

# Impresión 3D en RM: Lo que el radiólogo necesita saber

Ignacio Andrés Cano<sup>1</sup>, Pablo Andrés Cano<sup>2</sup>

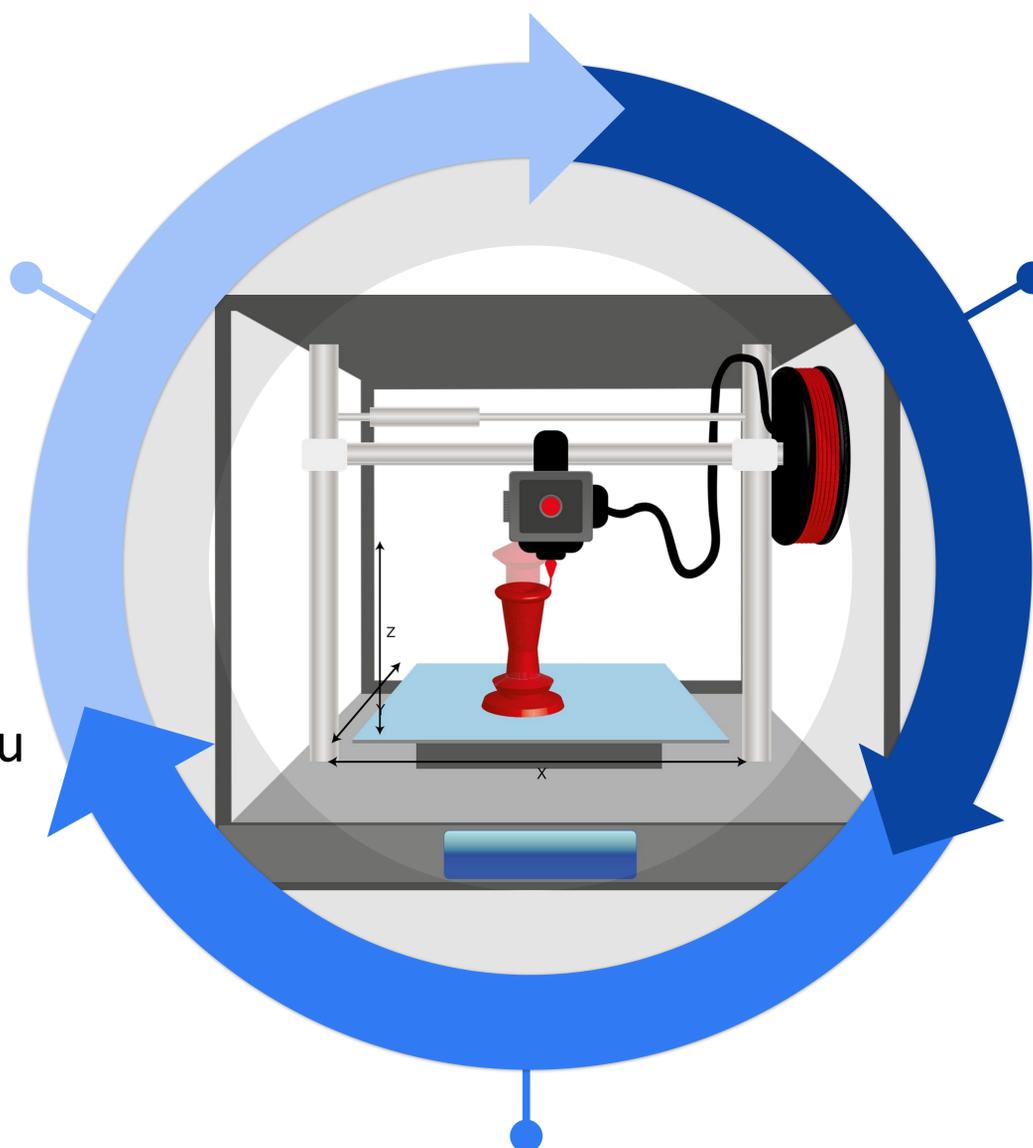
<sup>1</sup> Hospital Universitario Miguel Servet, Zaragoza;

<sup>2</sup> Hospital Universitario Puerta del Mar, Cádiz

# Objetivos docentes

## SABER

Las principales aplicaciones de la impresión 3D en medicina y algunas generalidades sobre su proceso.



## CONOCER

Nuestro proceso de segmentación e impresión 3D a partir de imágenes obtenidas mediante una resonancia magnética de rodilla.

## COMPRENDER

El papel que juega el radiólogo en el proceso de segmentación e impresión 3D.

# Revisión del tema

## Introducción a la impresión 3D

La tecnología de fabricación aditiva (mayormente conocida como “impresión 3D”) emergió en el campo de las ciencias no médicas para atender a la necesidad de un rápido desarrollo de prototipos en ingeniería.

La impresión 3D en radiología incluye la fabricación de estructuras anatómicas y órganos a partir de imágenes DICOM.

Sin embargo, las impresoras 3D no aceptan imágenes en el formato estándar en Imagenología Digital y Comunicaciones en Medicina (*DICOM* por sus siglas en inglés), por lo que será necesario un proceso que genere un archivo STL (*Standard Tessellation Language*), cuyo formato está compuesto por una serie de superficies de morfología triangular cada una de la cual representa una región del espacio que queremos imprimir.

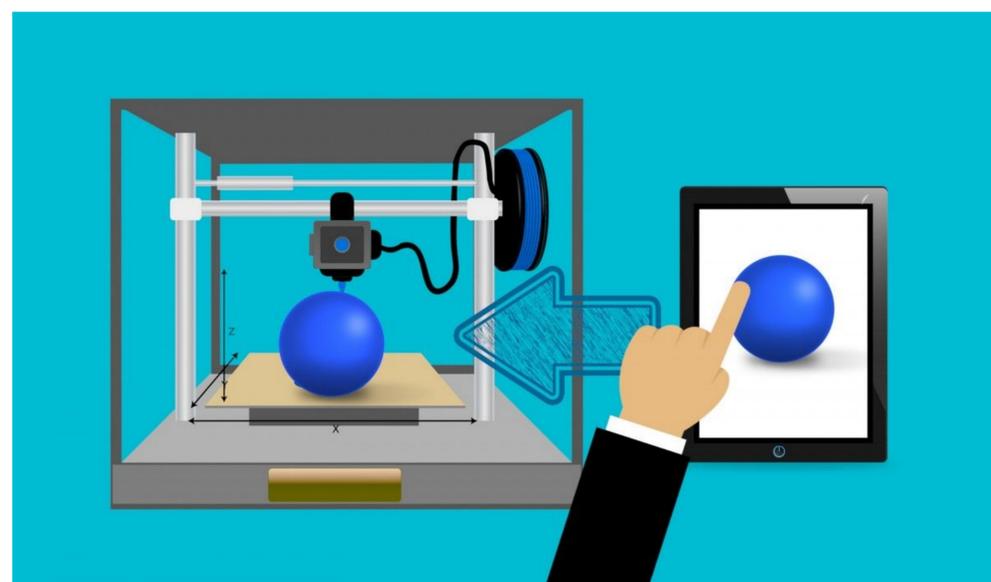


Imagen 1. Esquema ficticio resumido del proceso de impresión 3D

Un modelo anatómico final impreso en 3D a partir de una imagen DICOM representa la progresión natural desde la visualización de una reconstrucción en 3D, dado que la demanda para la planificación intervencionista está en vistas de aumentar al ser la tecnología cada vez más accesible.

