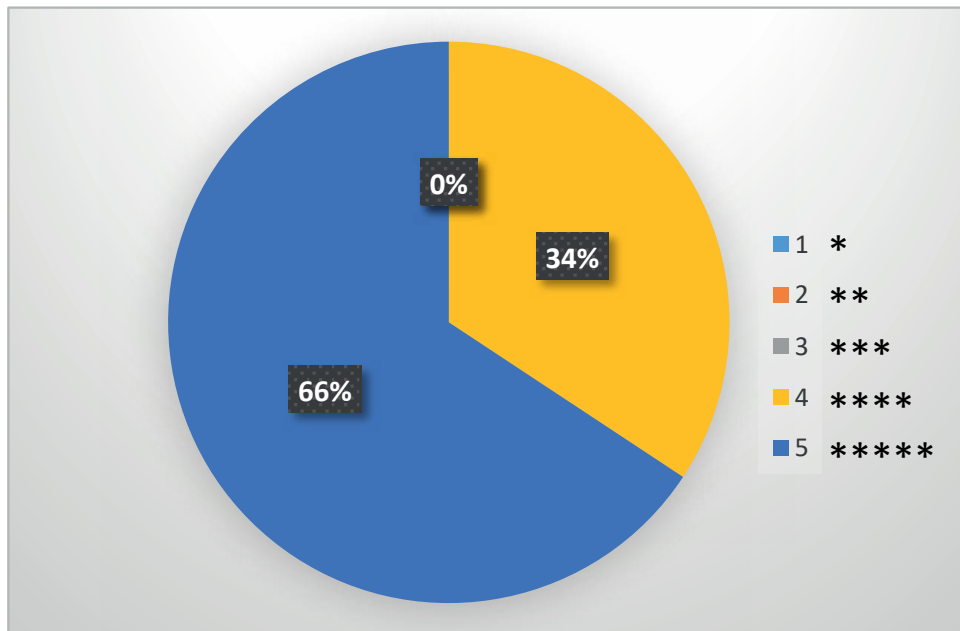
1 Baja. 5 Altísima.



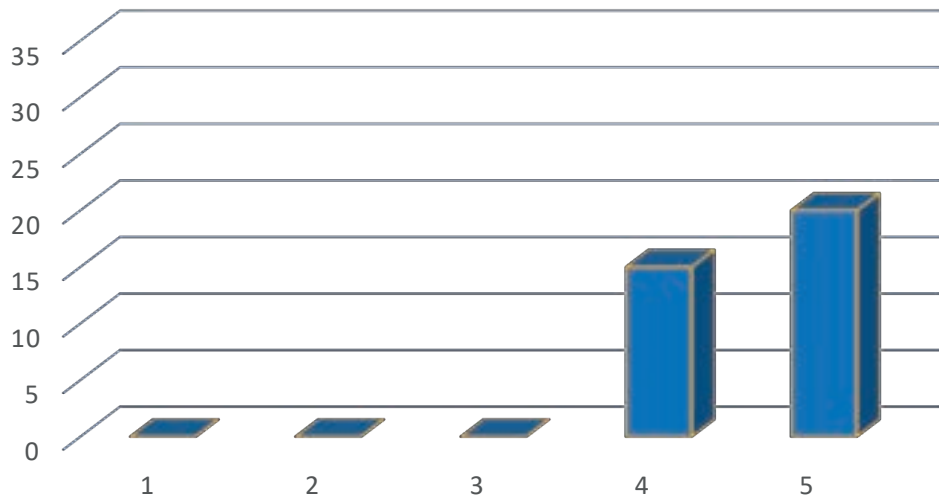
**H.- Mediante la tecnología de visión tridimensional utilizada ha empleado menos tiempo para el aprendizaje de la anatomía del aparato respiratorio, respecto a otros métodos tradicionales (uso de libros ilustrados, clases teóricas, practicas, videos, etc.)**



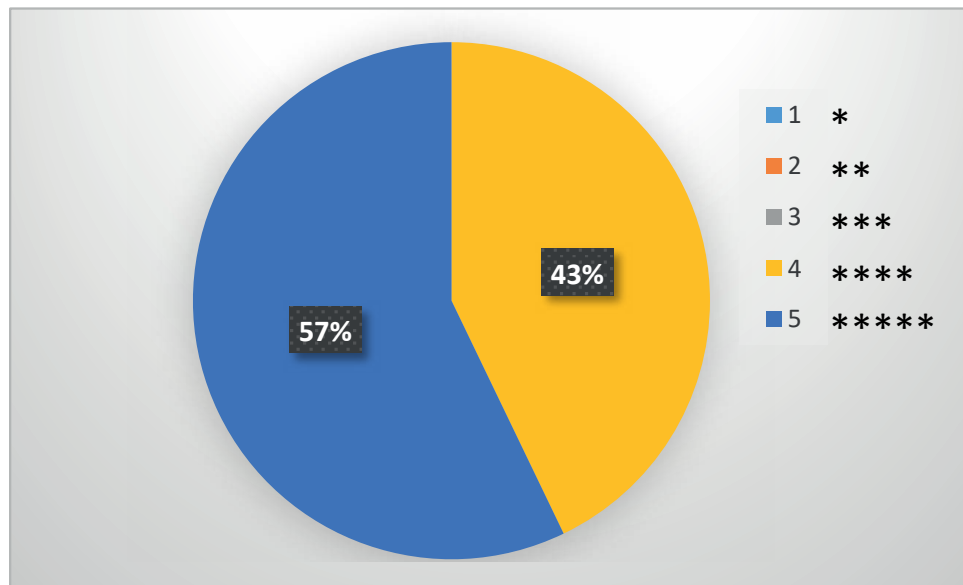
1 Baja. 5 Altísima.



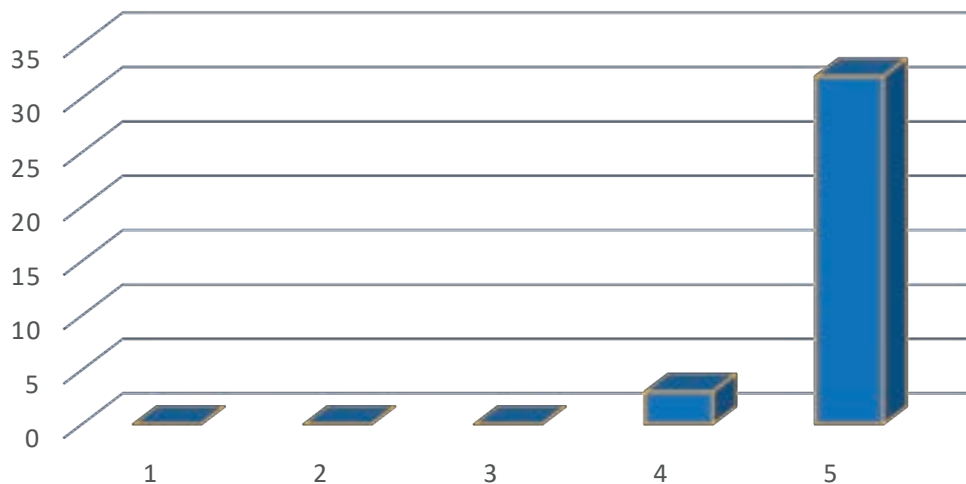
**I.- Considera esta tecnología de visión 3D interactiva un buen recurso docente complementario para el proceso de enseñanza y aprendizaje:**



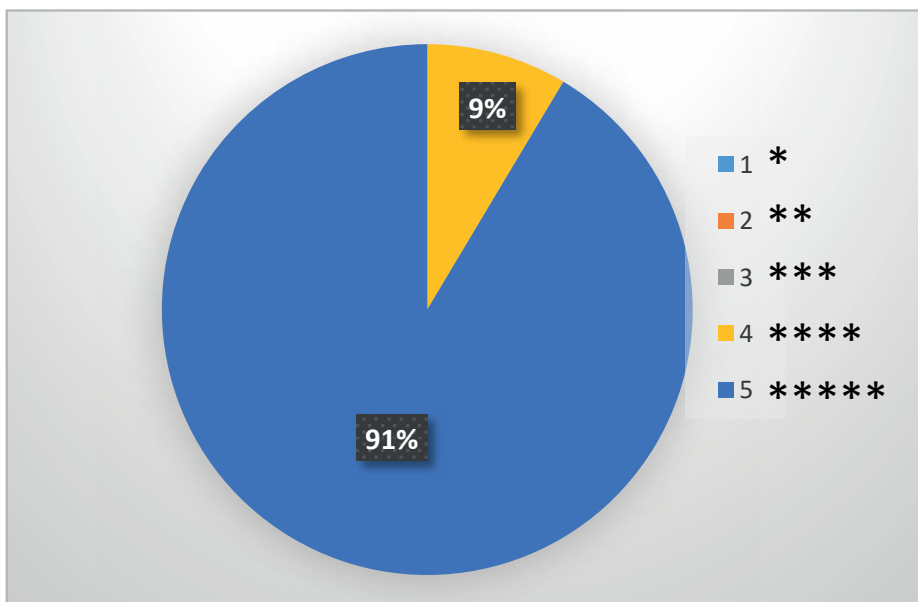
1 Baja. 5 Altísima.



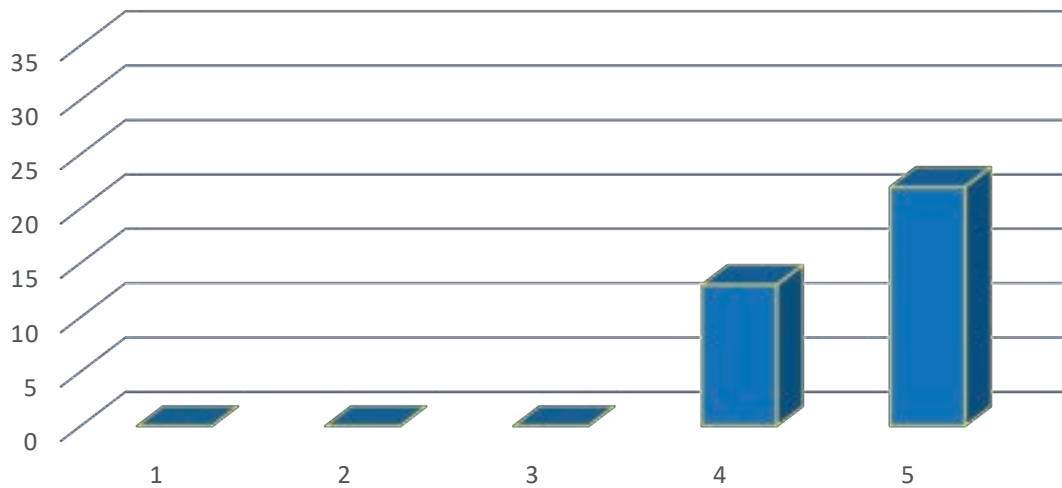
**J.- Desde el punto de vista de presentación visual, ¿cómo evaluaría los contenidos visualizados?**



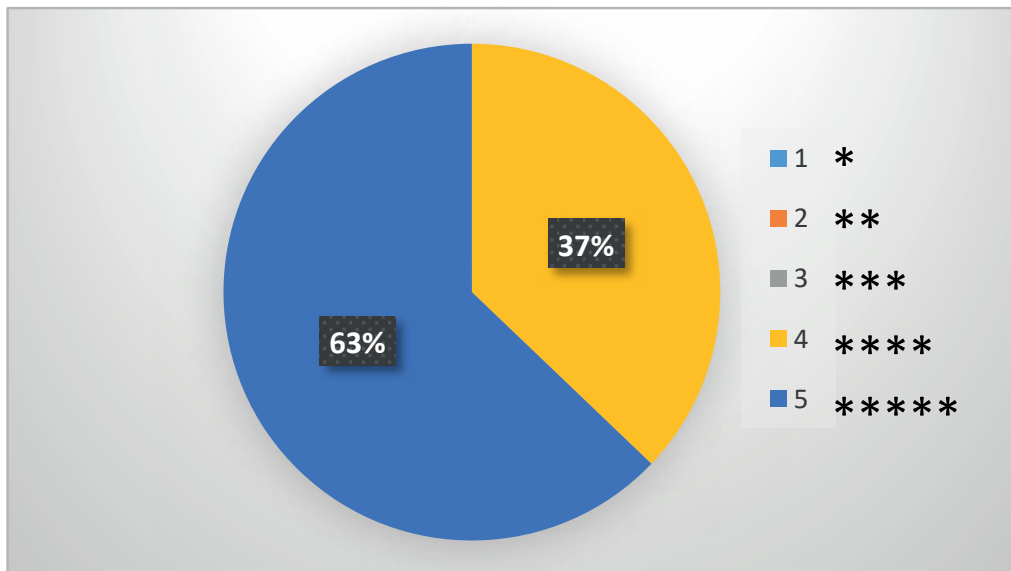
1 Baja. 5 Altísima.



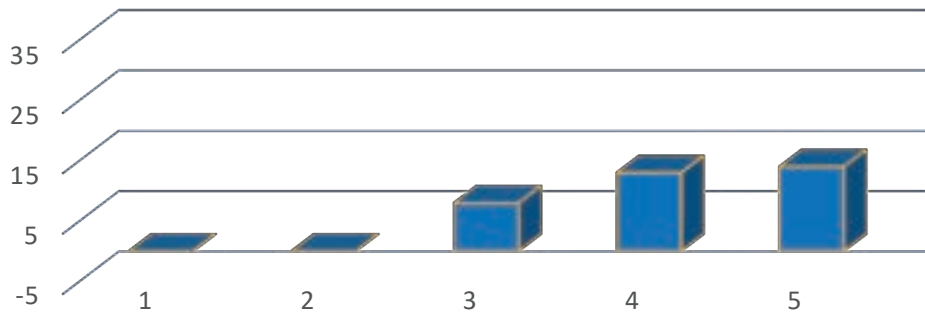
**K.- La navegación por el programa es muy intuitiva y presenta un desarrollo metodológico que motiva su aprendizaje de forma ágil y sencilla:**



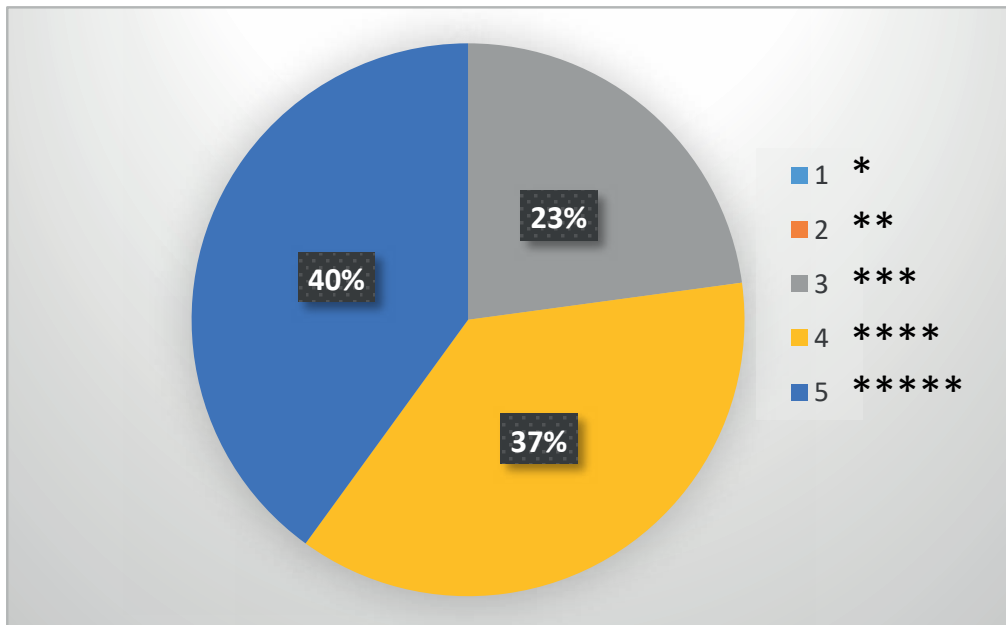
1 Baja. 5 Altísima.



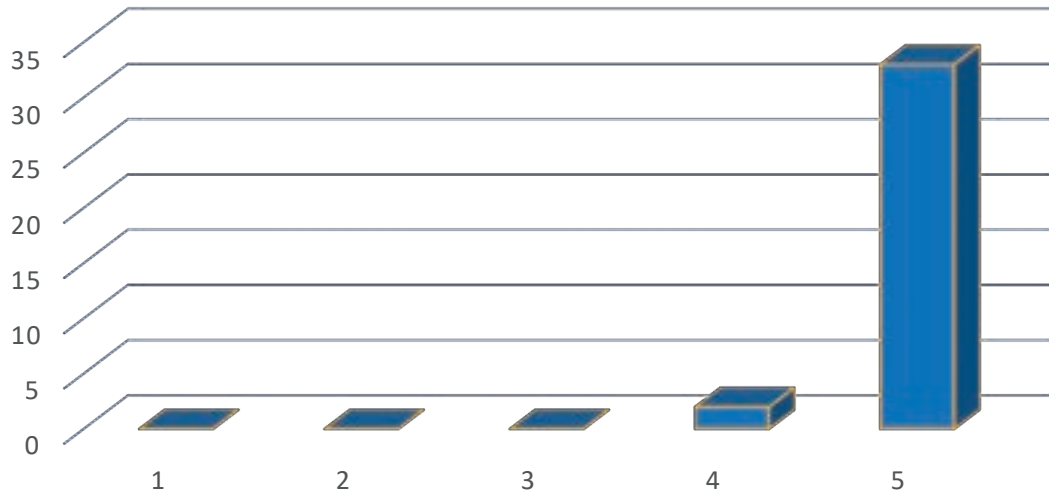
**L.- Los comentarios explicativos breves y concisos que aparecen en la pantalla le ayudan a comprender mejor la anatomía del aparato respiratorio, así como a afianzar su conocimiento:**



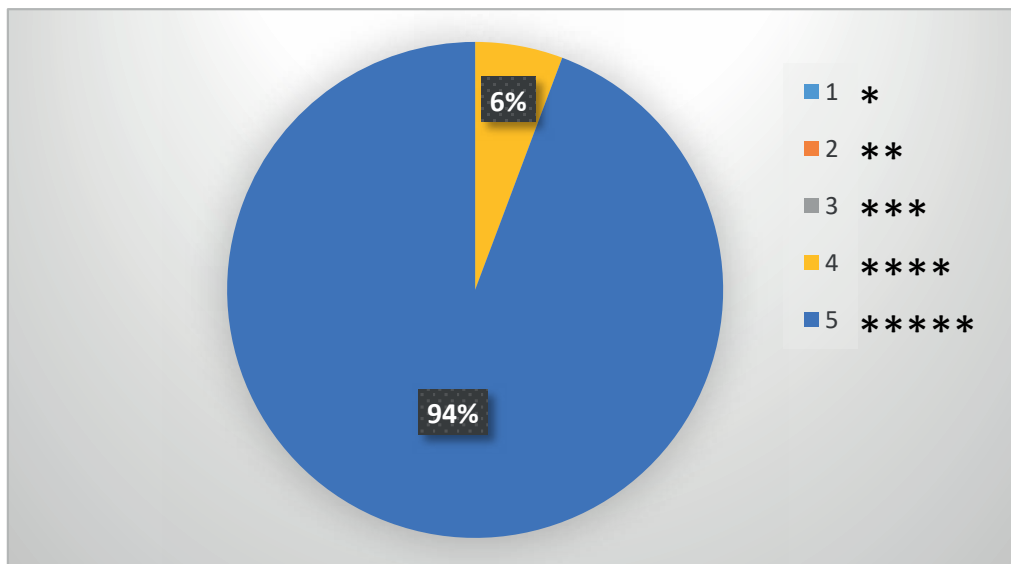
1 Baja. 5 Altísima.



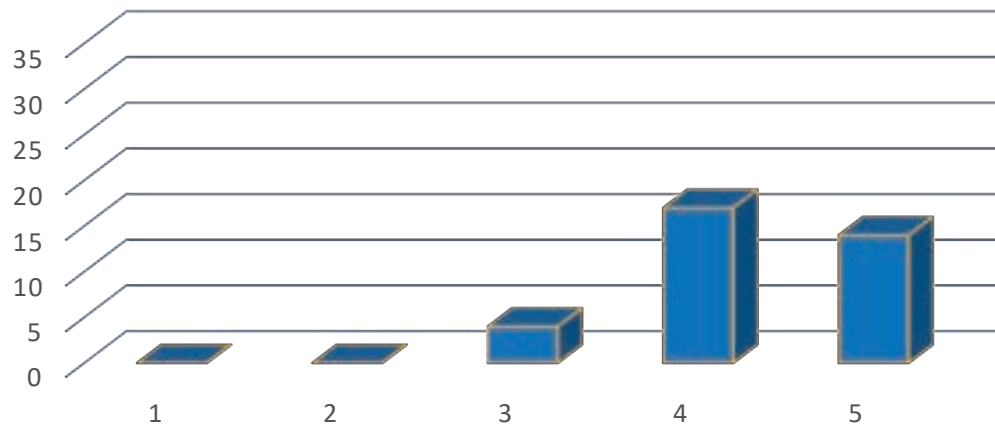
### M.- La interfaz del programa es intuitiva y de fácil manejo



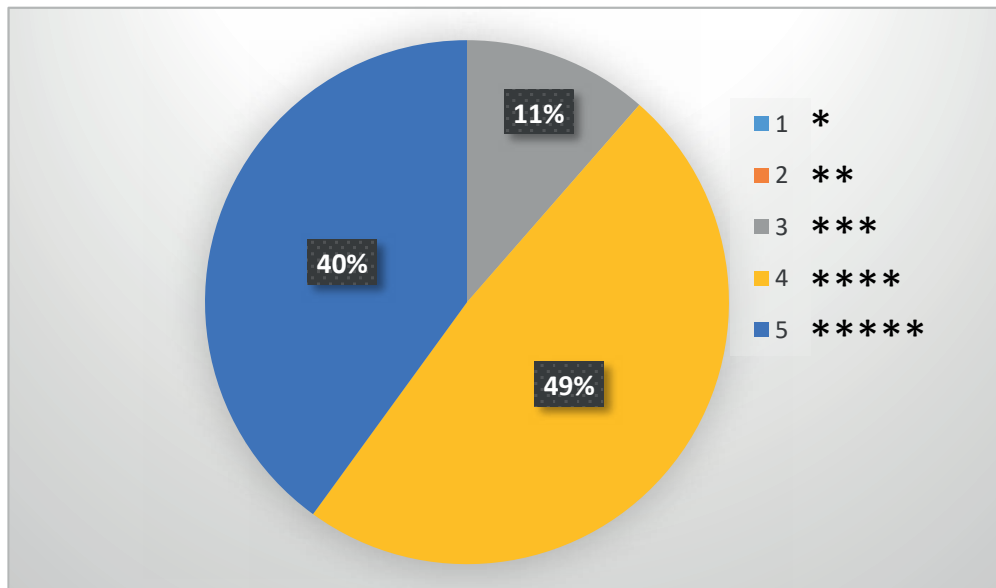
1 Baja. 5 Altísima.



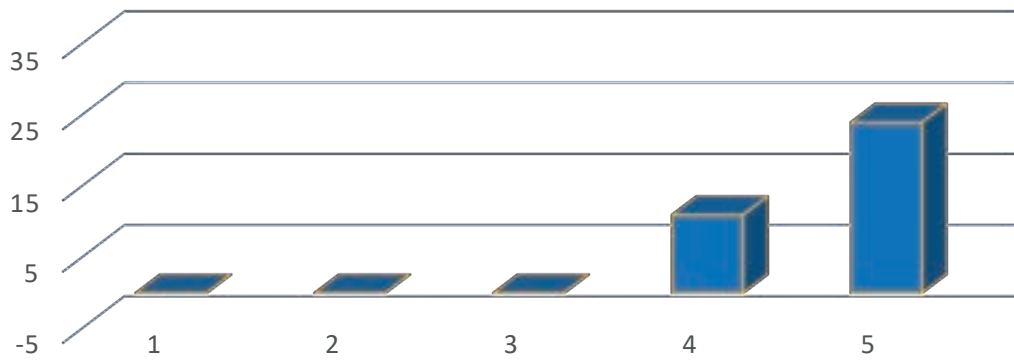
**N.- Como considera la aportación de este material docente complementario a la formación médica para el estudio del aparato respiratorio**



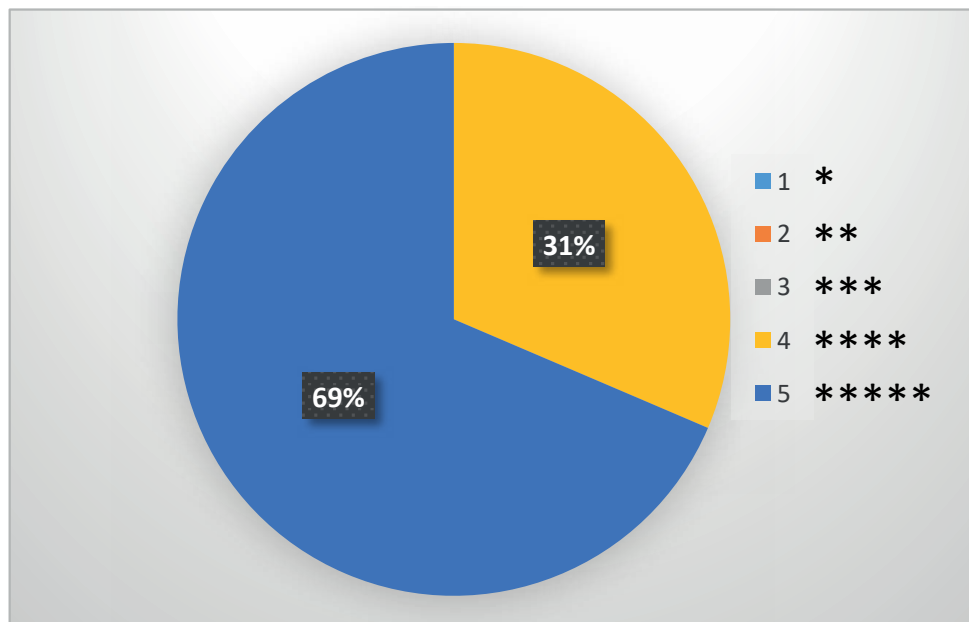
1 Baja. 5 Altísima.



### O.- Recomendaría a otros compañeros estos desarrollos informáticos para el aprendizaje y estudio de la Anatomía y Radiología del aparato respiratorio



1 Baja. 5 Altísima.



### 3. Abordaje quirúrgico robotizado

Como ejemplo del abordaje quirúrgico mediante cirugía robotizada con el robot Da Vinci, presentamos un protocolo de lobectomía superior derecha, en donde la podemos resumir en los siguientes pasos que se llevaron a cabo: se realiza en los siguientes 12 pasos:

**1. Colocación de puertos** (Figura 68). Se identifica la escápula y se marca el borde. A continuación, se palpa el punto medio de la columna vertebral y luego se dibuja una línea a lo largo de los pedículos laterales derechos vertebrales. Las costillas se cuentan y la parte superior de la novena costilla está marcada de anterior a posterior. Los sitios de incisión para los brazos robóticos 1, 2 y 3 se marcan a lo largo de la línea de la novena costilla, medida desde su intersección con el pedículo lateral derecho. El sitio para el brazo robótico 1 (puerto de 8 mm) está marcado a 4 cm del pedículo lateral derecho. El brazo robótico 2 (8 mm) se coloca 8 cm medial al brazo robótico 1, y el puerto de la cámara se coloca 8 cm medial al brazo robótico 2. Ocasionalmente, un paciente más pequeño puede requerir ajustar el espaciado de estos puertos (como 2 cm, 7 cm y 7 cm). Se realiza una incisión en la marca del sitio del puerto de la cámara y se coloca un trócar, seguido de la inserción de la cámara toracoscópica. Una vez que se asegura la visualización de la cavidad torácica, se inicia la insuflación. Bajo visualización toracoscópica, se administra analgesia preventiva. Los puertos posteriores se colocan ayudados por la cámara. Un puerto de 12 mm para el brazo robótico 4 se coloca anteriormente en el séptimo espacio, evitando los músculos rectos y se coloca justo encima del diafragma. Finalmente, el puerto asistente se coloca inferior y entre el puerto de la cámara y el puerto para el brazo robótico 4, creando una configuración triangular.



Figura 68. Colocación de los 4 puertos robóticos y del puerto del ayudante.

**2. Disección del ligamento pulmonar inferior y extirpación de los ganglios linfáticos de las estaciones 8 y 9** (Figura 69). El brazo robótico 1 se utiliza para retraer el pulmón para exponer el ligamento pulmonar inferior. Al comenzar, se explora el tórax para asegurar la ausencia de lesiones metastásicas. Se libera el ligamento pulmonar inferior y se extirpan los ganglios linfáticos de las estaciones 8 y 9.

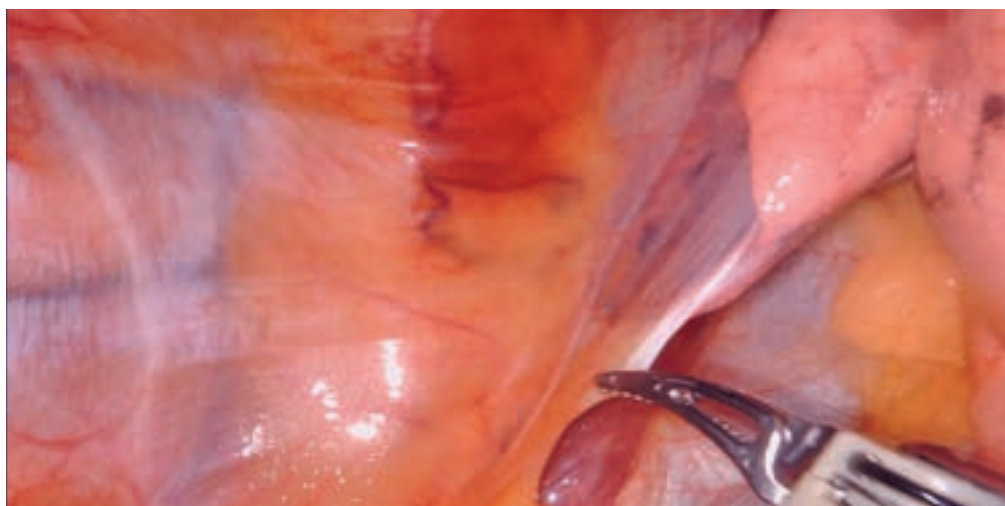


Figura 69. Disección del ligamento pulmonar inferior

**3. Disección de los ganglios linfáticos de la estación 7** (Figura 70). Se disecciona el paquete de ganglios linfáticos subcarinales de la estación 7. Se tiene cuidado para asegurar la hemostasia a medida que se retira todo este paquete de ganglios linfáticos. Es importante destacar que usamos el brazo robótico 1 para simplemente empujar contra el segmento superior (S6) para retraerlo anteriormente y exponer el pulmón.

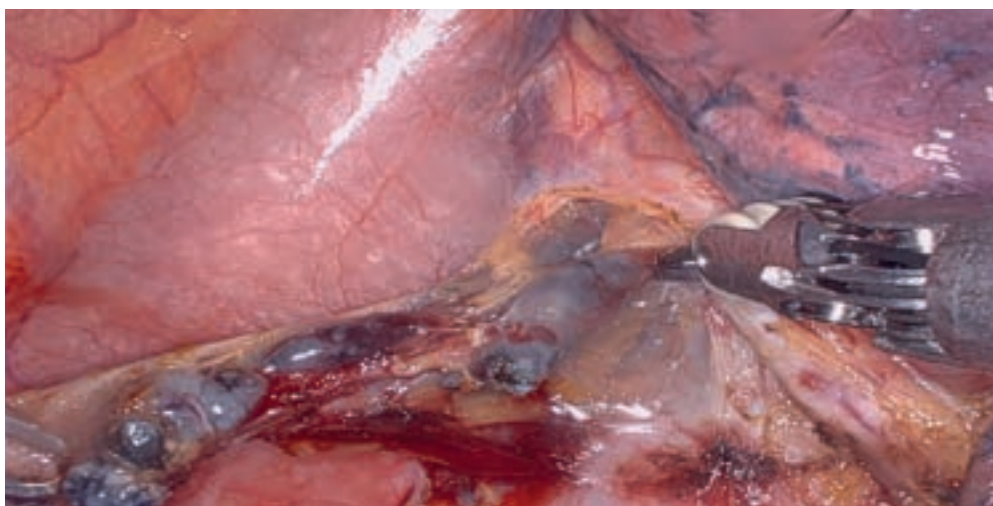


Figura 70. Disección de los ganglios linfáticos de la estación 7 subcarínica

**4. Disección del ganglio linfático de la estación 11** (Figura 71). Una vez que se retira todo el paquete de ganglios linfáticos subcarinales, es fundamental localizar la vena posterior (V2). El bronquio se puede diseccionar para identificar y distinguir el inicio del lóbulo superior derecho del bronquio principal derecho. El ganglio linfático de la estación 11 se encuentra debajo del lóbulo superior derecho y en la parte proximal del bronquio intermedio. El ganglio de la estación 11 debe researse con cuidado porque la arteria pulmonar se encuentra justo debajo de este ganglio, al igual que la vena V2.

