



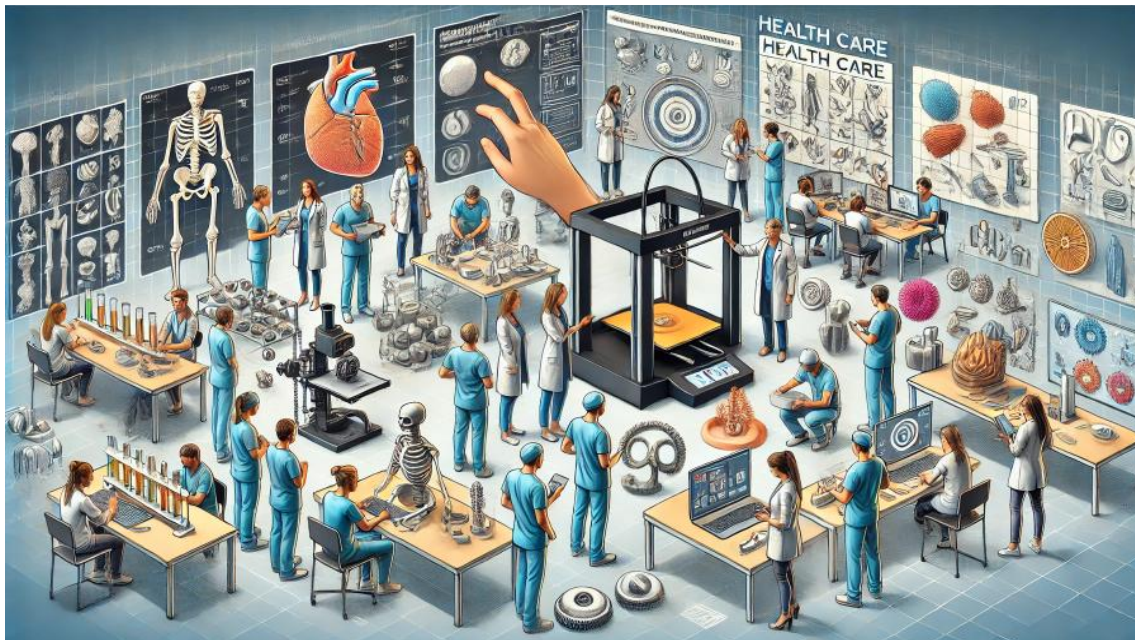
Co-funded by
the European Union



TECH-HEALTH Toolkit

Tecnologías innovadoras de impresión 3D para profesionales de la salud

Una guía para la educación y formación técnica



Bonifraterskie
Centrum Medyczne



Co-funded by
the European Union

This work is licensed under CC BY-NC-SA 4.0

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.
KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).
Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362

Co-Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Foundation for the Development of the Education System (FRSE). Neither the European Union nor FRSE can be held responsible for them.



Fundación
San Juan de Dios
Madrid

*Gemma Escobar Aguilar
María Simarro González
Manuel Lara Romero
Pedro Chana Valero*



TABLA DE CONTENIDOS

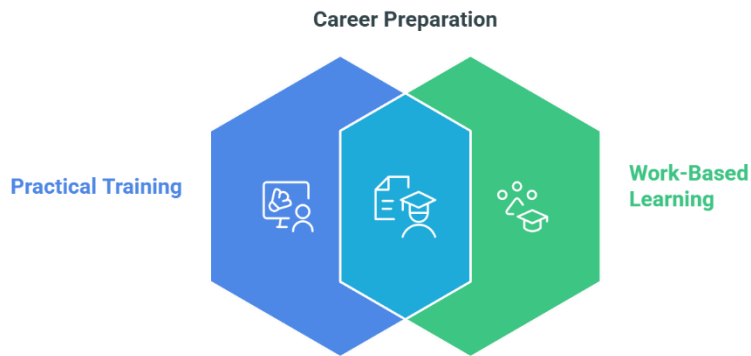
- 1. Introducción**
 - 1.1 Objetivo del documento
 - 1.2 Por qué la impresión 3D está transformando la asistencia sanitaria
- 2. Fundamentos tecnológicos: principios y ventajas clave**
 - 2.1 Fundamentos de la impresión 3D
 - 2.2 Materiales
 - 2.3 Ventajas clave en el sector sanitario
- 3. Aplicaciones clínicas de la impresión 3D**
 - 3.1 Prótesis y ortesis
 - 3.2 Modelos anatómicos y guías quirúrgicas
 - 3.3 Implantes personalizados
 - 3.4 Dispositivos médicos personalizados
 - 3.5 Fabricación descentralizada y coste-efectiva
 - 3.6 Aplicaciones en otras especialidades médicas
- 4. Innovaciones y tendencias futuras: bioimpresión y medicina regenerativa**
 - 4.1 Ingeniería de tejidos y órganos
 - 4.2 Modelización de enfermedades y ensayo de fármacos
 - 4.3 Medicina regenerativa e ingeniería de andamiajes
 - 4.4 Terapias inteligentes y micro-robótica
- 5. Implicaciones formativas y educativas**
- 6. Retos y consideraciones**
 - 6.1 Cumplimiento normativo
 - 6.2 Consideraciones éticas
 - 6.3 Sostenibilidad medioambiental
 - 6.4 Accesibilidad económica
 - 6.5 Escalabilidad
- 7. Mapeo de los Hubs europeos de innovación sanitaria.**
- 8. Bibliografía.**