Los radiólogos que adopten esta tecnología desde su implementación, podrán ayudar a definir las indicaciones clínicas, desarrollar herramientas para la impresión 3D y avanzar en el lugar que ocupará esta tecnología en la medicina.

# Revisión del tema

## Introducción a la impresión 3D

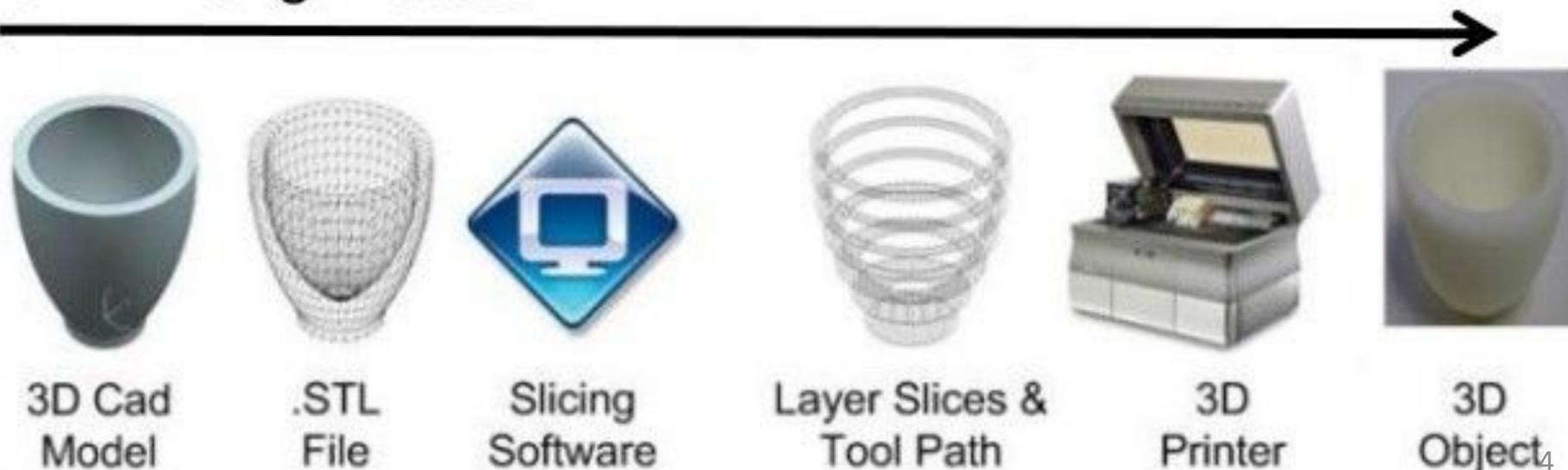
Las técnicas de imagen más comúnmente empleadas para la impresión 3D en medicina son la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM). No obstante, cualquier técnica de imagen en 3D (como la ecocardiografía) podría ser empleada como una fuente de datos para el proceso de segmentación y posterior impresión.

Las imágenes obtenidas deben tener suficiente resolución espacial para representar de forma precisa el área anatómica a reconstruir e imprimir.

La resolución espacial de un método de imagen viene definido como la menor distancia posible entre dos diferentes objetos o bien por dos partes diferenciables del mismo objeto.

El espesor de corte, que influye en la resolución espacial, así como el ruido de la imagen y en definitiva la resolución espacial, pueden ser optimizados según el modelo que se vaya generar.

### 3D Printing Process



# Revisión del tema

## Introducción a la impresión 3D

Por ejemplo, si la anatomía de interés mide 3mm, sería deseable que esta región sea capturada en al menos 3 imágenes secuenciales en cortes que sean mayores de 1 mm de grosor, y preferiblemente menores. Si fueran cortes mayores, podrían observarse una serie de “escalones” en el modelo 3D.

El **ratio señal-ruido** es una forma de medir la calidad de la imagen. Un mayor ratio implica datos más válidos para la impresión. El **ratio contraste-ruido** mide la diferencia de intensidad de señal (el contraste) entre dos regiones, escaladas al ruido. Ambos ratios mencionados deben ser comparables a, o superiores a, aquellos ratios para la “visualización 3D”, que viene definida como aquella empleada para la manipulación de datos volumétricos para la visualización 2D de una superficie en un monitor.

Si los ratios anteriormente descritos no son óptimos, los riesgos para una segmentación inadecuada o poco eficaz deben ser sopesados respecto a una nueva adquisición.

En la RM, el ratio señal-ruido puede ser improvisado mediante una adquisición volumétrica, disminuyendo el ruido, incrementando el *field of view* (FOV), disminuyendo el tamaño de la matriz o incrementando el espesor de corte.

Las imágenes médicas contienen **artefactos**, y todos los pasos del procesado de imágenes deben ser seguidos para minimizar dichos artefactos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones además del propio manejo de la imagen médica, se recomienda centralizar en radiología las unidades de impresión 3D.

# Revisión del tema

## Principales aplicaciones médicas

### Planificación preoperatoria

El uso de modelos impresos en 3D para la planificación en ortopedia y fijación de fracturas es una de las principales aplicaciones. Se han empleado modelos para diseñar componentes acetabulares en anatomías complejas así como guías y otros instrumentos en fracturas de calcáneo. Esto, junto a otras aplicaciones en este campo, ha permitido reducir el tiempo de quirófano y la cantidad de material empleado en la cirugía.

También se han empleado modelos anatómicos para planificar la resección de tumores renales. Los pacientes seleccionados fueron intervenidos mediante nefrectomía parcial, y los urólogos encontraron útil el modelo impreso en 3D de cara a planificar el margen de resección respecto a los vasos hiliares y el sistema colector.