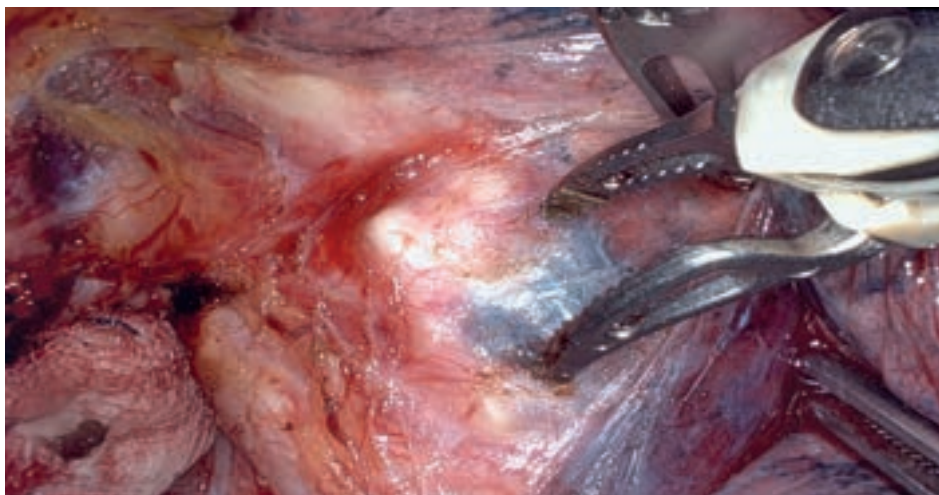


Figura 71. Disección del ganglio linfático de la estación 11 entre el bronquio intermedio y el tronco de la arteria pulmonar para el lóbulo inferior derecho

**5. Completar de la cisura posterior** (Figura 72). En un paciente con una cisura completa o casi completa, la fisura se puede diseccionar cuidadosamente para identificar la anatomía subyacente. Se deben identificar la vena V2 y las ramas de la arteria pulmonar ascendente posterior (A2) y la arteria pulmonar del segmento superior (A6), así como cualquier vena aberrante que cruce la cisura.

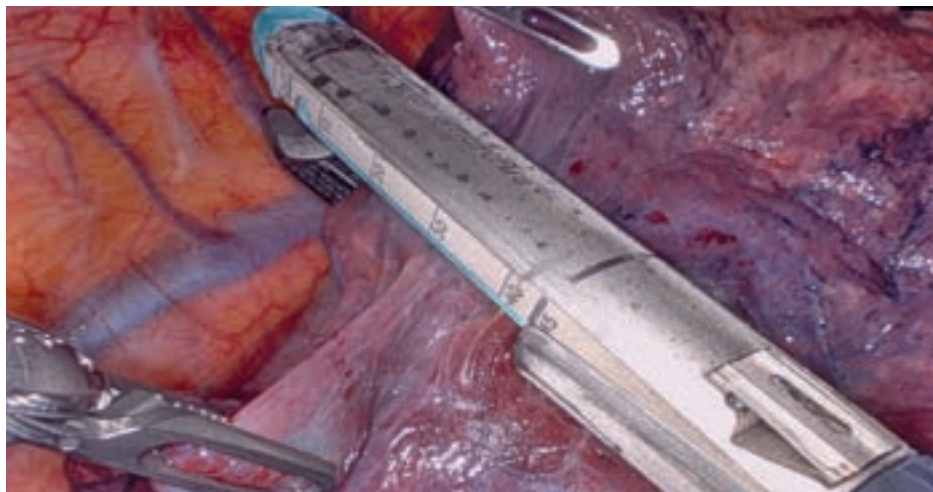


Figura 72. Imagen que muestra la sección de la parte posterior de cisura mayor incompleta mediante endograpadora-cortadora

**6. Disección y división de la arteria pulmonar ascendente posterior** (Figura 73). Se identifica la salida de la arteria A2, al igual que la vena V2 que corre por encima de ella, La rama A2 se secciona con una grapadora vascular (Figura 74).

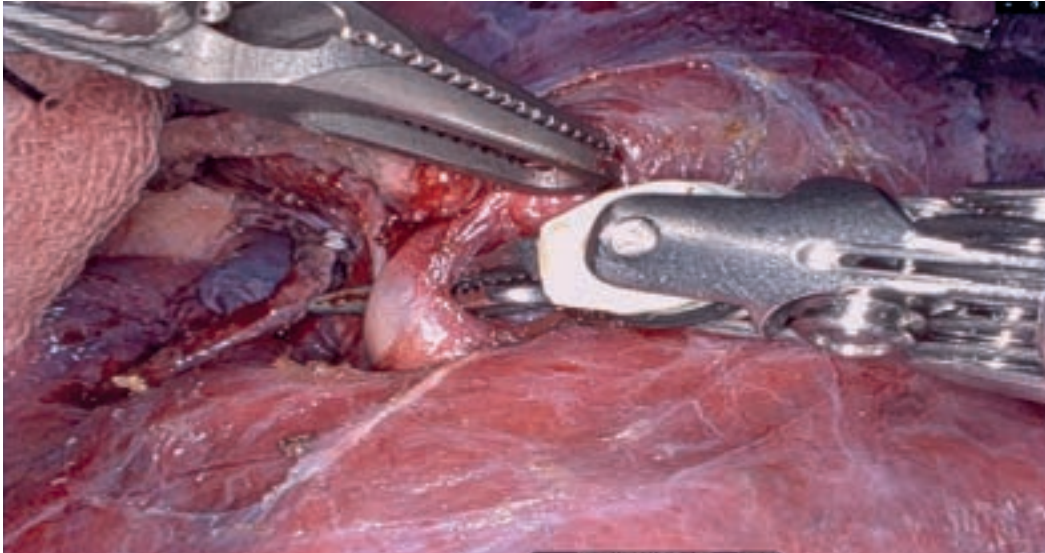


Figura 73. Disección de la arteria pulmonar ascendente posterior mediante el instrumento robótico "Maryland bipolar"



Figura 74. Sección de la arteria pulmonar ascendente posterior con una endograpadora-cortadora vascular

**7. Disección y división del bronquio del lóbulo superior derecho** (Figura 75 a, b, c y d). El bronquio del lóbulo superior derecho se disecciona del ganglio linfático 10R subyacente y el tronco de la arteria (A1/A3). El bronquio se retrae y la disección se lleva a cabo justo debajo del bronquio, eliminando todos los ganglios linfáticos estación 10. El bronquio se libera de la anatomía subyacente. Todo el paquete de ganglios linfáticos 10R se puede reseca posteriormente en este momento. Es importante en este paso diseccionar cuidadosamente la arteria pulmonar de la superficie anterior del bronquio para proporcionar una ventana clara para la disección.

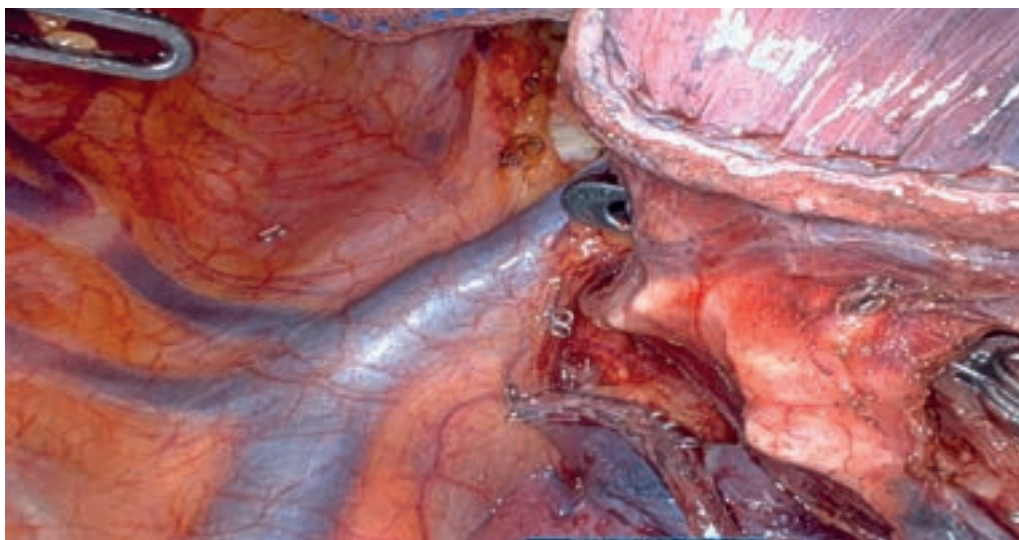


Figura 75a. Discección del bronquio del lóbulo superior derecho mediante el instrumento robótico "tip up".

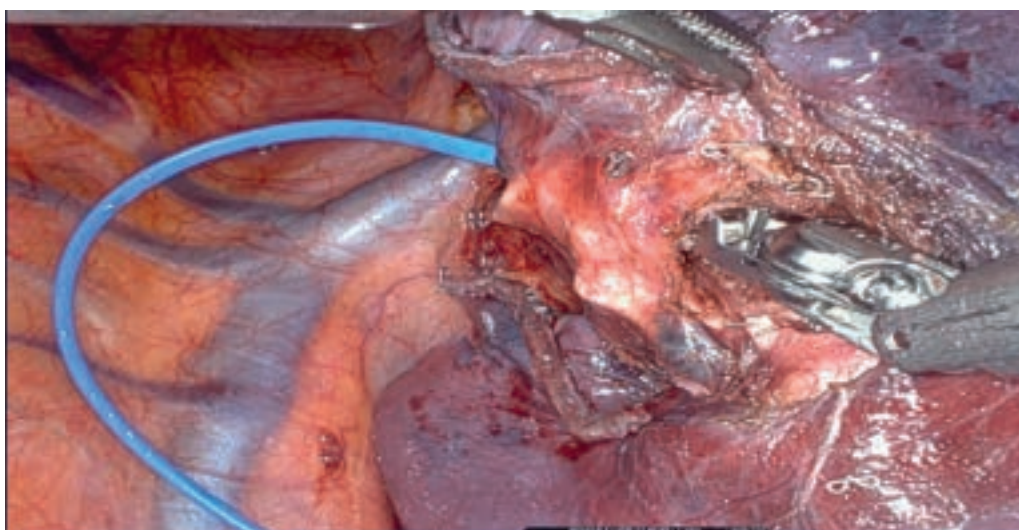


Figura 75b. Discección del bronquio del lóbulo superior derecho colocación de "vessel loop" para tracción

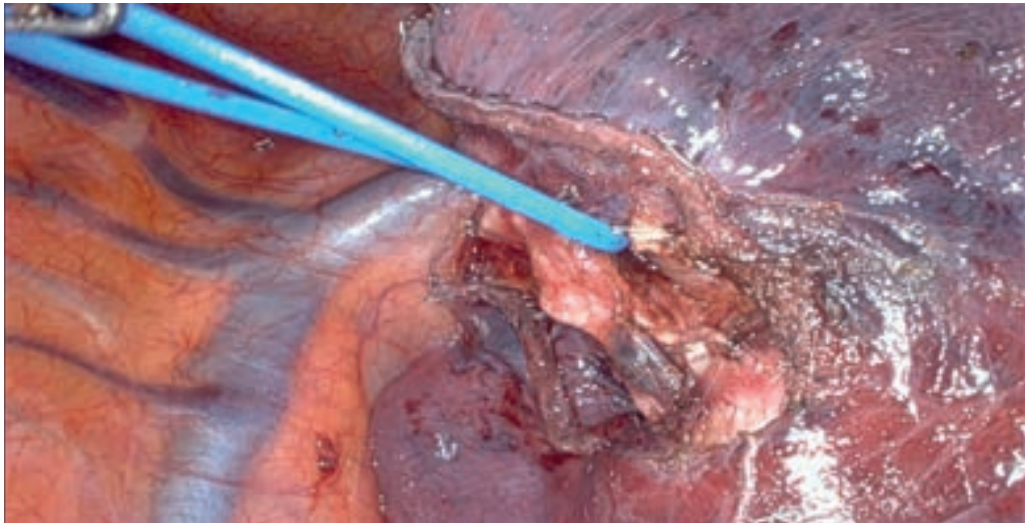


Figura 75c. Disección del bronquio del lóbulo superior derecho, tracción del bronquio con "vessel loop"

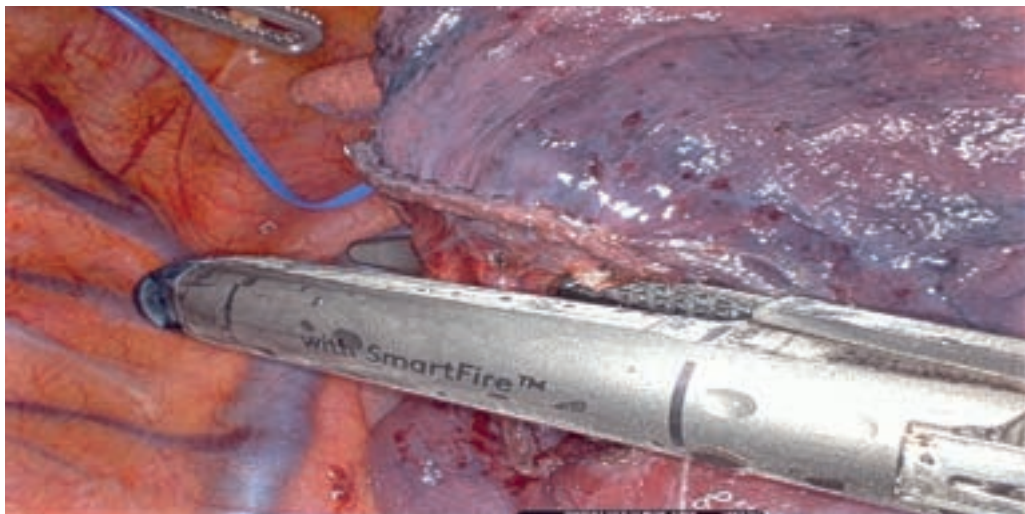


Figura 75d. Sección del bronquio del lóbulo superior derecho con una endograpadora-cortadora

**8. Disección y división del tronco arterial** (Figura 76). Una vez que se identifican la arteria pulmonar anterior (A3) y apical (A1), también conocida como tronco arterial, se pueden disecar por separado o juntos. La vena ácigos debe identificarse cuidadosamente durante esta parte del procedimiento. Preferimos sostener el bronquio dividido con el brazo robótico 2, exponiendo la vena V2, la vena ácigos y las ramas A1 y A3. Las ramas arteriales se pueden grapar con una grapadora vascular.



Figura 76. Disección y división del tronco arterial pulmonar común de las ramas apical y anterior

**9. Disección y división de la vena del lóbulo superior** (Figura 77). Se retrae el pulmón anteriormente; El brazo robótico 4 se puede utilizar para mantener el pulmón en esta posición retraída. Al hacerlo, se puede lograr el acceso a la vena del lóbulo superior; resecamos la vena del ganglio linfático 10R, con cuidado de identificar y evitar el nervio frénico. Se identifican la vena cava superior y la unión ácigos, y los ganglios linfáticos area 10 se extirpan por completo. Luego se puede disecar toda la vena V2. V1 y V3 a menudo están completamente englobados dentro de V2.

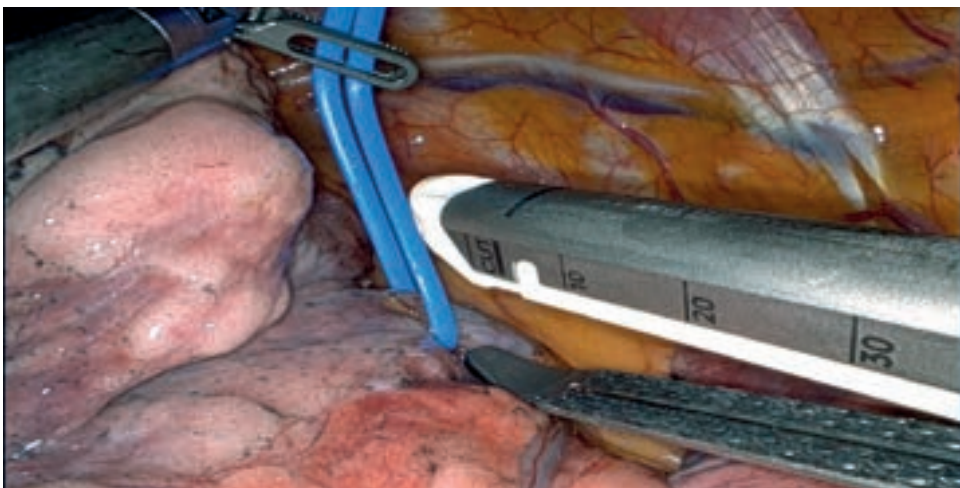


Figura 77. Disección y división de la vena del lóbulo superior derecha con una endograpadora-cortadora vascular

**10. Disección de los ganglios linfáticos de las estaciones 2 y 4** (Figura 78). Es fundamental que en todos se realice una linfadenectomía sistemática. Se identifican la arteria innominada y el receso superior del pericardio. Luego se identifica la tráquea y se tiene cuidado de preservar el nervio vago a medida que los paquetes de ganglios linfáticos 2R y 4R se diseccionan de la tráquea. Los ganglios linfáticos adicionales restantes de la estación 10 se pueden extirpar en este momento levantando los ácidos para exponer estos ganglios colindantes con la arteria pulmonar.



Figura 78. Discección de los ganglios linfáticos de las estaciones 2 y 4, ambas en la región paratraqueal derecha

**11. Finalización de la cisura anterior** (Figura 79). La visión posterior permite seccionar la cisura mientras se continúa retrayendo el pulmón anteriormente, esto permite un menor reposicionamiento del pulmón. Durante la finalización de la cisura, es importante asegurarse de que las estructuras hiliares seccionadas del lóbulo superior derecho estén por encima de la línea de grapa.

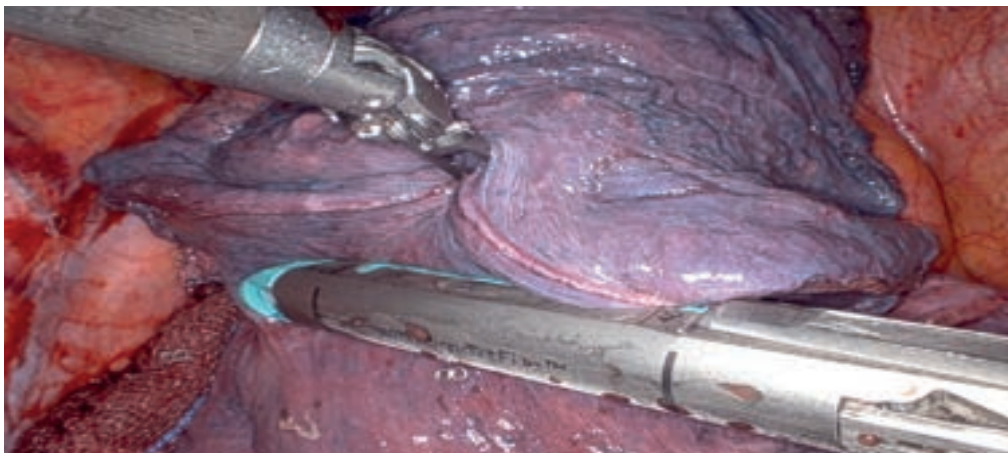


Figura 79. Sección de la cisura menor mediante una endograpadora-cortadora

**12. Extracción de la pieza de lobectomía** (Figura 80). La bolsa se coloca a través del puerto anterior. Mientras la bolsa se despliega en la cavidad torácica, el brazo robótico 1 se utiliza para tirar de la esquina de la bolsa hacia abajo para ayudar a abrir ampliamente la bolsa. Los brazos robóticos 1 y 2 se utilizan para colocar la muestra en la bolsa. Antes de sacar la bolsa, nos aseguramos de que no quede atrapada en ninguna línea de grapas. Se realiza hemostasia, con un examen cuidadoso de todos los orificios de los puertos. Se coloca un tubo torácico de 20 Fr en el tórax y el pulmón se vuelve a expandir bajo visualización directa.

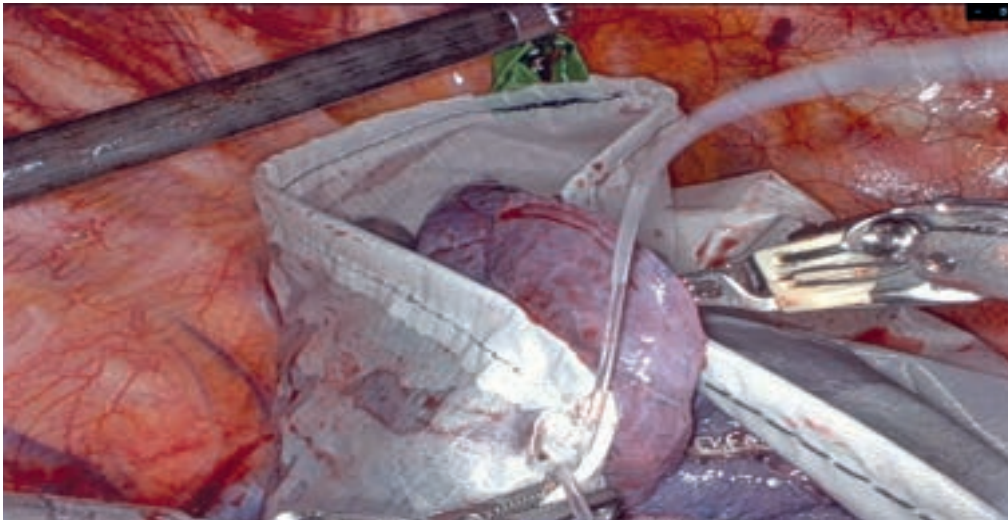


Figura 80. Extracción de la pieza de lobectomía mediante bolsa de alta resistencia a través de uno de los puertos

## Discusión

---



La anatomía macroscópica es uno de los pilares de la enseñanza de la medicina, al igual que en otras ciencias de la salud. Los métodos tradicionales para la enseñanza de la anatomía humana implican la utilización libros de texto, atlas y disecciones cadavéricas (Poirier y cols., 1909; Testut y Latarjet, 1968; Pansky, 1998; Feneis. y Dauber, 1998; Clasca y cols., 2002; Garcia Porrero, y Hurlle , 2005; Rouviere y Delmas, 2005; Canby, 2007; Netter , 2007; Moore y Dalley, 2007; Moore y Agur , 2007; Amat y Smith-Agreda, 2008; Lippert , 2009; Dykes y Watson, 2010; Rohen y cols, 2011; Preim y Saalfeld, 2018; Ferrando Castro, 2019; Wineski, 2019).

La visión tridimensional de la arquitectura del cuerpo humano, supone un gran avance, tanto para la enseñanza-aprendizaje de la anatomía humana, como para el diagnóstico clínico (Robb, 1995; Perlemuter, 1999; Temkin y cols., 2002; Eckhoff y cols, 2003; Parikh y cols., 2004; Li y cols., 2006; Temkin y cols., 2006; Abildgaard y cols, 2010; Abid y cols., 2010; Estevez y cols., 2010; De Notaris y cols., 2010; 2011; Moszkowicz y cols., 2011; Sora y cols., 2011; Ruisoto y cols., 2012; Nowinski y cols., 2013; Lewis y cols., 2014; McMenamin 2014; Allen y cols., 2015; Drapkin y cols., 2015; AbouHashem y cols, 2015; Azer y Azer, 2016; Hackett. y Proctor, 2016; Marro y cols., 2016; An y cols, 2017; Tabernerico y cols., 2017; Lone y cols., 2018; Zilverschoon y cols., 2018; Asensio Romero y cols, 2018; Erolin, 2019; Triepels y cols., 2019; O'Rourke y cols., 2020).

En las últimas décadas las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han revolucionado todos los ámbitos sociales y han irrumpido con fuerza en el sistema educativo, evidenciando la necesidad de establecer cambios en los modelos pedagógicos tradicionales para adaptarlos de manera más acorde a las demandas de la sociedad actual y a las características de un alumnado acostumbrado a convivir cotidianamente con la tecnología (Alvarez, 1984; Beccaría y Rey , 1999; Rodríguez Lamas, 2002; Morrissey, 2010; Prats Galino , 2010; Garcia y Lopez, 2011; Martínez y cols., 2017; Veloz y cols., 2012; Guerrero, 2014; Ricardo Barreto, y Diazgranados, 2017; Moreira , 2019).

Es evidente que las nuevas generaciones de estudiantes universitarios están cada vez más familiarizadas con los medios digitales, aprovechando la enorme potencialidad que ofrecen hoy día las distintas tecnologías en la transmisión de conocimientos y la predisposición de los estudiantes actuales a incorporar en sus estudios metodologías y recursos más innovadores sustentados en los avances tecnológicos (Gehrmann y cols., 2006; Astudillo y cols., 2018; Sáez López, 2018; Guerrero, 2014; Juanes y Ruisoto, 2014; Belloch, 2012; Morrisey, 2010; Vázquez y cols., 2007). Los avances tecnológicos han introducido nuevos y valiosos conceptos en los modelos de aprendizaje (Castillejo, 1986; Anderson y Jay, 1987; Garg y cols., 1999; Bustos Sanchez y Coll Salvador, 2010; Cook y cols., 2011; Framinan y cols., 2013; Briz Ponce y cols., 2014; Briz-Ponce y Garcia-Penalvo, 2015; Briz-Ponce y cols., 2017; Clunie y cols., 2018; Bin y cols., 2020; Golenhofen y cols., 2020).

El desarrollo tecnológico que nosotros hemos elaborado promueve el aprendizaje autónomo y convierte al estudiante en protagonista directo de su proceso de aprendizaje. La interacción continua con la aplicación informática, además de estimular el desarrollo de habilidades para mejorar la capacitación informática y audiovisual, despierta el interés y la motivación en el estudio.

La aplicación de metodologías de carácter tecnológico puede ayudar a los estudiantes a mejorar los resultados de aprendizaje al aumentar la participación e involucración de los mismos en la actividad de estudio (Juanes y cols., 2013; Juanes y cols., 2014; Juanes y Ruisoto, 2014; Morris y cols., 2016; Pickering y Swinnerton, 2018; Papadopoulou y cols., 2019; Lai y cols., 2020; Moro y cols., 2020)

En este sentido, apreciamos que los usuarios a los que se les ofreció realizar el estudio de la anatomía del aparato respiratorio con nuestra aplicación estaban bastante familiarizados con las herramientas tecnológicas, disponiendo la mayoría de teléfonos móviles de última generación con potentes sistemas operativos, que utilizaban durante varias horas diarias, principalmente para las relaciones sociales y el entretenimiento, siendo ocasionalmente empleados para la obtención de información o consulta de noticias y en muy pocas ocasiones para temáticas relacionadas con el ámbito docente. La mayoría de ellos contaba con una buena destreza en la instalación o desinstalación de diferentes aplicaciones para estos dispositivos móviles, pero solamente las empleaban de forma esporádica para la formación académica, aunque reconocían que la utilización de recursos de carácter multimedia (texto, imágenes, videos...), facilitaba el conocimiento y la comprensión de los temas consultados y que otros procedimientos tecnológicos, como la realidad virtual, implementados adecuadamente, podían ser un buen recurso didáctico.

La familiaridad de estas nuevas generaciones de estudiantes con los medios digitales, la constatación de que la enseñanza tradicional basada en la clase magistral del profesor y la evaluación mediante un examen final de los alumnos, basado en la memorización y la reproducción de la información, ha resultado ser una herramienta poco eficaz en el proceso de enseñanza-aprendizaje, la enorme potencialidad que ofrece la tecnología en la transmisión de conocimientos y la predisposición de los estudiantes actuales a incorporar en sus estudios metodologías más innovadoras sustentadas en los avances tecnológicos, son las cuestiones fundamentales que han conducido a considerar la aplicación de las TIC en la enseñanza del siglo XXI como una premisa esencial en la educación (Rodríguez Lamas, 2002; Vázquez y cols., 2007; Belloch, 2012; Juanes y Ruisoto, 2014; Guerrero, 2014; Prats-Galino y cols., 2015; Ricardo Barreto y Diazgranados, 2017; Astudillo y cols., 2018; Sáez López, 2018).

En el área de las ciencias de la salud, y especialmente en Medicina, la enseñanza de anatomía está a la vanguardia de la integración de metodologías tecnológicas innovadoras en sus planes de estudio (Clunie y cols., 2018). El gran potencial de las tecnologías junto con el vertiginoso desarrollo de las técnicas de diagnóstico por imagen como la tomografía computarizada, la resonancia magnética, la ecografía, etc.; dirigida principalmente al diagnóstico y a la práctica clínica, y la posibilidad de combinación de estos procedimientos ha abierto nuevas fuentes de enseñanza complementarias a la metodología tradicional, que clásicamente se venía ejerciendo a través de los libros de texto, las ilustraciones y la disección cadavérica (Papadopoulou y cols., 2019; Ghosh, 2015; Juanes y Ruisoto, 2014).

Es evidente que en el campo educativo, y especialmente en la formación médica, la tendencia indica que la tecnología y la educación evolucionaran de forma paralela, de manera que las necesidades educativas impulsaran el progreso tecnológico y este a su vez inducirá cambios en

los modelos educativos, lo que en definitiva confirma que en la era de la información y la comunicación, el binomio educación-tecnología será uno de los pilares básicos para el desarrollo, el crecimiento y el progreso de la sociedad.

Los avances tecnológicos han introducido nuevos y valiosos conceptos en los modelos de aprendizaje. El aprendizaje centrado en el estudiante, continuo, interactivo, autónomo, flexible, o colaborativo son términos que han adquirido gran relevancia en la metodología didáctica de las últimas décadas (Domínguez Merlano, 2010). Sin embargo, para dotarlos de auténtico valor formativo es necesaria la transformación tanto de los escenarios educativos, en los que el profesor es el centro de atención, como del papel tradicionalmente adoptado por los profesores y los estudiantes, pues el aprendizaje se construye fundamentalmente, mediante el proceso de interacción y retroalimentación permanente entre ambos (Pickering y Swinnerton, 2018).

La metodología que nosotros presentamos, promueve el aprendizaje autónomo y convierte al estudiante en protagonista directo de su proceso de aprendizaje. La interacción continua con la aplicación informática, además de estimular el desarrollo de habilidades para mejorar la capacitación informática y audiovisual, despierta el interés y la motivación en el estudio de la anatomía pélvica y reduce el tiempo necesario para el aprendizaje de la misma, como señalaron los estudiantes tras la implementación de nuestro recurso didáctico, que permitió así mismo una implicación en la tarea libre de barreras espacio-temporales. Coincidimos con las opiniones de Papadopoulou y cols.. (2019), Pickering y Swinnerton (2018) en que la aplicación de metodologías tecnológicas puede ayudar a los estudiantes a mejorar los resultados de aprendizaje al aumentar la participación e involucración de los mismos en la actividad de estudio. Sin embargo, para Golenhofen y cols.. (2020) el éxito de estas aplicaciones tecnológicas sobre el aprendizaje depende únicamente de la motivación o predisposición de los estudiantes para su empleo, que además parece ser mayor en los que muestran mejor rendimiento académico general.

Nuestro recurso didáctico interactivo proporciona una metodología complementaria a la enseñanza tradicional, centrada en los procesos de exploración e indagación, estimulantes del pensamiento crítico, a diferencia de la mayoría de las aplicaciones estudiadas por Martínez y cols.. (2017), que en su opinión, se basan únicamente en proporcionar nueva información pero sin potenciar habilidades que favorezcan la construcción del conocimiento en los estudiantes, lo que para Moreira (2019), Gutierrez Tapias (2018), Svirko y Mellanby (2017) y, García y López (2011) es fundamental en el proceso de enseñanza y aprendizaje y que principalmente se consigue a través de la observación, la investigación, la experiencia, la reflexión y el razonamiento.

