



Universidad de Valladolid

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CURSO 2023-2024

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA CIRUGÍA ORTOPÉDICA DE RODILLA (ACTUALIZACIÓN)

AUTOR: JAVIER AREÑOS GARCÍA

TUTOR: IGNACIO AGUADO MAESTRO

COTUTOR: IGNACIO GARCÍA CEPEDA

SERVICIO DE TRAUMATOLOGÍA Y CIRUGÍA ORTOPÉDICA DEL HURH



HOSPITAL UNIVERSITARIO
RÍO HORTEGA

Índice

Índice.....	2
1 Introducción.....	3
1.1 Flujo de trabajo en la impresión 3D médica	3
1ª Adquisición de imágenes.....	3
2ª Segmentación y generación de la malla.....	4
3ª Procesado de la malla.....	5
4ª Impresión 3D.....	7
1.2 Tipos de impresoras 3D	7
1.2.1 Fotopolimerización en tanque.....	8
1.2.2 Impresión por extrusión de material.....	9
1.3 Aplicaciones conocidas de la impresión 3D en cirugía ortopédica de rodilla hasta 2021	10
1.4 Objetivos	11
2 Métodos	11
2.1 Revisión sistemática.....	11
3 Resultados	12
3.1 Revisión sistemática.....	12
3.2 Aplicaciones de la impresión 3D en rodilla	13
4 Discusión	20
5 Conclusiones	21
6 Agradecimientos.....	21
7 Bibliografía.....	22

1 Introducción

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, se refiere al proceso de construcción de objetos a partir de modelos digitales en 3D, mediante la deposición sucesiva de capas de distintos componentes.¹ Sus orígenes se remontan a 1984, cuando Chuck Hall ideó el "dispositivo para la producción de objetos tridimensionales mediante estereolitografía".² Entre las ventajas principales de esta tecnología, aparte de la posibilidad para crear estructuras con geometrías muy complejas, se encuentra el hecho de que el costo no aumenta en función de la complejidad morfológica, sino más bien en relación al volumen del objeto.³ La expiración de patentes y la disminución en los precios de las impresoras (disponibles en tiendas en línea por menos de 300 euros) han posibilitado que incluso traumatólogos con mentalidad "maker" adopten esta tecnología. Las posibilidades casi ilimitadas de la impresión 3D han ampliado el espectro de aplicaciones, dejando prácticamente en manos de la creatividad de los sanitarios e ingenieros implicados la definición de sus límites.

1.1 Flujo de trabajo en la impresión 3D médica

Utilizamos esta expresión para describir el conjunto de etapas realizadas en el ámbito de la impresión 3D médica, las cuales pueden ser organizadas en cuatro fases distintas.

1ª Adquisición de imágenes

Actualmente hay diversos procedimientos para la medición y modelado de objetos preexistentes, incluyendo el cuerpo humano, con sus zonas más superficiales y también aquellas más profundas. Algunos de los enfoques más comunes son los escáneres 3D, que permiten capturar imágenes volumétricas de la anatomía superficial, así como la tomografía axial computarizada (TAC), la resonancia magnética nuclear (RMN) y la ecografía. Estos métodos no solo posibilitan la obtención de volúmenes en la superficie, sino también la reconstrucción en 3D de estructuras internas del cuerpo.³ La selección adecuada del método de adquisición resulta crítica, ya que imágenes de mala resolución podrían llevar a discrepancias entre la pieza impresa y la anatomía real del paciente. Para el almacenamiento de imágenes médicas, el formato de archivo comúnmente utilizado es el DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine).

Adquisición de las imágenes mediante tomografía axial computarizada (TAC)

Aunque es posible obtener imágenes aptas para impresión 3D a través de ecografías y resonancias magnéticas nucleares, los cortes axiales obtenidos de la tomografía axial

computarizada (TAC) son los más prevalentes en esta especialidad, ya que ofrecen la mejor evaluación de las corticales óseas.

Adquisición de las imágenes mediante resonancia nuclear magnética (RMN)

A pesar de que la mayoría de las capturas en impresión 3D se realizan mediante TC, la RMN tiene un rendimiento considerable, ya que brinda una definición precisa de los tejidos sin necesidad de usar radiación ionizante. Por otro lado, su cualidad para generar secuencias en distintos planos hará más sencilla la posterior segmentación. No obstante, sigue habiendo desafíos que deben superarse para convertirse en el método de adquisición óptimo.

Adquisición de imágenes mediante ecografía

En cuanto a la adquisición de imágenes mediante ecografía, su uso es más común en cardiología, permitiendo la obtención de modelos en 3D que luego podemos segmentar. Aunque presenta la ventaja de ser segura para los pacientes al no usar radiación ionizante, aún debe abordar el desafío de la baja resolución con la que se obtienen las imágenes.⁴

2ª Segmentación y generación de la malla

Implica la elección de las áreas anatómicas que se desean reconstruir en el modelo 3D. Este procedimiento puede llevarse a cabo mediante software comercial como Materialise Mimics (Materialise NV, Lovaina, Bélgica) o software de código abierto como Horos (Horos Project, Annapolis, MD, EEUU.), Invesalius (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Campinas, SP, Brasil) o 3D-Slicer (BWH, Cambridge, MA, EEUU).⁵ En general, estas aplicaciones nos ayudan a aislar las zonas relevantes utilizando herramientas relacionadas, en su mayoría, con la densidad radiológica (unidades Hounsfield)⁶:

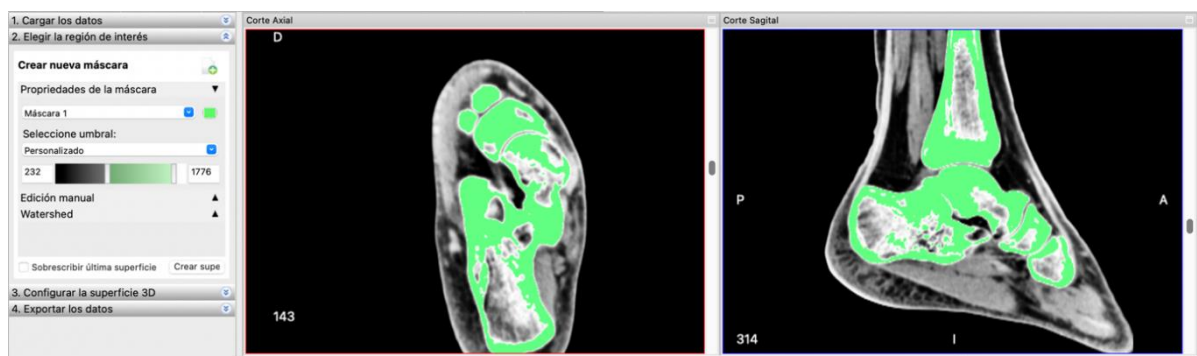


Figura 1. Proceso de segmentación automática con el programa InVesalius. Seleccionando un rango de unidades Hounsfield de entre 232 y 1776 UH.

- **Umbral (threshold):** permite seleccionar un rango de unidades Hounsfield que deben conservarse, excluyendo los datos distintos a ese parámetro.
- **Crecimiento a partir de semillas:** se escogen puntos específicos dentro de las zonas de relevancia como puntos de inicio. Después de definir la densidad requerida para las áreas a incluir y los criterios de detención, el software añadirá vóxels adicionales a la semilla en áreas que cumplan con los criterios.
- **Herramientas de segmentación manual:** implica la selección de cada píxel de las zonas que nos interesan en las capas del posterior modelo.