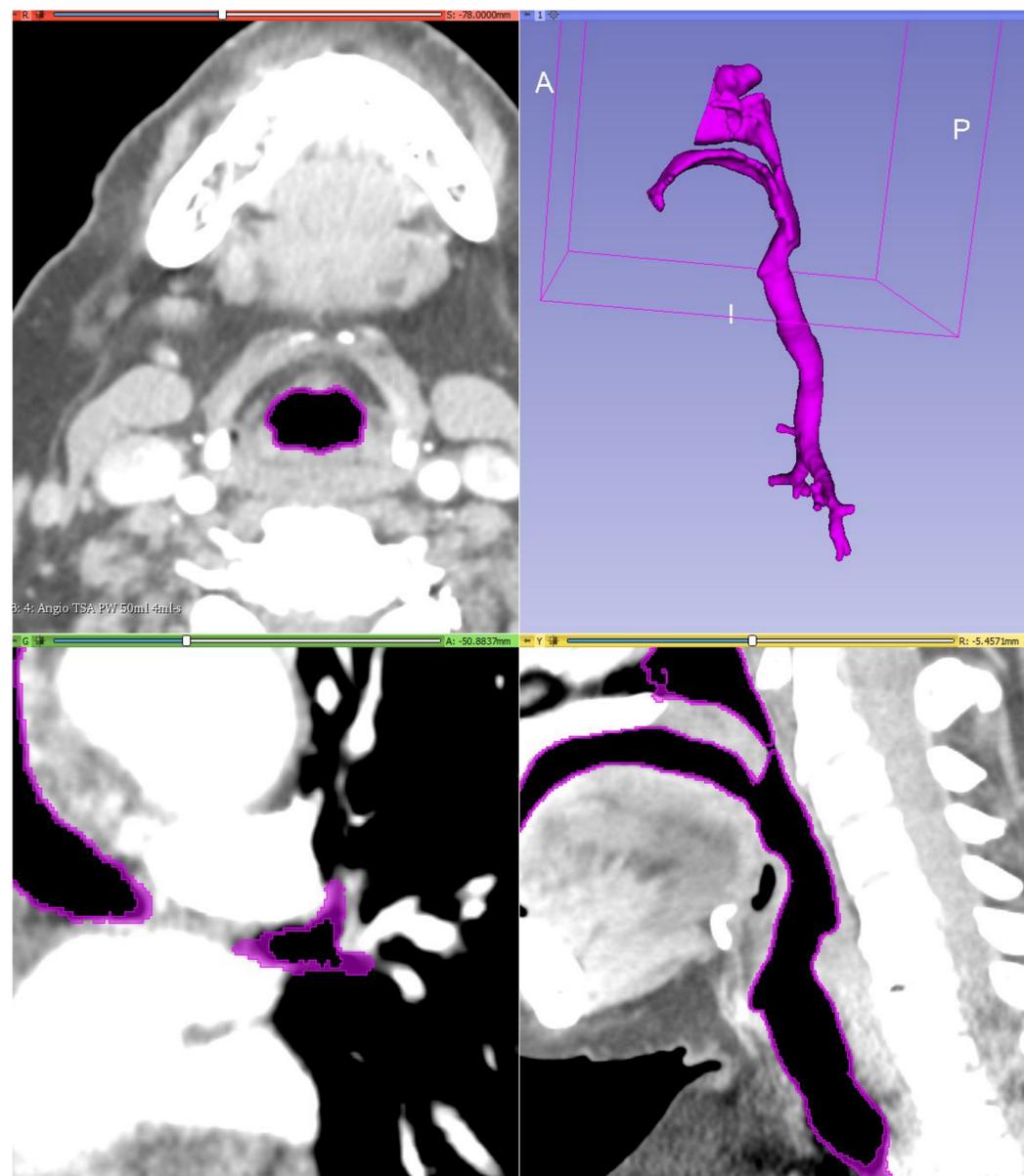


Imagen 3. Segmentación de un modelo anatómico de vía aérea incluyendo nasofaringe, laringofaringe, tráquea y bronquios principales y segmentarios proximales.

Los modelos de corazón y arteria aorta también han sido usados para planificación preoperatoria en cirugía cardíaca, vascular y cardiología. Por ejemplo, se han empleado modelos cardíacos para evaluar la integración de un dispositivo de oclusión de septo atrial.

# Revisión del tema

## Principales aplicaciones médicas

### Herramientas quirúrgicas y prótesis personalizadas

Además de la reconstrucción de modelos anatómicos, la impresión 3D puede emplearse para diseñar implantes, guías o herramientas personalizadas que se ajusten a la anatomía específica de cada paciente, así como prótesis. Los implantes o prótesis que sean impresos con biotecnología, es una revolución que está aún en proceso de desarrollo.

El uso de prótesis personalizadas en cirugía dental y maxilofacial están ampliamente aceptadas. Los implantes impresos en 3D se emplean para reconstrucciones de hueso temporal, cigomático y mandíbula, entre otros. Los tumores óseos como los ameloblastomas normalmente requieren una gran reconstrucción ósea tras la resección tumoral.