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo de este documento

La educación y formación técnica proporcionan a las personas las habilidades prácticas, los conocimientos y las competencias necesarias para desempeñarse con éxito en oficios o profesiones específicas, centrándose en la **formación práctica** y el aprendizaje basado en el trabajo, y combinando a menudo la **enseñanza en el aula con experiencias prácticas en entornos laborales reales**.



Principales objetivos

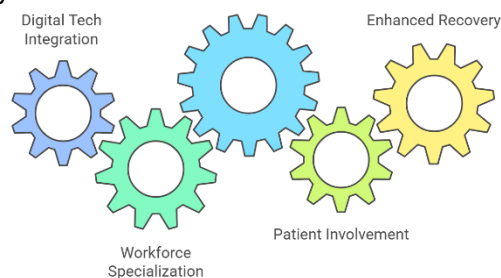
Building Skills
Align competencies to the evolving jobs and the digital transition.

Innovative Methodologies
Encourage new methods in 3D printing for healthcare.

Good Practices Toolkit
Create a resource of best practices for 3D printing and participatory models in healthcare.

Población diana

El creciente papel de las tecnologías digitales en el ámbito médico requiere un mayor nivel de especialización entre los profesionales sanitarios. Los grupos objetivo indirectos son los pacientes en hospitales y centros de atención sanitaria.



1.2 Por qué la impresión 3D está transformando la asistencia sanitaria

1.2.1 El potencial transformador de la impresión 3D

La impresión 3D, o fabricación aditiva, está redefiniendo la atención sanitaria moderna al ofrecer niveles sin precedentes de precisión, personalización y eficiencia en el desarrollo de soluciones médicas. Esta tecnología transformadora permite la fabricación rápida de estructuras complejas a partir de diseños digitales, facilitando la creación de dispositivos médicos personalizados, prótesis, implantes e incluso tejidos bioingenierizados (Figura 1). La adaptabilidad de la impresión 3D ha revolucionado la planificación quirúrgica, la educación médica y la medicina regenerativa, convirtiéndose en una herramienta indispensable en la atención sanitaria contemporánea (1–5,11). La capacidad de generar soluciones específicas para cada paciente ha impulsado su adopción generalizada en el ámbito médico, permitiendo abordar desafíos clínicos complejos con una precisión sin precedentes (5–10).



Figura 1: Beneficios de la impresión 3D en CCSS

Una ventaja significativa de la impresión 3D en el ámbito sanitario es su capacidad para adaptarse a las características anatómicas y fisiológicas específicas de cada paciente, lo que supone un cambio fundamental en la medicina personalizada (1,6,11). Este enfoque individualizado garantiza que las prótesis, implantes y modelos médicos ofrezcan un ajuste óptimo, mejorando tanto la funcionalidad como el confort del paciente. Además, la impresión 3D facilita el prototipado rápido y las pruebas iterativas, permitiendo a investigadores y clínicos perfeccionar los diseños en tiempo real y acelerar el proceso de innovación (9,11–14).