Después de completar la segmentación, se procede a extraer la superficie de los datos volumétricos, transformando los vóxels en un modelo poligonal, que consiste en una malla compuesta por triángulos. El formato utilizado para esto es el STL (Standard Triangle Language o Standard Tessellation Language).

3ª Procesado de la malla

Generalmente, la malla triangular obtenida suele requerir de una corrección o procesamiento para eliminar fallos y artefactos. Resulta fundamental la comparación entre el modelo STL resultante y la anatomía real del paciente para asegurarse de que las correcciones no alteren la fidelidad a la original.

Siguiendo la propuesta de Andrés-Cano et al.⁵, las 5 etapas del procesamiento de imágenes médicas en 3D son las siguientes:

- **Corrección de la malla:** en relación a áreas más osteoporóticas en las zonas óseas, es posible que aparezcan defectos que necesiten ser rellenados.
- **Cierre de extremos del modelo:** La segmentación a menudo resulta en una imagen superficial de área de relevancia que deja los extremos del hueso (como la cavidad endomedular) abiertos. El cierre ayudará a la posterior impresión.
- **Optimización de estructuras internas:** Cuando solo la superficie externa del modelo es clínicamente relevante, las estructuras internas endomedulares o áreas con discrepancias en el renderizado pueden ser eliminadas. Esto agilizará proceso de imprimir.

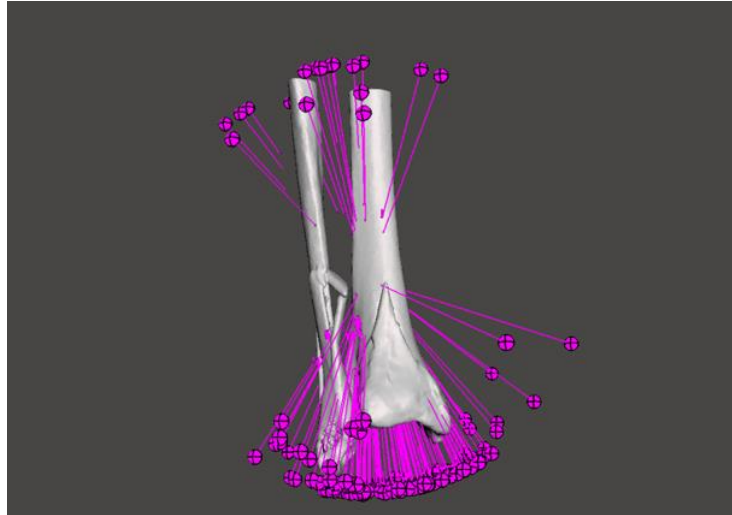


Figura 2. Proceso de corrección y cierre de la malla de una fractura de pilón tibial con programa Meshmixer

- **Suavización de artefactos:** Durante la adquisición de imágenes, se presentan diversos artefactos. Algunos están vinculados al paciente (movimientos, presencia de implantes metálicos) y otros surgen de la configuración del TAC.
- **Modificaciones del modelo:** Esta categoría abarca acciones que alteran el modelo original mediante la incorporación o eliminación de estructuras. En ciertas situaciones, se añaden soportes o estructuras para mantener unidas regiones óseas (como en articulaciones). Estas modificaciones deberán efectuarse sin alterar la realidad anatómica del paciente.



Figura 3. Realización de modificaciones en la estructura cubito-radial distal gracias a la adición de un prisma en la fase de procesamiento en la base para que permanezcan pegados.

4ª Impresión 3D

Este tramo del proceso abarca dos componentes de igual relevancia. En primer lugar, se encuentra la preparación y transformación del modelo tridimensional segmentado en formato STL, elaborado anteriormente, a un formato GCODE. Este último es un “lenguaje” mediante el cual se pueden impartir instrucciones comprensibles para las máquinas, permitiendo que la impresora materialice físicamente el diseño deseado.

Para llevar a cabo esto, el modelo tiene que ser importado a un software que lo descompondrá en varias capas individuales, preparándolo para su impresión por la máquina en cuestión.

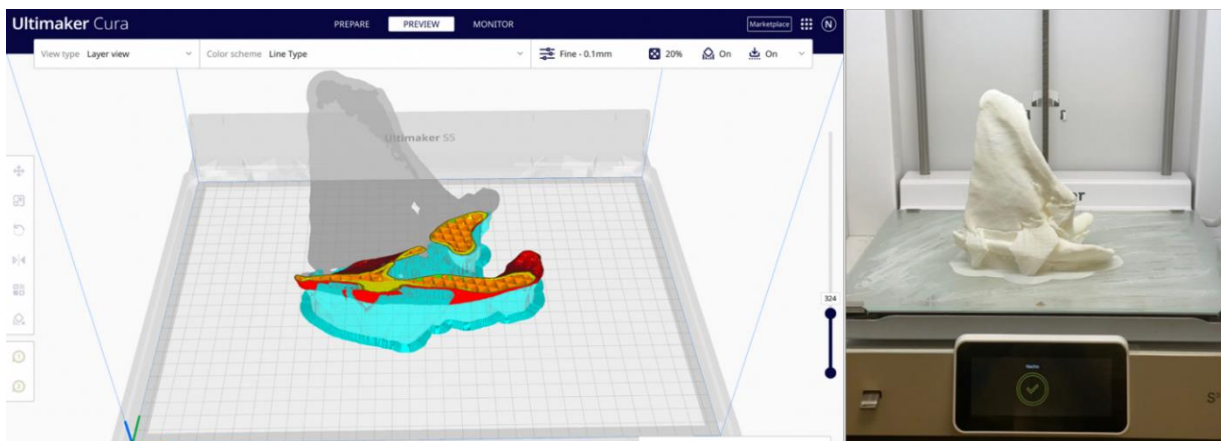


Figura 4. Laminación y preparado de la pieza tridimensional a un formato GCode (izquierda) que pueda materializarse en un modelo 3D físico (derecha).

1.2 Tipos de impresoras 3D

Hay 3 enfoques principales en la tecnología de fabricación de modelos. La fabricación de sustracción, de conformación y adición. En la primera, se parte de un bloque de material al que se le extraen secciones utilizando diversas técnicas, dando la forma geométrica requerida. La fase de conformación consiste en el empleo de moldes en los cuales se inyectan o comprimen materiales. Por último en la fase aditiva o de adición se realiza la deposición selectiva de los materiales.

Para economizar material y tiempo de fabricación, se utilizan estructuras prácticamente huecas. Estas estructuras presentan una pared exterior y un relleno interior (infill) que suele constituir alrededor del 20% del volumen total, dejando el 80% restante hueco.

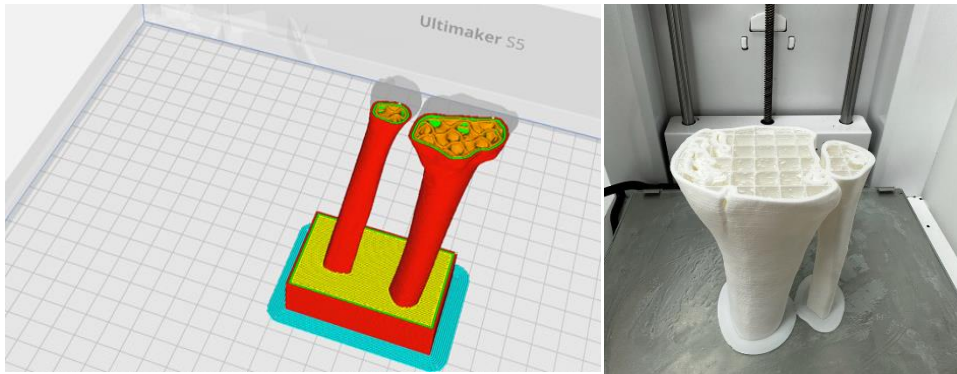


Figura 5. Modelo de radio-cúbito (izquierda patrón giroide, en amarillo) y tibia-peroné (derecha con patrón en retícula) con un relleno del 10%.