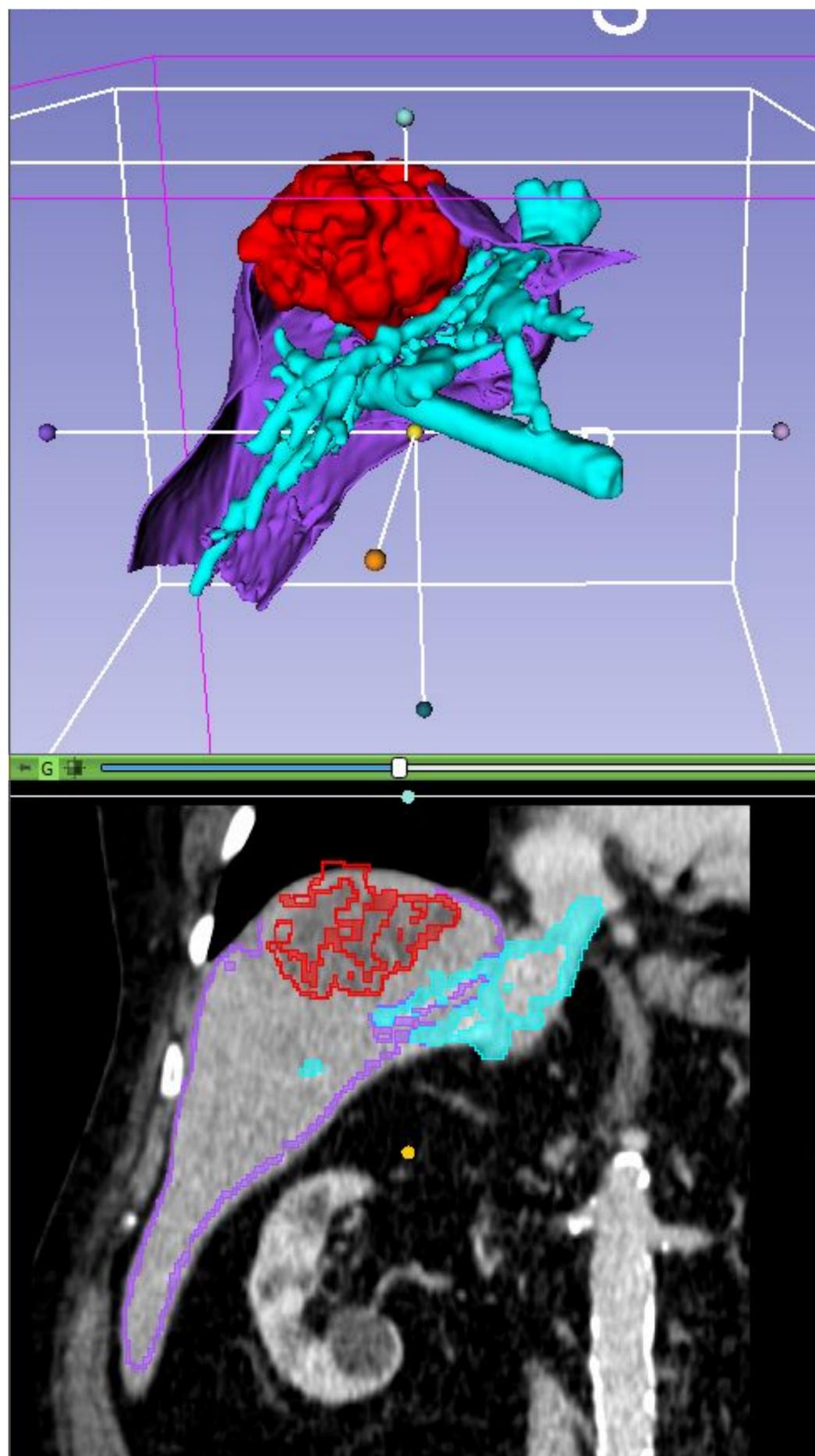


Imagen 4. Segmentación y reconstrucción 3D de una lesión maligna hepática y su relación con los vasos portales y venas suprahepáticas.

# Revisión del tema

## Principales aplicaciones médicas

### Educación del paciente

Los pacientes consultan en internet, cada vez con más frecuencia, sus síntomas y posibles diagnósticos. Existe un interés actual generalizado por educar o formar al paciente sobre su patología por parte de los profesionales de la salud. A pesar de ello, comunicar a los pacientes resultados de TC o RM de forma verbal puede no ser efectivo, dado que los pacientes en su mayoría no entienden una representación en dos dimensiones de una anatomía en 3 dimensiones. Existen estudios que muestran que el uso de modelos anatómicos en 3 dimensiones pueden ser útiles haciendo que los pacientes comprendan mejor su patología.

Un ejemplo de ello sería emplear modelos anatómicos impresos en 3D de cara a obtener el consentimiento informado antes de una intervención.

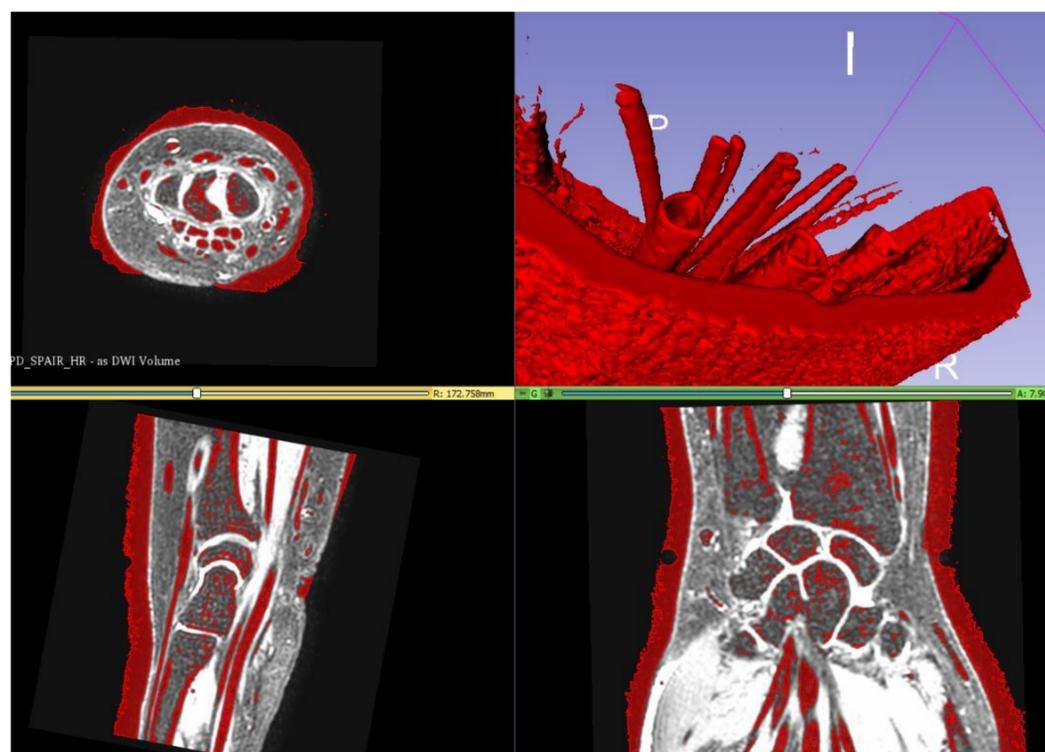


Imagen 5. Segmentación y reconstrucción 3D de elementos tendinosos y vasculares de la muñeca a partir de una RM.

### Enseñanza y aprendizaje de anatomía

Las facultades de medicina están empezando a emplear modelos anatómicos impresos en 3D para reemplazar la disección de cadáveres en las asignaturas de anatomía.

Las ventajas son indudables: los modelos son reproducibles, seguros y manejables; pueden ser desde anatomía normal hasta variantes anatómicas además de poder ser impresos a escala real, mayor o menor.

# Revisión del tema

## Preparación de la imagen médica a partir de RM

Recientemente, gracias a la incorporación de RM de alto campo a la práctica clínica habitual y a nuevas técnicas de adquisición y reconstrucción, se ha logrado disminuir el grosor de corte de las imágenes de RM y se ha desarrollado la adquisición volumétrica (se obtiene un volumen representado por vóxeles en lugar de un plano representado por píxeles), permitiendo reconstrucciones multiplanares.

Estas son las secuencias de RM 3D, que tienen una utilidad diagnóstica bien consolidada y se emplean como base para la impresión 3D a partir de RM. En comparación con las secuencias clásicas con cortes gruesos en un solo plano, las secuencias 3D aportan la ventaja de reunir la información de los tres planos del espacio en una sola secuencia.