Según Ricardo Barreto y Díazgranados (2017) todos estos cambios en las metodologías y en el entorno educativo no reflejarán los resultados esperados sobre el aprendizaje si no se tienen en cuenta premisas esenciales como la adecuación de las exigencias y de los materiales al nivel de desarrollo y capacidades del alumnado, la adaptación de los contenidos a los conocimientos previos de los estudiantes y fundamentalmente, el interés en la formación y en la integración de las nuevas metodologías didácticas en las aulas por parte de los profesores y de las instituciones educativas. Tam y cols.. (2009) señalan también que estos recursos didácticos pueden ser herramientas útiles para el aprendizaje siempre que estén bien diseñados e integrados en los planes de estudio de las disciplinas.

La extraordinaria calidad visual de las imágenes digitales que proporciona actualmente esta tecnología médica, permitiendo diferenciar densidades biológicas y gracias a ello, estructuras

anatómicas, y la posibilidad de conseguir imágenes seccionales de las mismas, ha supuesto una extraordinaria herramienta base para el desarrollo de recursos didácticos innovadores, como el que nosotros presentamos, en la docencia de anatomía. La utilidad pedagógica de las imágenes seccionales, que también pueden proceder de cortes anatómicos de cadáver, como los de la base de datos del VHP (Visible Human Project), CVH (Chinese Visible Human) (Chen y cols., 2003; Zhang y cols., 2006; Wu y cols., 2012) o VKH (Visible Korean Human) (Park, y cols., 2005; Park y cols., 2006) reside en dos aspectos fundamentales, preservan las relaciones espaciales existentes entre las estructuras vecinas, reflejando escrupulosamente la configuración y la ubicación de todos los tejidos y órganos de una zona anatómica, por lo que difieren del estudio anatómico tradicional mediante la disección, y además permiten realizar a través de procedimientos informáticos, una reconstrucción anatómica de diversos órganos, regiones corporales (en nuestro trabajo de la región pélvica femenina), o incluso del cuerpo entero, proporcionando una visualización volumétrica de los mismos (Wu y cols., 2012; Yuan y cols., 2008; Li y cols., 2006; Heng y cols., 2006; Uhl y cols., 2006; Zhang y cols., 2006).

El uso de tecnologías basadas en imágenes, especialmente las basadas en la representación en 3D, como la herramienta didáctica que nosotros desarrollamos, reflejan lo que se está enseñando en la teoría, pero con una visión tridimensional de las estructuras, lo que permite comprender y asimilar de forma más significativa el contenido que se está estudiando. Con estos medios se obtiene un nivel de visualización imposible de alcanzar con los métodos didácticos en 2D, puesto que proporcionan una visión de las estructuras con una profundidad de campo más realista, permitiendo ilustrar conceptos y principios que de otro modo serían muy difíciles de comprender por los estudiantes, especialmente aquellos que requieren habilidad espacial (Hassinger y cols., 2010).

La visualización volumétrica de una región anatómica, como la que aporta nuestro desarrollo informático, ofrece un completo análisis de la morfología, al poder valorar la forma, localización y situación de las diferentes estructuras que la componen y de las relaciones que mantienen con las adyacentes (Darras y cols., 2017; Allen y cols., 2016). Además de ser útiles en la enseñanza, tienen una interesante aplicación médica clínica, pues el conocimiento de las estructuras anatómicas en el individuo sano, facilita el diagnóstico de patologías y puede servir de base para la planificación de un abordaje quirúrgico en la zona de estudio (De Notaris y cols., 2013).

Hoy día existen multitud de aplicaciones 3D, como la que hemos desarrollado en este trabajo, susceptibles de ser utilizadas para el aprendizaje de anatomía y otras disciplinas relacionadas con el área de la salud, algunas incluso con una finalidad comercial además de educativa (García Fenoll, 2010; Keedy y cols., 2011; Kraima y cols., 2013; Drapkin y cols., 2015; Mavar-Haramija y cols., 2015; Gonzalo Dominguez y cols., 2016; Johnson y cols., 2016; Govsa y cols., 2017; Kostusiak y cols., 2017; Graupera y cols., 2018; Karakas y cols., 2018; Inzunza y cols., 2019; González Izard y cols., 2020; Haleem y cols., 2021)

Citaremos a continuación, una pequeña representación de los numerosos recursos digitales 3D que se han venido aportando a lo largo de los últimos años para la enseñanza-aprendizaje de la anatomía humana, general o regional. Cada uno de ellos tiene unas características específicas que sería muy largo de comentar, pero sí haremos referencia a consideraciones generales que a nuestro juicio parecen más valiosas o trascendentes, atendiendo de la misma manera a aquellas que definen nuestra aplicación. Enumeramos para ello algunos ejemplos, con una resumida descripción de las mismas:

- Human Anatomy: atlas virtual de anatomía humana en 3D que ofrece un completo modelo de anatomía con visualización de estructuras de todos los sistemas anatómicos en el hombre y en la mujer. El entorno cuenta con una gran biblioteca de modelos. Presenta una colección más amplia de modelos tridimensionales y de texto complementario que nuestro desarrollo, abarcando un mayor campo de conocimiento anatómico, ya que nosotros nos centramos únicamente en el aparato respiratorio. Esto hace que fomente que algunos detalles anatómicos no sean excesivamente concisos, al contrario de lo que suele ocurrir en aplicaciones centradas en una única región anatómica. A diferencia de nuestra herramienta informática, no presenta la posibilidad de ver imágenes seccionales de RM ni de cadáver, puesto que las imágenes seccionales que se pueden valorar son obtenidas únicamente de los modelos 3D desarrollados. Otro inconveniente, es que los propios desarrolladores incluyen en “contras” que familiarizarse con la aplicación integral puede ser intimidante, por lo que su manejo no será tan intuitivo y fácil como con nuestra aplicación.
- Visión Médica Virtual (VMV) 3D: herramienta 3D “on-line” para la presentación y estudio de la anatomía humana, con mucha información disponible además de los modelos anatómicos (imágenes radiológicas, datos e imágenes histológicas...). Su mayor diferencia radica en su acceso online, sin necesidad de realizar una instalación en tu propio dispositivo, como obstáculo, solicita una suscripción anual para poder hacer uso de ella. Además, aunque posee una importante compilación de imágenes radiológicas no permite su comparación, ni la visualización conjunta con los modelos 3D como posibilita nuestra aplicación 3D.
- Anatomía Humana 3D: proyecto consistente en la digitalización de estructuras anatómicas del cuerpo humano en modelos tridimensionales (los modelos son reales), que permite la visualización de las mismas desde diferentes ángulos, y con la posibilidad de usar realidad aumentada, reproducible a través de un móvil o Tablet. Su acceso es gratuito y aporta clases anatómicas en pdf. Un importante hándicap de esta aplicación frente a nuestro desarrollo es que no hace referencia al aparato respiratorio ni las estructuras que la constituyen y que permite únicamente la valoración de estructuras aisladas, no su valoración conjunta, aunque sea de todas las estructuras del cuerpo humano, y sin soporte de imágenes seccionales por lo que de cara a fomentar el estudio y aprendizaje de las relaciones espaciales nuestra aplicación es mucho más completa.
- Zygote body: aplicación virtual que ofrece modelos de anatomía 3D del cuerpo humano con finalidad pedagógica. Presenta un modelo anatómico 3D complejo, en el que puedes ver sus componentes en su conjunto y seleccionar uno en concreto pudiendo visualizar su posición y trayecto en el caso de vasos y nervios. Tiene funciones a las que únicamente puedes acceder mediante pago. Carece de imágenes reales seccionales ya sean de cadáver o de RM. Su manejo no es muy intuitivo, ya que cuesta discernir para que es cada botón y como manejar la aplicación, así como las posibilidades que ofrece, lo que puede hacer que su aprovechamiento sea inferior al que aporta, aunque puede que esto se deba también a las funcionalidades deshabilitadas en la versión gratuita. Por tanto nuestra aplicación parece superior en cuanto a la incorporación de las imágenes seccionales y a que el uso de la misma es más entendible y sencillo por parte del usuario.
- Bio TK: atlas de anatomía en 3D generado a partir de cortes de cadáver humano, por lo que es preciso y realista. Permite la valoración de imágenes seccionales de cadáver (no

de RM como nuestra herramienta informática) y de los modelos 3D embebidos en ella, al igual que nuestra aplicación, pero a diferencia de la nuestra, permite simular una disección de cadáver en la que extraes los órganos y los valores de manera independiente. Las composiciones pueden ser almacenadas y compartidas, igual que con nuestra aplicación. Bio TK es compatible con prácticamente todas las plataformas de hardware y se integra fácilmente a plataformas de E-learning, permite un acceso parcial de forma gratuita y tiene versiones Premium de pago.

- Proyecto HDM (Human Dissection Models): basado en la creación de modelos tridimensionales a partir de órganos o estructuras diseccionadas de cuerpos humanos, que proporciona su valoración aislada y mediante realidad aumentada. Nuestra aplicación es más completa en cuanto a usabilidad, y a la contribución a la formación médica, ya que esta aplicación únicamente proporciona imágenes con tecnología de visión tridimensional, no son modelos 3D reconstruidos.
- Mesa de Disección 3D Sectra: representación digitalizada de estructuras del cuerpo humano en diferentes planos, empleando imágenes de cortes de cadáver, provenientes de la base de datos del “Visible Human Project” y de resonancia magnética. Las imágenes se trabajaron usando el programa VH Dissector instalado en una mesa de visualización digital 3D táctil del fabricante SECTRA. El que para su uso precise de esta mesa de visualización específica, hace que utilizarla únicamente sea posible en universidades o grandes centros, lo que limita ampliamente su disponibilidad frente a nuestra aplicación, que para su empleo únicamente se necesita un ordenador de los que prácticamente cada estudiante dispone actualmente en su domicilio.
- Human Body (male): como indica su nombre inglés, solo dispone de anatomía humana masculina. Cubre varios sistemas biológicos y modelos 3D de órganos (dispone de narraciones y animaciones), pero de una forma sencilla, sin entrar en demasiados detalles ni realismo. No hace uso de imágenes seccionales. Es una aplicación cuyo fin no es fomentar el conocimiento anatómico de estudiantes de medicina puesto que se queda corta en el aporte de información, mientras que nuestro desarrollo, al contrario que en este caso, necesita de conocimientos anatómicos previos, puesto que la información que aporta es más completa y compleja y requiere habilidades adquiridas previamente en la interpretación de imágenes seccionales. A diferencia que nuestra aplicación, puede ser utilizada en dispositivos portátiles.
- 3D Bones and Organs: plataforma de anatomía humana en 3D. El entorno es completamente gratuito y cuenta con ricos modelos 3D de sistemas y órganos biológicos humanos, al igual que con la aplicación anterior, la contribución al aprendizaje anatómico de estudiantes de medicina es pobre, al contrario que con nuestra herramienta, como ya hemos comentado previamente. Como ventaja, igualmente, puede utilizarse en dispositivos móviles.
- Anatomy Learning: ofrece una amplia gama de la anatomía humana con varios sistemas biológicos (hombre y mujer), junto con modelos 3D de diferentes partes del cuerpo y órganos. Se basa en modelos 3D muy esquemáticos, para uso en móviles y tablets. No relaciona la anatomía con imágenes seccionales, por lo que no colabora en el aprendizaje anatómico como nuestra aplicación informática. Permite navegar y encontrar los contenidos que se buscan, pero la forma de utilizar el contenido (interfaz) no siempre es intuitiva y se necesitan instrucciones de uso, aunque los enlaces funcionan correctamente.

- Sistema Óseo en 3D (Anatomía): proporciona información sobre la anatomía del esqueleto humano mediante modelos simplificados en tres dimensiones de los huesos. Es una aplicación bastante escasa y simple en contenidos anatómicos, al contrario que nuestro desarrollo informático.
- Complete Anatomy de 3D 4 MEDICAL (Elsevier): plataforma de publicación para la educación con anatomía 3D para interacción con los más pequeños detalles del cuerpo humano. Es una aplicación de pago, con muchas posibilidades, entre ellas favorecer el interés por la anatomía en los estudiantes gracias a sus características de realidad aumentada. Sus modelos tridimensionales son muy realistas, permitiendo animaciones y representaciones de determinadas funcionalidades del cuerpo humano. Nuestra aplicación aporta frente a esta, el uso de la anatomía seccional como base para el estudio de las relaciones anatómicas reales entre estructuras adyacentes al usar secciones de RM..
- Modelo 3D para el estudio de la pelvis femenina (Balaya y cols., 2016): especial mención a esta aplicación puesto que es muy similar al desarrollo que nosotros hemos realizado, pero mas rudimentario en cuanto a su interfaz y visualización. La reconstrucción de los modelos 3D es de secciones de cadáver, pero no se pueden visualizar los cortes seccionales junto con los modelos 3D. Algunas estructuras no aparecen representadas, especialmente las de menor calibre y tamaño, probablemente por la dificultad de su identificación durante la segmentación y posterior reconstrucción.

Además de las comentadas previamente, existen muchas otras aplicaciones informáticas, cuya finalidad es similar a la nuestra, aportar un recurso informático para la enseñanza de determinadas regiones del cuerpo humano que por sus características intrínsecas, son catalogadas como “difíciles” por las habilidades espaciotemporales que precisa su estudio, como son las siguientes:

- Aplicación 3D para el estudio del tracto urogenital masculino (Uhl y cols., 2006): Reconstrucción tridimensional del tracto urogenital masculino a partir de imágenes seccionales de cadáver, pero no emplea como también hacemos en nuestra aplicación imágenes seccionales de resonancia magnética. El modelo no incluye músculos relacionados con el sistema urogenital como el diafragma pélvico y los músculos perineales, y sólo muestra modelos 3D pero no imágenes seccionales a diferencia de nuestra aplicación. Incluye un modo de visualización especial para proporcionar un efecto estereoscópico mediante el uso de gafas de color verde y rojo.
- Modelo 3D para el estudio del suelo pélvico femenino (Hampton y Sung, 2010): Muestra órganos pélvicos y sus estructuras de soporte, pero no incluye estructuras vasculares ni nerviosas, por lo que cuenta con menor detalle anatómico que nuestra aplicación. Además el recorrido por la pelvis se realiza siguiendo un itinerario guiado, no como en nuestro recurso, que se realiza a voluntad del usuario. Muestra modelos 3D pero no imágenes seccionales. Tiene voz en off, animaciones y videoclips. Compagina los modelos tridimensionales con módulos de enseñanza de patologías del suelo pélvico.
- Herramienta 3D para el estudio de la vía óptica y el sistema oculomotor (Juanes y cols., 2014): Muy similar a nuestra aplicación. Emplea para la reconstrucción tridimensional imágenes de resonancia magnética de alta resolución. No hay imágenes seccionales de cadáver como en nuestro recurso.

- Aplicación 3D para estudio del cuerpo perineal (Larson y cols., 2010): Modelo tridimensional con órganos pélvicos y estructuras del cuerpo perineal. Muestra modelos 3D e imágenes seccionales de RM, no de cadáver como también aparecen en nuestro desarrollo informático. La aplicación no hace referencia a que se pueda interactuar con los modelos 3D.
- Recurso 3D para el estudio de los músculos y nervios craneales del sistema oculomotor (Allen y cols., 2015): Emplea para la reconstrucción secciones del VHP, pero solo muestra modelos, no imágenes seccionales. Como diferencia con nuestra aplicación, va acompañado de narración, empleando lo que denominan efecto de personalización (voz personal y acogedora). Según los autores al recibir la información por dos canales sensoriales, como la vista y el oído se reduce la carga cognitiva y se mejora el aprendizaje.
- Aplicación 3D para el estudio de la red venosa de la extremidad inferior en el feto humano (Kurobe y cols., 2015): Modelos tridimensionales reconstruidos a partir de extremidades inferiores fetales, en las que los autores realizaron los cortes seccionales. Muestra modelos e imágenes seccionales de sus cortes anatómicos, pero reconocen que la reconstrucción se mejoraría, empleando también imágenes seccionales de RM o TC, como realizamos en nuestra aplicación. En su trabajo no describen si hay posibilidad de interactuar con los modelos.
- Aplicación 3D para el estudio del sistema ventricular del cerebro (Gonzalo y cols., 2016): Valora la morfología del sistema ventricular del cerebro en su conjunto y desde cualquier posición espacial. Muestra modelos 3D e imágenes seccionales de RM, pero no de cadáver, como también aparecen en nuestro desarrollo informático. Permite la interacción con los modelos y cuenta con una interfaz intuitiva al igual que en nuestra aplicación.
- Aplicación 3D para el estudio de la base del cráneo (Tabernerico y cols., 2017): Reconstrucción tridimensional realizada a través de imágenes seccionales de TC. Muestra imágenes seccionales de TC (no de cadáver y RM) y modelos 3D con los que se puede interactuar, como en nuestra aplicación.

Reseñamos a continuación, las cuestiones que consideramos más significativas de nuestro desarrollo interactivo 3D. Son, principalmente, la fidelidad anatómica que refleja, entre otras razones gracias a la calidad de las imágenes seccionales empleadas, la utilidad didáctica/práctica y la funcionalidad, determinada básicamente por la interfaz de usuario.

Un estudio realizado por Zilverschoon y cols. (2018), tras el análisis de varias herramientas 3D concluye que las aplicaciones que utilizan imágenes seccionales son más completas y proporcionan un mayor realismo anatómico al permitir la inclusión de estructuras biológicas pequeñas. Además, las que emplean imágenes obtenidas por técnicas diagnósticas como la resonancia magnética permiten observar la existencia de diferencias anatómicas entre distintos individuos. Las que tienen finalidad comercial, suelen tener mejor funcionalidad al ser diseñadas por "expertos", pero más complejidad, se pueden aplicar a cualquier sistema operativo en general, incluidos los dispositivos móviles, y muestran mayor extensión anatómica (del cuerpo entero en los atlas) pero menor detalle estructural. Según su opinión, las aplicaciones con finalidad principalmente didáctica, como es el caso de nuestro recurso pélvico, suelen restringirse

a zonas anatómicas concretas y cuentan en general con mayor detalle anatómico, permitiendo una mejor comprensión de regiones estructuralmente complejas.

En referencia a los detalles anatómicos, Kraima y cols. (2013) ponen de manifiesto que para realizar una reconstrucción anatómica fiable, con la inclusión de pequeñas estructuras anatómicas, es preferible emplear imágenes seccionales de cadáver e imágenes seccionales proporcionadas por técnicas diagnósticas como la RM. En nuestro desarrollo tecnológico hemos empleado secciones seriadas de RM y de TC y hemos tenido presentes en algunas ocasiones las secciones de cadáver procedentes del Proyecto Visible Human. (VHP).

Las imágenes seccionales ofrecen una visión fidedigna tanto de la forma como de la posición relativa de los órganos y estructuras anatómicas de una región corporal, ofrecidas en una visión bidimensional, que convertiremos en tridimensional mediante la adicción de secciones sucesivas (Clascá y cols., 2002).

Consideramos que nuestro desarrollo 3D interactivo de las principales estructuras anatómicas del aparato respiratorio constituye un atlas anatómico dinámico, que se posiciona como un instrumento apropiado y útil para la enseñanza descriptiva de anatomía, especialmente para la comprensión de conceptos que requieren habilidad espacial, como confirman varios autores tras el empleo didáctico de este tipo de recursos (Jamil y cols., 2019; Guimarães y cols., 2018; Allen y cols., 2015; Morris y cols., 2016; Framiñán y cols., 2013; Lewis y cols., 2013). Una visualización en tres dimensiones y desde distintas perspectivas, como la que proporciona nuestra aplicación, que además muestra modelos tridimensionales embebidos en imágenes seccionales de resonancia magnética, permite apreciar la morfología, la localización y la topografía de las estructuras del aparato respiratorio, así como las relaciones de vecindad que establecen, facilitando la comprensión de estas zonas, especialmente compleja. Las imágenes seccionales de RM en los tres planos del espacio proporcionan una visión más clara de las estructuras individuales dentro de esta región. De hecho, la visión volumétrica de nuestro recurso 3D fue muy valorada por los estudiantes, manifestando que nuestra aplicación les facilitó el entendimiento y la comprensión de las estructuras anatómicas que constituyen el aparato respiratorio.

Creemos que nuestra aplicación tecnológica constituye una herramienta atractiva para que estudiantes, residentes y profesionales aprovechen como medio auxiliar para la planificación de un escenario quirúrgico en algunas regiones corporales, como opinan con sus trabajos varios autores (Mavar-Haramija y cols., 2015; Juanes y cols., 2014; Kraima y cols., 2013; De Notaris y cols., 2013), aunque según Kostusiak y cols. (2017) hacen falta estudios rigurosos que certifiquen la utilidad de estas aplicaciones para el entrenamiento quirúrgico.

Las encuestas de satisfacción de los alumnos al trabajar sobre nuestro programa informático nos proporcionaron una información valiosa sobre la eficacia y la usabilidad del programa desde la perspectiva de los usuarios finales.

Estas encuestas proporcionaron información detallada sobre la experiencia del usuario, incluidos aspectos como la facilidad de uso, la claridad de las instrucciones, la eficacia de las funciones proporcionadas y la satisfacción general con la plataforma. Este feedback nos ayudó a identificar áreas de mejora, detectar posibles problemas técnicos y entender las preferencias y necesidades específicas de los usuarios. Con esta retroalimentación, se pudieron realizar ajustes y mejoras del procedimiento tecnológico, lo que a su vez contribuyó a la mejora continua y la optimización del programa informático desarrollado.

La visión tridimensional de estructuras anatómicas del aparato respiratorio antes de un abordaje quirúrgico con métodos robotizados ofrece ventajas significativas. En primer lugar, proporciona una comprensión más precisa de la anatomía del paciente, lo que permite una planificación quirúrgica más detallada y personalizada. Además, ayuda a los cirujanos a visualizar con mayor claridad las relaciones espaciales entre los órganos y tejidos, lo que resulta fundamental para una intervención precisa y mínimamente invasiva. Esta visión tridimensional también mejora la precisión y la destreza durante la cirugía, lo que puede llevar a una reducción de los tiempos de recuperación y a una disminución de posibles complicaciones postoperatorias.

Algunos de los dispositivos y aparatos robóticos utilizados para realizar abordajes o cirugías robotizadas en el área torácica incluyen: Sistema Da Vinci: Uno de los sistemas robóticos más conocidos y ampliamente utilizados en cirugía torácica como en nuestro trabajo de Tesis Doctoral. Ofrece una plataforma avanzada que permite una mayor precisión y destreza durante procedimientos complejos. Senhance Surgical Robotic System: Diseñado para intervenciones quirúrgicas mínimamente invasivas, este sistema permite a los cirujanos realizar movimientos precisos y ofrece una visión tridimensional mejorada durante la cirugía torácica. Estos dispositivos robóticos están equipados con tecnología avanzada, como brazos robóticos articulados y cámaras de alta resolución, que permiten a los cirujanos llevar a cabo procedimientos torácicos de manera más precisa y menos invasiva, lo que puede resultar en tiempos de recuperación más cortos y en una reducción de complicaciones postoperatorias.

Hacer una correlación entre la disección anatómica y los abordajes quirúrgicos robotizados ofrece ventajas importantes. Permite a los cirujanos comprender con mayor precisión la anatomía específica de cada paciente, lo que facilita la planificación de abordajes quirúrgicos más personalizados y precisos.

Esta correlación también mejora la comprensión de las posibles variaciones anatómicas entre los pacientes, lo que resulta fundamental para adaptar los abordajes quirúrgicos según las necesidades individuales. Además, esta integración puede aumentar la seguridad durante la cirugía al minimizar el riesgo de daño a estructuras circundantes y mejorar la eficiencia durante los procedimientos.

La cirugía robótica ha revolucionado la forma en que los cirujanos abordan el tracto respiratorio, brindando numerosas aportaciones en términos de precisión, visión en 3D y capacidades mejoradas. Uno de los sistemas robóticos más conocidos y utilizados en cirugía es el sistema Da Vinci, que es el manejado en nuestro trabajo de Tesis Doctoral.

La cirugía robótica permite a los cirujanos realizar movimientos precisos y minuciosos a través de los brazos robóticos, que tienen una amplia gama de movimiento y eliminan cualquier temblor humano. Esto es esencial en la cirugía del tracto respiratorio, donde la precisión es crítica para evitar daños a estructuras cercanas como los nervios o los vasos sanguíneos.

El sistema Da Vinci nos proporcionó una visión estereoscópica en 3D con una alta definición, lo que permite a los cirujanos visualizar con claridad las estructuras anatómicas del tracto respiratorio. Esto facilita la identificación y la toma de decisiones precisas durante la cirugía, mejorando la seguridad y los resultados.

La cirugía robótica permite un acceso mejorado a áreas del tracto respiratorio que son difíciles de alcanzar con técnicas quirúrgicas convencionales. Esto es particularmente valioso en

procedimientos complejos, como la resección de tumores en la base de la lengua, la laringe o el mediastino.

La cirugía robótica a menudo se realiza a través de incisiones mínimamente invasivas, lo que significa que se requieren incisiones más pequeñas en comparación con las cirugías abiertas tradicionales. Esto reduce el trauma para el paciente, disminuye el tiempo de recuperación y minimiza las cicatrices visibles.

Los brazos robóticos de Da Vinci están diseñados para proporcionar una hemostasia precisa (control de sangrado). Esto resulta en una menor pérdida de sangre durante la cirugía, lo que puede ser especialmente beneficioso en procedimientos en el tracto respiratorio donde el sangrado excesivo puede ser problemático.

Los brazos robóticos pueden girar y moverse en direcciones que pueden ser difíciles de lograr con las manos humanas. Esto permite una manipulación más eficiente de los tejidos y facilita la sutura y la anastomosis en procedimientos como la reconstrucción de la tráquea o el esófago.

La cirugía robótica reduce la fatiga del cirujano, ya que los movimientos se transmiten de manera más precisa a través de los controles del robot. Esto es especialmente importante en procedimientos largos y complejos en el tracto respiratorio.

Los cirujanos pueden operar sentados cómodamente en una consola ergonómica mientras controlan los brazos robóticos. Esto reduce la tensión física y mejora la comodidad del cirujano durante la cirugía, lo que a su vez puede aumentar la precisión.

En resumen, la cirugía robótica con el sistema Da Vinci ha transformado la forma en que se abordan las afecciones del tracto respiratorio al ofrecer precisión, visión en 3D, acceso mejorado y una serie de beneficios adicionales. Estas aportaciones han llevado a mejores resultados quirúrgicos, una recuperación más rápida y una mayor comodidad tanto para los pacientes como para los cirujanos en el campo de la cirugía respiratoria.

Las técnicas de radiología de tomografía computarizada y resonancia magnética empleadas en nuestro trabajo, ofrecen ventajas significativas para la visualización anatómica de las estructuras corporales. La tomografía computarizada proporciona imágenes detalladas y transversales del cuerpo, lo que permite una visualización precisa de huesos, tejidos blandos y órganos internos, lo que resulta fundamental para el diagnóstico de diversas afecciones médicas. Por otro lado, la resonancia magnética utiliza campos magnéticos y ondas de radio para crear imágenes detalladas de tejidos blandos, articulaciones y órganos internos, lo que brinda una visión más clara de la anatomía y posibles patologías. Ambas técnicas ofrecen información complementaria y son fundamentales en el diagnóstico, planificación de tratamiento y seguimiento de enfermedades.

Los programas de tratamiento digital de imagen médica como OsiriX, ITK-SNAP, Mimics, 3D Slicer, etc... son ampliamente utilizados en el ámbito radiológico debido a varias razones. En primer lugar, ofrecen una amplia gama de herramientas de visualización y análisis que permiten a los profesionales de la salud trabajar con una variedad de formatos de imagen, incluidos los archivos DICOM, comunes en el campo de la radiología. Además, estos programas son conocidos por su facilidad de uso y su capacidad para procesar grandes conjuntos de datos de imágenes médicas de manera eficiente. También son software de código abierto, lo que fomenta la co-

laboración y el desarrollo continuo de nuevas características y funcionalidades por parte de la comunidad científica. Por estas razones, muchos profesionales del ámbito radiológico confían sobre todo en los softwares OsiriX y 3D Slicer para tareas de visualización y análisis de imágenes médicas.

OsiriX es un software de código abierto para visualización y análisis de imágenes médicas, especialmente para imágenes de resonancia magnética, tomografía computarizada, ultrasonido y otras modalidades. Fue desarrollado inicialmente para su uso en la plataforma Mac OS X y está diseñado para proporcionar herramientas avanzadas de procesamiento de imágenes médicas a médicos y radiólogos.

Ofrece una amplia gama de herramientas para manipular y visualizar imágenes médicas, lo que facilita a los profesionales médicos realizar análisis detallados.

Puede manejar una variedad de formatos de imágenes médicas, lo que lo hace muy versátil y útil para integrar con diversas máquinas y modalidades de escaneo.

OsiriX cuenta con herramientas avanzadas de procesamiento de imágenes que permiten a los usuarios realizar mediciones precisas, análisis de intensidad, segmentación y más, lo que facilita un diagnóstico más preciso.

Ofrece una interfaz de usuario amigable que permite una fácil manipulación de imágenes y personalización de la configuración según las necesidades individuales del usuario.

3D Slicer es una plataforma de software de código abierto ampliamente utilizada en la comunidad médica y de investigación. Ofrece una variedad de módulos y extensiones para la segmentación manual. Permite la visualización de imágenes DICOM en múltiples planos (axial, sagital, coronal) y proporciona herramientas de dibujo para delinear manualmente las estructuras de interés. También admite la revisión y corrección de segmentaciones.

Una de sus ventajas más destacadas es que se trata de un software gratuito, altamente personalizable y ofrece una comunidad activa de usuarios y desarrolladores.

ITK-SNAP es una herramienta de segmentación de código abierto que permite la segmentación manual y semiautomática. Proporciona una interfaz fácil de usar con herramientas de dibujo, ajustes de contraste y edición de segmentaciones. También es compatible con la visualización 3D de estructuras segmentadas. Entre otras ventajas es que es un software gratuito, multiplataforma y admite una variedad de formatos de imágenes médicas.

Mimics es una herramienta comercial especializada en la segmentación de estructuras a partir de imágenes médicas. Ofrece herramientas avanzadas para la segmentación manual, incluyendo la edición en 3D, la interpolación y la creación de modelos 3D precisos. Es ampliamente utilizado en la industria médica y ofrece características avanzadas para la creación de modelos 3D.

Si bien los programas indicados son los más empleados en el ámbito radiológico, en nuestro trabajo hemos optado por la utilización del software Amira, el cual ofrece una amplia gama de herramientas de procesamiento de imágenes radiológicas y visualización interactiva que permiten a los investigadores y profesionales médicos explorar y analizar datos complejos en diferentes niveles de detalle. Además, su capacidad para integrar datos de diversas fuentes lo

convierte en una herramienta versátil para la investigación y el análisis de imágenes médicas avanzadas.

La visión 3D desempeña un papel fundamental en la formación médica y en el diagnóstico clínico, ya que proporciona una representación más precisa y realista de las estructuras anatómicas y patologías, lo que tiene importantes beneficios en ambos contextos.

La visión 3D permite a los estudiantes de medicina explorar y comprender las estructuras anatómicas de manera más completa y tridimensional. Esto facilita la identificación de relaciones anatómicas y la comprensión de la variabilidad anatómica.

La visualización 3D fomenta el aprendizaje activo, ya que los estudiantes pueden interactuar con modelos tridimensionales y explorar las estructuras desde diferentes ángulos. Esto promueve una comprensión más profunda y una retención a largo plazo del conocimiento.

La tecnología 3D se utiliza en simuladores médicos para practicar procedimientos quirúrgicos y médicos. Esto permite a los estudiantes adquirir habilidades prácticas antes de enfrentarse a situaciones clínicas reales.

Los médicos pueden utilizar modelos y herramientas 3D para mejorar la enseñanza y la comunicación con los estudiantes. Pueden explicar conceptos de manera más efectiva y facilitar la comprensión de casos clínicos.

La práctica en entornos 3D reduce los riesgos asociados con la formación médica en pacientes reales. Los errores pueden corregirse sin consecuencias negativas para los pacientes.

La visualización 3D en técnicas de imagen médica, como la tomografía computarizada y la resonancia magnética, mejora la precisión diagnóstica al permitir una evaluación más detallada de las estructuras anatómicas y patologías.