Todas estas tecnologías, se clasifican de acuerdo a la norma ISO/ASTM 52900 en los siguientes tipos⁷, aunque nos centraremos en las dos primeras ya que son las más utilizadas en el hospital:

- Fotopolimerización en tanque
- Impresión por extrusión del material
- Deposición directa de energía
- Fusión por lecho de polvo
- Inyección de material (material jetting)
- Inyección aglutinante (binder jetting)
- Laminación de hojas

1.2.1 Fotopolimerización en tanque

En esta clase de tecnología, se parte de una resina líquida compuesta por un fotopolímero, una sustancia sintética cuyas propiedades se alteran mediante la exposición a la luz, causando una solidificación irreversible (curado). La fuente lumínica puede ser un láser (SLA - estereolitografía), un proyector (DLP - Procesamiento Digital de Luz), o incluso a través de oxígeno y diodos emisores de luz.⁸ Entre estas, una alternativa muy utilizada en la impresión 3D en traumatología es la estereolitografía.

En una impresora estereolitográfica, se sitúa una plataforma de impresión en un tanque transparente lleno de resina líquida. Una fuente de luz láser es proyectada en la base del tanque, desencadenando la fotopolimerización (curado, solidificación) de la resina en función de la capa que debe construirse siguiendo el diseño original en formato STL.

1.2.2 Impresión por extrusión de material

También identificada como FDM - Modelado por Deposición Fundida, esta técnica representa uno de los métodos de impresión más extendidos y asequibles. En esta modalidad, la impresión se efectúa al extruir un material sólido semifundido mediante una boquilla que reproduce cada capa bidimensional del modelo.⁹ Las temperaturas son variables, pero generalmente superan los 200 °C.

Esta técnica emplea termoplásticos comunes. Estos materiales normalmente se adquieren en forma de filamentos de diferente diámetro, siendo los más comunes el ácido poliláctico y el acrilonitrilo butadieno estireno (PLA y ABS)

PLA – Ácido poliláctico

El PLA figura entre los polímeros más empleados en aplicaciones médicas. Se origina a partir del ácido láctico y destaca por su alta biocompatibilidad, además de presentar excelentes propiedades físicas que agilizan el proceso de impresión.¹⁰ La temperatura de impresión, que se ubica entre 200 y 220 °C, facilita la extrusión mediante la impresora y previene la deformación ocasionada por el enfriamiento abrupto tras la impresión. Sin embargo, a partir de los 60 °C, es propenso a la deformación.¹¹

ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno

Consiste un plástico termo moldeable que posee cualidades mecánicas superiores al PLA aportando mayor resistencia a la pieza. No obstante, su impresión conlleva mayores desafíos, ya que su temperatura de impresión sobrepasa los 250 °C, lo que lo hace más propenso a la deformación durante el proceso y requiere una superficie de impresión caliente (a más de 90 °C). Además, los gases que se generan al extruirlo necesitan ser ventilados, ya que se consideran tóxicos.



Figura 6. Impresoras FDM y SLA disponibles en el Hospital Universitario del Río Hortega.

1.3 Aplicaciones conocidas de la impresión 3D en cirugía ortopédica de rodilla hasta 2021

1.	Corrección de malformaciones diafisarias complejas del fémur mediante guías impresas en 3D ¹²
2.	Osteotomía de sustracción femoral mediante guía paciente específica impresa en 3D ¹³
3.	Osteotomía lateral de adición femoral para la varización guiada mediante guía quirúrgica a medida impresa en 3D ¹⁴
4.	Osteotomía medial de adición tibial para el tratamiento del genu varo mediante guías quirúrgicas a medida impresas en 3D ¹⁵⁻²⁰
5.	Tratamiento de la enfermedad de Blount mediante osteotomía a dos niveles guiada por impresión 3D ²¹
6.	Osteotomía desrotadora de fémur y tibia mediante guía quirúrgica específica impresa en 3D ²²
7.	Planificación prequirúrgica de las fracturas de meseta tibial mediante impresión de los biomodelos en 3D con o sin premoldeado de la placa de osteosíntesis ²³⁻²⁵
8.	Reducción y osteosíntesis de fracturas bicondíleas de meseta tibial mediante guía quirúrgica impresa en 3D a medida ²⁶
9.	Reducción y osteosíntesis percutánea de fracturas de meseta tibial con guía a medida impresa en 3D ²⁷
10.	Tratamiento de la consolidación viciosa de fracturas de meseta tibial mediante planificación in vitro con modelos impresos en 3D ^{28,29}
11.	Tratamiento de la consolidación viciosa de fracturas de meseta tibial mediante guías quirúrgicas específicas impresas en 3D ³⁰
12.	Corrección de deformidades angulares en la tibia mediante guías quirúrgicas a medida impresas en 3D ^{31,32}
13.	Evaluación de la displasia troclear ³³
14.	Reducción y osteosíntesis de fracturas conminutas de rótula con guía quirúrgica impresa en 3D ³⁴
15.	Tratamiento de la deformidad severa en flexo de rodilla ³⁵
16.	Artroplastia unicompartmental de rodilla con guías quirúrgicas a medida impresas en 3D ³⁶
17.	Planificación del aloinjerto osteocondral en casos complejos de defectos osteocondrales femorales ³⁷
18.	Osteosíntesis de fracturas tibiales sobre hueso patológico (Paget) con clavo preconformado ³⁸
19.	Planificación del tratamiento de las deformidades postraumáticas de la tibia con fijadores externos circulares ³⁹
20.	Recambio de rodilla en dos tiempos con espaciador de cemento articulado hecho a medida con tecnología 3D ^{40,41}
21.	Osteosíntesis de fracturas tibiales sobre hueso patológico (Paget) con clavo preconformado ³⁸
22.	Tratamiento de la pseudoartrosis congénita de la tibia mediante simulación y planificación en modelos 3D ⁴²
23.	Reducción y osteosíntesis mínimamente invasiva de fracturas de tibia mediante la asistencia de un fijador externo con pines estándar impreso en 3D ⁴³
24.	Reducción y osteosíntesis mínimamente invasiva de fracturas de tibia con la asistencia de un fijador externo circular parcialmente impreso en 3D ^{44,45}

Figura 7: Tabla resumen aplicaciones hasta el año 2021 impresión 3D en rodilla para cirugía ortopédica.⁴⁶

1.4 Objetivos

La realización de este trabajo tiene como fin la realización de una revisión sistemática de las novedades existentes en el momento actual (desde el año 2022) en la tecnología de impresión 3D intrahospitalaria en la cirugía ortopédica y traumatología, centradas en la articulación de la rodilla.

2 Métodos

2.1 Revisión sistemática

Con el fin de abordar este objetivo, se llevó a cabo una búsqueda y revisión sistemática de las publicaciones catalogadas en MEDLINE a través del motor de búsqueda PubMed.⁴⁷ Se recopilaron todos los estudios que emplearan la impresión 3D en el campo de la cirugía ortopédica y traumatología, con la condición de que el diseño y/o la impresión se realizaran dentro de las instalaciones hospitalarias, orientados hacia aplicaciones quirúrgicas. La última búsqueda se llevó a cabo el 30 de septiembre de 2023, incluyendo los artículos desde el 1 de enero de 2022 en adelante.