Otra ventaja de estas secuencias 3D es el hecho de obtener una gran cantidad de información en un tiempo relativamente corto. Además, la mayor resolución espacial y la posibilidad de realizar reconstrucciones multiplanares en pantalla facilitan la interpretación de los hallazgos patológicos.

Las secuencias 3D presentan algunas desventajas, entre las cuales se encuentra la mayor vulnerabilidad a artefactos de movimiento por la duración de la adquisición, y el ser especialmente susceptibles a artefactos por foldover (“plegado”).

Para imprimir modelos 3D a partir de imágenes de RM, se debe planificar la exploración con anterioridad, para adquirir la secuencia necesaria. Esta dependerá de qué región anatómica se desee imprimir, y con qué fin.

# Revisión del tema

## Preparación de la imagen médica a partir de RM

En el caso de la impresión 3D orientada a patología musculoesquelética articular, la RM ofrece una clara ventaja sobre la tomografía computarizada (TC) por su mayor resolución de contraste para tejidos blandos, además de permitir imprimir el hueso con una fidelidad asimilable a la de la impresión 3D a partir de TC. En base a la experiencia acumulada en nuestro centro, se recomienda el uso de secuencias isotrópicas potenciadas en DP con supresión grasa tipo inversión-recuperación con atenuación espectral (SPAIR).

La potenciación en DP unida a la supresión grasa mediante SPAIR logra una óptima resolución de contraste que delimita adecuadamente el tejido óseo y las distintas partes blandas articulares, y perfila especialmente bien las estructuras fibrocartilaginosas como los meniscos. Se recomienda adquirir las imágenes con el menor grosor de corte posible (1 mm o inferior), para minimizar las irregularidades en las superficies y lograr la máxima fidelidad del modelo. En la tabla inferior se enumeran los parámetros técnicos más relevantes.

Atributo DICOM	3D DP SPAIR	3D T2 SPAIR	3D mFFE WATS
<i>Scanning Sequence</i>	SE	SE	GR
<i>Sequence Variant</i>	SK	SK	SS
<i>MR Acquisition Type</i>	3D	3D	3D
<i>Slice Thickness</i>	0,68	0,68	0,68
<i>Spacing Between Slices</i>	0,63	0,68	0,34
<i>Repetition Time</i>	1300	1500	17,7835998535156
<i>Echo Time</i>	198,068	255,42	13,455
<i>Number Of Averages</i>	2	2	1
<i>Echo Number</i>	1	1	2
<i>Echo Train Length</i>	52	85	2
<i>Flip Angle</i>	90	90	15

# Revisión del tema

## Impresión 3D con RM

La principal limitación de la segmentación de un estudio de imagen de RM a partir de secuencias 3D es la imposibilidad para utilizar las herramientas de segmentación semiautomáticas conocidas como “umbral” ya que no se aplica la escala de grises de Hounsfield en este tipo de estudios. Si bien algunos autores han propuesto protocolos de adquisición específicos para el hueso, “secuencias de hueso negro”, encontramos la necesidad de incluir el resto de estructuras blandas en la reconstrucción.

A continuación se expone brevemente el proceso de segmentación mediante una secuencia 3D DP SPAIR. Para ello hemos empleado el software de uso libre 3D-Slicer v.4.10.2 (BWH, Cambridge, MA, USA).