A medida que continúan los avances tecnológicos, se espera que la impresión (3D) desempeñe un papel aún más relevante en la atención sanitaria. La integración de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático en los flujos de trabajo de impresión 3D probablemente mejorará la automatización, la optimización de materiales y la modelización predictiva, perfeccionando aún



más las soluciones médicas centradas en el paciente. Con el avance de la investigación y la colaboración entre ingenieros, científicos biomédicos y profesionales sanitarios, la adopción de la impresión 3D en medicina está destinada a acelerarse, revolucionando tanto las metodologías de tratamiento como los paradigmas de atención al paciente (9,11,11,12,14).

Otro aspecto transformador es la eficiencia en costes. Los métodos tradicionales de fabricación de dispositivos médicos personalizados implican moldes costosos y largos tiempos de producción, lo que limita su accesibilidad. En contraste, la impresión 3D reduce el desperdicio de materiales y permite una producción localizada, disminuyendo significativamente los costes globales. La rapidez de fabricación aumenta aún más su atractivo, ya que modelos anatómicos complejos y herramientas quirúrgicas pueden producirse en una fracción del tiempo requerido por las técnicas convencionales (9,11,11,12,14). Esta eficiencia resulta especialmente crucial en escenarios médicos de emergencia, donde el acceso oportuno a dispositivos personalizados puede mejorar de forma notable los resultados clínicos.

La capacidad de producir soluciones sanitarias personalizadas bajo demanda constituye otra ventaja clave de la impresión 3D. A diferencia de los métodos tradicionales, que suelen requerir largos plazos de producción y moldes costosos, la fabricación aditiva agiliza el proceso productivo, permitiendo el prototipado rápido y modificaciones en tiempo real. Esta flexibilidad permite a los profesionales sanitarios desarrollar tratamientos adaptados a las necesidades anatómicas y fisiológicas específicas de cada paciente, mejorando los resultados y aumentando la satisfacción del paciente (11,12,14,15).

1.2.3 El papel de la fabricación digital en la medicina moderna

La fabricación digital, que abarca la impresión 3D y otras técnicas avanzadas de manufactura, está redefiniendo la medicina moderna al introducir precisión, flexibilidad e innovación en la atención al paciente. A través de la integración de flujos de trabajo digitales, los profesionales sanitarios pueden diseñar, simular y producir estructuras anatómicas complejas, implantes personalizados e incluso tejidos bioingenierizados con una precisión sin precedentes (5,6,8).

Una de las contribuciones más significativas de la fabricación digital a la medicina es su capacidad para mejorar la planificación quirúrgica. Los cirujanos pueden utilizar modelos impresos en 3D de anatomías específicas de pacientes para ensayar procedimientos antes de realizarlos, reduciendo así los riesgos y mejorando los resultados. Esta aplicación resulta especialmente beneficiosa en cirugías complejas, como la neurocirugía, la ortopedia y los procedimientos reconstructivos, donde la alta precisión es esencial (6,16,17).



Además, la fabricación digital permite la producción rápida de prótesis y dispositivos ortésicos personalizados. Los procesos de fabricación tradicionales de estos dispositivos suelen ser costosos y requieren mucho tiempo, mientras que la fabricación digital posibilita la creación de soluciones adaptadas en un plazo significativamente menor. Esto es especialmente ventajoso para pacientes pediátricos y traumatológicos, que requieren ajustes frecuentes en sus dispositivos a medida que crecen o se recuperan (5,6,8).

Otra aplicación innovadora de la fabricación digital es la bio-impresión, que está revolucionando la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa. Actualmente, los científicos son capaces de fabricar andamiajes tisulares, organoides e incluso tejidos humanos funcionales mediante el uso de bio-tintas especializadas. Estos avances tienen un enorme potencial para el desarrollo de fármacos, la modelización de enfermedades y, en última instancia, la creación de órganos cultivados en laboratorio para trasplantes (5,6,8).

Asimismo, la fabricación digital impulsa la innovación en el desarrollo de dispositivos médicos inteligentes. Monitores de salud portátiles, sistemas de liberación de fármacos e implantes personalizados pueden adaptarse a las necesidades individuales de cada paciente, mejorando la eficacia del tratamiento y la adherencia terapéutica. La capacidad de integrar componentes electrónicos en estructuras impresas en 3D amplía aún más el alcance de sus aplicaciones médicas, haciendo posible la monitorización en tiempo real y los ajustes terapéuticos automatizados (5,6,8).