Los médicos utilizan la visión 3D para planificar cirugías con mayor precisión. Pueden estudiar la ubicación y la extensión de tumores, malformaciones y otras afecciones antes de la intervención.

La visualización 3D es una herramienta eficaz para educar a los pacientes sobre sus afecciones y tratamientos. Los pacientes pueden comprender mejor su situación y tomar decisiones más informadas.

La visualización 3D se utiliza para realizar un seguimiento de la respuesta al tratamiento. Los médicos pueden evaluar cómo cambian las estructuras anatómicas o patológicas con el tiempo.

En procedimientos médicos y quirúrgicos mínimamente invasivos, la visión 3D es esencial para guiar a los médicos en la colocación precisa de instrumentos y dispositivos en tiempo real.

La planificación preoperatoria con visualización 3D reduce los riesgos quirúrgicos al permitir a los cirujanos anticipar posibles desafíos y planificar estrategias para abordarlos.

En resumen, la visión 3D desempeña un papel esencial tanto en la formación médica como en el diagnóstico clínico al mejorar la comprensión anatómica, la precisión diagnóstica y la toma de decisiones clínicas. Estas tecnologías contribuyen significativamente a la mejora de la atención médica y al tratamiento de pacientes.

Para reconstruir imágenes anatómicas 3D desde secciones de imágenes radiológicas podemos llevar a cabo un procedimiento de segmentación manual, o procedimientos de segmentación automática.

La segmentación manual de estructuras anatómicas a partir de secciones seriadas de imágenes DICOM de resonancia magnética y/o de Tomografía Computarizada es un proceso crucial en medicina y ciencias biomédicas. Permite la identificación y delimitación precisa de regiones de interés en el cuerpo humano con el fin de realizar análisis cuantitativos, planificación de tratamientos, diagnóstico y estudios de investigación.

La segmentación manual de estructuras anatómicas del aparato respiratorio desde imágenes DICOM de RM y/o de TC es un proceso laborioso pero esencial en medicina, que requiere habilidad y experiencia para garantizar la precisión y la calidad de los resultados.

Sin embargo, la continua mejora en las técnicas de segmentación automática está ayudando a reducir la carga de trabajo manual, pero la validación y supervisión humana siguen siendo fundamentales para la toma de decisiones clínicas precisas.

La segmentación manual y automática de estructuras anatómicas del aparato respiratorio para su posterior reconstrucción 3D es un proceso crítico en la medicina, la investigación médica y la planificación de tratamientos.

La elección entre segmentación manual y automática depende de la aplicación, la disponibilidad de tiempo y recursos, así como de la precisión requerida. En muchos casos, una combinación de ambas técnicas, puede proporcionar los mejores resultados. Además, la elección de la herramienta específica dependerá de las necesidades y preferencias del usuario, así como del presupuesto disponible.

Los desarrollos tecnológicos basados en técnicas de visión 3D de estructuras anatómicas y técnicas de visión estereoscópica con gafas de realidad virtual están transformando la forma en que se lleva a cabo la formación médica. Estas tecnologías aportan una serie de beneficios significativos para la educación y capacitación de profesionales de la salud.

Estas tecnologías permiten la representación tridimensional de estructuras anatómicas, lo que proporciona una comprensión más completa y realista de la anatomía humana. Los modelos 3D permiten a los estudiantes explorar las estructuras desde diferentes ángulos y profundidades.

La visión 3D y estereoscópica ayuda a los estudiantes a comprender mejor la disposición espacial de las estructuras anatómicas. Pueden visualizar cómo las estructuras se relacionan entre sí en un entorno tridimensional, lo que facilita la comprensión de la anatomía en su contexto real.

Las tecnologías de visión 3D y estereoscópica a menudo permiten la interacción con los modelos anatómicos. Los estudiantes pueden manipular las estructuras, separarlas o acercarlas para examinar detalles específicos, lo que promueve un aprendizaje práctico y activo.

Las gafas de realidad virtual ofrecen una experiencia inmersiva en la que los estudiantes se sienten completamente sumergidos en un entorno anatómico simulado. Esto crea un ambiente de aprendizaje más realista y memorable.

Los programas de formación basados en tecnologías 3D y VR pueden adaptarse a las necesidades individuales de los estudiantes. Pueden avanzar a su propio ritmo y repetir procedimientos o secciones específicas según sea necesario.

Estas tecnologías permiten la simulación de procedimientos médicos, como cirugías, de manera segura y sin riesgos para los pacientes. Los estudiantes pueden practicar y perfeccionar técnicas antes de llevarlas a cabo en un entorno clínico real.

La formación con modelos 3D y VR ayuda a reducir errores médicos al mejorar la comprensión y la habilidad de los profesionales de la salud. Los médicos y cirujanos están mejor preparados para abordar situaciones clínicas complejas.

Los entornos virtuales permiten a estudiantes y profesionales de la salud acceder a modelos anatómicos desde cualquier lugar del mundo. Además, pueden colaborar en tiempo real, lo que facilita la formación y la resolución de problemas conjunta.

Los desarrollos tecnológicos basados en visión 3D y estereoscópica con gafas de realidad virtual están revolucionando la formación médica al proporcionar un entorno de aprendizaje más interactivo, inmersivo y efectivo. Estas tecnologías mejoran la comprensión de la anatomía y las habilidades prácticas de los profesionales de la salud, contribuyendo a una atención médica más segura y eficaz.

La RV brinda experiencias inmersivas que permiten a los estudiantes explorar el cuerpo humano en 3D, visualizar patologías y realizar procedimientos virtuales. Esto mejora la comprensión anatómica y facilita el aprendizaje interactivo (Robb y Satava, 1997; Temkin y cols., 2000; Robb, 2000; Temkin y cols., 2002; Parikh y cols., 2004; Spitzer y Scherzinger, 2006; Temkin y cols., 2006; Seixas-Mikelus y cols., 2010; Robison y cols., 2011; Ruiz y cols., 2012; Lombardi y cols., 2014; Pardos, 2017; Moro y cols., 2017; Preim y Saalfeld, 2018; Papadopoulou y cols., 2019).

La utilización de software de visión 3D, técnicas de realidad virtual y abordajes quirúrgicos robotizados en el aprendizaje y diagnóstico clínico de estructuras del aparato respiratorio mediante resonancia magnética y tomografía computarizada ha revolucionado la forma en que los profesionales de la salud y los estudiantes de medicina abordan la anatomía y las patologías respiratorias.

La combinación de software de visión 3D y realidad virtual ha mejorado significativamente la educación médica. Los estudiantes pueden explorar y comprender mejor las estructuras respiratorias en un entorno tridimensional, lo que facilita el aprendizaje y la retención de conocimientos.

La utilización de técnicas de realidad virtual y software 3D en la planificación quirúrgica reduce los riesgos y complicaciones en las cirugías respiratorias. Los cirujanos pueden realizar una planificación detallada y anticipar posibles desafíos antes de la cirugía real.

Las técnicas de visualización en 3D y la cirugía robotizada permiten acceder a áreas del aparato respiratorio que pueden ser difíciles de alcanzar con técnicas convencionales. Esto es especialmente útil en procedimientos de mínima invasión.

La visualización en 3D y la realidad virtual también pueden ser utilizadas para explicar a los pacientes las afecciones respiratorias de manera más clara y comprensible. Esto facilita la comunicación médico-paciente y ayuda en la toma de decisiones compartidas.

En conjunto, la utilización de software de visión 3D, técnicas de realidad virtual y abordajes quirúrgicos robotizados ha llevado a avances significativos en la educación médica, el diagnóstico clínico y la atención al paciente en el campo de las estructuras del aparato respiratorio. Estas tecnologías continúan desempeñando un papel crucial en la mejora de la práctica médica y la calidad de la atención a los pacientes respiratorios.

## Conclusiones

---



Tras realizar un trabajo sobre el desarrollo de un sistema informático integrado, basado en técnicas avanzadas de imágenes médicas (TC y RM), visión 3D y abordaje quirúrgico robotizado, para la mejora de la enseñanza de la anatomía sobre el aparato respiratorio, y tras su evaluación y valoración por los estudiantes; hemos llegado a las siguientes conclusiones:

**1ª.** La visualización interactiva y en 3D permite una comprensión más profunda y realista de las estructuras anatómicas del aparato respiratorio, en comparación con representaciones en 2D de los clásicos atlas de Anatomía Humana. La interacción con modelos 3D permite a los estudiantes aprender de manera más activa, explorando las estructuras anatómicas y mejorando de esta forma, la retención del conocimiento morfológico de estas estructuras.

**2ª.** El conocimiento de la anatomía de la vía aérea nos permitirá un adecuado reconocimiento de la patología. Dicho conocimiento es muy importante en la estadificación de los procesos neoplásicos que afectan a estas estructuras anatómicas.

**3ª.** Si bien la segmentación manual es muy laboriosa y exige un elevado tiempo para su reconstrucción 3D; sin embargo, podemos señalar que es mucho más precisa que la reconstrucción automática desde las imágenes DICOM, debido sobretodo a la supervisión y análisis minucioso de anatomistas y radiólogos.

**4ª.** Los programas informáticos de visión 3D ayudan a los estudiantes a comprender cómo se relacionan diferentes órganos con estructuras vecinas dentro del cuerpo humano. Por otra parte, la visualización 3D de las estructuras anatómicas, embebidas dentro de las secciones de imágenes radiológicas de TC y RM prepara a los estudiantes para interpretar imágenes médicas, lo que le será de gran utilidad en la identificación e interpretación de las imágenes radiológicas.

**5ª.** Conocidas las estructuras anatómicas del aparato respiratorio tras su visionado en 3D, permite un entrenamiento preciso y seguro para futuros cirujanos, mediante el abordaje con el navegador Da Vinci, mejorando así sus habilidades quirúrgicas. De esta forma, además, se reducirán riesgos quirúrgicos al permitir procedimientos más precisos y menos invasivos.

**6ª.** Las técnicas de realidad virtual utilizadas en este trabajo proporcionan al usuario simulaciones muy realistas de la anatomía del paciente, visionando de forma inmersiva, todos los componentes anatómicos reconstruidos desde las imágenes DICOM de los pacientes, lo que permitirá tanto a alumnos, residentes y los propios facultativos valorar el abordaje quirúrgico antes de la cirugía real sobre el paciente

**7ª.** Estas tecnologías emergentes son valiosas herramientas en la educación médica, permitiendo una formación más completa y efectiva, fomentando una mayor retención del conocimiento debido a la experiencia inmersiva.

**8ª y última.** La combinación de visión 3D, con diferentes procedimientos tecnológicos tanto por visión en pantalla de ordenador, como mediante gafas estereoscópicas de visión inmersiva, están impulsando avances significativos en la enseñanza de la medicina, mejorando la precisión y la seguridad en procedimientos médicos y quirúrgicos. Estas tecnologías están transformando la enseñanza y la práctica médica al proporcionar una comprensión más profunda de la anatomía, adquirir habilidades quirúrgicas avanzadas y una base sólida para futuros profesionales de la salud.

## Bibliografía

---



- Abdulaziz, M., Deegan, E. G., Kavanagh, A., Stothers, L., Pugash, D. y Macnab, A. (2017). Advances in basic science methodologies for clinical diagnosis in female stress urinary incontinence. *Canadian Urological Association Journal*, 11 (6S2), 117-120. <https://doi.org/10.5489/cuaj.4583>
- Abid, B., Hentati, N., Chevallier, J. M., Ghorbel, A. y Delmas, V. (2010). Traditional versus three-dimensional teaching of peritoneal embryogenesis: a comparative prospective study. *Surg Radiol Anat*, 32, 647-652. <https://doi.org/10.1007/s00276-010-0653-1>
- Abildgaard A, Witwit AK, Karlsen JS, Jacobsen EA, Tennoe B, Ringstad G, Due-Tonnessen P (2010) An autostereoscopic 3D display can improve visualization of 3D models from intracranial MR angiography. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 5(5):549-54
- AbouHashem Y, Dayal M, Savanah S, Štrkalj G (2015) The application of 3D printing in anatomy education. *Med Educ Online* 20:29847
- Ackerman MJ, Rifkin BA, Folkenberg J. (2006). *Human Anatomy. Depicting the Body from the Renaissance to Today*. Thames & Hudson.
- Ackerman, M. J. (2016). The visible human projectR: From body to bits. *38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 3338-3341. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591442>
- Adams H, Shinn J, Morrel WG, Noble J, Bodenheimer B (2019). Development and evaluation of an immersive virtual reality system for medical imaging of the ear. In: *Proceedings of SPIE medical imaging: image-guided procedures, robotic interventions, and modeling*, vol 10951, p 1095111
- Alcaraz M. 2003. *Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico*. Servicio Publicaciones Universidad Murcia. Murcia.
- Allen, L. K., Bhattacharyya, S. y Wilson, T. D. (2015). Development of an interactive anatomical three-dimensional eye model. *Anat Sci Educ*, 8, 275-282.
- Allen, L. K., Eagleson, R. y De Ribaupierre, S. (2016). Evaluation of an online threedimensional interactive resource for undergraduate neuroanatomy education. *Anatomical Sciences Education*, 9, 5, 431-439. <https://doi.org/10.1002/ase.1604>
- Alvarez M. 1984. *Informática para docentes*. Anaya. Madrid.
- Amat Muñoz P, Smith-Agreda JM. 2008. *ESCOLAR: Anatomía Humana funcional y aplicada*. Tomo 2, Espaxs, 5ª Edición.
- An, G., Hong, L., Zhou, X.B., Yang, Q., Li, M.Q. y Tang, X.Y. (2017). Accuracy and efficiency of computer-aided anatomical analysis using 3D visualization software based on semi-automated and automated segmentations. *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger*, 210, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.11.009>

- Anderson JG, Jay JS. 1987. Use and impact of computers in clinical medicine. New York, Springer-Verlag.
- Araujo Cuauro, J. C. (2018). Aspectos históricos de la enseñanza de la anatomía humana desde la época primitiva hasta el siglo XXI en el desarrollo de las ciencias morfológicas. *Revista Argentina Anatomía Online*, 9 (3), 87-97. Recuperado de <http://www.revista-anatomia.com.ar/archivos-parciales/2018-3-revista-argentinade-anatomia-online-d.pdf>
- Arráez-Aybar, Luis-Alfonso y cols. (2010) Relevance of human anatomy in daily clinical practice. *Ann Anat-Anatomischer Anzeiger* 192(6):341-348. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2010.05.002>
- Arrondo, G., Bernacer, J. y Robredo, L. D. (2016). Visualización de modelos digitales tridimensionales en la enseñanza de anatomía: principales recursos y una experiencia docente en neuroanatomía. *Educación Médica*, 18(4), 267-269.
- Asensio Romero L, Asensio Gómez M, Prats-Galino A, y Juanes Méndez JA (2018) 3D models of female pelvis structures reconstructed and represented in combination with anatomical and radiological sections. *J Med Syst* 42(3)
- Asensio Romero, L., Asensio Gomez, M., Prats-Galino, A. y Juanes Mendez, J. A. (2018). 3D Models of Female Pelvis Structures Reconstructed and Represented in Combination with Anatomical and Radiological Sections. *Journal of Medical Systems*, 42 (3), 37.
- Asensio Romero, L., Asensio Gomez, M., Prats-Galino, A. y Juanes Mendez, J. A. (2019). Computer Application of Ultrasound and Nuclear Magnetic Resonance Images for the Anatomical Learning of the Pelvis and the Female Pelvic Floor. *Journal of Medical Systems*, 43 (5), 110. <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1240-6>
- Astudillo, M., Pinto, B., Arboleda, J. y Anchundia, Z. (2018). Aplicación de las TIC como herramienta de aprendizaje en la educación superior. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 2 (2), 585-598.
- Avolio S. (1981). Planeamiento del Proceso de Enseñanza-Aprendizaje. Marymar S.A. Buenos Aires.
- Azer, S. A. y Azer, S. (2016). 3D Anatomy Models and Impact on Learning: A Review of the Quality of the Literature. *Health Profession Education*, 2 (2), 80-98. <https://doi.org/10.1016/j.hpe.2016.05.002>
- Bakker AR, Ball MJ, Scherrer JR, Willems JL. 1988. Towards New Hospital Information System, Noth-Holland Publ Comp. Amsterdam. Barcelona.
- Barbeito, A., Painho, M., Cabral, P. y O'Neill, J. G. (2017). Beyond Digital Human Body Atlases. *International Journal of E-Health and Medical Communications*, 8(1), 19-36. <https://doi.org/10.4018/IJEHMC.2017010102>
- Barrie, M., Socha, J. J., Mansour, L. y Patterson, E. S. (2019). Mixed Reality in Medical Education: A Narrative Literature Review. *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 8, 1, 28-32. <https://doi.org/10.1177/2327857919081006>
- Bartolomé A. 1989. Nuevas tecnologías y Enseñanza. Graó-ICE UB. Barcelona
- Bazot M, Deligne L, Boudhene F, Buy JN, Truc JB, Nassau PJ, Bigot JM. 1998. Anatomic approach to the parametrium: value of computed tomographic in vitro study compared to dissection. *Surg Radiol Anat*, 13: 17-22.

- Beccaría LP, Rey PE. 1999. La inserción de la Informática en la Educación y sus efectos en la re-conversión laboral". Instituto de Formación Docente -SEPA-. Buenos Aires.
- Belle, M., Godefroy, D., Couly, G., Malone, S. A., Collier, F., Giacobini, P. y Chedotal, A. (2017). Tridimensional Visualization and Analysis of Early Human Development. *Cell*, 169 (1), 161-173. e12. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.03.008>
- Belloch, C. (2012). Las Tecnologías de la Información y Comunicación en el aprendizaje. *Material docente [on-line]*. Departamento de Metodos de Investigacion y Diagnóstico en Educacion. Universidad de Valencia. <http://www.uv.es/bellohc/pedagogia/EVA1.pdf>
- Bera K, Braman N, Gupta A, Velcheti V, Madabhushi A. (2022). Predicting cancer outcomes with radiomics and artificial intelligence in radiology. *Nat Rev Clin Oncol.*;19(2):132-146. doi: 10.1038/s41571-021-00560-7
- Bernard AM, De Certaines JD, Le Jeune JJ. 1988. Resonance Magnétique Nucléaire. Masson. Paris.
- Bin, S., Masood, S. y Jung, Y. (2020). Chapter Twenty -Virtual and augmented reality in medicine. En D. D. Feng (Ed.) *Biomedical Engineering. Biomedical Information Technology* (pp. 673-686). Academic Press, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816034-3.00020-1>
- Birbara, N. S., Sammut, C. y Pather, N. (2020). Virtual Reality in Anatomy: A Pilot Study Evaluating Different Delivery Modalities. *Anat Sci Educ.*, 0, 1-13.
- Blum T, Kleeberger V, Bichlmeier C, Navab N (2012) Mirracle: an augmented reality magic mirror system for anatomy education. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality Workshops (VRW), pp 115-116.
- Boonbrahm P, Kaewrat C, Pengkaew P, Boonbrahm S, Meni V (2018) Study of the hand anatomy using real hand and augmented reality. *Int J Interact Mobile Technol (ijIM)* 12(7):181-90.
- Bringman-Rodenbarger, L. y Hortsch, M. (2020). How students choose E-learning resources: The importance of ease, familiarity, and convenience. *FASEB BioAdvances*, 00, 1-10. <https://doi.org/10.1096/fba.2019-00094>
- Briz Ponce, L., Juanes Mendez, J. A. y Garcia Penalvo, F. J. (2014). A systematic review of using mobile devices in medical education. *2014 International symposium on computers in education (SIIE)*, 205-210. <https://doi.org/10.1109/SIIE.2014.7017731>
- Briz Ponce, L., Juanes Mendez, J. A., y Garcia-Penalvo, F. J. (2014). First approach of mobile applications study for medical Education purposes. *Proceedings of the Second International Conference on Technological Ecosystem for Enhancing Multiculturality TEEM'14*, 647-651. <https://doi.org/10.1145/2669711.2669968>
- Briz, L., Juanes, J. A., y Garcia, F. J. (2014). Analysis of mobile devices as a support tool for professional medical education in the University School. *EDULEARN14 Proceedings*, 4653-4658. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10366/125034>
- Briz-Ponce, L. y Garcia-Penalvo, F. J. (2015). An empirical assessment of a technology acceptance model for apps in medical education. *J Med Syst*, 39, 176.
- Briz-Ponce, L., Pereira, A., Carvalho, L., Juanes-Mendez, J. A. y Garcia-Penalvo, F. J. (2017). Learning with mobile technologies – Students' behavior. *Computers in Human Behavior*, 72, 612-620. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.05.027>
- Bustos Sanchez, A. y Coll Salvador, C. (2010). Los entornos virtuales como espacios de enseñanza y aprendizaje: una perspectiva psicoeducativa para su caracterización y análisis. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 44, 15, 163-194.

- Cabrero FJ. 2004. Imagen radiológica. Principios físicos e instrumentación. Masson. Barcelona.
- Cahill DR. (1997). Lachman's case studies in anatomy. 4th Edition. New Cork: Oxford University Press.
- Campohermoso Rodriguez, O. F., Soliz Soliz, R. E., Campohermoso Rodriguez, O. y Zuniga Cuno, W. (2016). Galeno de pergamino "principe de los medicos". *Cuadernos Hospital de Clínicas*, 57 (2), 84-93. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1652-](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1652-)
- Canby, C. A. (2007). *Anatomía basada en la resolución de problemas*. Barcelona, España. Elsevier.
- Castillejo, JL. (1986). Tecnología y Educación. CEAC. Barcelona.
- Chakraborty, T. R. y Cooperstein, D. F. (2018). Exploring anatomy and physiology using iPad applications. *Anat Sci Educ*, 11, 336-345. <https://doi.org/10.1002/ase.1747>
- Chen L, Ashton-Miller JA, HSU Y, Delancey JO. 2006. Interaction among apical support, levator ani impairment and anterior vaginal wall prolapse. *Obstet Gynecol*, 108: 324-332.
- Clasca, F., Bover, R., Buron, J. A. y Castro Calvo, A. (2002). *Anatomía seccional. Atlas de esquemas axiales y Guía de referencia*. Barcelona, Elsevier-Masson.
- Clunie, L., Morris, N. P., Joynes, V. C. y Pickering, J. D. (2018). How comprehensive are research studies investigating the efficacy of technology-enhanced learning
- Comaniciu, D., Engel, K., Georgescu, B., y Mansi, T. (2016). Shaping the future through innovations: From medical imaging to precision medicine. *Medical Image Analysis*, 33, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.06.016>
- Contreras DJ. (1990). Enseñanza, Currículum y Profesorado. Introducción crítica a la Didáctica, Akal. Buenos Aires.
- Cook, D. A., Hatala, R., Brydges, R., Zendejas, B., Szostek, J. H., Wang, A. T., Erwin, P. J. y Hamstra, S. J. (2011). Technology-enhanced simulation for health professions education: A systematic review and meta-analysis. *JAMA*, 306, 978-988. Recuperado de <http://jama.ama-assn.org/content/306/9/978.abstract>
- Corton, M. M., McIntire, D. D., Wai, C. Y., Ling, F. V. y Wendel, G. D. Jr. (2006). A comparison of an interactive computer-based method with a conventional reading approach for learning pelvic anatomy. *Am J Obstet Gynecol*, 195, 5, 1438-1443. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2006.06.076>
- Cottam WW. (1999). Adequacy of medical school gross anatomy education as perceived by certain postgraduate residency programs and anatomy course directors. *Clin Anat*, 12: 55-65.
- Cronan JJ. (2006). Ultrasound: is there a future in diagnostic imaging? *J Am Coll Radiol*. 2006 Sep;3(9):645-6. doi: 10.1016/j.jacr.2006.04.006.
- Cuenca J. (1986). Inteligencia artificial: sistemas expertos. Alianza. Madrid.
- Dai, J. X., Chung, M. S., Qu, R. M., Yuan, L., Liu, S. W. y Shin, D. S. (2012). The Visible Human Projects in Korea and China with improved images and diverse applications. *Surg Radiol Anat*, 34 (6), 527-534. <https://doi.org/10.1007/s00276-012-0945-8>
- Darras, K. E., De Bruin, A. B. H., Nicolaou, S., Dahlstrom, N., Persson, A., Van Merrienboer, J. y Forster, B. B. (2018). Is there a superior simulator for human anatomy education? How virtual dissection can overcome the anatomic and pedagogic limitations of cadaveric dissection. *Med Teach*, 40, 7, 752-753.
- Darras, K. E., Forster, B. B., Nicolaou, S. y Munk, P. L. (2017). A Golden Opportunity for Radiologists: Bringing Clinical Relevance to Undergraduate Anatomy Through Virtual Dissection. *Can Assoc Radiol J*, 68, 3, 232-233.

- Das, S., y Mitchell, P. (2013). Comparison of three aids for teaching lumbar surgical anatomy. *British Journal of Neurosurgery*, 27, 475-478.
- De Notaris, M., Prats-Galino, A., Cavallo, L. M., Esposito, F., Iaconetta, G., Gonzalez, J. B., Montagnani, S., Ferrer, E. y Cappabianca, P. (2010). Preliminary experience with a new three-dimensional computer-based model for the study and the analysis of skull base approaches. *Childs Nerv. Syst.* 26, 621-626. <https://doi.org/10.1007/s00381-010-1107-0>
- De Notaris, M., Solari, D., Cavallo, L. M., Ensenat, J., Alobid, I., Soria, G., Gonzalez, J. B., Ferrer, E. y Prats-Galino, A. (2011). The use of a three-dimensional novel computerbased model for analysis of the endonasal endoscopic approach to the midline skull base. *World Neurosurg.* 75, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2010.09.033>
- De Notaris, M., Topczewski, T., De Angelis, M., Ensenat, J., Alobid, I., Gondolbleu, A. M., Soria, G., Gonzalez, J. B., Ferrer, E. y Prats-Galino, A. (2013). Anatomic Skull Base Education Using Advanced Neuroimaging Techniques. *World Neurosurg.* 79, S16.e9-13. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2012.02.027>
- De Pablos J, Gortari C. (1992). Las nuevas tecnologías de la información en la educación. Alfar. Sevilla.
- Deng, X., Zhou, G., Xiao, B., Zhao, Z., He, Y. y Chen, C. (2018). Effectiveness evaluation of digital virtual simulation application in teaching of gross anatomy. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 218, 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2018.02.014>
- Deutsch JC. (2006). Applications of the Colorado Visible Human Project in Gastroenterology. *Clin Anat*, 19: 254-257.
- Dominguez Merlano, E. (2010). Analisis comparativo de tres modelos de aprendizaje: colaborativo virtual, colaborativo presencial y magisterial. En *Congreso Internacional de Educación Mediada con Tecnología, Universidad de Barcelona*. Recuperado de <https://docplayer.es/5244475-Analisis-comparativo-de-tres-modelos-deaprendizaje-colaborativo-virtual-colaborativo-presencial-y-magistral.html>
- Drapkin, Z. A., Lindgren, K. A., Lopez, M. J. y Stabio, M. E. (2015). Development and assessment of a new 3D neuroanatomy teaching tool for MRI training. *Anatomical Sciences Education*, 8, 6, 502-509. <https://doi.org/10.1002/ase.1509>
- Dykes, M. y Watson, W. (2010). *Lo esencial en Anatomía*. Barcelona, España. Elsevier Mosby.
- Eckhoff DG, Bach, JM, Spitzer VM, Reining KD, Bagur MM, Baldini TH, Rubinstein D, y Humphries S. (2003). Three-dimensional morphology and kinematics of the distal part of the femur viewed in virtual reality. Parte II. *J Bone Joint Surg Am*, 85 (Suppl 4): 97-104
- Edelman RR.(2014). The history of MR imaging as seen through the pages of radiology. *Radiology*. Nov;273(2 Suppl):S181-200. doi: 10.1148/radiol.14140706.
- Educational Affaire Committee. American Association of Clinical Anatomists. 2001. Clinical Anatomy and the Physical Examination Part I: Thorax, Abdomen, Perineum and Pelvis. *Clinical Anatomy*, 14: 332-348.
- Ekstrand, C., Jamal, A., Nguyen, R., Kudryk, A., Mann, J. y Mendez, I. (2018). Immersive and interactive virtual reality to improve learning and retention of neuroanatomy in medical students: a randomized controlled study. *CMAJ Open*, 6, 1, E103-E109. <https://doi.org/10.9778/cmajo.20170110>
- Elster, AD. 1986. Magnetic Resonance Imaging. A reference Guide and Atlas, Lippincott. Boston.

- Enriquez F, Martínez D. 1991. Metodología para la informatización de la historia clínica. Rama. Madrid.
- Erolin, C. (2019). Interactive 3D Digital Models for Anatomy and Medical Education. En: P.Rea (Ed.) *Biomedical Visualisation. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 1138. Springer, Cham
- Espinosa Pizarro (2012) Técnicas de postprocesado de las imágenes (TC y RM): qué, como, cuando y porque s-1551, SERAM, [On line]. <https://posterng.netkey.at>
- Estai, M. y Bunt, S. (2016). Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 208, 151-157.
- Estevez, M. E., Lindgren, K. A. y Bergethon, P. R. (2010). A novel three-dimensional tool for teaching human neuroanatomy. *Anatomical Sciences Education*, 3, 309-317. <https://doi.org/10.1002/ase.186>
- Fang, B., Wu, Y., Chu, C., Li, Y., Luo, N., Liu, K., Tan, L. y Zhang, S. (2017). Creation of a Virtual Anatomy System based on Chinese Visible Human data sets. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 39 (4), 441-449. <https://doi.org/10.1007/s00276-016-1741-7>
- Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, Finet J, Fillion-Robin JC, Pujol S, Bauer C, Jennings D, Fennessy F, Sonka M, Buatti J, Aylward S, Miller JV, Pieper S, Kikinis R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn Reson Imaging*;30(9):1323-41. doi: 10.1016/j.mri.2012.05.001.
- Feneis, H. y Dauber, W. (1998). *Feneis. Nomenclatura anatómica ilustrada*. Barcelona, Espana. Elsevier Masson.
- Fenesi, B., Mackinnon, C., Cheng, L., Kim, J. A. y Wainman, B. C. (2017). The effect of image quality, repeated study, and assessment method on anatomy learning. *Anatomical Sciences Education*, 10 (3), 249-261. <https://doi.org/10.1002/ase.1657>
- Ferrando Castro, M. (2019). *Historia de la anatomía humana: origen y personajes destacados*. RedHistoria. Recuperado de <https://redhistoria.com/historiade-la-anatomia-humana-origen-y-personajes/>
- Fiesch M. (1987). Inteligencia artificial en medicina. Sistemas expertos. Masson.
- Figueiredo Paulo S, Belo M, Kuffner dos Anjos R, Armando Jorge J, y Simões Lopes D (2018) Volume and surface rendering of 3D medical datasets in unity®, Granada. <https://miccai-sb.git>
- Fiz F, Viganò L, Gennaro N, Costa G, La Bella L, Boichuk A, Cavinato L, Sollini M, Politi LS, Chiti A, y Torzilli G. (2020). Radiomics of Liver Metastases: A Systematic Review. *Cancers (Basel)*. 2020 Oct 7;12(10):2881. doi: 10.3390/cancers12102881.
- Fleckenstein P, Jensen JT. 1995. Bases anatómicas del diagnóstico por la imagen. Mosby, Doyma. Madrid.
- Framinan, A., Ruisoto, P., Garcia, D. y Juanes, J. A. (2013). Advanced neuroimage processing for the study of the neurovascular system. *Proceedings of the First International Conference on Technological Ecosystem for Enhancing Multiculturality – TEEM´13*,
- Gadian DG. (1982). Magnetic Resonance and its applications to living systems. Clarendon Press. Oxford.
- Gamsu, G., Webb, W. R., Sheldon, P., Kaufman, L., Crooks, L. E., Birnberg, F. A., Hedgecock, M. (1983). Nuclear magnetic resonance imaging of the horax. *Radiology*, 147(2), 473-480.