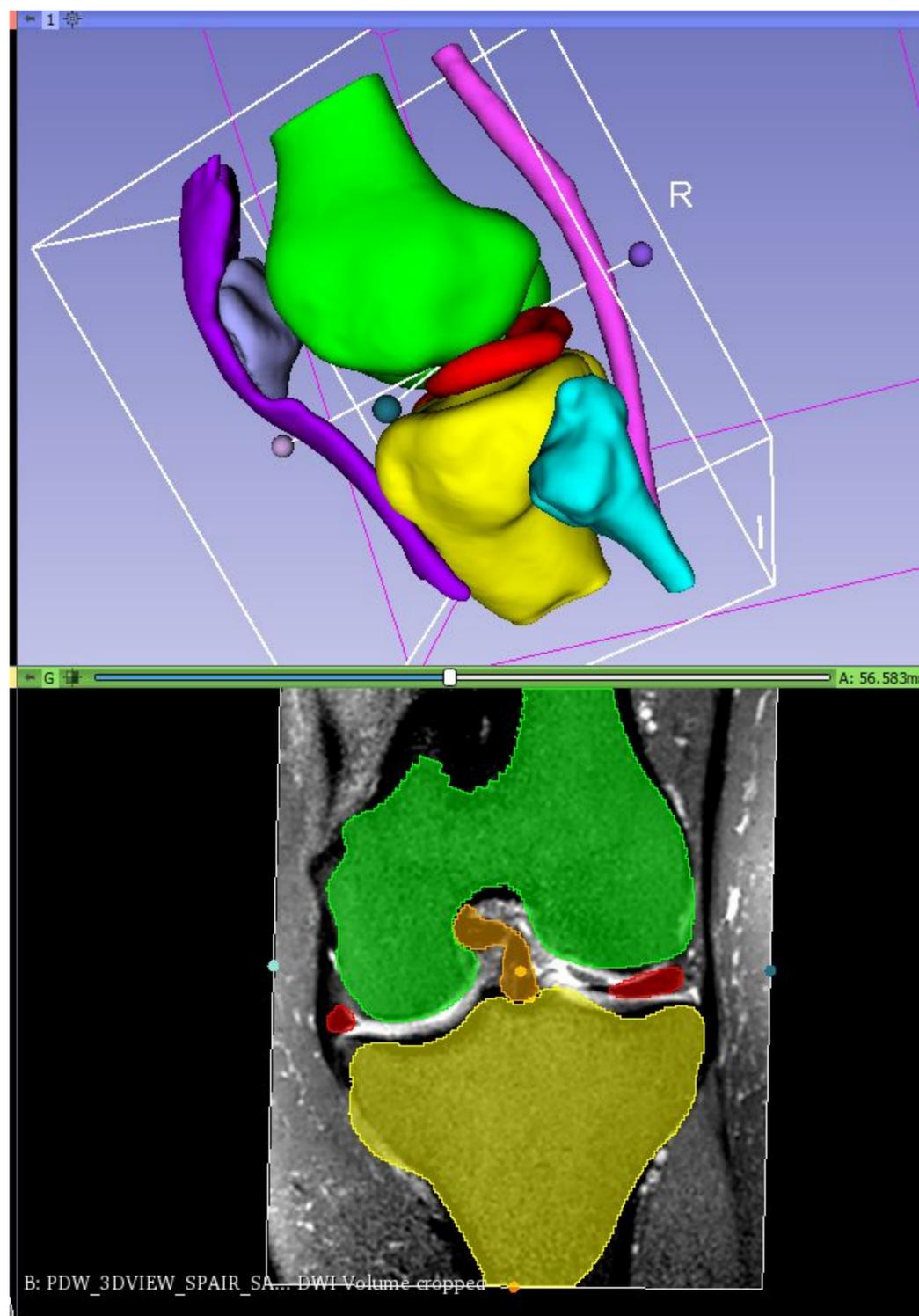


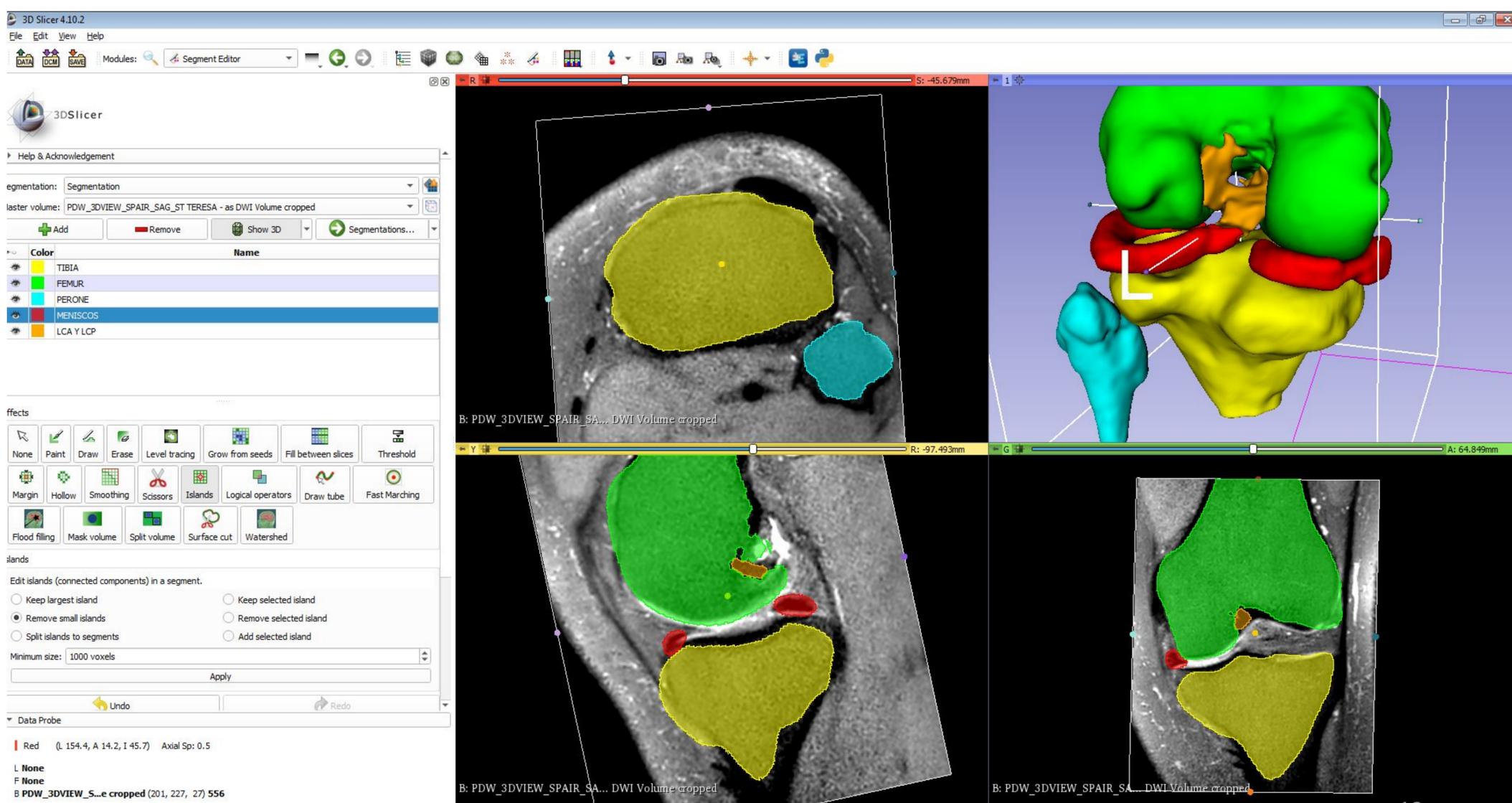
Imagen 6. Segmentación y reconstrucción 3D de una articulación de rodilla con diversas estructuras óseas y de partes blandas.

# Revisión del tema

## Nuestro proceso de segmentación

En primer lugar se llevó a cabo la segmentación de las estructuras óseas por separado con las herramientas *paint* y *fast marching*. También se emplearon las herramientas de suavizado (*smoothing*) y borrado (*erase*) como primera aproximación al modelo final.

Para los meniscos, el proceso comenzó con la herramienta *threshold* y posteriormente recortamos con la herramienta tijeras las estructuras que sobraban de forma grosera. Nos apoyamos de la herramienta *islands* para eliminar los vóxeles que no nos interesaban y aquellos otros elementos que tampoco deberían ser incluidos.



# Revisión del tema

## Nuestro proceso de segmentación

Para el tendón rotuliano y la arteria poplítea el proceso fue llevado a cabo con la herramienta blood filling y posteriormente con *margin/grow*.

En todos los casos anteriormente descritos, el proceso se apoyó en *margin/grow* y finalizó con un suavizado del modelo mediante la herramienta *smoothing/gaussian*.