Una vez seleccionados todos los artículos, se descargaron en formato PDF para su inclusión en el programa Zotero y clasificados en función de su contenido.

Los resultados fueron expresados a modo de guía, creando un compendio de aplicaciones de fácil accesibilidad.

Los términos para la búsqueda en PubMed fueron los siguientes:

**3D printing AND (orthopedics OR traumatology) NOT tissue engineering
NOT scaffold NOT in vitro**

Una vez revisados todos los artículos, estos fueron seleccionados en base a los siguientes **criterios de inclusión**:

- Artículos en inglés o castellano.
- Disponibilidad de artículo completo (*full text*).
- Relacionados con aplicaciones de la impresión 3D en cirugía ortopédica y traumatología de rodilla.

Los **criterios de exclusión** fueron:

- Artículos publicados en idioma distinto al inglés o castellano.
- Imposibilidad de conseguir el artículo completo o región anatómica diferente.
- Artículos no relacionados con la cirugía ortopédica o traumatología en humanos.
- Estudios experimentales sin humanos.
- Estudios con terapia celular o ingeniería de tejidos.
- Artículos relacionados con el uso de prótesis o implantes a medida, fabricación industrial, ortesis o navegación.
- Artículos basados en flujos de impresión 3D desarrollados por completo fuera de las instalaciones del hospital.
- Aplicaciones ya mencionadas anteriormente en el punto 1.3.

3 Resultados

3.1 Revisión sistemática

La búsqueda en PubMed arrojó un total de 558 estudios:

511 eliminados por tratar de una región anatómica diferente

15 por estar en un idioma diferente al castellano/inglés

18 por tratar sobre aplicaciones ya descritas anteriormente

6 artículos (5 aplicaciones) se incluyeron finalmente en el trabajo, organizados a modo de fichas con la siguiente estructura:

Localización: definición de la región anatómica de interés.

Sección: Ortopedia, traumatología, ortopedia infantil, oncología.

Categoría: Premoldeado de implantes, planificación quirúrgica, guías quirúrgicas a medida, docencia y formación o instrumental quirúrgico.

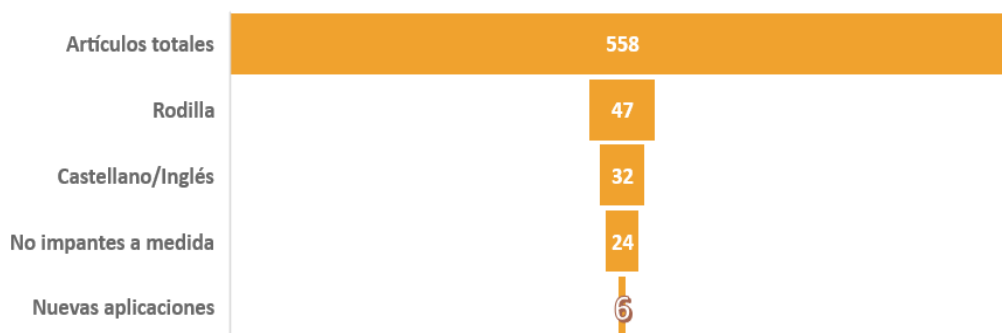


Figura 8. Diagrama de elegibilidad de los artículos incluidos en la actualización.

3.2 Aplicaciones de la impresión 3D en rodilla



Localización:	Rodilla
Sección:	Ortopedia
Categoría:	Guías quirúrgicas a medida
Plantilla de navegación individualizada impresa en 3D para la definición del túnel femoral para la reconstrucción del ligamento patelofemoral medial ⁴⁸	
Adquisición de imagen:	TAC
Segmentación:	Mimics Research 19.0
Procesado:	Mimics Research 19.0
Impresión:	
- Impresora	Creality, Shenzhen, China
- Material	Acido poliláctico (PLA)

El autor Schöttle propuso el uso de tres líneas en un procedimiento relacionado con la anatomía femoral y la creación de una plantilla de navegación individualizada. Estas líneas se utilizaron para determinar un punto importante en el ligamento femorrotuliano medial femoral (punto de Schöttle). Se creó una plantilla impresa en 3D para guiar el procedimiento quirúrgico tomando como referencia la superficie cortical femoral medial y el punto de Schöttle. Las guías de impresión se fabricaron con material de ácido poliláctico, que es seguro para el trabajo clínico y tiene una alta resistencia a la compresión.

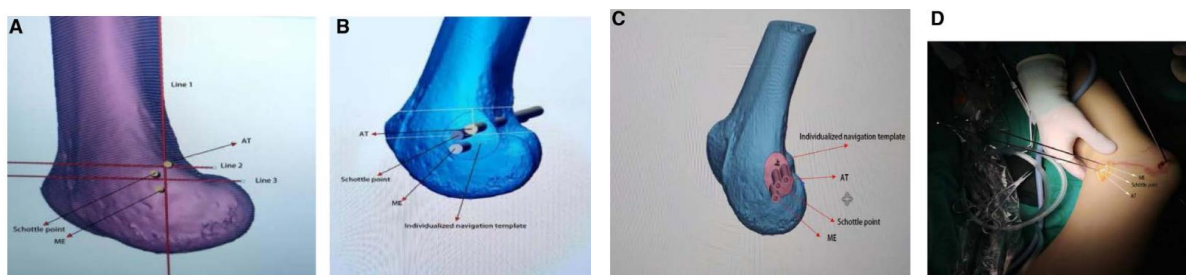


Figura 9: (a) Determinación preliminar del punto de Schöttle utilizando Mimics Research. (b y c) Diseño de la guía quirúrgica a medida por medio de chimeneas con el software 3 matic. (d) Imagen intraoperatoria del uso de la guía.⁴⁸

Localización:	Rodilla
Sección:	Ortopedia
Categoría:	Planificación quirúrgica

Planificación de la osteosíntesis de las pseudoartrosis de fracturas de Hoffa mediante modelos impresos en 3D ⁴⁹

Adquisición de imagen:	TAC grosor del corte 0,6mm
Segmentación:	InVesalius
Procesado:	Meshmixer 3.5
Impresión:	
- Impresora	No especifica
- Material	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Se realizó un tratamiento in vitro de la pseudoartrosis por medio de un modelo anatómico impreso en 3D por medio de una placa. Se creó un archivo en formato STL que puede usarse en entornos de diseño asistido por ordenador (CAD) y para impresión 3D. La simulación quirúrgica se basó en estudios recientes que sugieren que el uso de una placa y tornillos proporciona una mayor estabilidad biomecánica en el tratamiento de fracturas coronales del cóndilo femoral. Se empleó una placa de compresión con tornillos bloqueados (tipo LCP) con tornillos de diferentes tamaños siguiendo los principios de fijación de fracturas articulares desarrollados por la Fundación Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) para tratar la pseudoartrosis en un modelo anatómico 3D.