- García Barrios, C., Mejías Rodríguez, I. y Castillo del Río, M. (1999). Origen e historia de la disección anatómica. *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 3 (2). Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1025-02551999000200016](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02551999000200016)
- García Fenoll I. (2010) Aportaciones a la segmentación y caracterización de imágenes médicas 3D. [On line]. <http://bibing.us.es>
- García Porrero, J. A. y Hurle, J. M. (2005). *Anatomía Humana*. Madrid, España. McGraw Hill Interamericana.
- García, F. y López, F. (2011). Influencia de las TIC en el Aprendizaje significativo (TFM). Universidad Internacional de la Rioja. Recuperado de
- Garg A, Norman G, Spero L, Taylor I. 1999. Learning anatomy: do new computer models improve spatial understanding. *Med Teacher*, 21: 519-522.
- Gehrmann S, Höhne KH, Linhart W, Pflesser B, Pommert A, Riemer M, Tiede U, Windolf J, Schumacher U, Rueger JM. 2006. A Novel Interactive Anatomie Atlas of the Hand. *Clin Anat*, 19: 258-266.
- Ghosh, S. K. (2015). Evolution of illustrations in anatomy: A study from the classical period in Europe to modern times. *Anatomical Sciences Education*, 8(2), 175-188. <https://doi.org/10.1002/ase.1479>
- Giannini, A., Iodice, V., Picano, E., Russo, E., Zampa, V., Ferrari, V. y Simoncini, T. (2017). Magnetic Resonance Imaging-Based Three Dimensional Patient-Specific
- Giardino A, Gupta S, Olson E, Sepulveda K, Lenchik L, Ivanidze J, Rakow-Penner R, Patel MJ, Subramaniam RM, Ganeshan D. (2017). Role of Imaging in the Era of Precision Medicine. *Acad Radiol*. May;24(5):639-649. doi: 10.1016/j.acra.2016.11.021. Epub 2017 Jan 25. PMID: 28131497.
- Gilroy, A. M., MacPherson, B. R., Ross, L. M., Schunke, M., Schulte, E. y Schumacher U. (2008). *Prometheus, Atlas de Anatomía*. Madrid, España. Panamericana.
- Goh V, Halligan S, Kaplan G, Healy JC, Bartram C. (2000). Dynamic MR imaging of the pelvic floor in asymptomatic subjects. *AJR* 174: 661-666.
- Golenhofen, N., Heindl, F., Grab-Kroll, C., Messerer, D. A., Bockers, T. M. y Bockers, A. (2020). The Use of a Mobile Learning Tool by Medical Students in Undergraduate Anatomy and its Effects on Assessment Outcomes. *Anat Sci Educ*, 13, 8-18. <https://doi.org/10.1002/ase.1878>
- González Izard S, Sánchez Torres R, Alonso Plaza O, Juanes Méndez JA; y García-Peñalvo FJ (2020). Nextmed: Automatic Imaging Segmentation, 3D Reconstruction, and 3D Model Visualization Platform Using Augmented and Virtual Reality-. *Sensors* 2020, 20, 2962 pp:1-19
- González Izard S; Juanes-Mendez JA; García Peñalvo FJ; Gonçalves-Estella JM ; Sánchez Ledesma MJ; Ruisoto Palomera P (2018). Virtual Reality as an Educational and Training Tool for Medicine. *J Med Syst* (2018) 42: 50. ISSN: 0148-5598. On line ISSN: 1573-689X. Springer US.
- Gonzalo Dominguez, M., Hernandez, C., Ruisoto, P., Juanes, J. A., Prats, A. y Hernandez, T. (2016). Morphological and Volumetric Assessment of Cerebral Ventricular System with 3D Slicer Software. *Journal of Medical Systems*, 40, 6.
- Govsa, F., Yagdi, T., Ozer, M. A., Eraslan, C. y Alagoz, A. K. (2017). Building 3D anatomical model of coiling of the internal carotid artery derived from CT angiographic data. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngology*, 274, 2, 1097-1102. <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4355-0>

- Graupera, B., Pascual, M. A., Hereter, L. y Pedrero, C. (2018). Role of 3D Ultrasound in the Evaluation of Uterine Anomalies. En A. Tinelli, L. A. Pacheco y S. Haimovich (Eds.), *Hysteroscopy* (pp. 69-82). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57559-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57559-9_8)
- Guerrero, M. R. (2014). *Metodologías activas y aprendizaje por descubrimiento. Las TIC y la educación*. Marpadal Interactive Media S.L.
- Guimaraes, B., Firmino-Machado, J., Tsisar, S., Viana, B., Pinto-Sousa, M., Vieira-Marques, P., Cruz-Correia, R. y Ferreira, M. A. (2018). The Role of Anatomy Computer-Assisted Learning on Spatial Abilities of Medical Students. *Anatomical Sciences Education*, 12,2, 138-153. <https://doi.org/10.1002/ase.1795>
- Guiraldes, H., Oddo, H., Mena, B., Velasco, N. y Paulos, J. (2001). Enseñanza de la anatomía humana: experiencias y desafíos en una escuela de medicina. *Revista chilena de anatomía*, 19 (2), 205-212. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-98682001000200013>
- Gunby P. (1982). The new wave in medicine: Nuclear Magnetic Resonance. *JAMA*, 247: 151-159.
- Gutierrez Tapias, M. (2018). Estilos de aprendizaje, estrategias para enseñar. Su relación con el desarrollo emocional y "aprender a aprender". *Tendencias pedagógicas*, 31, 83-96. <http://dx.doi.org/10.15366/tp2018.31.004>
- Haak D, Page CE, Reinartz S, Krüger T, Deserno TM. (2015). DICOM for Clinical Research: PACS-Integrated Electronic Data Capture in Multi-Center Trials. *J Digit Imaging*. 2015 Oct;28(5):558-66. doi: 10.1007/s10278-015-9802-8.
- Hackett, M. y Proctor, M. (2016). Three-Dimensional Display Technologies for Anatomical Education: A Literature Review. *Journal of Science Education and Technology*, 25, 4,641-654. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9619-3>
- Haleem A, Javaid M, Suman R, Singh RP. (2021). 3D Printing Applications for Radiology: An Overview. *Indian J Radiol Imaging*;31(1):10-17. doi: 10.1055/s-0041-1729129.
- Hassinger, J. P., Dozois, E. J., Holubar, S. D., Camp, J. C., Farley, D. R., Fidler, J. L., Pawlina, W., Robb, R. A. y Larson, D. W. (2010). Virtual pelvic anatomy simulator: a pilot study of usability and perceived effectiveness. *J Surg Res*, 161, 23-27.
- Hatfield P, Temkin B, Griswold JA, Deeb SA, Dev P, Heinrichs WL, Srivastava S, Waldron K. (2002). Volumetric virtual body structures. *Stud Health Technol Inform*, 85: 185-187
- Hecht, L. P. y Larrazabal, M. A. (2018). Uso de nuevos recursos tecnológicos en la docencia de un curso de anatomía con orientación clínica para alumnos de medicina. *Int. J. Morphol.*, 36 (3), 821-828. Recuperado de
- Heng PA, Zhang SX, Xie YM, Wong TT, Chui YP, Cheng CY. (2006). Photorealistic Virtual Anatomy Based on Chinese Visible Human Data. *Clin Anat*, 19: 232-239.
- Hoffman JM, Gambhir SS. (2007). Molecular imaging: the vision and opportunity for radiology in the future. *Radiology*;244(1):39-47. doi: 10.1148/radiol.2441060773
- Houser, J. J. y Kondrashov, P. (2018). Gross Anatomy Education Today: The Integration of Traditional and Innovative Methodologies. *Missouri medicine*, 115, 1, 61-65. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30228685>
- Hoyek, N., Collet, C., Di Rienzo, F., De Almeida, M. y Guillot, A. (2014). Effectiveness of three-dimensional digital animation in teaching human anatomy in an authentic classroom context. *American Association of Anatomists*, 7, 430-437. <https://doi.org/10.1002/ase.1446>

- Hu, M., Wattchow, D. y De Fontgalland, D. (2018). From ancient to avant-garde: a review of traditional and modern multimodal approaches to surgical anatomy education. *ANZ J Surg*, 88, 146-151. <https://doi.org/10.1111/ans.14189>
- Inzunza, O., Caro, I., Mondragon, G., Baeza, F., Burdiles, A. y Salgado, G. (2015). 3D impressions, new technology that supports anatomical teaching. *Int. J. Morphol.*, 33 (3), 1176-1182. Recuperado de <https://diseno.uc.cl/wp/wpcontent/uploads/2017/06/Inzunzalmpre3D-2.pdf>
- Izard, S. G., Juanes, J. A., Garcia Penalvo, F. J., Estella, J. M. G., Ledesma, M. J. S. y Ruisoto, P. (2018). Virtual Reality as an Educational and Training Tool for Medicine. *Journal of Medical Systems*, 42, 50. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0900-2>
- Jacobson HG. 1987. Fundamentals of magnetic resonance imaging. *JAMA*, 258: 3417-3423.
- Jamil, Z., Saeed, A. A., Madhani, S., Baig, S., Cheema, Z. y Fatima, S. S. (2019). Threedimensional Visualization Software Assists Learning in Students with Diverse Spatial Intelligence in Medical Education. *Anat Sci Educ*, 12, 5, 550-560.
- Jashtrou H, Vollrath L. 2002. Anatomy online: Presentation of a detailed WWW atlas of human gross anatomy-reference for medical education. *Clin Anat*, 15: 402-408.
- Jiménez B, González AP, Ferreres V. 1989. Modelos didácticos para la innovación educativa. PPU. Barcelona.
- Jimenez Lopez, M., Garcia-Penalvo, F. J., Ruisoto, P., Gonzalez Izard, S., Juanes Mendez, J. A. y Pastor Vazquez, F. (2017). 360o vision applications for medical training. *Proceedings of the Fifth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality – TEEM´17*, 55, 1-7. <https://doi.org/10.1145/3144826.3145405>
- Johnson S, Erdman AG, Jackson B, Keefe DF, Tourek B, Molina M (2016) Immersive analytics for medicine: hybrid 2D/3D sketch-based interfaces for annotating medical data and designing medical devices. In: Companion proceedings of the 2016 ACM international conference on interactive surfaces and spaces: nature meets interactive surfaces, ISS 2016, November 2016.
- Juanes JA, Prats A, Lagándara ML, Riesco JM. 2003. Application of the "Visible Human Project" in the field of anatomy: a review. *European Journal of Anatomy*, 7: 147-159.
- Juanes Mendez, J. A., Prats-Galino, A. y Gomez Borrallo, J. (2010): Avances en el desarrollo de interfaces de usuario de programas docentes: importancia de su diseño para la eficacia y optimización del aprendizaje. En J. A. Juanes Mendez (Coord.), Avances tecnológicos digitales en metodologías de innovación docente en el campo de las Ciencias de la Salud en España. *Revista Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 11 (2), 101-116. Universidad de Salamanca.
- Juanes, J. A. y Ruisoto, P. (2014). Technological Advances and Teaching Innovation Applied to Health Science Education. *Journal of Information Technology Research*, 7, 2, 1-6. <https://doi.org/10.4018/jitr.2014040101>
- Juanes, J. A. y Ruisoto, P. (2015). Computer Applications in Health Science Education. *J Med Syst*, 39, 97. <https://doi.org/10.1007/s10916-015-0283-6>
- Juanes, J. A., Hernandez, D., Ruisoto, P., Garcia, E., Villarrubia, G. y Prats, A. (2014). Augmented reality techniques, using mobile devices, for learning human anatomy. *Proceedings of the Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality – TEEM´14*, 7-11.

- Juanes, J. A., Ruisoto, P., Cabrero, F. J. y Prats-Galino, A. (2014). An Update on Health Information Technology. *Journal of Information Technology Research*, 7, 2, 63-74. <https://doi.org/10.4018/jitr.2014040106>
- Juanes, J. A., Ruisoto, P., Obeso, J. A., Prats, A. y San-Molina, J. (2015). Computer-Based Visualization System for the Study of Deep Brain Structures Involved in Parkinson's Disease. *J Med Syst*, 39, 151. <https://doi.org/10.1007/s10916-015-0348-6>
- Juanes, J. A., Ruisoto, P., Prats-Galino, A. y Framinan, A. (2014). Open Source Applications for Image Visualization and Processing in Neuroimaging Training. *Journal of Information Technology Research (JITR)*, 7(2), 75-87.
- Juanes, J. A., Ruisoto, P., Prats-Galino, A., Framinan, A. y Riesco, J. M. (2014d). Computed anatomical modelling of the optic pathway and oculomotor system using magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroradiology*, 41, 3, 168-176.
- Juanes, J. A., Ruisoto, P., Velasco, M. A. y Gomez, J. J. (2013). Advance technology for enhanced study of the brain from neuroimaging. En: L. Gomez Chova, I. Candel Torres y A. Lopez Martinez (Eds.), *Proceedings of the 5th International Technology, Education and Development Conference (INTED)*, 5073-5082. Valencia. Recuperado de <https://library.iated.org/view/JUANE-S2013ADV>
- Karakas, A. B., Govsa, F., Ozer, M. A. y Eraslan, C. (2018). 3D Brain Imaging in Vascular Segmentation of Cerebral Venous Sinuses. *Journal of Digital Imaging*, 32, 2, 314-321. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0125-4>
- Kean, DM, Smith MA. 1986. Magnetic resonance imaging: principles and applications. Williams & Wilkins. Baltimore.
- Keedy, A. W., Durack, J. C., Sandhu, P., Chen, E. M., O'Sullivan, P. S. y Breiman, R. S. (2011). Comparison of traditional methods with 3D computer models in the instruction of hepatobiliary anatomy. *Anat Sci Ed*, 4, 84-91. <https://doi.org/10.1002/ase.212>
- Kenway, L. C. y Bakr, M. M. (2019). The Use of Digital Software Applications and Digital Atlases to Supplement Anatomy Teaching to Undergraduate Allied Health Students. En M. Khosrow-Pour (Ed.), *Virtual Reality in Education. Breakthroughs in Research and Practice* (pp. 824-845). Information Resources Management Association (EEUU).
- Khot, Z., Quinlan, K., Norman, G. R. y Wainman, B. (2013). The relative effectiveness of computer-based and traditional resources for education in anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 6, 211-215. <https://doi.org/10.1002/ase.1355>
- Kostusiak, M., Hart, M., Barone, D. G., Hofmann, R., Kirolos, R., Santarius, T. y Trivedi, R. (2017). Methodological shortcomings in the literature evaluating the role and applications of 3D training for surgical trainees. *Medical Teacher*, 39, 11, 1168-1173. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2017.1362102>
- Kraima, A. C., Smit, N. N., Jansma, D., Wallner, C., Bleys, R. L., Van de Velde, C. J., Botha, C. P. y DeRuiter, M. C. (2013) Toward a highly-detailed 3D pelvic model: approaching an ultra-specific level for surgical simulation and anatomical education. *Clin Anat* 26
- Kurobe, N., Hakkakian, L., Chahim, M., Delmas, V., Vekemans, M. y Uhl, J. F. (2015). Threedimensional reconstruction of the lower limb's venous system in human fetuses using the computer-assisted anatomical dissection (CAAD) technique. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 37(3), 231-238. <https://doi.org/10.1007/s00276-014-1350-2>

- Labovitz, J. y Hubbard, C. (2020). The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education, *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 37, 2, 409-420.
- Lai, J. W. M. y Bower, M. (2020). Evaluation of technology use in education: Findings from a critical analysis of systematic literature reviews. *J Comput Assist Learn*, 2020, 1-19. <https://doi.org/10.1111/jcal.12412>
- Larson, K. A., Yousuf, A., Lewicky-Gaupp, C., Fenner, D. E. y DeLancey, J. O. (2010). Perineal body anatomy in living women: 3-dimensional analysis using thin-slice magnetic resonance imaging. *Am J Obstet Gynecol* 203, 494.e15-494.e21.
- Lee CI, Gupta S, Sherry SJ, Chiunda A, Olson E, Chokshi FH, Mankowski-Gettle L, Mendiratta-Lala M, Lee YZ, Moser FG, Duszak R Jr (2018) . Translating New Imaging Technologies to Clinical Practice. *Acad Radiol*. 2018 Jan;25(1):3-8. doi: 10.1016/j.acra.2017.03.027. Epub 2017 Aug 31. PMID: 28843464
- Lewis, T. L., Burnett, B., Tunstall, R. G. y Abrahams, P. H. (2014). Complementing anatomy education using three-dimensional anatomy mobile software applications on Tablet computers. *Clin. Anat*, 27, 313-320. <https://doi.org/10.1002/ca.22256>
- Li, L., Liu, Y. X. y Song, Z. J. (2006). Three-dimensional reconstruction of registered and fused Chinese Visible Human and patient MRI images. *Clinical Anatomy*, 19(3), 225-231. <https://doi.org/10.1002/ca.20291>
- Lippert, H. (2009). *Anatomía con orientación clínica para estudiantes*. Madrid, Espana. Marban.
- Lombardi, S. A., Hicks, R. E., Thompson, K. V. y Marbach-Ad, G. (2014). Are all hands-on activities equally effective? Effect of using plastic models, organ dissections, and virtual dissections on student learning and perceptions. *Advances in Physiology Education*, 38, 80-86. <https://doi.org/10.1152/advan.00154.2012>
- Lone, M., Vagg, T., Theocharopoulos, A., Cryan, J. F., Mckenna, J. P., Downer, E. J. y Toulouse, A. (2018). Development and Assessment of a Three-Dimensional Tooth Morphology Quiz for Dental Students. *Anatomical Sciences Education*, 12, 3, 284-299. <https://doi.org/10.1002/ase.1815>
- Luo, J., Ashton-Miller, J. A. y DeLancey, J. O. (2011). A model patient: female pelvic anatomy can be viewed in diverse 3-dimensional images with a new interactive tool. *Am J Obstet Gynecol*, 205, 4, 391E1-391E2. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2011.08.018>
- Malmberg F, Nordenskjöld R, Strand R, y Kullberg J (2017) Smartpaint: a tool for interactive segmentation of medical volume images. *Comput Methods Biomech Biomed Eng Imaging Visualiz* 5(1): 36-44.
- Mansfiel P, Morris PG. 1982. NMR Imaging in Biomedicine. Academic Press. Filadelfia.
- Margulis AR, Kaufman L, Crooks LE. 1982. Nuclear Magnetic Resonance Imaging in Medicine. Igaku-Shoin. New York.
- Marro A, Bandukwala T, Mak W. (2016). Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications. *Curr Probl Diagn Radiol*. 2016 Jan-Feb;45(1):2-9. doi: 10.1067/j.cpradiol.2015.07.009.
- Martinez, G. F., Mir, F. y Garcia Romano, L. (2017). Caracterización de aplicaciones móviles para la enseñanza y el aprendizaje de la anatomía humana. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas, Extra 0*, 1597-1604.

- Mavar-Haramija, M., Prats-Galino, A., Mendez, J. A. J., Puigdelivoll-Sanchez, A. y De Notaris, M. (2015). Interactive 3D-PDF Presentations for the Simulation and Quantification of Extended Endoscopic Endonasal Surgical Approaches. *J Med Syst*, 39, 127. <https://doi.org/10.1007/s10916-015-0282-7>
- Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, Häggström I, Szczypiński P, Gibbs P, Cook G. (2020). Introduction to Radiomics. *J Nucl Med. Apr*;61(4):488-495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893. Epub 2020 Feb 14.
- McMenamin PG (2014) The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology, 7(6):479-86. <https://doi.org/10.1002/ase.1475>
- Mishra A, Wong A, Zhang W, Clausi D, Fieguth P. (2008). Improved interactive medical image segmentation using Enhanced Intelligent Scissors (EIS). *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.*:3083-6. doi: 10.1109/IEMBS.2008.4649855.
- Mitrousias, V., Varitimidis, S. E., Hantes, M. E., Malizos, K. N. Arvanitis, D. L. y Zibis, A. H. (2018). Anatomy learning from prosected cadaveric specimens versus threedimensional software: A comparative study of upper limb anatomy. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 218, 156-164.
- Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, Cai T, Kumamaru KK, George E, Wake N, Caterson EJ, Pomahac B, Ho VB, Grant GT, y Rybicki FJ. (2015). Medical 3D Printing for the Radiologist. *Radiographics.*;35(7):1965-88. doi: 10.1148/rg.2015140320.
- Mompeo-Corredera, B. (2014). Metodologías y materiales para el aprendizaje de la anatomía humana: percepciones de los estudiantes de medicina "nativos digitales". *FEM: Revista de la Fundación Educación Médica*, 17 (2), 99-104.
- Montemayor Flores, B. G. (2006). El Significado de la Práctica de Disección para los Estudiantes de Medicina. *International Journal of Morphology*, 24 (4), 575-580. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022006000500010>
- Moore KL, y Dalley II AF. (2007). Anatomía con orientación clínica. Panamericana. 5ª edición. Madrid.
- Moore, C. W., Wilson, T. D. y Rice, C. L. (2017). Digital preservation of anatomical variation: 3D-modeling of embalmed and plastinated cadaveric specimens using CT and MRI. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 209, 69-75.
- Moore, K. L. y Agur, A. M. R. (2007). *Compendio de Anatomía con orientación clínica*. Barcelona, España. Elsevier Masson.
- Moreira, P. (2019). Las TIC en el aprendizaje significativo y su rol en el desarrollo social y cognitivo de los adolescentes. *Rehuso*, 4 (2), 1-12.
- Moro, C. y Gregory, S. (2019). Utilising Anatomical and Physiological Visualisations to Enhance the Face-to-Face Student Learning Experience in Biomedical Sciences and Medicine. En P. Rea (Ed.), *Biomedical Visualisation. Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1156, (pp. 41-44). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19385-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19385-0_3)
- Moro, C., Smith, J. y Stromberga, Z. (2019). Multimodal Learning in Health Sciences and Medicine: Merging Technologies to Enhance Student Learning and Communication. En P. Rea (Ed.), *Biomedical Visualisation. Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1205, (pp.71-78). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31904-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31904-5_5)

- Moro, C., Stromberga, Z. y Birt, J. (2020). Technology Considerations in Health Professions and Clinical Education. En D. Nestel, G. Reedy, L. McKenna y S. Gough (Eds), *Clinical Education for the Health Professions* (pp. 1-22). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6106-7\\_118-1](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6106-7_118-1)
- Moro, C., Stromberga, Z., Raikos, A. y Stirling, A. (2017). The Effectiveness of Virtual and Augmented Reality in Health Sciences and Medical Anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 10, 6, 549-559. <https://doi.org/10.1002/ase.1696>
- Morris, N. P., Lambe, J., Cicconet, J. y Swinnerton, B. (2016). Mobile technology: students perceived benefits of apps for learning neuroanatomy. *J Comp Assisted Learning*, 32,5, 430-442. <https://doi.org/10.1111/jcal.12144>
- Morrissey, J. (2010). El uso de TIC en la enseñanza y el aprendizaje. Cuestiones y desafíos. En R. Aparici (Coord.), *Conectados en el ciberespacio* (pp. 235-246). Madrid, UNED.
- Moszkowicz, D., Alsaid, B., Bessedé, T., Zaitouna, M., Penna, C., Benoit, G. y Peschard, F. (2011). Neural Supply to the Clitoris: Immunohistochemical Study with Three-Dimensional Reconstruction of Cavernous Nerve, Spongiosus Nerve, and Dorsal Clitoris Nerve in Human Fetus. *The Journal of Sexual Medicine*, 8 (4), 1112-1122. <https://doi.org/10.1111/j.1743-6109.2010.02182.x>
- Netter, F. H. (2007). *Atlas de Anatomía Humana*. Barcelona, Espana. Elsevier Masson.
- Nicolaou S, Mohammed MF. (2018). Multienergy Computed Tomography: A New Horizon in Computed Tomographic Imaging. *Radiol Clin North Am*. 2018 Jul;56(4):xv-xvi. doi: 10.1016/j.rcl.2018.04.001. PMID: 29936954.
- Noguera, J. M., Jimenez, J. J. y Osuna-Perez, M. C. (2013). Development and evaluation of a 3D mobile application for learning manual therapy in the physiotherapy laboratory. *Comput Educ* 69, 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.007>
- Nowinski, W. L., Chua, B. C., Johnson, A., Qian, G., Poh, L. E., Yi, S. H. W., Bivi, A. y Nowinska, N. G. (2013). Three-dimensional interactive and stereotactic atlas of head muscles and glands correlated with cranial nerves and surface and sectional neuroanatomy. *Journal of Neuroscience Methods*, 215(1), 12-18.
- Olabarriaga SD, Smeulders AWM (2001) Interaction in the segmentation of medical images: a survey. *Medical Image Anal* 5(2):127-142
- O'Rourke, J. C., Smyth, L., Webb, A. L. y Valter, K. (2020). How Can We Show You, If You Can't See It? Trialing the Use of an Interactive Three-Dimensional Micro-CT Model in Medical Education. *Anat Sci Educ*, 13, 2, 206-217. <https://doi.org/10.1002/ase.1890>
- Ortega P, Martinez F. (1994). Educación y Nuevas Tecnologías. Paraninfo. Madrid
- Padole A, Ali Khawaja RD, Kalra MK, Singh S. (2015). CT radiation dose and iterative reconstruction techniques. *AJR Am J Roentgenol*. Apr;204(4):W384-92. doi: 10.2214/AJR.14.13241. PMID: 25794087.
- Pansky B. 1998. Review of gross anatomy. McMillan Publishing. New York
- Papadopoulou, P., Chui, K. T., Daniela, L. y Lytras, M. D. (2019). Virtual and Augmented Reality in Medical Education and Training: Innovative Ways for Transforming Medical Education in the 21st Century. En M. Lytras, N. Aljohani, L. Daniela, y A. Visvizi (Eds.), *Cognitive Computing in Technology-Enhanced Learning* (pp. 109-150). Hershey, PA:IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9031-6.ch006>

- Pardos, E. (2017). *Realidad Virtual y medicina: usos y aplicaciones*. Recuperado el 15 de mayo de 2020 de <https://baboonlab.odoo.com/blog/noticias-de-marketinginmobiliario-y-tecnologia-1/post/realidad-virtual-y-medicina-usos-y-aplicaciones>
- Parikh M, Rasmussen M, Brubaker L, Salomon C, Sakamoto K, Everhouse R, Ai Z, Damaser MS. 2004. Three-dimensional virtual reality model of the normal female pelvic floor. *Ann Biomed Eng*, 32: 292-296.
- Park JS, Cheng MS, Hwang SB, Lee YS, Har DH, Park HS. (2005). Visible Korean human: Improved serially sectioned images of the entire body. *IEEE Trans Med Imaging*, 24: 352-360.
- Park JS, Cheng MS, Hwang SB, Shin BS, Park HS. (2006). Visible Korean Human: Its Techniques and Applications. *Clin Anat*, 19: 216-224.
- Perandini S, Faccioli N, Zaccarella A, Re T, Mucelli RP (2010) The diagnostic contribution of CT volumetric rendering techniques in routine practice. *Indian J Radiol Imaging* 20(2):92-97.
- Perlemuter, L. (1999). *Anatomo-Fisiología*. Barcelona, Espana. Masson.
- Peterson, D. C. y Mlynarczyk, G. S. A. (2016). Analysis of traditional versus three-dimensional augmented curriculum on anatomical learning outcome measures. *Anatomical Sciences Education*, 9(6), 529-536. <https://doi.org/10.1002/ase.1612>
- Pickering, J. D. y Swinnerton, B. J. (2018). Exploring the dimensions of medical student engagement with technology-enhanced learning resources and assessing the impact on assessment outcomes. *Anat Sci Educ*, 12, 2, 117-128.
- Poirier P, Charpy A, Cuneo B. 1909. *Abrégé d'Anatomie*. V.3. Masson, París pp 107-113.
- Prats Galino, A. (2010). VIX: Una aplicacion informatica abierta para la visualizacion y estudio interactivo de la anatomia en 3D. En J. A. Juanes Mendez (Coord.), *Avances tecnologicos digitales en metodologias de innovacion docente en el campo de las Ciencias de la Salud en Espana. Revista Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 11, (2), 171-193.
- Prats-Galino A, Reina MA, Haramija MM, Puigdemívol-Sánchez A, Juanes Mendez JA, De Andrés JA (2015) 3D interactive model of lumbar spinal structures of anesthetic interest. *Clin Anat* 28:205-212.
- Preece, D., Williams, S. B., Lam, R. y Weller, R. (2013). "Let's Get Physical": Advantages of a physical model over 3D computer models and textbooks in learning imaging anatomy. *Anatomical Sciences Education*, 6(4), 216-224. <https://doi.org/10.1002/ase.1345>
- Preim B, Saalfeld P (2018) A survey of virtual human anatomy education systems. *Comput Graph* 71:132-153
- Ratib O, Ligier Y, Mascarini C, Logean M, Girard C, Trayser G, Hochstrasser D. (1997). Multimedia image and data navigation workstation. *Radiographics*;17(2):515-21; doi: 10.1148/radiographics.17.2.9084087
- Rea, P. M. (2016). Advances in Anatomical and Medical Visualisation. En M. Pinheiro, y D.Simoes (Eds.), *Handbook of Research on Engaging Digital Natives in Higher Education Settings* (pp. 244-264). Hershey, PA: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0039-1.ch011>
- Ricardo Barreto, C. y Diazgranados, F. (2017). *Las TIC en la educacion superior. Experiencias de innovacion*. Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte.

- Rinck PA, Petersen SB, Muler RN. (1986). Introducción a la resonancia magnética nuclear biomédica. Panamericana. Buenos Aires.
- Robb RA, Hanson DP. (2006). Biomedical Image Visualization Research Using the Visible Human Datasets. *Clin Anat*, 19: 240-253.
- Robb RA, Satava, RM. (1997). Virtual endoscopy: Applications of 3-D visualization to medical diagnosis. *Presence* 6: 179-197.
- Robb RA. (2001). The biomedical imaging resource at Mayo Clinic. *IEEE Trans Med Imaging*, 20: 854-867.
- Robb, RA. (1995). Three-dimensional biomedical imaging. Principles and practice. New York, NY: VCH Publishers, Inc. P 1-282.
- Robb, RA. (2000). Virtual endoscopy: Development and evaluation using the Visible Human Datasets. *Comput Med Imaging Graph*, 24: 133-151.
- Robison RA, Liu CY, Apuzzo MLJ (2011) Man, mind, and machine: the past and future of virtual reality simulation in neurologic surgery. *World Neurosurg* 76(5):419-430.
- Rodríguez Lamas R. (2002). Introducción a la Informática Educativa. Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana.
- Rodríguez Rubio, R., Shehata, J., Kournoutas, I., Chae, R., Vigo, V., Wang, M., El-Sayed, I. y Abla, A. A. (2019). Construction of Neuroanatomical Volumetric Models Using 3-Dimensional Scanning Techniques: Technical Note and Applications. *World Neurosurgery*, 126, 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.03.099>
- Rodríguez-Herrera, R., Losardo, R. J. y Binivignat, O. (2019). La Anatomía Humana como Disciplina Indispensable en la Seguridad de los Pacientes. *International Journal of Morphology*, 37 (1), 241-250. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-241-250>.
- Roger FH, Santucci G. (1987). Perspectives of Information processing in Medical Applications., Springer-Verlag, Berlín
- Rohen, J. W, Yokochi, C. y Lutjen-Drecoll, E. (2011). *Atlas de anatomía humana*. Barcelona, España. Elsevier.
- Romero Reveron, R. (2007). Andreas Vesalius (1514-1564): Fundador de la Anatomía Humana Moderna. *International Journal of Morphology*, 25 (4), 847-850. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022007000400026>
- Rouviere H, Delmas A. (2005). Anatomía Humana: descriptiva, topográfica y funcional. Edit. Masson. Tomo 2. Barcelona.
- Ruisoto, P., Juanes, J. A., Contador, I., Mayoral, P. y Prats-Galino, A. (2012). Experimental evidence for improved neuroimaging interpretation using three-dimensional graphic models. *Anatomical Sciences Education*, 5, 3, 132-137.
- Ruiz, E., Martínez, N. y Galindo, R. (2012). Aprendizaje colaborativo en ambientes virtuales y sus bases socioconstructivistas como vía para el aprendizaje significativo. *Apertura. Revista de innovación educativa*, 4, 2.
- Runge VM. (2013). Current technological advances in magnetic resonance with critical impact for clinical diagnosis and therapy. *Invest Radiol*.;48(12):869-77. doi: 10.1097/01.rli.0000434380.71793.d3.