A medida que las tecnologías de fabricación digital continúan evolucionando, contribuirán a reducir la brecha entre la investigación médica y la práctica clínica. La estandarización de la formación en fabricación digital dentro de la educación médica y los programas de formación profesional es fundamental para garantizar que los profesionales sanitarios adquieran las competencias necesarias para aprovechar eficazmente estas innovaciones. Fomentando la colaboración interdisciplinar entre ingenieros, profesionales sanitarios y científicos de materiales, la fabricación digital seguirá configurando el futuro de la medicina moderna y mejorando los resultados en salud a nivel global.

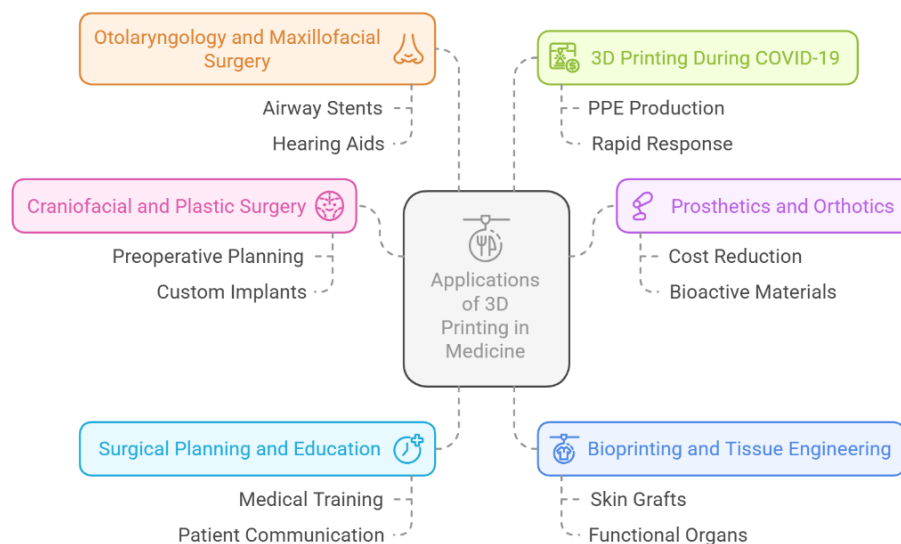


Figura 2: Aplicaciones de la impresión 3D en medicina

2. Fundamentos tecnológicos: principios y ventajas clave

La impresión tridimensional (3D) es una tecnología de fabricación aditiva que construye objetos físicos mediante la deposición de materiales en capas sucesivas a partir de un diseño digital. A diferencia de los métodos de fabricación sustractiva, que eliminan material de un bloque sólido, la fabricación aditiva genera geometrías mediante la adición controlada de material (18–21).

El proceso comienza generalmente con un modelo digital tridimensional creado mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD) o generado a partir de datos de imagen médica, como resonancia magnética (RM) o tomografía computarizada (TC). Estos modelos digitales sirven como base para la fabricación (19).

2.1 Principales técnicas de impresión 3D

Actualmente, se emplean diversas tecnologías de fabricación aditiva en contextos técnicos y médicos:

- **Impresión basada en extrusión:** Material termoplástico o de base biológica se extruye a través de una boquilla y se deposita capa por capa.
- **Sinterización:** Material en polvo o líquido se fusiona selectivamente mediante una fuente de alta energía, como un láser.
- **Estereolitografía (SLA):** La luz láser o ultravioleta solidifica resinas líquidas para crear estructuras de alta resolución.
- **Modelado por deposición fundida (FDM):** Un filamento termoplástico se funde y se deposita con precisión capa a capa para construir objetos.

Entre estas, el **modelado por deposición fundida (FDM)** es una de las tecnologías más ampliamente utilizadas en el ámbito sanitario.



2.2 Modelado por deposición fundida (FDM): principios y arquitectura funcional (18,20,21)

El modelado por deposición fundida (FDM) se utiliza ampliamente en el ámbito sanitario para la producción de modelos anatómicos, ortesis, férulas, guías quirúrgicas y simuladores educativos. Este proceso se basa en la extrusión controlada de un filamento termoplástico que se calienta hasta alcanzar un estado semi-fundido y se deposita capa por capa, formando un objeto tridimensional a partir de un modelo digital. Cada nueva capa depositada se adhiere térmicamente a la anterior, creando una estructura cohesionada.

La comprensión de la arquitectura mecánica y térmica de los sistemas FDM es fundamental para garantizar la precisión dimensional, la integridad estructural y la reproducibilidad, especialmente en aplicaciones clínicas.