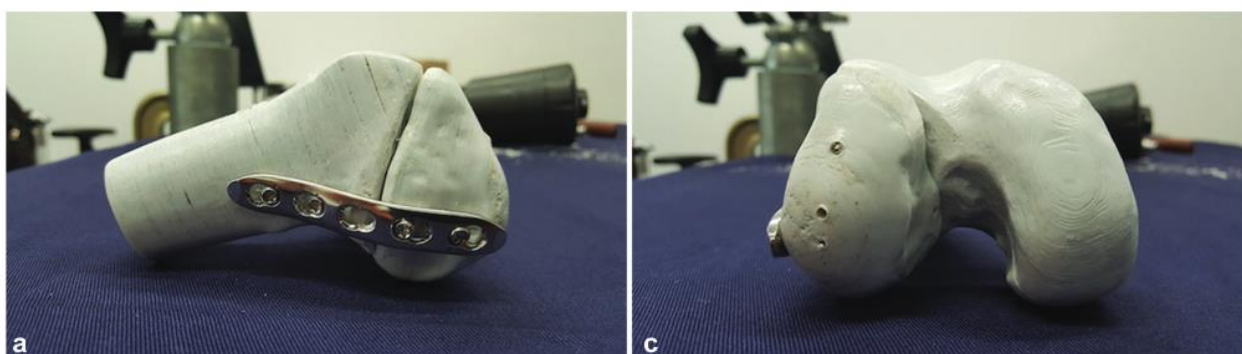


Figura 10: Imágenes del hueso impreso en 3D fijado con la placa LCP en la porción lateral del fémur distal.⁴⁹

Localización:	Rodilla
Sección:	Ortopedia
Categoría:	Guías quirúrgicas a medida

Osteosíntesis asistida por guía impresa en 3D de fractura por avulsión del LCA ⁵⁰

Adquisición de imagen:	TAC
Segmentación:	Mimics
Procesado:	Geomagic y Mimics
Impresión:	
- Impresora	No especifica
- Material	No especifica

Reconstruimos el modelo 3D de la fractura (Fig. 11A), y posteriormente se diseñan los túneles por los que introducir las agujas de Kirschner. Por medio de ingeniería inversa se diseña una plantilla que sirva de guía (Fig. 11B), evitando el contacto directo con la cavidad articular del paciente (Fig. 11C). Se puede utilizar para una colocación individualizada y precisa de los túneles tibiales.

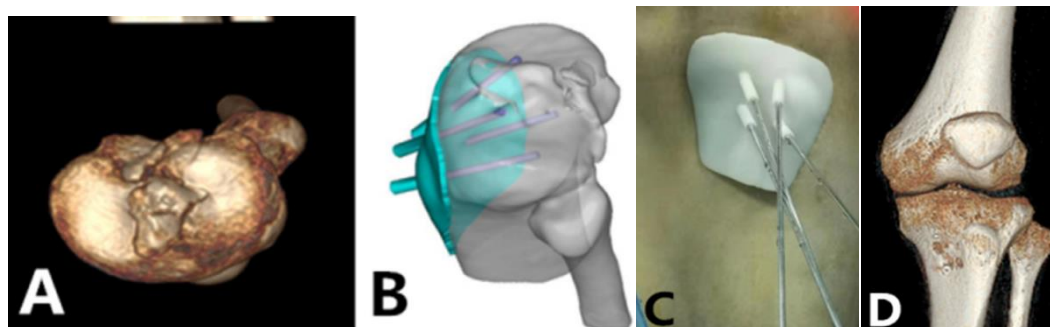


Figura 11: Proceso de creación del modelo 3D para la colocación de las guías.⁵⁰

Los autores refieren que el uso de este procedimiento disminuye el tiempo de cirugía y las pérdidas de sangre aumentando por lo tanto la seguridad de la cirugía. Sin embargo se carece de evidencia científica al no tratarse de un ensayo clínico aleatorizado.

Localización:	Rodilla
Sección:	Ortopedia
Categoría:	Planificación quirúrgica

Impresión 3D de las articulaciones femorrotulianas en pacientes con inestabilidad rotuliana ⁵¹

Adquisición de imagen:	TAC
Segmentación:	Simpleware ScanIP
Procesado:	Simpleware ScanIP (Formalabs)
Impresión:	
- Impresora	Formalabs 3B o 3BL (Formlabs, Somerville, MA)
- Material	Resina gris v4 (Formlabs)

Se lleva a cabo la segmentación del fémur distal por medio del software eliminando la tibia y patela. Posteriormente, se procede a imprimir en resina el fémur distal. Se menciona que la comprensión tridimensional de esta deformidad es crucial para la planificación quirúrgica en pacientes con inestabilidad rotuliana. Se destaca la utilidad de las imágenes y modelos tridimensionales para comprender mejor la anatomía de la rodilla y las deformidades trocleares, lo que ayuda en la planificación de cirugías para corregir la inestabilidad rotuliana recurrente. También se menciona que esta tecnología tiene el potencial de avanzar aún más en el campo de la cirugía patelofemoral y otras deformidades en la rodilla.

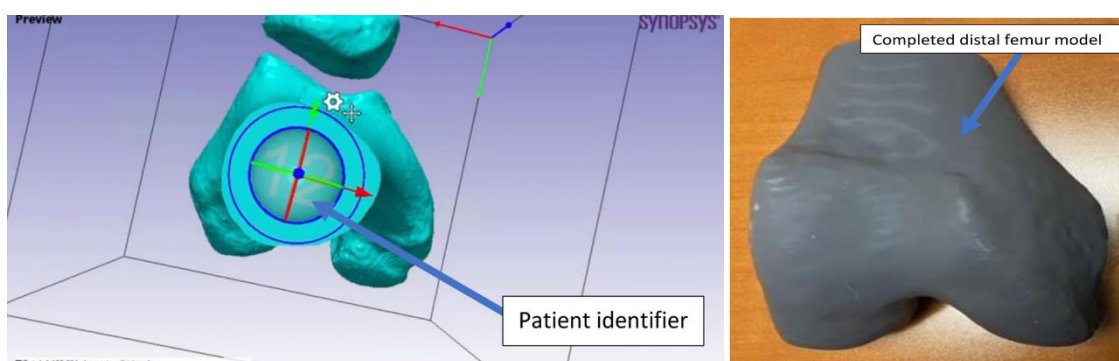


Figura 12: Procesado del modelo 3D personalizado y modelo impreso del fémur distal.⁵¹

Localización:	Rodilla
Sección:	Ortopedia
Categoría:	Guías quirúrgicas a medida

Instrumentación impresa 3D específica para el paciente para reproducir túneles óseos femorales en lesiones de rodilla de múltiples ligamentos ^{52,53}

Adquisición de imagen:	TAC grosor del corte 0,625mm – 1mm (máx.) ⁵²
Segmentación:	Materialise Mimics 21.0 (Mimics Innovation Suite, Materialise MV, Bélgica) ⁵²
Procesado:	3-matic 13.0 (Mimics Innovation Suite, Materialise MV) ⁵²
Impresión:	
- Impresora	Ultimaker 3/S5 (Ultimaker, Netherlands) ⁵²
- Material	Acido polilactico (PLA) y alcohol polivinílico (PVA) ⁵²

En este estudio, se utilizó la tecnología de impresión 3D para crear guías quirúrgicas precisas en cirugías de rodilla en cadáveres humanos. Se realizaron incisiones y disecciones para exponer las estructuras anatómicas relevantes, como los ligamentos colaterales lateral (LCL) y poplíteo (PT) en el lado lateral, y el ligamento colateral medial (MCL) y el ligamento oblicuo posterior (POL) en el lado medial de la rodilla. Las guías quirúrgicas diseñadas con una tolerancia de 0.4 mm se utilizaron para perforar túneles óseos con agujas de Kirschner.