- Saez-Lopez, J. M. (2018). Estilos de aprendizaje. Escuela y posmodernidad. Una nueva escuela para una sociedad en cambio. En *Estilos de aprendizaje y métodos de enseñanza* (pp.9-21). Madrid, UNED.
- Salinas J. 1994. Hipertexto e hipermedia en la enseñanza universitaria. *Pixel-Bit*. Revista de Medios y Educación. N°1. Enero. pp. 15-29.
- Scatliff JH, Morris PJ. (2014). From Roentgen to magnetic resonance imaging: the history of medical imaging. *N C Med J.* ;75(2):111-3. doi: 10.18043/ncm.75.2.111.
- Seeram E. (2018). Computed Tomography: A Technical Review. *Radiol Technol*. Jan;89(3): 279CT-302CT.
- Seixas-Mikelus, S. A., Adal, A., Kesavadas, T., Baheti, A., Srimathveeravalli, G., Hussain, A., Chandrasekhar, R., Wilding, G. E. y Guru, K. A. (2010). Can image-based virtual reality help teach anatomy?. *Journal of Endourology*, 24, 629-634.
- Shunke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. y Wesker, K. (2005). *Prometheus. Texto y Atlas de Anatomía*. Madrid, España. Panamericana.
- Sobejano A, Tomas JM, Muñoz C. 1992. Manual de Resonancia Magnética. Jims. Barcelona.
- Sopena R, Marti-Bonmati L, Vilar J. 1996. Algoritmos en diagnóstico por imagen. Masson. Barcelona.
- Sora, M. C., Jilavu, R. y Matusz, P. (2011). Computer aided three-dimensional reconstruction and modeling of the pelvis, by using plastinated cross sections, as a powerful tool for morphological investigations. *Surg Radiol Anat*, 34 (8), 731-736. <https://doi.org/10.1007/s00276-011-0862-2>
- Spitzer VM, Ackerman MJ, Scherzinger AL, y Whitlock D. (1996). The Visible Human male: A technical report. *J Am Med Inform Assoc*, 3: 118-130.
- Spitzer VM, y Scherzinger AL. (2006). Virtual Anatomy: An Anatomist's Playground. *Clinical Anatomy*, 19: 192-203.
- Spitzer VM, y Whitlock DG. (1998). The Visible Human dataset: The anatomical platform for human simulation. *Anat Rec (New Anat)*, 253: 49-57.
- Stark DD, y Bradley WG. (1987). *Magnetic Resonance Imaging*. Mosby. Chicago.
- Svirko, E. y Mellanby, J. (2017). Teaching neuroanatomy using computer-aided learning: What makes for successful outcomes?. *Anatomical Sciences Education*, 10, 6, 560-569. <https://doi.org/10.1002/ase.1694>
- Tabernero Rico, R. D., Juanes Mendez, J. A. y Prats Galino, A. (2017). New Generation of Three-Dimensional Tools to Learn Anatomy. *Journal of Medical Systems*, 41 (5), 88. <https://doi.org/10.1007/s10916-017-0725-4>
- Tam, M. D. B. S., Hart, A. R., Williams, S., Heylings, D. y Leinster, S. (2009). Is learning anatomy facilitated by computer-aided learning? A review of the literature. *Medical Teacher*, 31, 9, e393-e396. <https://doi.org/10.1080/01421590802650092>
- Temkin B, Acosta E, Hatfield P, Onal E, Tong A. (2002). Web-based three-dimensional Virtual Body Structures: W3D-VBS. *JAMIA* 9: 425-436.
- Temkin B, Acosta E, Malvankar A, Vaidyanath S. 2006. An interactive three-dimensional virtual body structures system for anatomical training over the internet. *Clin Anat*;19: 267-274.

- Temkin B, Stephens B, Acosta E, Wei B, Hatfield P. 2000. Virtual body structures. En: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> visible human conference, Bethesda, Maryland.
- Temkin, B., Acosta, E., Malvankar, A. y Vaidyanath, S. (2006). An interactive threedimensional virtual body structures system for anatomical training over the internet. *Clinical Anatomy*, 19(3), 267-274. <https://doi.org/10.1002/ca.20230>
- Testut L, Latarjet A. 1968. Tratado de Anatomía Humana. Tomo II. Salvat S.A. Barcelona.
- Thompson BH, Stanford W. (2000). MR imaging of pulmonary and mediastinal malignancies. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2000 Nov;8(4):729-39. PMID: 11149676.
- Tierny J (2015) Introduction to volume rendering [On line]. [https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny\\_intro\\_vol\\_rend09.pdf](https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny_intro_vol_rend09.pdf). Accessed 20 Aug 2018
- Torres Merchan, N. Y. (2013). Enseñanza de Anatomía: Una experiencia a partir de cuestionamientos propuestos en situaciones contextuales. *Escenarios*, 11(1), 131-138.
- Trelease, R. B. (2016). From chalkboard, slides, and paper to e-learning: How computing technologies have transformed anatomical sciences education. *Anatomical Sciences Education*, 9(6), 583-602. <https://doi.org/10.1002/ase.1620>
- Triepels, C. P. R., Smeets, C. F. A., Notten, K. J. B., Kruitwagen, R. F. P. M., Futterer, J. J., Vergeldt, T. F. M. y Van Kuijk, S. M. J. (2019). Does three-dimensional anatomy improve student understanding?. *Clinical Anatomy*, 33, 1, 25-33.
- Ugidos Lozano, M. T., Blaya Haro, F., Molino Diaz, C., Manzoor, S., Ferrer Ugidos, G. y Juanes Mendez, J. A. (2017). 3D Digitization and Prototyping of the Skull for Practical Use in the Teaching of Human Anatomy. *Journal of Medical Systems*, 41, 83. <https://doi.org/10.1007/s10916-017-0728-1>
- Ugidos Lozano, M. T., Blaya Haro, F., Ruggiero, A., Manzoor, S. y Juanes Mendez, J. A. (2019). Evaluation of the Applicability of 3d Models as Perceived by the Students of Health Sciences. *Journal of Medical Systems*, 43, 5. <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1238-0>
- Ugidos Lozano, M. T., Juanes Mendez, J. A., Molino Diaz, C., Manzoor, S., Ferrer Ugidos, G. y Blaya Haro, F. (2016). Processing and additive manufacturing of bones for the teaching of human anatomy. *ACM International Conference Proceeding Series*, 533-536. <http://dx.doi.org/10.1145/3012430.3012569>
- Uhl JF, Hautin R, Park JS, Chung BS, Latremouille C, Delmas V (2017) Tridimensional vectorial modeling of the heart and coronary vessels from the anatomical slices of the Korean Visible human. *J Hum Anat* 1(3): 1-9
- Valenzuela Torres, D., Zuniga Herranz, F. y Zuniga Rocha, S. (2010). Doscientos anos de la enseñanza de la Medicina. La experiencia chilena como ejemplo de los procesos de independencia hispanoamericana y los cambios en educacion medica. *Bordón*, 62(2),81-91.
- Van Nuland, S. E. y Rogers, K. A. (2016). The anatomy of E-Learning tools: Does software usability influence learning outcomes? *Anatomical Sciences Education*, 9(4), 378-390. <https://doi.org/10.1002/ase.1589>
- Van Nuland, S. E. y Rogers, K. A. (2017). The skeletons in our closet: E-learning tools and what happens when one side does not fit all. *Anatomical Sciences Education*, 10, 6,570-588. <https://doi.org/10.1002/ase.1708>

- Varma DR. (2012). Managing DICOM images: Tips and tricks for the radiologist. *Indian J Radiol Imaging*. 2012 Jan;22(1):4-13. doi: 10.4103/0971-3026.95396.
- Vazquez, R., Riesco, J. M., Juanes, J. A., Blanco, E., Rubio, M. y Carretero, J. (2007). Educational strategies applied to the teaching of anatomy. The evolution of resources. *European Journal of Anatomy*, 11(1), 31-43.
- Veloz-Martinez, M. G., Almanza-Velasco, E., Uribe-Ravell, J. A., Libiend-Diaz Gonzalez, L., Quintana-Romero, V., y Alanis-Lopez, P. (2012). Uso de tecnologías en informacion y comunicacion por medicos residentes de ginecologia y obstetricia. *Investigación en educación médica*, 1(4), 183-189.
- Venkatesh V, Verdini D, y Ghoshhajra B. (2011). Normal magnetic resonance imaging of the thorax. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 19(3):489-506, viii. doi: 10.1016/j.mric.2011.05.014.
- Webb, W. R., Gamsu, G., Stark, D. D., y Moore, E. H. (1984). Magnetic resonance imaging of the normal and abnormal pulmonary hila. *Radiology*, 152(1), 89-94.
- Wilson, A. B., Brown, K. M., Misch, J., Miller, C. H., Klein, B. A., Taylor, M. A., Goodwin, M., Boyle, E. K., Hoppe, C. y Lazarus, M. D. (2019). Breaking with Tradition: A Scoping Meta-Analysis Analyzing the Effects of Student-Centered Learning and Computer-Aided Instruction on Student Performance in Anatomy. *American Association of Anatomists*, 12, 61-73. <https://doi.org/10.1002/ase.1789>
- Wineski, L. E. (2019). *Snell Anatomía clínica por regiones*. Barcelona, España. Wolters Kluwer.
- Wu, Y., Tan, L. W., Li, Y., Fang, B. J., Xie, B., Wu, T. N., Li, Q. Y., Qiu, M. G., Liu, G. J., Li, K., Xu, H. T., Luo, N. y Zhang, S. X. (2012). Creation of a female and male segmentation dataset based on Chinese Visible Human (CVH). *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 36(4), 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2012.01.003>
- Yamine, K. y Violato, C. (2014). A meta-analysis of the educational effectiveness of three-dimensional visualization technologies in teaching anatomy. *Anat Sci Educ*, 8, 525-538. <https://doi.org/10.1002/ase.1510>
- Yamine, K. y Violato, C. (2016). The effectiveness of physical models in teaching anatomy: a meta-analysis of comparative studies. *Adv in Health Sci Educ* 21, 883-895. <https://doi.org/10.1007/s10459-015-9644-7>
- Yi T, Pan I, Collins S, Chen F, Cueto R, Hsieh B, Hsieh C, Smith JL, Yang L, Liao WH, Merck LH, Bai H, Merck D. (2021). DICOM Image ANalysis and Archive (DIANA): an Open-Source System for Clinical AI Applications. *J Digit Imaging*. Dec;34(6):1405-1413. doi: 10.1007/s10278-021-00488-5. Epub 2021 Nov 2.
- Yuan, Y., Qi, L. y Luo, S. (2008). The reconstruction and application of virtual Chinese human female. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 92(3), 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2008.05.011>
- Zhang SX, Heng PA, Liu ZJ, Tan LW, Qiu MG, Li QY, Liao RX, Li K, Cui GY, Guo YL, Yang XP, Liu GJ, Shan JL, Liu JJ, Zhang WG, Chen XH, Chen JH, Wang J, Chen W, Lu M, You J, Pang XL, Xiao H, Xie YM. 2003. Creation of the Chinese Visible Human data set. *Anat Rec*, 275B: 190-195.
- Zhang SX, Heng PA, Liu ZJ. (2006). Chinese Visible Human Project. *Clinical Anatomy*, 19: 204-215.
- Zilverschoon, M., Kotte, E. M. G., Van Esch, B., Ten Cate, O., Custers, E. J. y Bleys, R. L. A. W. (2018). Comparing the critical features of e-applications for three-dimensional anatomy education. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 222, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2018.11.001>

## Anexos

---



**36 Congreso Nacional de la Sociedad Española de Radiología  
Médica (SERAM). 25-28 Mayo, 2022. Málaga**

Desarrollo de un software de visión 3D de estructuras del aparato respiratorio, embebidas en secciones de Resonancia Magnética

*Manuela Martín Izquierdo, Andrés Framiñán de Miguel, Juan Carlos Paniagua Escudero, Juan A. Juanes Méndez*



# Desarrollo de un software de visión 3D de estructuras del aparato respiratorio, embebidas en secciones de Resonancia Magnética

*Manuela Martín Izquierdo<sup>1</sup>; Andrés Framiñán de Miguel<sup>1</sup>;  
Juan Carlos Paniagua Escudero<sup>1</sup>; Juan A. Juanes Méndez<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Hospital Universitario de Salamanca.

<sup>2</sup>Universidad de Salamanca



## Equipo de trabajo

*Manuela Martín Izquierdo<sup>1</sup>; Andrés Framiñán de Miguel<sup>1</sup>;  
Juan Carlos Paniagua Escudero<sup>1</sup>; Juan A. Juanes Méndez<sup>2</sup>*



*Servicio de Radiodiagnóstico  
Hospital Universitario Salamanca*



*Dpto. Anatomía Humana.  
Universidad de Salamanca*



VisualMed System

*Grupo de Investigación Reconocido (GIR) sobre Sistemas de Visualización Médica Avanzada.  
VisualMed Systems*

*Universidad de Salamanca*



## Revisión del tema:

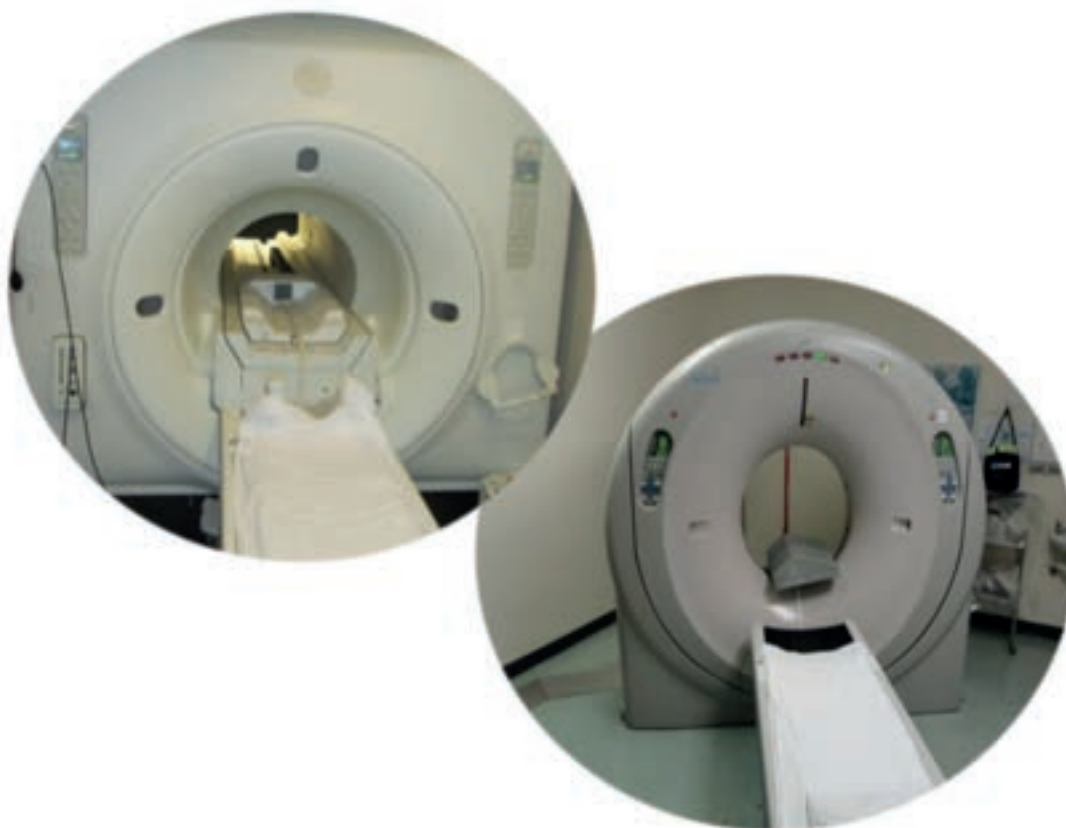
La visión tridimensional de la arquitectura del cuerpo humano, supone un gran avance tanto para la enseñanza-aprendizaje de la anatomía humana, como para el diagnóstico clínico.





## Revisión del tema:

El gran detalle anatómico alcanzado por las imágenes adquiridas por las diferentes técnicas radiológicas actuales como la **Tomografía Computarizada Multidetector** y la **Resonancia Magnética**, están ampliado sus horizontes de las ciencias médicas, en general; y de la anatomía humana, en particular.





# Objetivo:

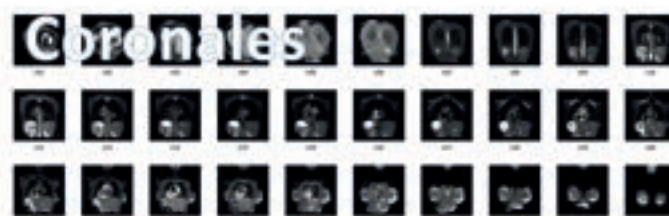
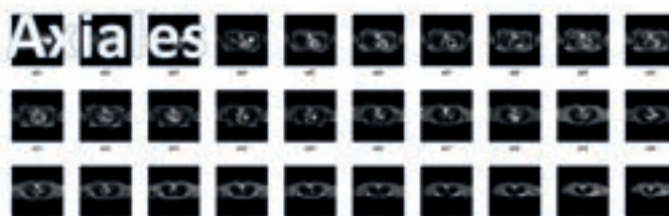
Desarrollar un entorno informático que permite visualizar e interactuar, con las principales estructuras anatómicas del aparato respiratorio, reconstruidas en 3D a partir de secciones seriadas de Resonancia Magnética.





## Metodología:

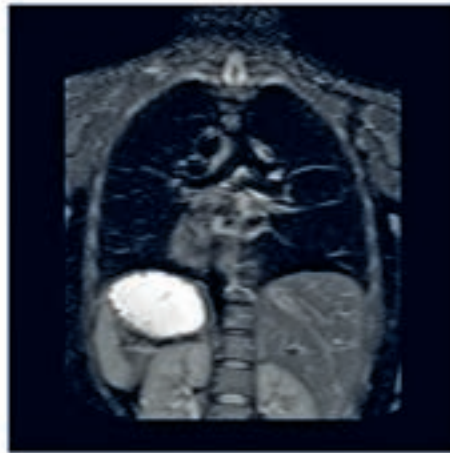
Se obtuvieron imágenes de alta resolución potenciadas en diferentes secuencias, en los tres planos ortogonales (axial, coronal y sagital) de la región torácica de un varón de 45 años de edad, empleando un equipo de Resonancia Magnética de 1.5 Teslas.





## Metodología:

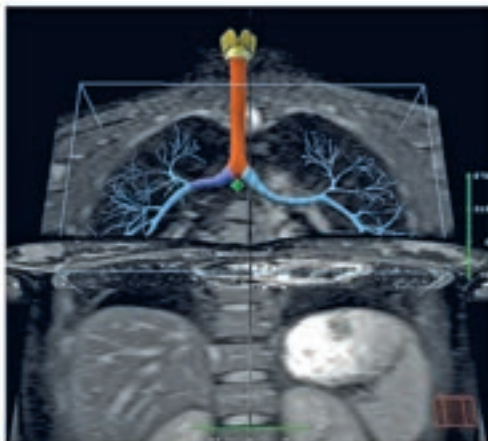
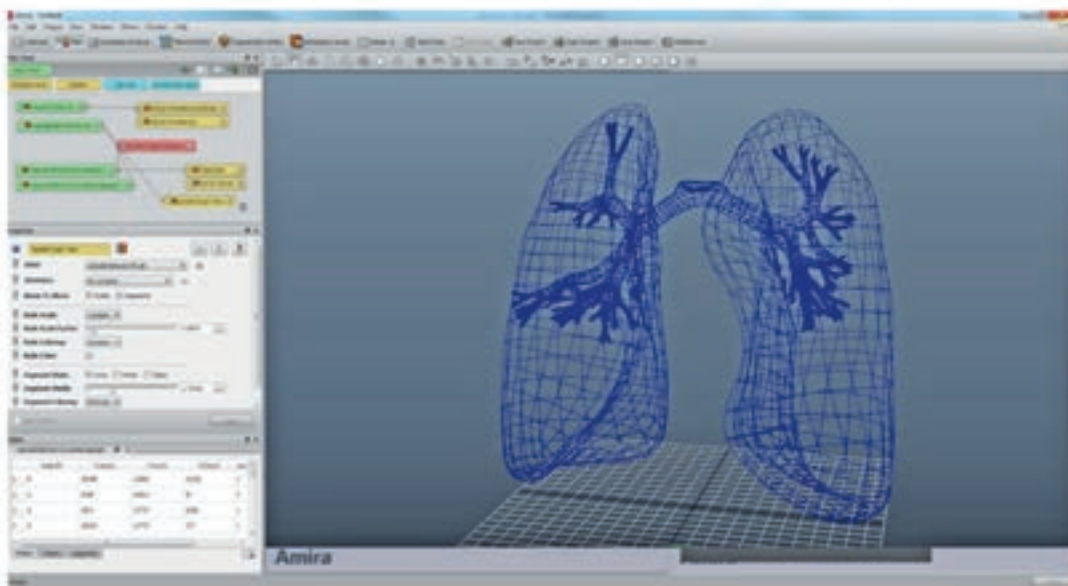
A partir de los ficheros DICOM se procedió a la segmentación y delimitación de las regiones de interés (ROIs).





# Metodología:

Generación de un modelo de malla triangular



## Amira 6.3

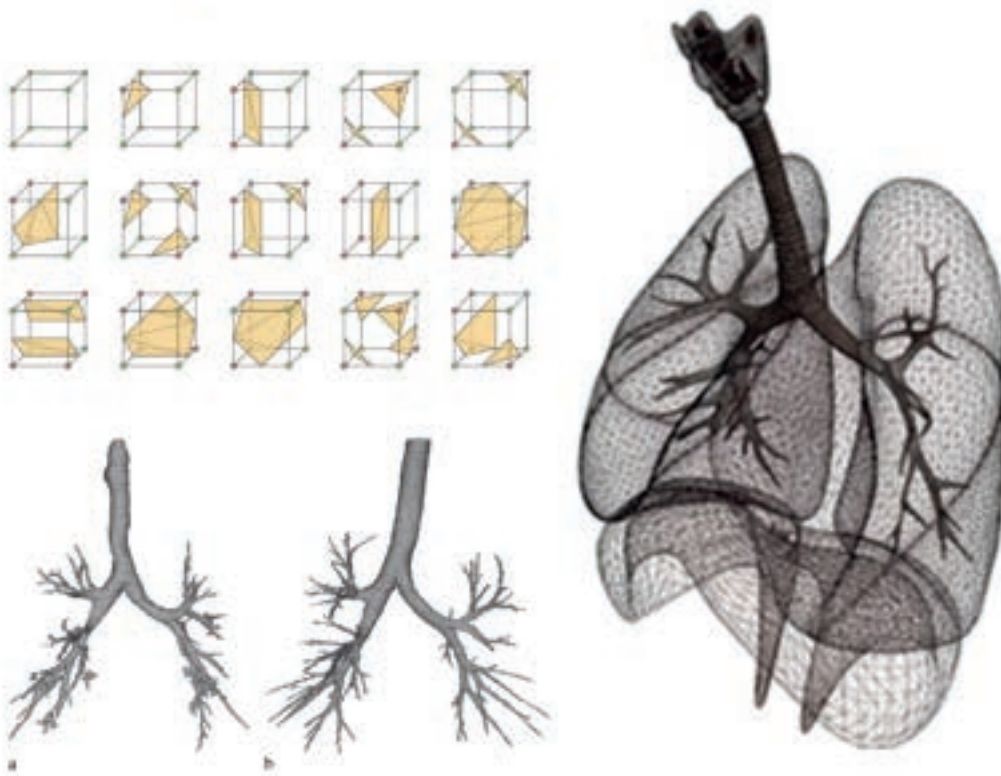
3D Visualization & Analysis  
Software For Life Sciences

Software para la visualización,  
el procesamiento y el análisis  
de datos 3D y 4D



## Metodología:

A partir de cada una de las regiones de interés resultantes se obtuvo un modelo de superficie compuesto por una malla mediante el procedimiento de marching cubes.

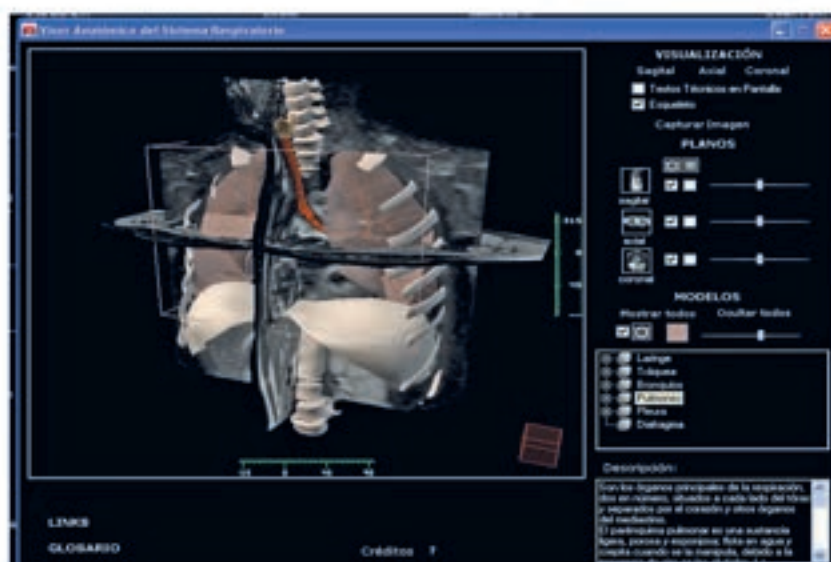


A los modelos se aplicaron algoritmos de decimación para simplificarlos y suavizarlos.



## Metodología:

Las imágenes seccionales y todos los modelos 3D de superficie obtenidos en la fase anterior, fueron visualizados en un visor específicamente desarrollado para esta aplicación informática, programado en **Visual C++** que incluye controles para la renderización de imágenes y modelos de malla poligonal.

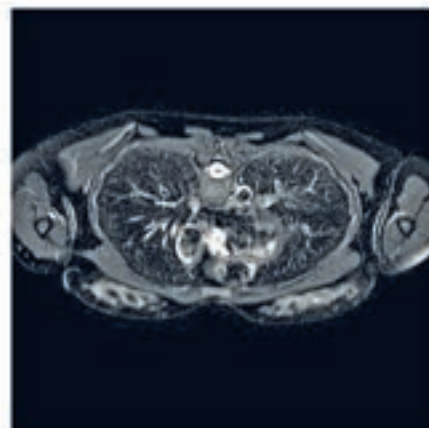
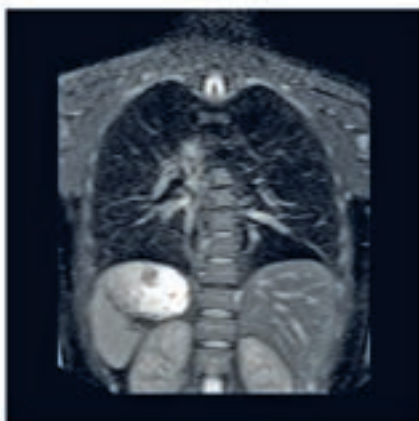
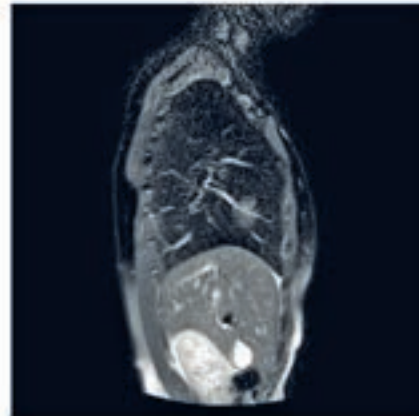


Visor anatómico-radiológico



## Resultados:

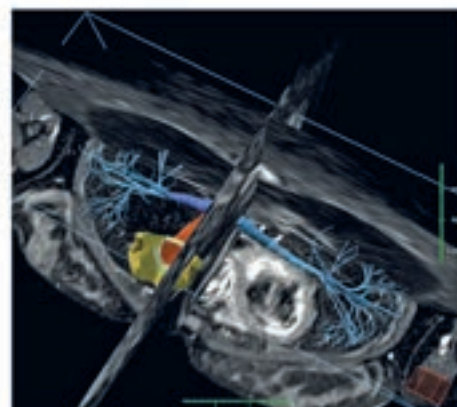
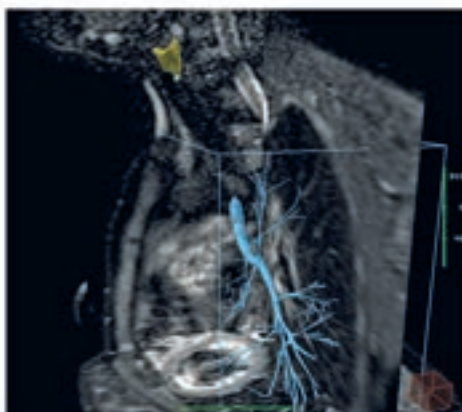
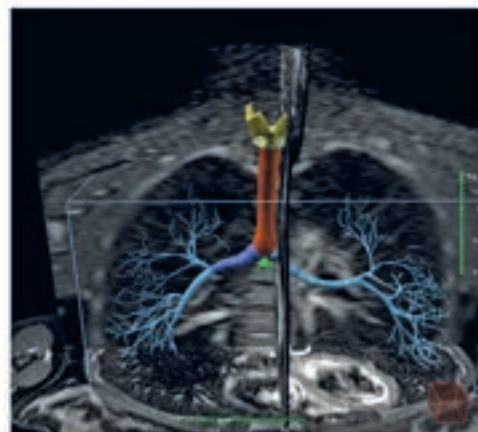
La técnica de Resonancia Magnética de la cavidad torácica permitió el estudio morfológico de las estructuras del aparato respiratorio debido a la facilidad con que demuestra el contraste entre grasa, músculo, estructuras óseas y vísceras, permitiendo, así como una adecuada visualización de la integridad anatómica de la cavidad torácica.





## Resultados:

Las vías aéreas principales se representan como estructuras carentes de señal, por el aire que contienen, diferenciadas de los vasos por su localización anatómica. En los vasos, el flujo sanguíneo rápido proporciona una ausencia de señal dentro de las estructuras vasculares, siendo bien distinguibles de la hiperintensidad provenientes de la grasa que los rodea.





# Resultados:

La **interfaz** generada para esta aplicación informática es intuitiva y de fácil manejo.



Visualización en los tres planos

Captura de imagen

Activación/desactivación y movimiento del plano de corte deseado

Mostrar u ocultar estructura anatómica en 3D

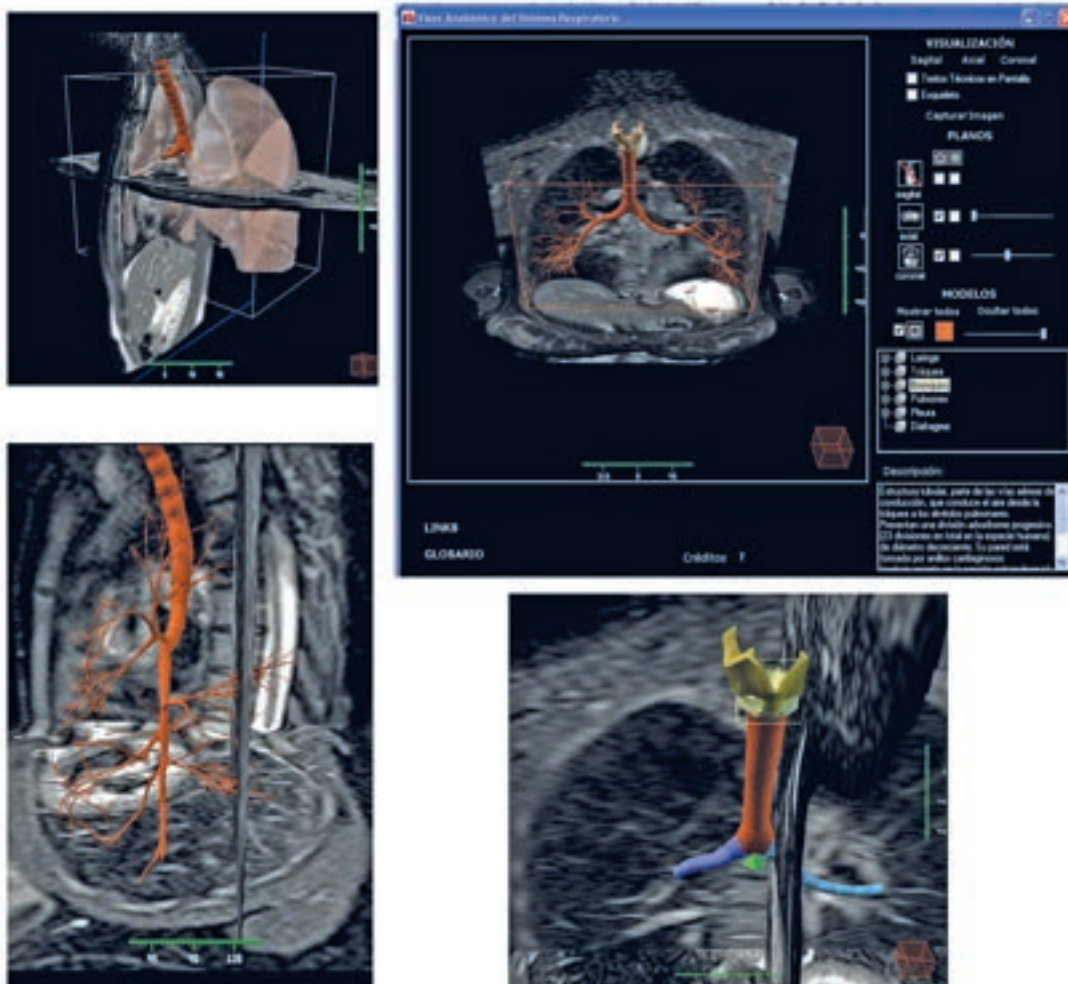
Breve descripción morfológica de la estructura anatómica seleccionada.