2.2.1 Sistema de extrusión

El sistema de extrusión gestiona el transporte, la fusión y la deposición del material. Un filamento termoplástico continuo (p. ej., PLA, ABS, PETG, TPU) es impulsado por un motor extrusor hacia un *hot end* regulado térmicamente, donde se funde y se expulsa a través de una boquilla calibrada (habitualmente de 0,4 mm de diámetro).

El diámetro de la boquilla determina el ancho de línea (resolución en X–Y), la altura máxima de capa, la estabilidad de la extrusión y la velocidad de impresión. Para garantizar una adecuada adhesión entre capas, la altura de capa no debería superar, por lo general, el 70–80% del diámetro de la boquilla.

Se emplean habitualmente dos configuraciones mecánicas:

- **Direct Drive:** el motor está montado directamente sobre el cabezal de impresión. Esta configuración ofrece un control preciso de la extrusión y la retracción, y resulta especialmente ventajosa para polímeros flexibles.
- **Bowden:** el motor está montado de forma remota y el filamento se conduce a través de un tubo Bowden. Esto reduce la masa en movimiento y puede aumentar la velocidad de impresión, pero requiere una calibración precisa para mantener la consistencia de la extrusión.



2.2.2 Cinemática y precisión mecánica

Las impresoras FDM operan dentro de un sistema de coordenadas cartesianas (X: lateral, Y: anteroposterior, Z: apilamiento vertical). Los motores paso a paso accionan correas, poleas y husillos para posicionar el cabezal de impresión mediante movimientos discretos e incrementales. La mayoría de los sistemas utilizan control en lazo abierto, lo que significa que las posiciones comandadas se ejecutan sin retroalimentación posicional en tiempo real.

Las irregularidades mecánicas, como correas flojas o deslizamientos en las poleas, pueden provocar errores acumulativos (por ejemplo, desplazamientos de capa), comprometiendo la precisión dimensional. Esto resulta especialmente crítico en aplicaciones clínicas, como guías quirúrgicas o interfaces específicas para el paciente.

Por ello, la calibración periódica y el mantenimiento mecánico son medidas esenciales de control de calidad.

2.2.3. Gestión térmica

Los termoplásticos se expanden durante el calentamiento y se contraen durante el enfriamiento. Una adecuada regulación de la temperatura es fundamental para garantizar la integridad estructural y la estabilidad dimensional.

Una base de impresión calefactada mejora la adhesión de la primera capa, reduce los gradientes térmicos y minimiza las deformaciones (*warping*). Los rangos de temperatura habituales incluyen:

- **PLA:** aproximadamente 50–60 °C
- **ABS:** hasta 100–120 °C

Los sistemas de refrigeración activa regulan la solidificación de las capas depositadas y previenen la acumulación de calor (*heat creep*) en el *hot end*. Un equilibrio adecuado entre la temperatura de extrusión y la velocidad de enfriamiento optimiza la adhesión entre capas, el acabado superficial y la estabilidad dimensional.



2.3 Materiales en FDM y aplicaciones médicas (20)

La selección del material es un factor crítico que determina tanto el rendimiento mecánico como la idoneidad clínica.

- **Ácido poliláctico (PLA):** termoplástico altamente versátil utilizado no solo para prototipado estándar, sino también en contextos médicos como guías quirúrgicas, aplicaciones en cirugía ortopédica, matrices para regeneración tisular y recubrimientos para liberación controlada de fármacos.
- **ABS:** termoplástico resistente con mayor tolerancia a altas temperaturas.
- **PETG:** ofrece una mayor resistencia mecánica y estabilidad química.
- **TPU:** polímero flexible adecuado para interfaces blandas o componentes ortésicos.
- **PVA:** material soluble en agua utilizado habitualmente para estructuras de soporte complejas en impresión multimaterial.

La selección del material adecuado debe considerar las exigencias mecánicas, la biocompatibilidad, la resistencia estructural y la función clínica prevista.

Se puede consultar un resumen de las principales características de la impresión 3D FDM en el ámbito sanitario en la **Tabla I**.