Se realizó un TC preoperatorio de cada rodilla utilizando un sistema Discovery PET/CT 690 (GE Healthcare, EE. UU.). Las imágenes fueron postprocesadas a un archivo STL, y se realizó una segmentación específica de la región de interés con Materialise Mimics 21.0. Los archivos de STL se transfirieron al software de diseño 3-matic para realizar la planificación quirúrgica y el diseño de las guías quirúrgicas. Para este propósito, se identificaron primero las inserciones anatómicas femorales del ligamento colateral lateral (LCL) y el tendón poplíteo (PT) en el lado lateral y el ligamento colateral medial (MCL) y el ligamento oblicuo posterior (POL) en el lado medial. Luego, se planificaron cuatro túneles óseos para cada rodilla, comenzando desde las inserciones anatómicas del LCL, PT, MCL y POL, aplicando diferentes direcciones. Se diseñaron dos guías quirúrgicas personalizadas para cada rodilla para reproducir los túneles planificados durante la cirugía: la primera para el LCL y PT y la segunda para el MCL y POL. La dirección de los túneles era variable. Los criterios de diseño a seguir en todos los casos fueron los siguientes: (1) sin coalescencia de los túneles planificados, (2) sin invasión

intraarticular a nivel femorotibial y (3) sin invasión de la troclea femoral. Esto nos permitió analizar el grado de precisión de la técnica en diferentes escenarios quirúrgicos.

En resumen, este estudio resalta la utilidad de las guías quirúrgicas impresas en 3D para mejorar la precisión en cirugías de rodilla, evitando complicaciones intra y postoperatorias. Aunque se reconocen algunas limitaciones, como la falta de evaluación de tejidos blandos y la necesidad de más investigaciones, esta tecnología muestra un gran potencial en el campo de la cirugía ortopédica.



Figura 13: Vistas coronal, lateral, axial y medial de planificación quirúrgica incluyendo instrumentación específica del paciente (PSI) impresa en 3D en la segunda imagen para su posterior uso intraoperatorio en la última imagen.⁵²

4 Discusión

La impresión en 3D se ha estado utilizando de manera creciente en diversos campos, incluyendo la cirugía ortopédica, y es relevante en la creación de biomodelos, herramientas quirúrgicas (como guías y plantillas), implantes y prótesis. Los modelos anatómicos también pueden facilitar la comunicación entre el equipo médico y el paciente, así como con sus familiares, proporcionando información sobre el tipo de tratamiento quirúrgico, promoviendo una mejor comprensión de la situación clínica y las posibles complicaciones, así como una mayor adherencia al tratamiento, lo que contribuye a mejorar la relación médico-paciente.

Antes de la creación de los sistemas de almacenamiento y comunicación de imágenes médicas (PACS), las tomografías computarizadas (TC) y las resonancias magnéticas (RM) se imprimían en película, con la pérdida de información valiosa en el proceso. El PACS cambió la forma de analizar las imágenes, proporcionando otra dimensión a su interpretación, ya que permite la visualización dinámica del objeto en 3D desde varios ángulos. La reconstrucción volumétrica de la estructura estudiada se puede exportar a software CAD para su modelado y representación, lo que permite imprimir el objeto.⁴⁹

El trabajo presenta un total de 31 aplicaciones, poniendo énfasis en las más novedosas publicadas en los dos últimos años. Se destaca la limitada evidencia en comparación con las técnicas convencionales en las diversas aplicaciones de la impresión 3D. En algunas aplicaciones específicas (incluyendo las publicadas con anterioridad a 2022), se observó una disminución en el tiempo quirúrgico, el sangrado, la incidencia de infecciones la exposición a radiación y mayor precisión. Por lo tanto, sugiero que la realización de estudios prospectivos en el futuro podría proporcionar una mayor base de evidencia para las ventajas de estas técnicas.

Con la creciente complejidad de la cirugía y la toma de decisiones quirúrgicas, esta tecnología ha surgido como una herramienta con el potencial y la conveniencia para tener un gran impacto en el campo de la cirugía. Las principales aplicaciones incluyen: planificación preoperatoria; implantes 3D; instrumentación específica para pacientes en 3D PSI (printed patient specific instrument). La planificación preoperatoria permite a los cirujanos visualizar estructuras anatómicas relevantes y ayuda a simular cirugías complejas, los implantes 3D se pueden utilizar para la sustitución directa de grandes defectos después de la resección de tumores y para ayudar en la reconstrucción en cirugías de preservación de miembros, y el uso intraoperatorio de PSI se puede utilizar

en gran medida para una colocación más precisa de los implantes o lugares de osteotomía, especialmente en presencia de anatomía anormal y deformidades.⁵⁰

Dado lo novedoso del uso de esta tecnología, la falta de práctica puede estar contribuyendo al aumento del tiempo operatorio.⁵³ No existen estudios que examinen el cambio en el tiempo quirúrgico después de años de práctica utilizando esta tecnología.

Para finalizar, cabe destacar el escaso uso de estas novedosas técnicas en los hospitales que son de gran utilidad ya que nos permiten realizar la cirugía de forma personalizada y precisa para cada paciente eliminando así los posibles errores al calcular los puntos anatómicos de cada caso, debido al desconocimiento de estas.

5 Conclusiones

Existe un vasto espectro de utilidades de la impresión 3D en la cirugía ortopédica y en la traumatología, siendo su límite determinado por la regulación específica de cada ámbito y la creatividad del cirujano o ingeniero involucrado. Sin embargo, es evidente la limitada cantidad de evidencia objetiva disponible en la revisión sistemática con respecto a estas indicaciones. Por lo tanto, resulta de gran importancia realizar estudios prospectivos y aleatorizados en el futuro para definir con mayor precisión las ventajas de la impresión 3D en las diversas aplicaciones médicas.

Una mayor divulgación de estas técnicas permitirá una más fácil adopción por nuestros cirujanos.

6 Agradecimientos

La realización de este trabajo de fin de grado supone la culminación de una larga etapa que me gustaría terminar agradeciendo en primer lugar a mi familia, especialmente a mis padres por su apoyo incondicional, especialmente en los momentos más complicados ellos siempre estuvieron ahí, a mi pareja que siempre ha sido una inspiración para seguir superándome y por último a mis amigos y compañeros por esta maravilloso camino que recorrimos y hoy llega a su fin.

A mis tutores, los Dres. Aguado y Cepeda y en general a todos aquellos que durante este tiempo me han ayudado a que este proyecto sea hoy una realidad, gracias por confiar en mí, este logro es en parte vuestro también.

7 Bibliografía

1. Wang C, Huang W, Zhou Y, et al. 3D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Bioact Mater* 2020;5(1):82–91.
2. Whitaker M. The history of 3D printing in healthcare. *Bull R Coll Surg Engl* 2014;96(7):228–9.
3. Ejnisman L, Gobbato B, de França Camargo AF, Zancul E. Three-Dimensional Printing in Orthopedics: from the Basics to Surgical Applications. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2021;14(1):1–8.
4. Chen SA, Ong CS, Hibino N, Baschat AA, Garcia JR, Miller JL. 3D printing of fetal heart using 3D ultrasound imaging data. *Ultrasound Obstet Gynecol Off J Int Soc Ultrasound Obstet Gynecol* 2018;52(6):808–9.
5. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R. Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: current applications and legal issues for a personalized medicine. *Rev Espanola Cirugia Ortop Traumatol Engl Ed* 2021;65(2):138–51.
6. Marro A, Bandukwala T, Mak W. Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications. *Curr Probl Diagn Radiol* 2016;45(1):2–9.
7. International Organization for Standardization. ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Geneva: ISO; 2021.
8. Pagac M, Hajnys J, Ma Q-P, et al. A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers* 2021;13(4):598.
9. Vyavahare S, Teraiya S, Panghal D, Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyp J* 2020;26(1):176–201.
10. Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater* 2021;122:26–49.
11. Al-Rubaiai M, Pinto T, Qian C, Tan X. Soft Actuators with Stiffness and Shape Modulation Using 3D-Printed Conductive Polylactic Acid Material. *Soft Robot* 2019;6(3):318–32.
12. Liang J, Guo H, Guo J, et al. Short-term clinical effect of 3D printing techniques on the correction of complex malformations. *Orthopade* 2019;48(10):862–7.
13. Shi J, Lv W, Wang Y, et al. Three dimensional patient-specific printed cutting guides for closing-wedge distal femoral osteotomy. *Int Orthop* 2019;43(3):619–24.
14. Arnal-Burró J, Pérez-Mañanes R, Gallo-Del-Valle E, Igualada-Blazquez C, Cuervas-Mons M, Vaquero-Martín J. Three dimensional-printed patient-specific cutting guides for femoral varization osteotomy: Do it yourself. *The Knee* 2017;24(6):1359–68.