Muestra las diferentes opciones que posibilitan la interacción del usuario con el visor anatomo-radiológico.



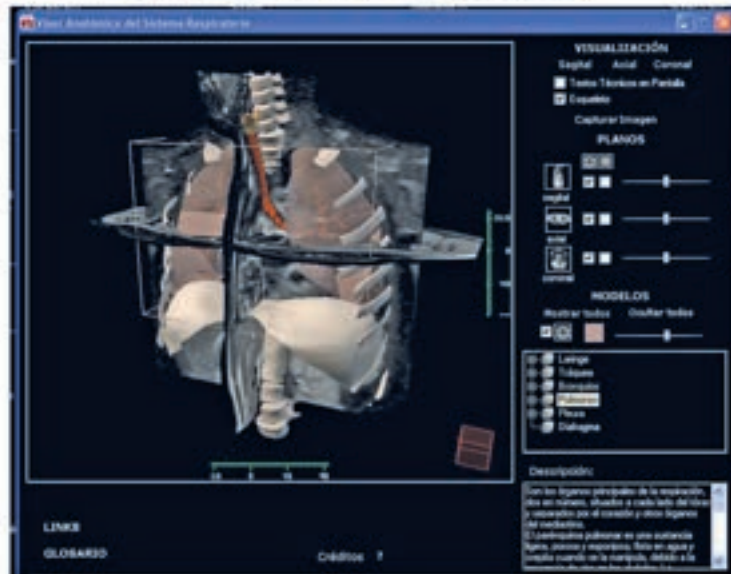
## Resultados:

Todas las interacciones con los elementos de la escena visual (rotaciones, traslaciones, zoom y selección) se realizan situando el cursor sobre el visor, usando el ratón del ordenador.





# Resultados:



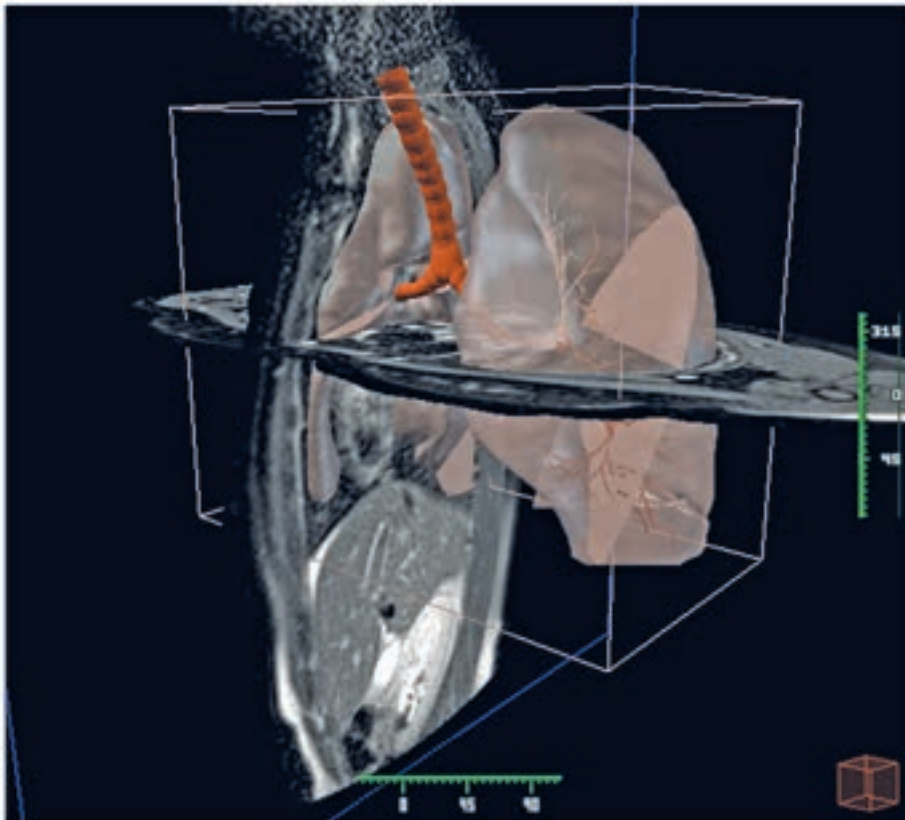
Visor anatómico-radiológico





## Conclusiones:

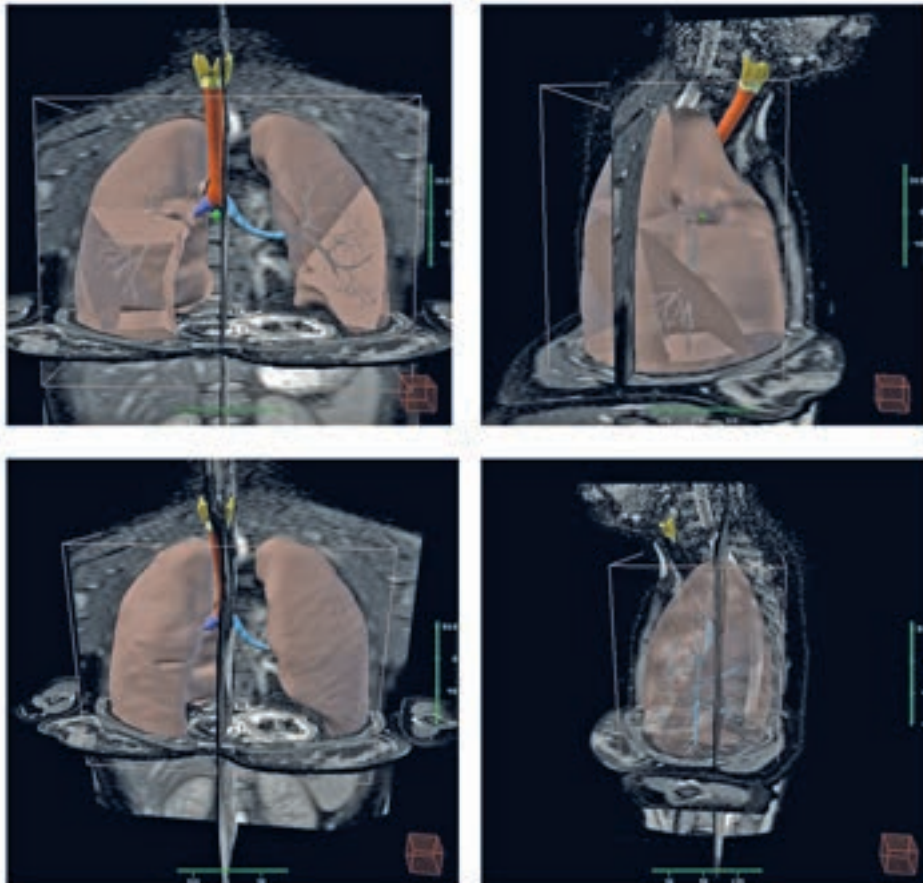
La utilización de recursos tecnológicos de representación tridimensional de las imágenes médicas mejora la percepción espacial y el entendimiento anatómico permitiendo elaborar material docente correlacionado con imágenes radiológicas como la resonancia magnética.





## Conclusiones:

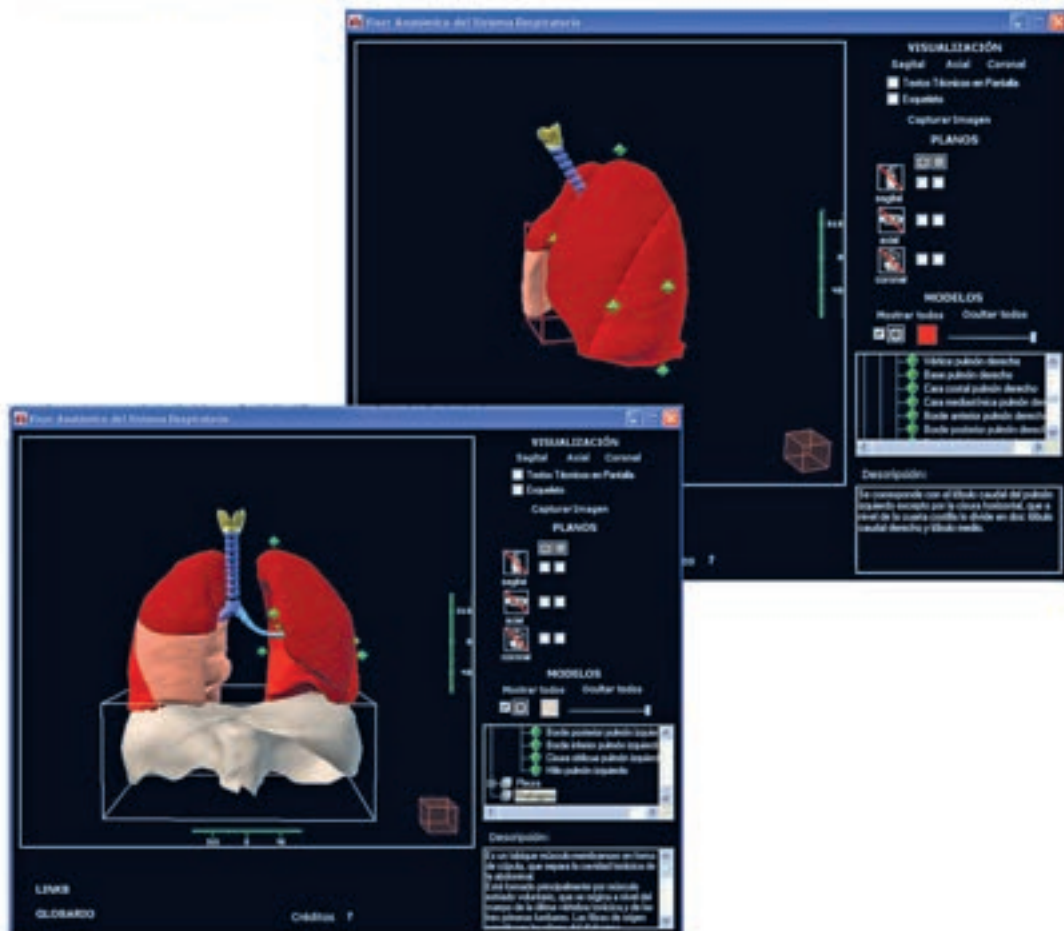
Nuestra aplicación informática constituye una verdadera herramienta docente, que facilita el aprendizaje de la anatomía radiológica del aparato respiratorio,, visualizando cada estructura en 3D en la posición espacial que desee el usuario, y con los cortes de RM que seleccione como referencia.





## Conclusiones:

Nuestro visor anatómico-radiológico, facilita el estudio, la comprensión y el aprendizaje de la anatomía del aparato respiratorio, con un diseño informático de fácil manejo, posibilitando así, de una manera atractiva, dinámica, visual y animada; la adquisición de los conocimientos necesarios de estas estructuras.





## Referencias:

- AbouHashem Y, Dayal M, Savanah S, Štrkalj G (2015) The application of 3D printing in anatomy education. *Med Educ Online* 20:29847
- Asensio Romero L, Asensio Gómez M, Prats-Galino A, Juanes Méndez JA (2018) 3D models of female pelvis structures reconstructed and represented in combination with anatomical and radiological sections. *J Med Syst* 42(3)
- Erolin C (2019) Interactive 3D digital models for anatomy and medical education. In: Rea P (eds) *Biomedical visualisation. Advances in experimental medicine and biology*, vol 1138. Springer, Cham
- Perandini S, Faccioli N, Zaccarella A, Re T, Mucelli RP (2010) The diagnostic contribution of CT volumetric rendering techniques in routine practice. *Indian J Radiol Imaging* 20(2):92–97. <https://doi.org/10.4103/0971-3026.63043>
- Tabernero Rico R; Juanes Méndez JA; Prats Galino A (2017). New Generation of Three-Dimensional Tools to Learn Anatomy. *J Med Syst.* 41:88



## Students' Assessment of the Use of 3D Vision Technology Resources for Independent Learning

Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2023 LNET, pp. 165-172, 2023.

[https://doi.org/10.1007/978-981-99-0942-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-99-0942-1_16)

*Manuela Martín Izquierdo*<sup>1,2(B)</sup>, *Marcelo F. Jiménez López*<sup>1,3</sup> and *Juan A. Juanes Méndez*<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Group VisualMed Systems, University of Salamanca, Salamanca, Spain  
mmimhp@gmail.com, {mfjl,jajm}@usal.es

<sup>2</sup> Radiodiagnosis Service, Salamanca University Hospital, Salamanca, Spain

<sup>3</sup> Thoracic Surgery Service, Salamanca University Hospital, Salamanca, Spain

<sup>4</sup> Department of Human Anatomy, Faculty of Medicine, University of Salamanca, Salamanca, Spain

**Abstract.** This work compiles the results of a survey on the opinion of Human Anatomy students on the use and management of interactive technological resources for the three-dimensional visualisation of body structures. The students tested an interactive 3D-vision computer application developed by the VisualMed Systems working group. Shortly after, they filled out a satisfaction survey to evaluate the degree of interest and capacity of autonomous learning given by these technological tools. The majority of students who used the 3D tool highlighted the high teaching value, as it is easy to use due to its intuitive interface. Moreover, it provides a high degree of satisfaction to the user in the teaching-learning process, given its 3D visual and dynamic nature. For all these reasons, the students considered the use of these resources to be very useful in their medical training, as opposed to the classic static anatomical atlases.

**Keywords:** Technology · 3D vision · autonomous learning · Human Anatomy.

### 1. Introduction

Human anatomy is the science that studies the structure of the organism. It is a fundamental discipline in health training, in all Health Science degrees, providing the necessary knowledge on the structure of the human body, useful for the exercise of health professions.

Over the years, the knowledge of human anatomy has considerably improved, thanks to numerous visual contributions to the study of the human body (i.e. dissection of cadavers, atlases, planimetric reconstructions or anatomical models,..). It was only in the 20th century that the modern period of the study of human anatomy began. The proliferation of diagnostic imaging techniques such as computed tomography and magnetic resonance imaging (MRI) made it possible to study the human body in the living individual in a more realistic way. Sectional anatomy has acquired great relevance in clinical practice today. The images provided by these technologies have provided substantial information on human body structures.

On the other hand, the irruption of technological innovations applied to medical training, together with the rapid development of information and communication technologies, has led to the appearance of new methodological teaching-learning resources [1-14].

The incorporation of technologies in the academic training of students encourages an active attitude in the student, making them the protagonist of their own learning. The possibility of constructing three-dimensional anatomical images from those obtained by radiological imaging techniques allows the user to interact with the body structures. Therefore, the students learn human anatomy in a more dynamic way, by directing their own training and setting their own pace of learning. These technological resources reinforce the visual memory, which in turn facilitates the understanding of teaching content, especially in disciplines such as human anatomy, where the image is fundamental to its study.

This study aimed to directly assess the students' opinion on using a 3D visualisation tool to study complex structures, such as those that make up the respiratory apparatus. This was correlated with magnetic resonance sections reconstructed from segmented anatomical structures of this thoracic body region.

## 2. Materials and Methods

For the 3D reconstructions of the anatomical structures under study, serial high-resolution MRI sections enhanced in different sequences, T1 and T2 in the three orthogonal planes (axial, coronal and sagittal), with a spacing of 0.5 mm, were used. A 1.5 T equipment was used to obtain the radiological images.

Segmentation and delineation of regions of interest consisted of subdividing each acquired anatomical image into homogeneous regions. A medical image interaction application toolkit was used and developed to assist in data manipulation, registration and segmentation. Segmentation was based on manual delineation using commercial digital medical imaging software in DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) format. A surface model composed of a mesh was obtained from each of the resulting regions of interest using the marching cubes procedure. Decimation algorithms were applied to the models to simplify and smooth them. Volume rendering consists of the visualisation of volumetric data from images corresponding to the different anatomical structures by applying colour and texture.

The software application was developed for Windows platforms and programmed in Visual C++, which, as an integrated development environment, allowed us to carry out object-oriented programming (OOP) under the programming languages C, C++ and C++

/CLI in conjunction with the Windows SDK (also called API, Application Programming Interface) development system.

The developed user interface is very intuitive and user-friendly (Fig. 1).

Satisfaction surveys were carried out with a group of medical students ( $n = 35$ ), to assess the usefulness for teaching this computer tool, considering a sufficiently representative number to obtain a sample to guide us on the students' satisfaction with the technological development presented. All the students had previous knowledge of the subject, and all of them had passed the human anatomy course on splacnology before carrying out the satisfaction survey.

The survey focused exclusively on the computer development itself, trying to assess the effectiveness and satisfaction of the users who used the teaching programme on the anatomy

of the respiratory apparatus, with three-dimensional views of these structures, embedded in radiological sections of magnetic resonance imaging.

The resulting data were processed with Microsoft Excel spreadsheet software, which allowed us to analyse and process all the survey data and present the different graphs.



Fig. 1. Display screen of the developed software. Its interface is intuitive and easy to use.

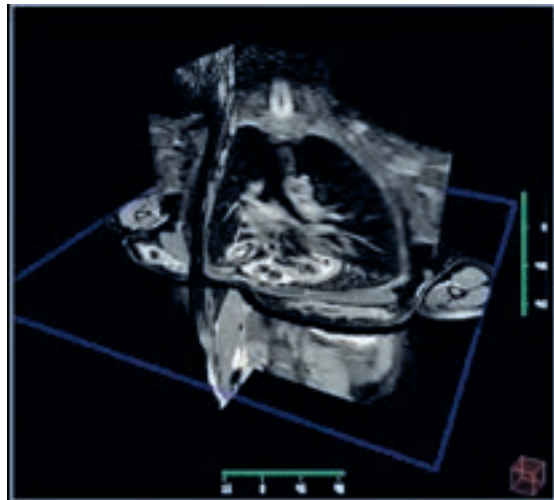
### 3. Results

The computer application developed presents a global vision of the anatomical structures of the respiratory system through sectional magnetic resonance images, in the three planes of space. (Fig. 2 and 3). It allows visualizing the three-dimensional anatomical structures embedded in the magnetic resonance sections as shown in Fig. 3.

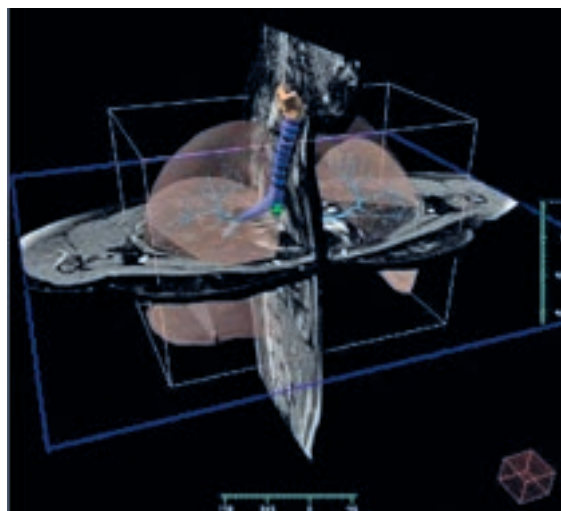
After the satisfaction survey prepared by the students, concerning the validity of this computer development for teaching anatomy, the obtained results showed very positive data regarding the didactic value of this technological tool for active and dynamic learning.

Aspects such as the developed software itself, its easy and simple installation (Fig. 4), and without its interactivity being interrupted by the program (Fig. 5) were positively highlighted.

Our computer application allows navigation through the different program options in an intuitive way (Fig. 6). The 3D visualization of the anatomical structures of the respiratory system, embedded in the MRI sections, facilitates the understanding and study of the morphology of these structures (Fig. 7).



**Fig. 2.** Simultaneous visualisation of three MRI sections: coronal, axial and sagittal.



**Fig. 3.** Three-dimensional visualisation of the trachea, main and segmental bronchi, embedded in MRI sections.

The brief explanatory comments of the anatomical structures that are included in our technological development are well-valued (Fig. 8), and the user interface is intuitive and easy to use, a response given by almost 100% of the users who handled it (Fig. 9).

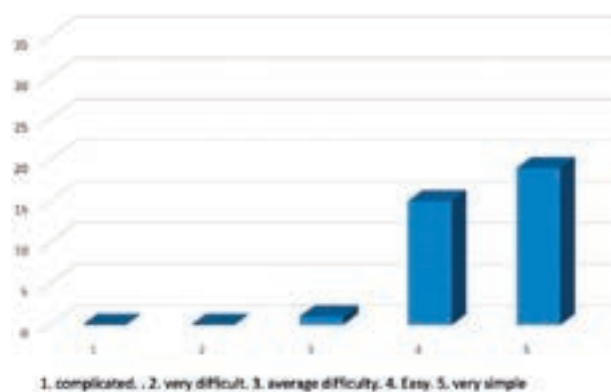


Fig. 4. Very positive assessment of the software, highlighting its ease of installation.

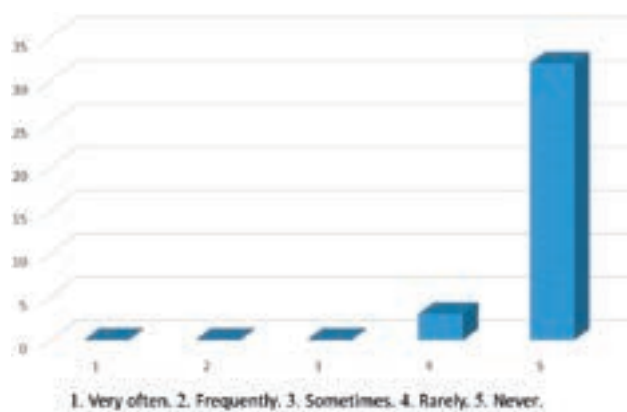


Fig. 5. Most users report that the software application does not crash.

After the questions asked to the students, it can be deduced that this technological development, from the teaching point of view, is highly valued as a complementary didactic resource for the study of radiological anatomy, surpassing many static anatomoradiological atlases, compared to the dynamic and interactivity that our computer application presents. The visual presentation of the contents is very attractive, being therefore highly valued by the students.

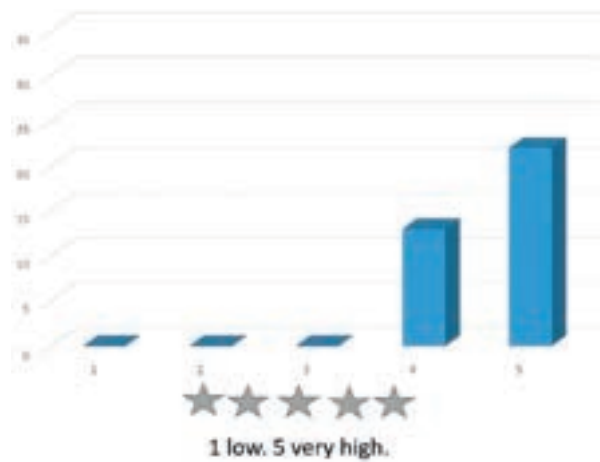
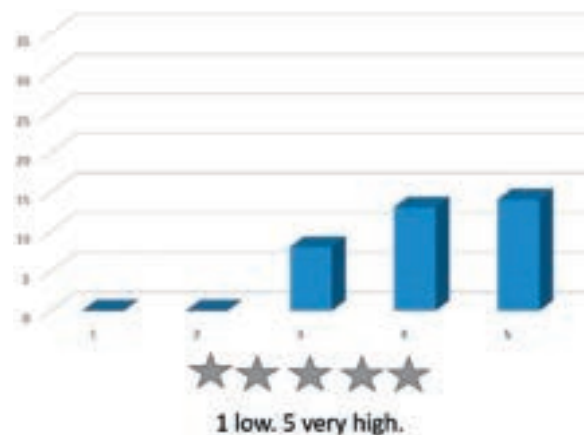


Fig. 6. A very high percentage indicates that navigation through the programme is very intuitive

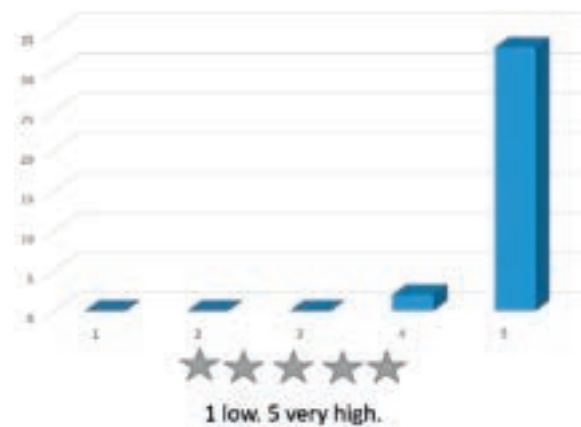


Fig. 7. Most users indicate that the three-dimensional view of anatomical structures facilitates understanding and study

In this way, after the obtained data, we can highlight that using 3D visualization technological environments for training in the field of human anatomy, such as the one we have developed, constitutes a good teaching-learning method. The representation and three-dimensional vision of the organs and anatomical structures, allow to visualize them from different angles. These teaching resources are attractive to students, which provides further motivation for student learning.



**Fig. 8.** Brief comments describing anatomical structures, as an explanatory supplement, are highly appreciated.



**Fig. 9.** The programme interface is very intuitive and user-friendly, responses were given by almost 100% of users.

#### 4. Conclusions

The students who handled our computer tool considered it to be a very innovative computer design, which facilitates the study, understanding and learning of anatomical structures.

Its attractive, dynamic, visual and animated presentation facilitates the acquisition of the necessary and fundamental morphological knowledge of the respiratory system. The tool developed by our working group is fully controlled by the user (student). It is the user who decides how to visualise the images and in the chosen spatial position desired. Therefore, we consider our computer application to be a real teaching tool in which there is an interaction between the computer and the user, thus avoiding, as far as possible, that the latter becomes a mere spectator. The introduction of these didactic technological tools in teaching considerably enriches the teaching-learning process. Learning by interacting with information motivates and provides students with an active attitude for autonomous and meaningful learning.

## 5. References

1. Darras, K.E., y cols.: Is there a superior simulator for human anatomy education? how virtual dissection can overcome the anatomic and pedagogic limitations of cadaveric dissection. *Med. Teach.* **40**(7), 752-753 (2018). <https://doi.org/10.1080/0142159X.2018.1451629>
2. Fang, B., y cols.: Creation of a virtual anatomy system based on Chinese visible human data sets. *Surg. Radiol. Anat.* **39**(4), 441-449 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00276-016-1741-7>
3. Govsa, F., Yagdi, T., Ozer, M.A., Eraslan, C., Alagoz, A.K.: Building 3D anatomical model of coiling of the internal carotid artery derived from CT angiographic data. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* **274**(2), 1097-1102 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4355-0>
4. Moore, C.W., Wilson, T.D., Rice, C.L.: Digital preservation of anatomical variation: 3D-modeling of embalmed and plastinated cadaveric specimens using uCT and MRI. *Ann. Anatomy- Anatomischer Anzeiger* **209**, 69-75 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.09.010>
5. Smit, N., y cols.: PelVis: atlas-based surgical planning for oncological pelvic surgery *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* **23** (1), 741-750 (2017). <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2598826>
6. Balaya, V., y cols.: Modelisation anatomique 3D du pelvis feminin par dissection anatomique assistee par ordinateur: applications et perspectives. *J. Gynecol. Obstet. Biol. Reprod.* **45**(5), 467-477 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2016.01.006>
7. Gonzalo Domínguez, M., Hernández, C., Ruisoto, P., Juanes, J.A., Prats, A., Hernández, T.: Morphological and volumetric assessment of cerebral ventricular system with 3D slicer software. *J. Med. Syst.* **40**(6), 1-8 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0510-9>
8. Drapkin, Z.A., Lindgren, K.A., Lopez, M.J., Stabio, M.E.: Development and assessment of a new 3D neuroanatomy teaching tool for MRI training. *Anat. Sci. Educ.* **8**(6), 502-509 (2015). <https://doi.org/10.1002/ase.1509>
9. Mavar-Haramija, M., Prats-Galino, A., Méndez, J.A.J., Puigdelívoll-Sánchez, A., de Notaris, M.: Interactive 3D-PDF Presentations for the simulation and quantification of extended endoscopic endonasal surgical approaches. *J. Med. Syst.* **39**(10), 1-9 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10916-015-0282-7>
10. Juanes, J.A., Ruisoto, P., Cabrero, F.J., Prats-Galino, A.: An update on health information technology. *J. Inf. Technol. Res.* **7**(2), 63-74 (2014). <https://doi.org/10.4018/jitr.2014040106>
11. De Notaris, M., y cols.: Anatomic skull base education using advanced neuroimaging techniques. *World Neurosurg.* **79**, S16.e9-13 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2012.02.027>
12. Nowinski, W.L., y cols.: Three-dimensional interactive and stereotactic atlas of head muscles and glands correlated with cranial nerves and surface and sectional neuroanatomy. *J. Neurosci. Methods* **215**(1), 12-18 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.02.005>
13. Sora, M.C., Jilavu, R., Matusz, P.: Computer aided three-dimensional reconstruction and modeling of the pelvis, by using plastinated cross sections, as a powerful tool for morphological investigations. *Surg. Radiol. Anat.* **34**(8), 731-736 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00276-011-0862-2>
14. Larson, K.A., Yousuf, A., Lewicky-Gaup, C., Fenner, D.E., DeLancey, J.O.: Perineal body anatomy in living women: 3-dimensional analysis using thinslice magnetic resonance imaging. *Am. J. Obstet. Gynecol.* **203**, 494.e15-494.e21 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2010.06.008>

## Impact of robot-assisted surgery and 3D vision systems with virtual reality on medical training

*Manuela Martín Izquierdo<sup>1,2</sup>; Marcelo F. Jiménez López<sup>1,3,5</sup> and Juan A. Juanes Méndez<sup>1,4,5</sup>*

<sup>1</sup> Group VisualMed Systems. University of Salamanca. Spain

<sup>2</sup> Radiodiagnosis Service. Salamanca University Hospital. Spain

<sup>3</sup> Thoracic Surgery Service. Salamanca University Hospital

<sup>4</sup> Department of Human Anatomy. Faculty of Medicine. University of Salamanca

<sup>5</sup> Education Sciences University Institute. University of Salamanca

**Abstract.** Robot-assisted surgery has changed the way in which surgery is practiced, as well as the way in which it is taught and learnt. These robotic devices designed for surgical interventions have been used to teach surgical approaches and practice with three-dimensional virtual anatomic models instead of patients. Medical training has also been transformed over the last years, with significant changes due to the use of different tools and technological devices that are increasingly similar to reality and allow students to acquire skills and competences through a 3D visualization of anatomical structures. In spite of the advantages of robot-assisted surgery, it requires a learning process, just as any other innovative procedure, since there are several limitations that need to be considered, such as ergonomic obstacles, the difficulty to visualize some anatomical structures and the lack of control of certain movements in the operating console. This study will present the possibilities for morphological visualization of these robotic systems, as well as the advantages of these surgical procedures in the results on the patient and in the visualization of anatomical structures. The study will analyze a surgical approach of the lung as an example of the possibilities of these devices. The Da Vinci robot will be used, and the anatomical structures of the area will be observed through a 3D reconstruction system based on computerized tomography sections that creates images with virtual reality techniques.