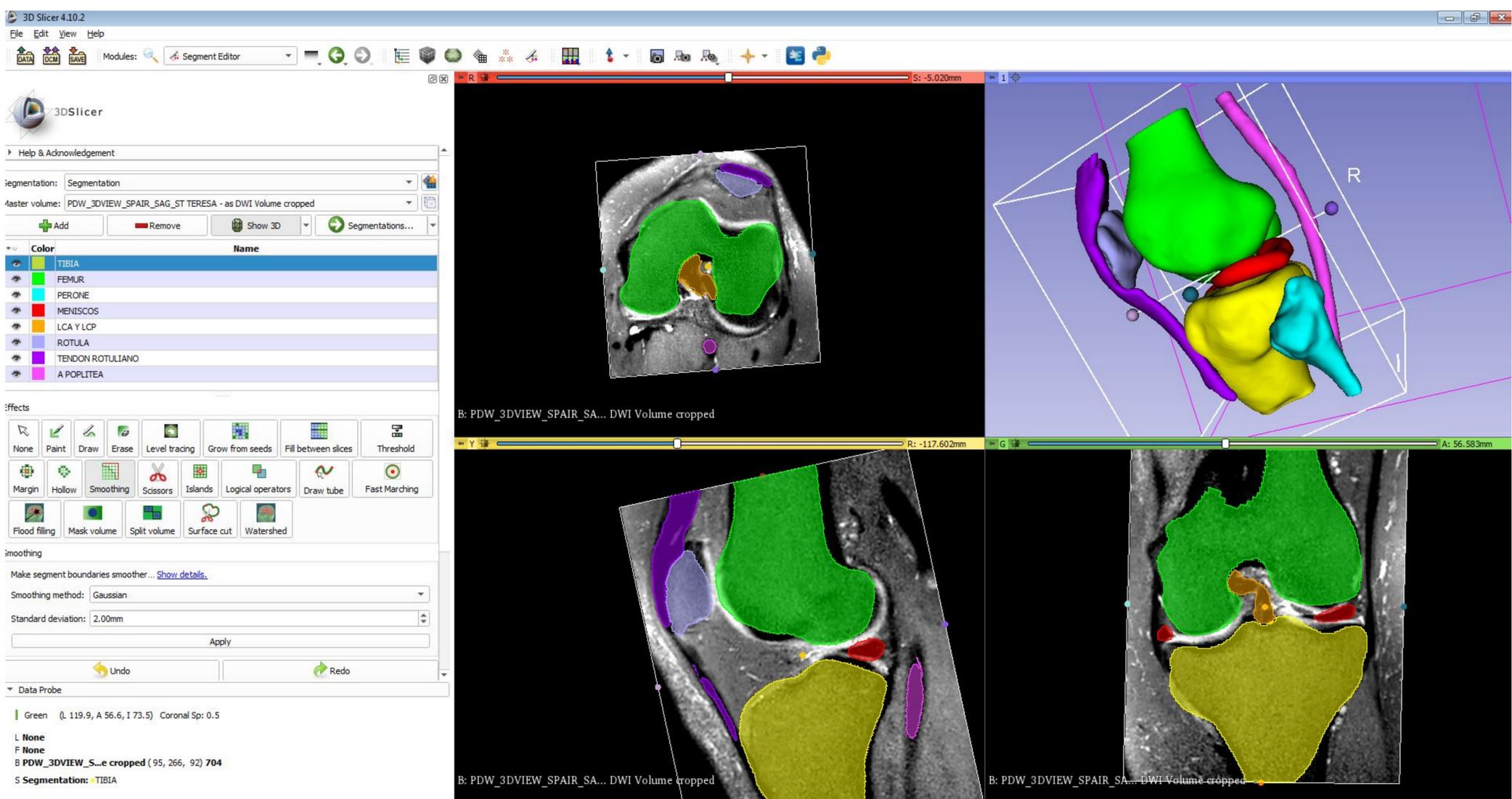


Imagen 8. Segmentación y reconstrucción del modelo final de rodilla con el software 3D Slicer.

# Revisión del tema

## Modelado e impresión final

### Modelado

Una vez realizada la segmentación y renderizado del modelo virtual, se realiza la exportación del modelo a un fichero digital CAD. Este fichero está formado por una malla tridimensional de triángulos cuyo formato más extendido es el .STL (Stereolithography), formato que pese al ser el más frecuentemente utilizado y soportado por la mayoría de las aplicaciones informáticas, no aporta información sobre el color, texturas o propiedades físicas aunque sí lo hace sobre el tamaño o la situación espacial.

Existen numerosas aplicaciones informáticas que permiten el procesado de los modelos CAD, algunas de las más usadas para modelos médicos son aplicaciones de libre distribución como Meshmixer (Autodesk Inc, San Rafael, CA, USA) o MeshLab (ISTI-CNR, Pisa, TO, Italy).

En función de cada caso y dependiendo de la utilidad prevista, el modelo CAD suele precisar un procesado posterior. El procesado puede abarcar desde un ligero suavizado de las irregularidades de la superficie hasta la creación de elementos añadidos como guías quirúrgicas.

El procesado del fichero debe incluir una serie de pasos sucesivos que garanticen la exactitud del modelo anatómico así como la eliminación de los artefactos o errores que la malla tridimensional pueda contener.

Los pasos recomendados son:

1. Corrección de errores de malla.
2. Cerrar extremos del modelo.
3. Optimizar estructuras internas eliminando aquellas que no aporten información clínica.
4. Suavizar artefactos.
5. Añadir conexiones al modelo para dar estabilidad al mismo.

# Revisión del tema

## Modelado e impresión final

### Fabricación e impresión final

A continuación, en función de la utilidad prevista y de la disponibilidad, es necesario seleccionar la tecnología de fabricación y el material más adecuado.

En la fabricación de biomodelos anatómicos 3D la tecnología más ampliamente utilizada es la deposición de material fundido (FDM), aunque no la única. La tecnología FDM destaca entre las demás gracias a su bajo coste y facilidad de manejo. Existe una amplia variedad de impresoras 3D de FDM con numerosos materiales técnicos como PLA, ABS, PVA, TPU, Nylon, etc.

La elección del material dependerá de las necesidades que requiera el proyecto y la utilidad final del modelo 3D. Por ejemplo, PLA es un material fácil de trabajar, que presenta alta resistencia, es rígido y del que existe gran variedad de colores. Por otro lado, PVA es un material muy útil como material de apoyo, puesto que es soluble en agua, consiguiendo un acabado de la pieza más suave.

Las impresoras actuales permiten la incorporación de un cabezal de doble extrusión, muy recomendable para casos como el tratado en este estudio.

La doble extrusión posibilita la impresión a dos colores de un modelo, diferenciando así de manera visual diferentes estructuras o tejidos, o la impresión de dos materiales distintos, con diferentes propiedades cada uno.

# Revisión del tema

## Modelado e impresión final

Una vez establecido el modelo definitivo, el archivo debe ser procesado mediante un software de laminado que adapte el formato .STL a un lenguaje que pueda ser identificado por las impresoras (Gcode). Para ello, la empresa Ultimaker posee su propio software de laminado llamado Ultimaker Cura. En Ultimaker Cura se pueden modificar parámetros de impresión como grosor de pared del modelo, altura de capa del filamento, tipo de material que se va a utilizar (cada material necesita unas especificaciones concretas proporcionadas por el fabricante), velocidad de impresión, el uso o no de soportes, y extrusión mediante un cabezal o doble, entre otros ajustes.