Tabla I. Resumen de la impresión 3D FDM en el ámbito sanitario

Impresión 3D FDM en el ámbito sanitario	Principio básico	Componentes / Variables clave	Consideraciones técnicas	Relevancia clínica / práctica
Fundamentos de FDM	La fabricación aditiva construye objetos capa a capa a partir de un modelo digital	Modelos CAD, imágenes RM/TC, archivos STL	La calidad del modelo determina la precisión final	Permite soluciones específicas para el paciente y personalización anatómica
Técnicas de impresión 3D	Diferentes métodos de deposición de energía/material	Extrusión, sinterización, SLA, FDM	Resolución, compatibilidad de materiales, coste del equipo	La selección depende de las necesidades de precisión y del contexto de aplicación
Sistema de extrusión	El filamento termoplástico se funde y se deposita a través de una boquilla	Filamento (PLA, ABS, PETG, TPU), hot end, boquilla (p. ej., 0,4 mm), Direct Drive / Bowden	El diámetro de la boquilla determina la resolución y la altura de capa ($\leq 70-80\%$ del diámetro)	Determina la integridad estructural y la idoneidad para ortesis, guías y simuladores
Cinématica y control de movimiento	Movimiento controlado en coordenadas cartesianas	Ejes X-Y-Z, motores paso a paso, correas, husillos	Control en lazo abierto; desalineaciones mecánicas pueden causar desplazamientos de capa	Crítico para la precisión dimensional en guías quirúrgicas y dispositivos personalizados
Gestión térmica	El calentamiento y enfriamiento controlados garantizan la adhesión	Base calefactada (PLA: 50–60°C; ABS: 100–120°C), ventiladores de refrigeración	Equilibrio entre temperatura de extrusión y velocidad de enfriamiento	Previene deformaciones (warping) y garantiza la estabilidad estructural
Materiales en FDM	El rendimiento mecánico y biológico depende del material	PLA, ABS, PETG, TPU, PVA (soportes)	Resistencia, flexibilidad, tolerancia térmica, eliminación de soportes	Determina el comportamiento mecánico y la posible aplicación médica
Diseño digital y optimización	La geometría se crea o modifica antes de la fabricación	Software CAD, imágenes médicas, inspección de malla	La calidad superficial y la integridad del modelo son esenciales	Previene errores de impresión y mejora la precisión clínica
Laminado y generación de G-Code	El modelo digital se convierte en instrucciones para la máquina	Archivo STL, software slicer (p. ej., Cura), G-Code	La selección correcta de la impresora evita daños mecánicos	Garantiza una ejecución segura y precisa
Parametrización	Las características internas y externas del objeto se definen por software	Altura de capa, velocidad, densidad/patrón de relleno, grosor de pared	Compromiso entre resistencia, tiempo y calidad superficial	Permite ajustar la resistencia y el peso del dispositivo
Ejecución y fabricación	Construcción física capa a capa	Transferencia de G-Code, adhesión de la primera capa, skirt	La calibración y el mantenimiento son esenciales	Determina la reproducibilidad y fiabilidad
Postprocesado	Refinamiento final del objeto impreso	Eliminación de soportes, vapor de acetona, curado UV, pulido mecánico	Técnicas de acabado dependientes del material	Mejora la durabilidad, la estética y el rendimiento funcional

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.
KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).
Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362



2.4 Flujo de trabajo de la fabricación digital y la impresión 3D: desde el diseño técnico hasta la aplicación clínica (18,20)

La transformación de un concepto digital en un objeto físico de alta fidelidad implica un flujo de trabajo estructurado conocido como fabricación aditiva. Este proceso requiere la integración fluida de software y hardware especializados para garantizar la precisión, especialmente cuando se aplica en ámbitos técnicos o médicos.

2.4.1 Diseño digital y optimización del modelo

El flujo de trabajo comienza con la creación de un modelo tridimensional. Esto puede lograrse mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD), descargando archivos verificados de repositorios en línea como Thingiverse, o utilizando ingeniería inversa a partir de imágenes médicas como tomografías computarizadas (TC) o resonancias magnéticas (RM). El uso de herramientas CAD/CAM en esta fase es esencial, ya que permite modificar y optimizar la geometría del modelo antes de consumir cualquier material. El control de calidad es fundamental en esta etapa. Los modelos digitales deben ser inspeccionados en cuanto a facetas superficiales y calidad de la malla. Archivos digitales de baja calidad conducen a resultados físicos deficientes durante la impresión (11,19).