**Keywords:** robot-assisted surgical approach, anatomy of the lung, 3D view.

### 1. Introduction

A comprehensive anatomical knowledge of the structures in the respiratory system is essential to analyze accurately the patterns of pulmonary disorders and their distribution. These morphological elements can better guide practitioners towards the analysis of techniques such as bronchoscopy, radiotherapy, and surgical approaches [1]. Robot-assisted surgery is currently a safe and effective method for the treatment of pulmonary disorders [2]. In this type of surgery, the surgeon controls all the movements remotely from a console [3]. In addition, they use infrared technology and thin arms that facilitate the surgical approach. Robot-assisted surgery has not only changed the way in which surgical interventions are conducted, but also the learning and teaching systems related to surgery as a whole [4] [5] [6]. In addition, it has been used to teach surgery and to practice with three-dimensional virtual models instead of patients. This study will show the anatomy of pulmonary structures with new visualization environments with robot-assisted techniques. These surgical images correlate with computerized tomography images with automatized three-dimensional

reconstruction. The Da Vinci robot, which was used in the study, was introduced in 1998-1999, and there have been multiple improvements and versions since then. Some of these improvements include changes in the ergonomics of the system and the reproduction of the hand movements. In addition, it has included infrared technology and thinner arms that make the procedures easier in multiple different approaches.

This study will also assess the benefits and risks of robot-assisted surgery with the Da Vinci surgical system compared with nonrobot-assisted surgery (laparotomy or laparoscopy), and more specifically of robot-assisted surgery of the lung. On the other hand, our virtual reality system gives the opportunity to interact with the anatomical structures while immersed in a virtual reality work environment.

## 2. Material and Methods

Our study used the Da Vinci Xi robot with a sterile cover (Fig. 1), which includes a vision cart with a dual-lighting system and double cameras which consist of three chips each; the surgeon console (Fig. 2); and the patient cart, which holds the arms for instruments and for the camera. The console includes two controllers for the robotic arms with seven ranges of motion, a computer and a 3D viewing system. An infrared sensor detects the moment in which the surgeon's head enters the console, which immediately activates the controllers and the robotic arms.

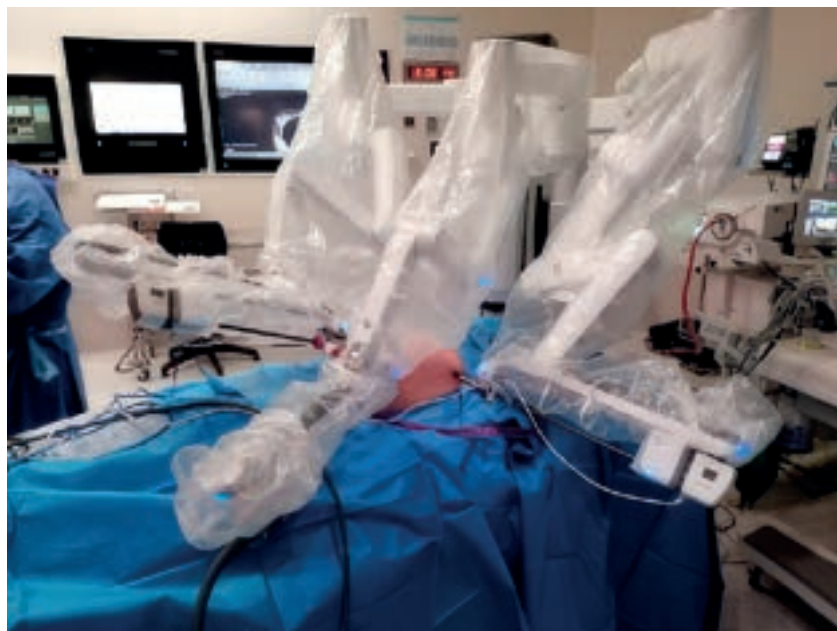


Fig. 1. Robotic system in Da Vinci Xi. The arms have a sterile cover to be used on the patient.



Fig. 2. Surgeon console to view the surgical field and manage the robotic arms.

For the computerized tomography studies, a dual energy device from General Electrics was used (Fig. 3), which uses two different energy levels generated by the X-ray tube or by the combined use of two tubes. This makes it possible to analyze tissue or materials with different densities in the body.



Fig. 3. Dual energy tomograph from General Electrics that was used in our study.

After taking the DICOM serial sections with computerized tomography, the anatomical structures of the respiratory system were automatically segmented in order to generate 3D mesh models that can be viewed with virtual reality techniques (Fig. 4).



Fig. 4. Stereoscopic view with virtual reality glasses of the images generated from the computerized tomography sections.

### 3. Results

Since robotic surgery has become an effective approach for the treatment of pulmonary surgical disorders, it is necessary for new generations of practitioners to acquire a good learning curve in robotic anatomical lung resections. With regard to the surgical anatomy of these systems, it is important to highlight some relevant morphological details when performing surgery in this area. After entering the pulmonary area, it is necessary to identify the different lobes and fissures in each of the lungs (Fig. 5).

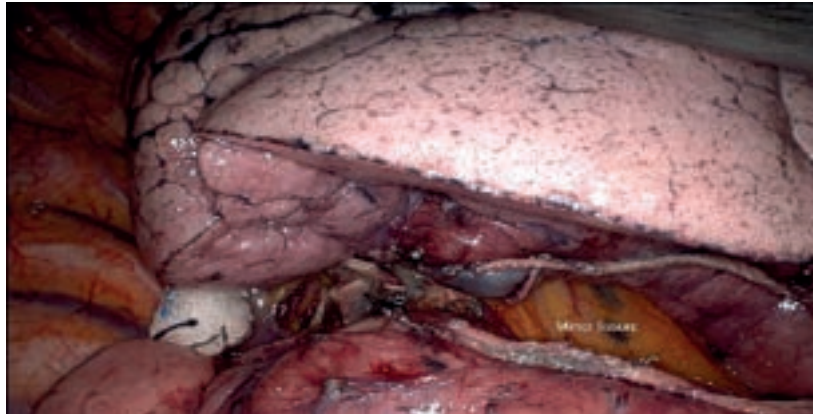


Fig. 5. Panoramic view of the lung showing some of the fissures.

The view provided by the robotic system has great quality and does not include any obstacles to identify the structures (Fig. 6).

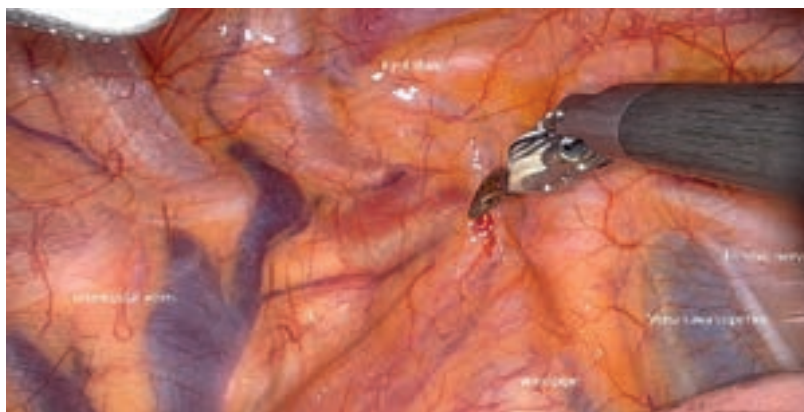


Fig. 6. View of different anatomical elements from the console of the Da Vinci robot.

It is also advisable to observe the different portions of the lungs (costal, diaphragmatic, and mediastinal). The internal or mediastinal side of the lung is the area which shows more anatomical details because the hilum is located here. From an anatomical perspective, the hilum of the lung has a tennis racket form and projects to the thoracic wall on a horizontal plane, along the upper edge of the fourth rib. This area contains blood and lymph vessels, nerves, and bronchi that enter and exit the lung. The typologies of the right lung and the left lung are different. This area also makes it possible to identify the pulmonary ligament (Fig. 7), which extends downward towards the base of the lung and anchors in the lower lobe of the lung to the mediastinum.



Fig. 6. View of some anatomical structures through the robotic camera.

Robot-assisted surgery has become a new way to acquire the necessary skills and competences to operate, thanks to the simulation of all the interventions that can be performed with the robot.

On the other hand, the combination of surgical robots to operate with the use of three-dimensional image simulators with virtual reality provides a significant methodological tool to teach surgery to interns and students, who can improve their learning process. This also allows them to acquire surgical skills in a short period of time, and it improves the safety of the patients by preventing errors during the operations.

In addition, complementary virtual reality techniques make it possible to plan and simulate surgical procedures, which shows the surgeon interactive and three-dimensional views of the anatomical areas that are being treated. It may be said that virtual reality techniques are an important source in medical training systems because they give the users an anatomical view of the body structures that is dynamic, three-dimensional, and interactive. Using the serial sections of computerized tomography in DICOM format (Digital Imaging and Communication in Medicine), we developed 3D models of the anatomical structures that could be viewed with virtual reality techniques (Fig. 7, Fig. 8, and Fig. 9).

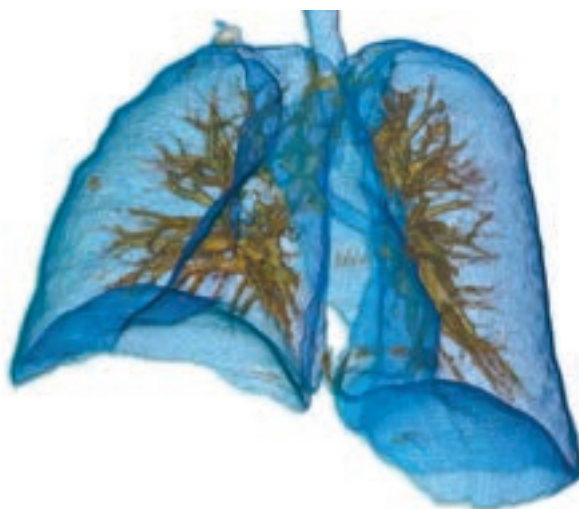


Fig. 7. Automatic 3D reconstruction of respiratory structures based on DICOM images from computerized tomography.

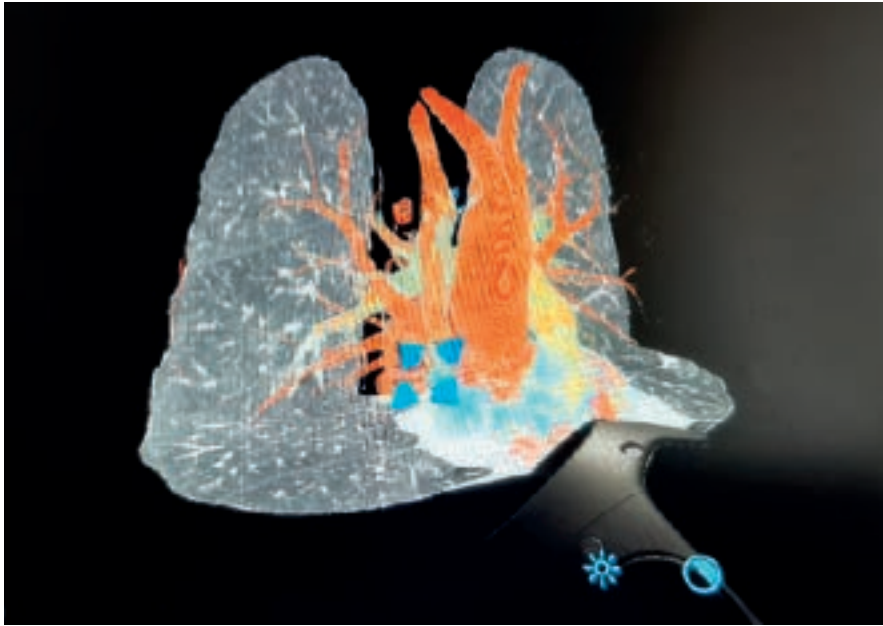


Fig. 8. 3D reconstruction from serial computerized tomography images designed to be viewed with virtual reality glasses.

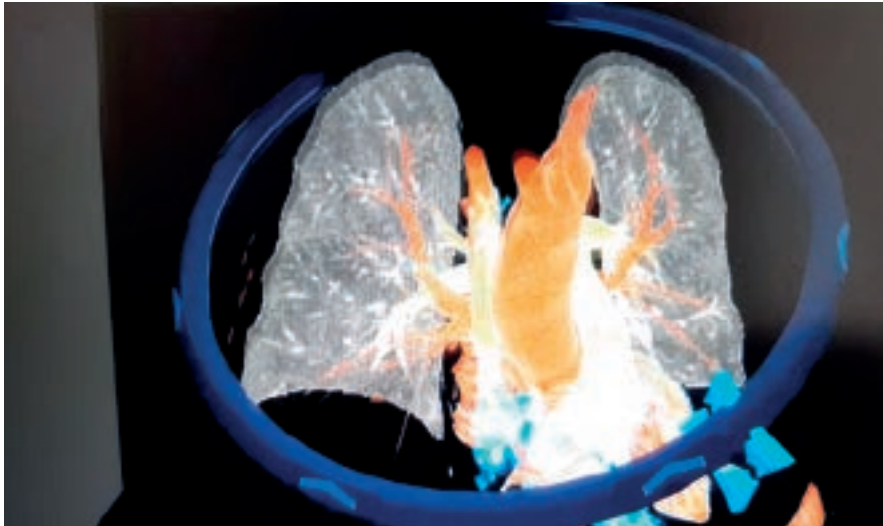


Fig. 9. 3D reconstruction from a computerized tomography image that allows the user to interact with the visible anatomic elements.

## 4. Conclusions

The anatomical visualization of robot-assisted surgical approaches represents a significant learning method for surgeons in training. It can easily help them recognize the different anatomical structures in the area and acquire the necessary skills and competences to control the morphological structures of the respiratory system, such as the pulmonary hilum, which is a very relevant anatomical element that needs to be considered in all surgical approaches in this area. Although there is still much to be researched and developed in the field of robotic surgery, the results are positive, and it seems that it is only a matter of time until it becomes the standard procedure in a significant number of surgical interventions. On the other hand, stereoscopic vision systems with virtual reality glasses have recently experienced significant improvements in the closer observation of anatomical structures. In addition, these systems are a good alternative for the morphological assessment of anatomical elements, because they can be analyzed in three dimensions and from any spatial position that the user may require.

### Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

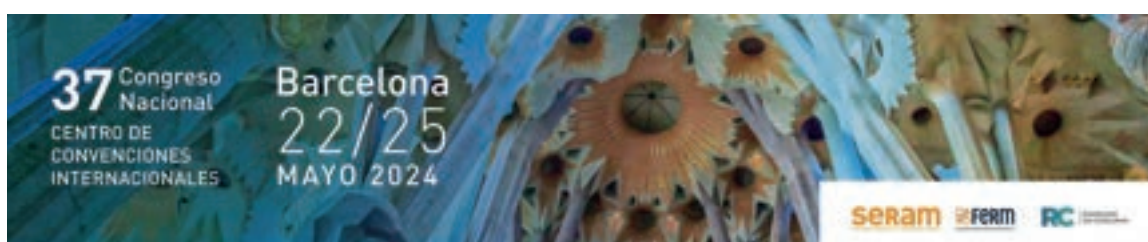
## 5. References

1. Emmert A, Straube C, Buentzel J, Roever C. Robotic versus thoracoscopic lung resection: A systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2017; 96 (95): e7633.
2. Park BJ, Melfi F, Mussi A, Maisonneuve P, Spaggiari L, Da Silva RKC, y cols.. Robotic lobectomy for non-small cell lung cancer (NSCLC): long-term oncologic results. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2012;143:383-9
3. Gharagozloo F, Margolis M, Tempesta B, Strother E, Najam F. Robot-assisted lobectomy for early-stage lung cancer: report of 100 consecutive cases. *Ann Thorac Surg*. 2009;88:380-4.
4. Siu J, Hill AG, MacCormick AD. Estimation of the acquisition and operating cost for robotic surgery. *JAMA*. 2018;320(8):836-6
5. Schreuder HWR, Wolswijk R, Zweemer RP, Schijven MP, Verheijen RHM. Training and learning robotic surgery, time for a more structured approach: A systematic review. *BJOG An Int J Obstet Gynaecol*. 2012;119(2):137-49.
6. Feifer A, Al-Ammari A, Kovac E, Delisle J, Carrier S, Anidjar M. Randomized controlled trial of virtual reality and hybrid simulation for robotic surgical training. *J Urol*. 2010;183:423.

### 37 Congreso Nacional de la Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM). 22-25 Mayo, 2024. Barcelona

Segmentación automática de Tomografía Computarizada para su visualización con técnicas de Realidad Virtual con fines docentes

*Manuela Martín Izquierdo, Andrés Framiñán de Miguel, Juan Carlos Paniagua Escudero, Santiago González Izard, Juan A. Juanes Méndez*



# Segmentación automática de imágenes de Tomografía Computarizada, para su visualización con técnicas de Realidad Virtual con fines docentes

Manuela Martín Izquierdo <sup>1</sup>, Andrés Framiñán De Miguel <sup>1</sup>, Juan Carlos Paniagua Escudero <sup>1</sup>, Santiago González Izard <sup>2</sup>, Juan A. Juanes Méndez <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hospital Universitario de Salamanca, <sup>2</sup>ARSoft.

<sup>3</sup>Universidad de Salamanca, Salamanca



Nuestro propósito es mejorar la comprensión de la anatomía que facilite a los estudiantes y residentes una visualización tridimensional detallada de la anatomía radiológica, utilizando para ello tecnologías de última generación como la realidad virtual bajo la visión con gafas estereoscópicas.





## Revisión del tema

- La visión tridimensional (3D) de estructuras anatomo-radiológicas desempeña un papel fundamental en el diagnóstico clínico, debido a su capacidad para proporcionar una comprensión más completa y profunda de la organización y relación de las estructuras en el cuerpo humano.



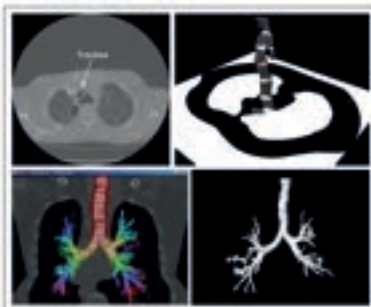
- Los avances en la tecnología, como la realidad virtual (RV), han llevado la visión 3D de anatomía humana a un nivel superior.



## Revisión del tema

- La utilización de RV y la visión 3D en la enseñanza de la radiología no solo mejora la comprensión de las estructuras, sino que también prepara a los profesionales para interpretar imágenes radiológicas con mejor precisión .

- Para llevar a cabo reconstrucciones en tres dimensiones de estructuras anatómicas, desde secciones seriadas de RM y TC, es preciso utilizar **técnicas de segmentación** de las estructuras morfológicas a reconstruir

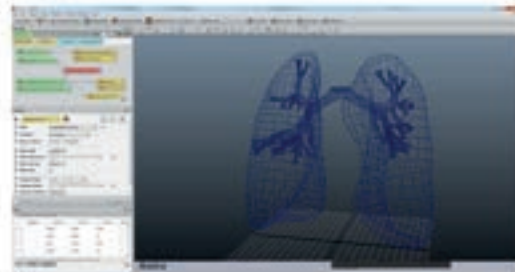


- La **segmentación** de estructuras anatómicas desde secciones seriadas de imágenes en formato DICOM puede realizarse de dos formas principales: manual y automática.



## Revisión del tema

- La segmentación **manual** implica que un profesional de la salud o un investigador identifica y delimita las estructuras de interés en cada corte de la imagen de manera individual



- La segmentación **automática** utiliza algoritmos computacionales avanzados para identificar y delimitar las estructuras de interés en las imágenes DICOM



- La segmentación manual es precisa, pero requiere tiempo y esfuerzo humano, mientras que la segmentación automática es más rápida pero puede requerir ajustes y validación manual.



## METODOLOGÍA

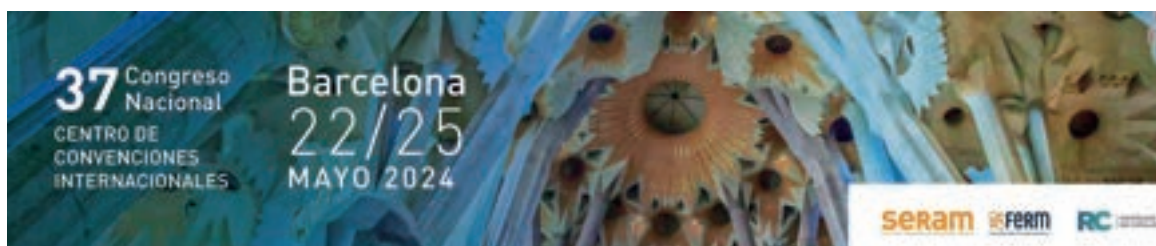
# Procedimientos elaborados



- Como base de nuestro desarrollo utilizamos el software **Unity 3D**, el cual presenta una serie de rutinas de programación que permiten el funcionamiento de un entorno interactivo.
- El lenguaje de programación utilizado con Unity fue **C++**, a través de la **API** (Application Programming Interface) de complementos de scripting (Unity Native Plugin) para mejorar el rendimiento



- Como **gafas** de RV utilizamos las **HT Vive** con una resolución de 2160x1200 (1080x1200 por ojo); con un campo de visión de 110 grados. Utilizan estaciones base (Lighthouse) para un seguimiento preciso del movimiento y controladores.



## Resultados

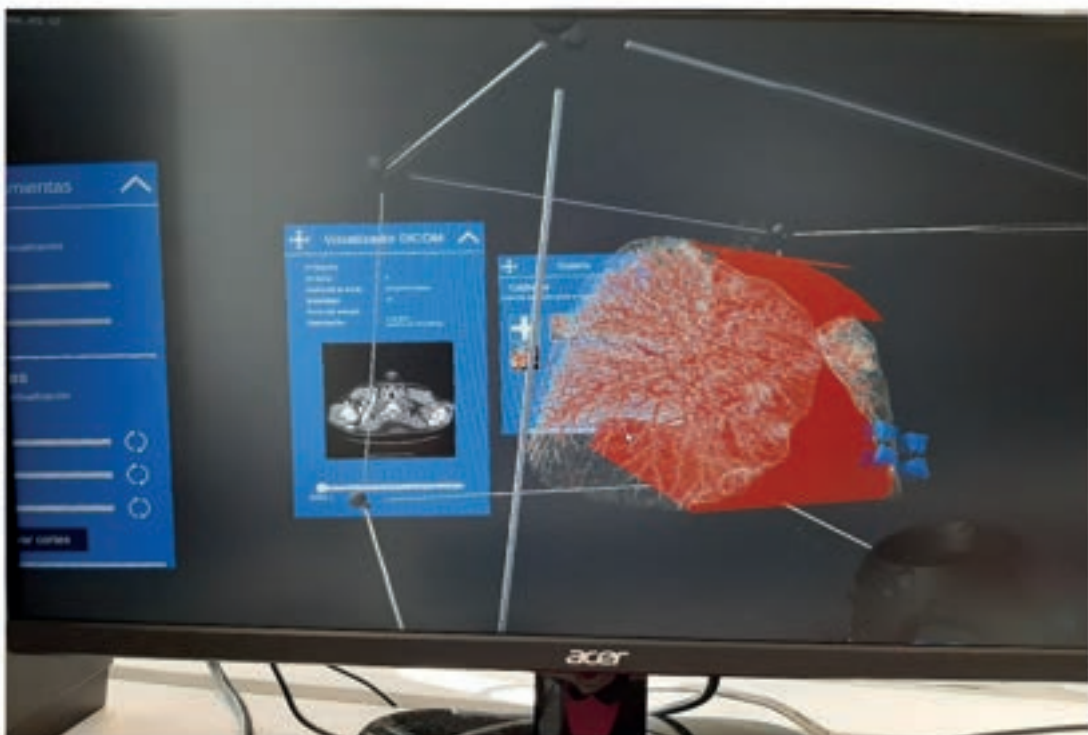
- Para la visualización y manipulación mediante realidad virtual de los modelos 3D producidos desde las secciones radiológicas se ha diseñado una aplicación multiplataforma.
- Construida sobre **Unity** y usando la tecnología **Vuforia** de realidad virtual nos proporciona un entorno fácilmente usable para el usuario en el que se podrá realizar, de forma sencilla, la visualización y el diagnóstico sobre el modelo 3D generado a partir de los resultados radiológicos





## Resultados

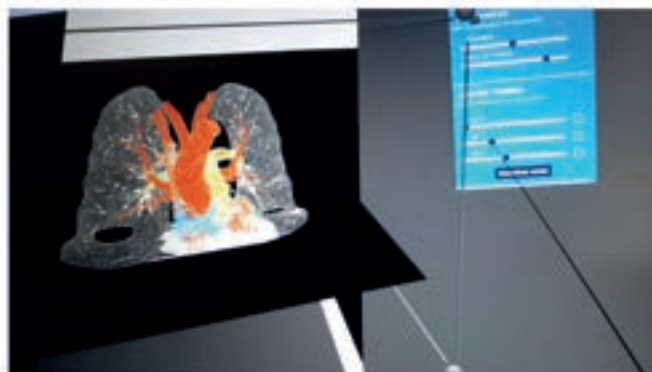
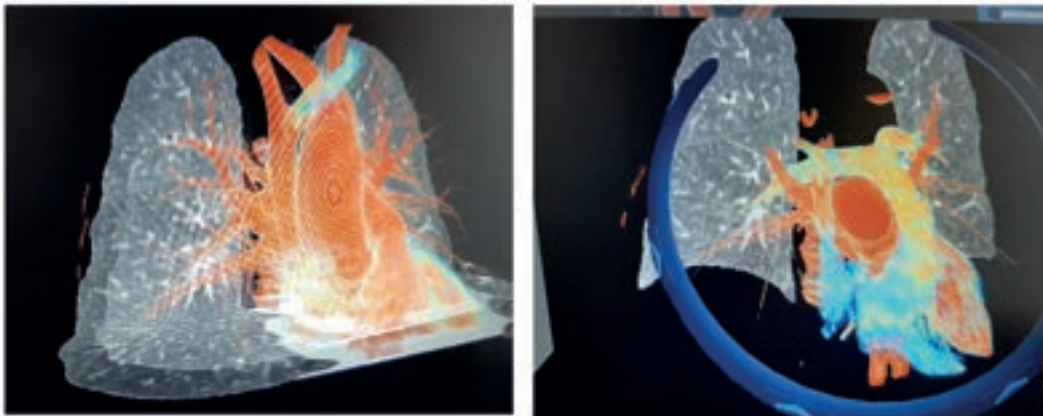
- Una interfaz sencilla dirige al usuario a la visualización con realidad virtual del modelo deseado.





## Resultados

- La visualización del modelo anatómico 3D, puede rotarse en cualquier posición espacial, y realizar un análisis minucioso de la estructura anatómica para llevar a cabo un diagnóstico.





## Resultados

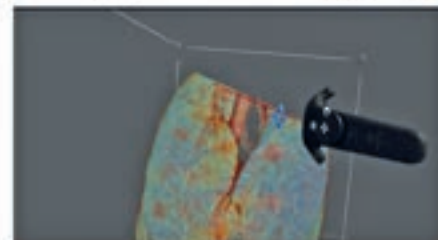
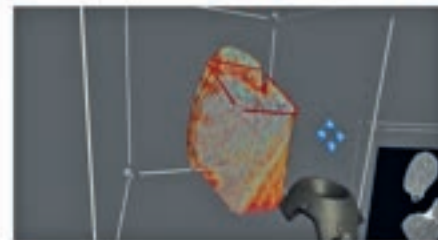
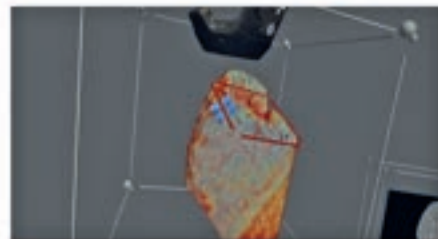
- El desarrollo tecnológico permite trabajar con transparencias lo que facilita visualizar el interior del parénquima de los órganos.





Con la herramienta de corte podremos estudiar su interior y aislar zonas de interés.

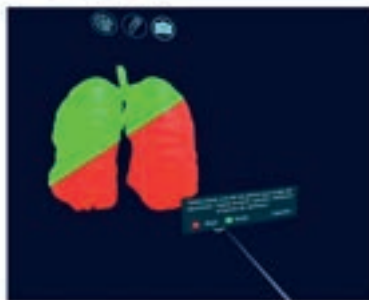
Este desarrollo tecnológico generado aprovecha la potencia de interacción de usuario e inmersión que proporciona la tecnología de la realidad virtual. De esta forma la manipulación del modelo se vuelve más fácil e intuitiva haciendo más cómodo el posible diagnóstico.





## Resultados

- El proceso de corte se basa en un sistema de corte versátil que permite la sección múltiple de modelos 3D mediante shaders. Con esto se consigue no modificar el modelo original y permitir deshacer los cambios de los cortes de forma eficiente





## Conclusión

La visualización interactiva y en 3D permite una comprensión más profunda y realista de las estructuras anatómicas del cuerpo humano, en comparación con representaciones en 2D de los clásicos atlas de Anatomía Humana.

- La interacción con modelos 3D permite aprender de manera más activa, explorando las estructuras anatómicas y mejorando de esta forma, la retención del conocimiento morfológico de estas estructuras.
- Las técnicas de realidad virtual proporcionan al usuario simulaciones muy realistas de la anatomía del paciente, visionando de forma inmersiva, todos los componentes anatómicos reconstruidos desde las imágenes DICOM de los pacientes.



## Referencias bibliográficas

Balaya, V., et al.: Modelisation anatomique 3D du pelvis feminin par dissection anatomique assistee par ordinateur: applications et perspectives. *J. Gynecol. Obstet. Biol. Reprod.* **45**(5), 467–477 (2016).  
<https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2016.01.006>

Gonzalo Domínguez, M., Hernández, C., Ruisoto, P., Juanes, J.A., Prats, A., Hernández, T.: Morphological and volumetric assessment of cerebral ventricular system with 3D slicer software. *J. Med. Syst.* **40**(6), 1–8 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0510-9>

Drapkin, Z.A., Lindgren, K.A., Lopez, M.J., Stabio, M.E.: Development and assessment of a new 3D neuroanatomy teaching tool for MRI training. *Anat. Sci. Educ.* **8**(6), 502–509 (2015). <https://doi.org/10.1002/ase.1509>

Tierny J (2015) Introduction to volume rendering [On line]. [https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny\\_intro\\_vol\\_rend09.pdf](https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny_intro_vol_rend09.pdf), Accessed 20 Aug 2018

Tierny J (2015) Introduction to volume rendering [On line]. [https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny\\_intro\\_vol\\_rend09.pdf](https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny_intro_vol_rend09.pdf), Accessed 20 Aug 2018



## Referencias bibliográficas

Balaya, V., et al.: Modelisation anatomique 3D du pelvis féminin par dissection anatomique assistée par ordinateur: applications et perspectives. *J. Gynecol. Obstet. Biol. Reprod.* **45**(5), 467–477 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2016.01.006>

Gonzalo Domínguez, M., Hernández, C., Ruisoto, P., Juanes, J.A., Prats, A., Hernández, T.: Morphological and volumetric assessment of cerebral ventricular system with 3D slicer software. *J. Med. Syst.* **40**(6), 1–8 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0510-9>

Drapkin, Z.A., Lindgren, K.A., Lopez, M.J., Stabio, M.E.: Development and assessment of a new 3D neuroanatomy teaching tool for MRI training. *Anat. Sci. Educ.* **8**(6), 502–509 (2015). <https://doi.org/10.1002/ase.1509>

Tiemy J (2015) Introduction to volume rendering [On line]. [https://www-apr.lip6.fr/~tiemy/stuff/teaching/tiemy\\_intro\\_vol\\_rend09.pdf](https://www-apr.lip6.fr/~tiemy/stuff/teaching/tiemy_intro_vol_rend09.pdf). Accessed 20 Aug 2018



# Referencias bibliográficas

Perandini S, Faccioli N, Zaccarella A, Re T, Mucelli RP (2010) The diagnostic contribution of CT volumetric rendering techniques in routine practice. *Indian J Radiol Imaging* 20(2):92–97.

Robison RA, Liu CY, Apuzzo MLJ (2011) Man, mind, and machine: the past and future of virtual reality simulation in neurologic surgery. *World Neurosurg* 76(5):419–430.

Tierny J (2015) Introduction to volume rendering [On line]. [https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny\\_intro\\_vol\\_rend09.pdf](https://www-apr.lip6.fr/~tierny/stuff/teaching/tierny_intro_vol_rend09.pdf). Accessed 20 Aug 2018