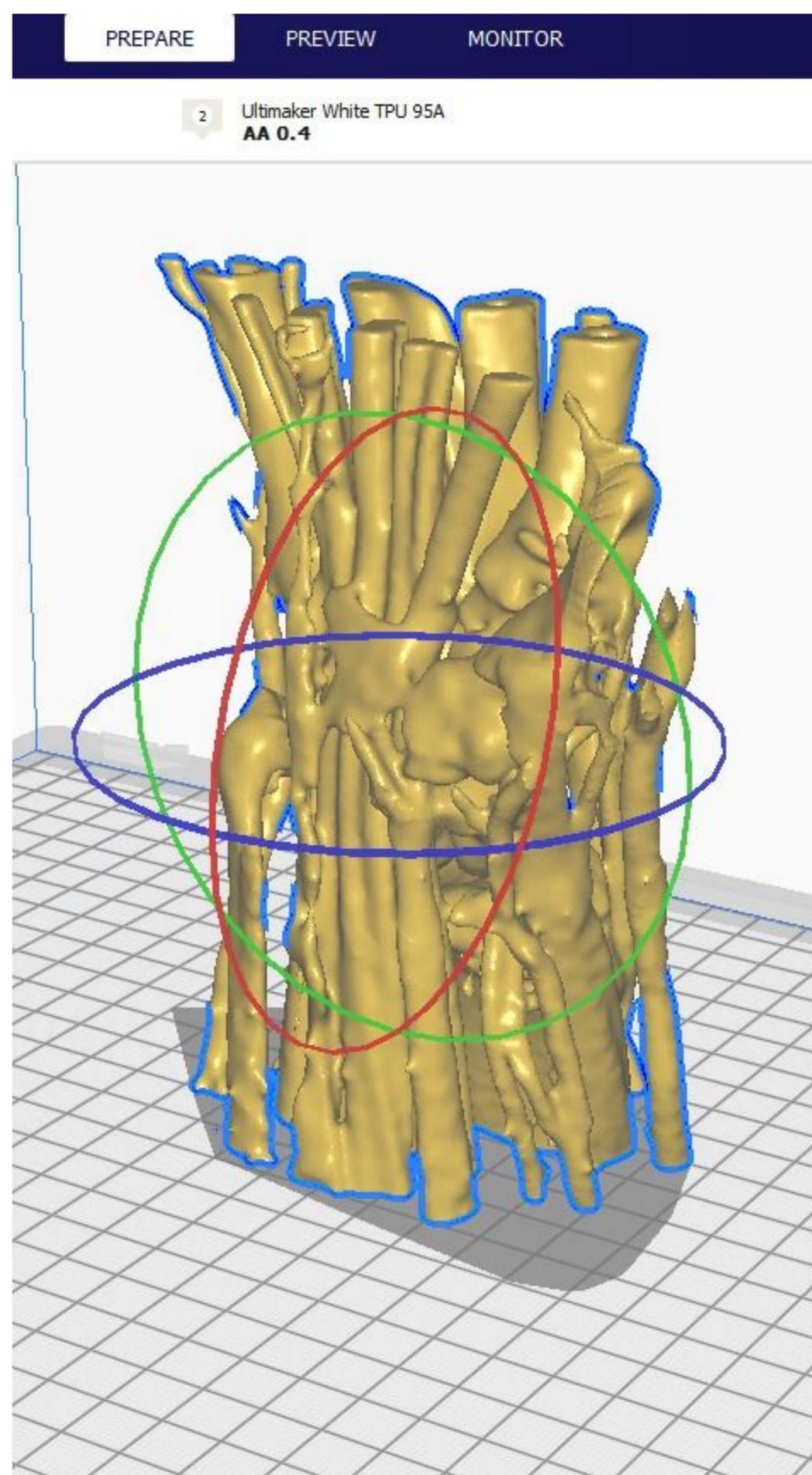


Imagen 9. Preparación de la impresión de un modelo de muñeca con Ultimaker Cura.

# Revisión del tema

## Modelado e impresión final

Por último, la impresora va depositando el material fundido -que rápidamente se solidifica- gracias a la información convertida a lenguaje G-Code que contiene los datos de las coordenadas en las que se encuentra el modelo.



Imagen 10 y 11. Modelo final de rodilla impreso.

# Conclusiones

El uso de biomodelos 3D puede disminuir el tiempo quirúrgico en determinadas intervenciones con un ahorro de los costes de la intervención

El uso de estos modelos para planificación preoperatoria en traumatología y cirugía maxilofacial es una de las utilidades que más interés ha despertado en los últimos años.

Los pacientes tienen una mejor comprensión de su lesión y la operación planeada cuando el cirujano le informa utilizando biomodelos 3D.

Varios estudios avalan la necesidad de que las unidades de impresión 3D estén centralizadas en los departamentos de radiología, aspecto que también proponemos desde nuestra experiencia.

La RM supone una alternativa libre de radiaciones ionizantes respecto a la TC, ofreciendo un mayor grado de detalle en la valoración de tejidos blandos.

Si bien algunos autores ya han propuesto secuencias específicas de RM para hueso, proponemos una serie de pasos para incluir todas las estructuras que forman parte de la articulación mediante el software de uso libre Slicer.

La mayoría de la literatura hasta la fecha se basa en series de casos. Se deben realizar más estudios con énfasis en los beneficios clínicos de los pacientes para elaborar guías clínicas y solicitar apoyo y financiación de las entidades sanitarias.

# Bibliografía

1. Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos A, Cai T, Kumamaru K et al. Medical 3D Printing for the Radiologist. *RadioGraphics*. 2015;35(7):1965-1988.
2. Mitsouras D, Liacouras P, Wake N, Rybicki F. *RadioGraphics Update: Medical 3D Printing for the Radiologist*. *RadioGraphics*. 2020;40(4):E21-E23.
3. Ballard D, Trace A, Ali S, Hodgdon T, Zygmunt M, DeBenedictis C et al. Clinical Applications of 3D Printing. *Academic Radiology*. 2018;25(1):52-65.
4. Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Printing in Medicine*. 2018;4(1).
5. Ripley B, Levin D, Kelil T, et al. 3D printing from MRI Data: Harnessing strengths and minimizing weaknesses. *J Magn Reson Imaging*. 2017;45(3):635-645.  
doi:10.1002/jmri.25526
6. Eley KA, Watt-Smith SR, Sheerin F, Golding SJ. "Black Bone" MRI: a potential alternative to CT with three-dimensional reconstruction of the craniofacial skeleton in the diagnosis of craniosynostosis. *Eur Radiol [Internet]*. 2014 jul 20;24(10):2417-26.
7. Shakoob D, Kijowski R, Guerhazi A, Fritz J, Roemer FW, Jalali-Fahrani S, et al. Diagnosis of knee meniscus injuries by using three-dimensional MRI: a systematic review and meta-analysis of diagnostic performance. *Radiology*. 2019;290:433-435.
8. Martín-Noguerol T, Paulano-Godino F, Riascos R, Luna A. 3D printing units should be centrally managed in the radiology department. *European Journal of Radiology*. 2022;148:110161.