2.4.2 Exportación de archivos y procedimientos de laminado

Una vez finalizado el diseño, este se exporta como archivo STL. Este formato traduce la superficie del modelo en una malla simplificada, eliminando información adicional como el color o la textura. Posteriormente, el archivo STL se importa en un software de laminado (*slicing*), como Ultimaker Cura u Orca, que divide el modelo en capas horizontales y genera el código G (*G-Code*). Durante el proceso de laminado, debe seleccionarse el modelo específico de impresora (p. ej., Creality Ender 5). El uso de un G-Code destinado a una máquina diferente puede provocar daños mecánicos graves (22,23).

2.4.3 Selección de materiales y configuración del hardware

Antes de la impresión, es necesario asegurarse de que se ha seleccionado el material adecuado según los requisitos de la aplicación, que la impresora esté correctamente calibrada y que el tamaño de la boquilla configurado en el software coincida con el hardware físico. Esta alineación garantiza la consistencia en la extrusión y la precisión dimensional (24).



2.4.4 Parametrización técnica (24)

Las características internas y externas del objeto impreso vienen determinadas por varios parámetros clave:

1. **Altura de capa (resolución en eje Z) y velocidad de impresión:** equilibrio entre calidad superficial y tiempo de producción.
2. **Densidad y patrón de relleno:** el porcentaje y el patrón (p. ej., líneas para eficiencia, tri-hexagonal para resistencia estructural) determinan la resistencia y el peso.
3. **Grosor de pared:** influye en la resistencia a presiones externas y en la durabilidad global.

2.4.5 Ejecución y fabricación capa a capa

El G-Code se transfiere a la impresora (habitualmente mediante tarjeta de memoria) y el objeto se fabrica capa por capa. La correcta ejecución depende de una calibración y mantenimiento regulares, así como de una adecuada adhesión de la primera capa.

Técnicas como la impresión de un *skirt* (línea perimetral alrededor del objeto) ayudan a purgar el aire de la boquilla y asegurar un flujo de material constante antes de comenzar la deposición.

2.4.6 Postprocesado y acabado (21)

La fase final implica ajustes físicos para cumplir con las especificaciones técnicas y clínicas.

Dependiendo del material y la tecnología empleada, el postprocesado puede incluir:

- **Eliminación de soportes:** extracción manual de estructuras temporales.
- **Acabado superficial:** aplicación de vapor de acetona, curado ultravioleta o pulido mecánico para mejorar la durabilidad y la calidad estética.

Siguiendo este flujo de trabajo técnico estructurado —desde el diseño digital hasta el postprocesado— es posible producir soluciones personalizadas y coste-efectivas que cumplen con los altos estándares requeridos en aplicaciones industriales y clínicas. Una adecuada comprensión de los fundamentos tecnológicos, la arquitectura mecánica, las propiedades de los materiales y los parámetros del proceso es esencial para garantizar la seguridad, la precisión y la reproducibilidad en la fabricación aditiva aplicada al ámbito sanitario.