15. Yang JC-S, Chen C-F, Luo C-A, et al. Clinical Experience Using a 3D-Printed Patient-Specific Instrument for Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy. *BioMed Res Int* 2018;2018:9246529.
16. Pérez-Mañanes R, Burró JA, Manaute JR, Rodríguez FC, Martín JV. 3D Surgical Printing Cutting Guides for Open-Wedge High Tibial Osteotomy: Do It Yourself. *J Knee Surg* 2016;29(8):690–5.
17. Kim H-J, Park J, Shin J-Y, Park I-H, Park K-H, Kyung H-S. More accurate correction can be obtained using a three-dimensional printed model in open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 2018;26(11):3452–8.
18. Kim H-J, Park J, Park K-H, et al. Evaluation of Accuracy of a Three-Dimensional Printed Model in Open-Wedge High Tibial Osteotomy. *J Knee Surg* 2019;32(9):841–6.
19. Jeong SH, Samuel LT, Acuña AJ, Kamath AF. Patient-specific high tibial osteotomy for varus malalignment: 3D-printed plating technique and review of the literature. *Eur J Orthop Surg Traumatol Orthop Traumatol* 2022;32(5):845–55.
20. Duan D, Cao Y, Li R, et al. Opening Wedge High Tibial Osteotomy with Combined Use of Patient-Specific 3D-Printed Plates and Taylor Spatial Frame for the Treatment of Knee Osteoarthritis. *Pain Res Manag* 2021;2021:8609921.
21. Gómez-Palomo JM, Meschian-Coretti S, Esteban-Castillo JL, García-Vera JJ, Montañez-Heredia E. Double Level Osteotomy Assisted by 3D Printing Technology in a Patient with Blount Disease: A Case Report. *JBS Case Connect* 2020;10(2):e0477.
22. Sabatini L, Nicolaci G, Giachino M, Risitano S, Pautasso A, Massè A. 3D-Printed Surgical Guiding System for Double Derotational Osteotomy in Congenital Torsional Limb Deformity: A Case Report. *JBS Case Connect* 2021;11(1):e20.00468.
23. Wu W-Y, Xu W-G, Wan C-Y, Fang M. Preoperative Plan with 3D Printing in Internal and External Fixation for Complex Tibial Plateau Fractures. *Orthop Surg* 2019;11(4):560–8.
24. Shen S, Wang P, Li X, Han X, Tan H. Pre-operative simulation using a three-dimensional printing model for surgical treatment of old and complex tibial plateau fractures. *Sci Rep* 2020;10(1):6044.
25. Ozturk AM, Ozer MA, Suer O, et al. Patient-Specific Three-Dimensional Model for a Safe Surgical Pathway in Sacral Chondrosarcoma. *Indian J Surg Oncol* 2019;10(1):107–14.
26. Nie W, Gu F, Wang Z, Wu R, Yue Y, Shao A. Preliminary application of three-dimension printing technology in surgical management of bicondylar tibial plateau fractures. *Injury* 2019;50(2):476–83.
27. Dong X-P, Zhang Y-W, Wang Z, Deng L. Clinical application of three-dimensional printing assisted percutaneous guide plate in minimally invasive reduction and internal fixation of tibial plateau fracture. *China: Asian journal of surgery*; 2020.
28. Yang P, Du D, Zhou Z, et al. 3D printing-assisted osteotomy treatment for the malunion of lateral tibial plateau fracture. *Injury* 2016;47(12):2816–21.

29. Horas K, Hoffmann R, Faulenbach M, Heinz SM, Langheinrich A, Schweigkofler U. Advances in the Preoperative Planning of Revision Trauma Surgery Using 3D Printing Technology. *J Orthop Trauma* 2020;34(5):e181–6.
30. Hsu C-P, Lin S-C, Nazir A, Wu C-T, Chang S-S, Chan Y-S. Design and application of personalized surgical guides to treat complex tibial plateau malunion. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2021;24(4):419–28.
31. Chan P-K, Fang C, Fang E, Leung M, Yan C-H, Chiu K-Y. Three-Dimensional Printing and Computer Navigation for Correction of Multiple Deformities in Osteogenesis Imperfecta: A Case Report. *JBSJ Case Connect* 2021;11(2).
32. Sys G, Eykens H, Lenaerts G, Shumelinsky F, Robbrecht C, Poffyn B. Accuracy assessment of surgical planning and three-dimensional-printed patient-specific guides for orthopaedic osteotomies. *Proc Inst Mech Eng [H]* 2017;231(6):499–508.
33. Fritz B, Fucentese SF, Zimmermann SM, Tscholl PM, Sutter R, Pfirrmann CWA. 3D-printed anatomic models of the knee for evaluation of patellofemoral dysplasia in comparison to standard radiographs and computed tomography. *Eur J Radiol* 2020;127:109011.
34. Long Z-S, Gong F-P, Dong X-P, Li J-T. Clinical application of multiple 3D-printed guide plates for precise reduction and fixation of comminuted patellar fractures. *J Int Med Res* 2020;48(11):300060520972088.
35. Vaish A, Rabari Y, Vaish R, Vaishya R. Correction of a Severe Flexion Knee Deformity Using 3D Printing. *Indian J Orthop* 2020;54(2):228–9.
36. Gu F, Li L, Zhang H, et al. Three-Dimensional-Printed Guiding Template for Unicompartmental Knee Arthroplasty. *BioMed Res Int* 2020;2020:7019794.
37. Okoroha KR, Evans TJ, Stephens JP, Makhni EC, Moutzouros V. Three-dimensional printing improves osteochondral allograft placement in complex cases. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA* 2018;26(12):3601–5.
38. Mackey C, Wake N, Aldahamsheh O, Yang R, Hoang B, Geller DS. A Case Report Describing Pre-operative Contouring of an Orthopedic Implant using a 3D-Printed Patient-specific Model. *Journal of orthopaedic case reports*; 2021.
39. Corona PS, Vicente M, Tetsworth K, Glatt V. Preliminary results using patient-specific 3d printed models to improve preoperative planning for correction of post-traumatic tibial deformities with circular frames. *Injury* 2018;49 Suppl 2:S51–9.
40. Kong L, Mei J, Ge W, et al. Application of 3D Printing-Assisted Articulating Spacer in Two-Stage Revision Surgery for Periprosthetic Infection after Total Knee Arthroplasty: A Retrospective Observational Study. *BioMed Res Int* 2021;2021:3948638.
41. Kong L, Mei J, Ge W, et al. Corrigendum to “Application of 3D Printing-Assisted Articulating Spacer in Two-Stage Revision Surgery for Periprosthetic Infection after Total Knee Arthroplasty: A Retrospective Observational Study”. *BioMed Res Int* 2021;2021:9792626.
42. Zhong H, Ma S, Cen Y, et al. A case report of early unilateral external fixation by 3D printing and computer-assisted and secondary bone graft internal fixation in pseudarthrosis of the tibia surgery. *J Int Med Res* 2020;48(9):030006052094551.

43. Wu J, Zhou P, Zhang Y, Xiao L, Li L, Xu S. A new technology using a customized 3D printed fixator to assist fracture reduction and fixation: Technical note. *Int J Med Robot Comput Assist Surg MRCAS* 2021;17(4):e2270.
44. Qiao F, Li D, Jin Z, Hao D, Liao Y, Gong S. A novel combination of computer-assisted reduction technique and three dimensional printed patient-specific external fixator for treatment of tibial fractures. *Int Orthop* 2016;40(4):835–41.
45. Qiao F, Li D, Jin Z, et al. Application of 3D printed customized external fixator in fracture reduction. *Injury* 2015;46(6):1150–5.
46. Ignacio Aguado Maestro. Impresión 3D en Cirugía Ortopédica y Traumatología. Revisión sistemática de su aplicabilidad y estudio de los métodos de esterilización más adecuados para la utilización en quirófanos de las impresiones realizadas en el hospital. 2023;
47. PubMed [Internet]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>
48. Zhang W, Mou L, Zhang S, et al. 3D-printed individualized navigation template versus the fluoroscopic guide to defining the femoral tunnel for medial patellofemoral ligament reconstruction: A retrospective study. *Medicine (Baltimore)* 2023;102(4):e32729.
49. Mendonça CJA, Gasoto SC, Belo IM, Setti JAP, Soni JF, Júnior BS. Aplicação da tecnologia de impressão 3D no tratamento da pseudartrose da fratura de Hoffa*. *Rev Bras Ortop* 2023;58(02):303–12.
50. Li H, Gao W, Zhang G. 3D-printed-guider-assisted fixation of cruciate-ligament tibial avulsion fracture: A new attemp. *Asian J Surg* 2022;45(8):1571–2.
51. Beitler BG, Yu KE, Wang A, et al. Three-Dimensional Printing of the Patellofemoral Joints of Patellar Instability Patients. *Arthrosc Tech* 2023;12(3):e401–6.
52. Fernández-Poch N, Fillat-Gomà F, Martínez-Carreres L, et al. Three-dimensional-printed patient-specific instrumentation is an accurate tool to reproduce femoral bone tunnels in multiple-ligament knee injuries. *Int Orthop* 2023;47(5):1213–9.
53. Yavari E, Moosa S, Cohen D, et al. Technology-assisted anterior cruciate ligament reconstruction improves tunnel placement but leads to no change in clinical outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc [Internet]* 2023 [cited 2023 Aug 9]; Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s00167-023-07481-1>



REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA CIRUGÍA ORTOPÉDICA DE RODILLA



Autor: Javier Areños García
Tutor: Ignacio Aguado Maestro
Cotutor: Ignacio García Cepeda

1. Introducción

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, se refiere al proceso de construcción de objetos a partir de modelos digitales en 3D obtenidos gracias a pruebas de imagen (TAC, RNM...), mediante la deposición sucesiva de capas de diferentes materiales.¹ Las posibilidades casi ilimitadas de la impresión 3D han ampliado el espectro de aplicaciones facilitando el procedimiento quirúrgico y aumentando su precisión.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo tiene como fin la realización de una revisión sistemática de todas las aplicaciones existentes en el momento actual de la tecnología de fabricación 3D intrahospitalaria en la cirugía ortopédica y traumatología centradas en la articulación de la rodilla.



3. Materiales y método

Se realiza una búsqueda en PubMed con los siguientes términos:

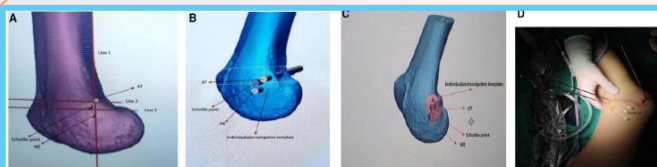
3D printing AND (orthopedics OR traumatology) NOT tissue engineering NOT scaffold NOT in vitro

Criterios de inclusión: texto completo en castellano o inglés y relacionados con la rodilla.

Criterios de exclusión: publicaciones relacionadas con estudios experimentales, fuera de las posibilidades intrahospitalarias o previos al año 2022.

De los **558** artículos obtenidos con los parámetros de búsqueda solo **6** cumplieron todos los criterios.

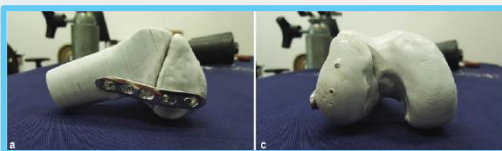
4. Resultados



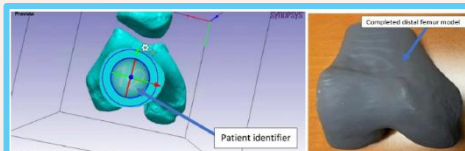
Plantilla de navegación individualizada impresa en 3D para la definición del túnel femoral para la reconstrucción del ligamento patelofemoral medial.²



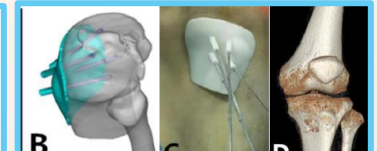
Instrumentación específica para el paciente impresa en 3D para la reproducción de túneles óseos femorales en lesiones multiligamentosas de rodilla.³



Planificación de la osteosíntesis de las pseudoartrosis de fracturas de Hoffa mediante modelos impresos en 3D.⁴



Impresión 3D de la articulación femoropatelar en pacientes con inestabilidad rotuliana.⁵



Osteosíntesis asistida por guía impresa en 3D de fractura por avulsión del LCA.⁶

5. Conclusiones

1. Existe un amplio número de aplicaciones quirúrgicas de la impresión 3D.
2. Falta de estudios prospectivos y de formación a profesionales del sector.
3. Suponen una gran ventaja para la planificación quirúrgica.
4. Disminuyen las complicaciones intra y extra operatorias.

6. Bibliografía

1. Wang C, Huang W, Zhou Y, et al. 3D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Bioact Mater* 2020;5(1):82-91.
2. Zhang W, Mou L, Zhang S, et al. 3D-printed individualized navigation template versus the fluoroscopic guide to defining the femoral tunnel for medial patellofemoral ligament reconstruction: A retrospective study. *Medicine (Baltimore)* 2023;102(4):e32729.
3. Fernández-Poch N, Fillat-Gomà F, Martínez-Carreres L, et al. Three-dimensional-printed patient-specific instrumentation is an accurate tool to reproduce femoral bone tunnels in multiple-ligament knee injuries. *Int Orthop* 2023;47(5):1213-9.
4. Mendonça CJA, Gasoto SC, Belo IM, Setti JAP, Soni JF, Júnior BS. Aplicação da tecnologia de impressão 3D no tratamento da pseudoartrose da fratura de Hoffa*. *Rev Bras Ortop* 2023;58(02):303-12.
5. Beitter BG, Yu KE, Wang A, et al. Three-Dimensional Printing of the Patellofemoral Joints of Patellar Instability Patients. *Arthrosc Tech* 2023;12(3):e401-6.
6. Li H, Gao W, Zhang G. 3D-printed-guider-assisted fixation of cruciate-ligament tibial avulsion fracture: A new attempt. *Asian J Surg* 2022;45(8):1571-2.