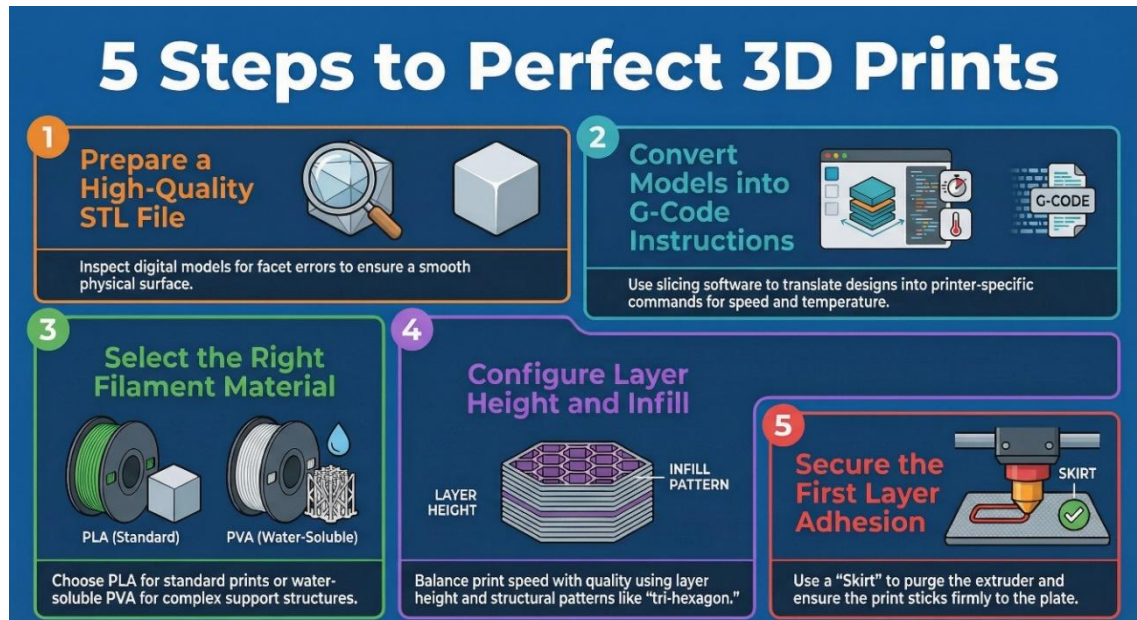


Figura 3: la impresión 3D perfecta en 5 pasos

2.5 Principales ventajas de la impresión 3D en el ámbito sanitario

- **Personalización:** Fabricación de implantes y dispositivos médicos adaptados a la anatomía específica del paciente (1,2,5,11,15).
- **Producción acelerada:** Prototipado rápido y reducción del tiempo de desarrollo para nuevas soluciones médicas (1,3,5,11,15,16).
- **Eficiencia en costes:** Menor desperdicio de material y reducción de los costes de producción en comparación con los métodos de fabricación tradicionales (2,11,14,15).
- **Mayor precisión:** Permite la creación de estructuras complejas de alta fidelidad, esenciales para aplicaciones médicas (1–3).
- **Versatilidad de materiales:** Compatibilidad con una amplia gama de materiales, incluyendo polímeros, metales, cerámicas y bio-tintas (1,2,11,25).

Se puede consultar una visión comparativa de las tecnologías de impresión 3D en el ámbito sanitario en el **Anexo II**.

Advantages of 3D Printing in Healthcare

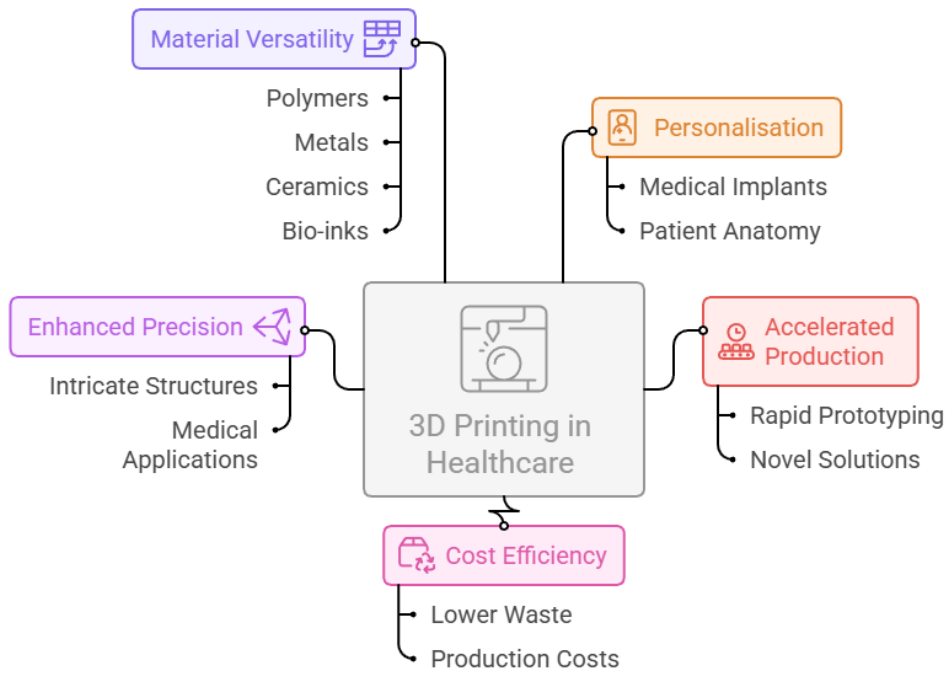


Figura 4: Ventajas de la impresión 3D en CCSS

3. Aplicaciones clínicas de la impresión 3D

La integración de las tecnologías de impresión 3D en el ámbito sanitario ha impulsado significativamente la práctica clínica, la planificación quirúrgica, la recuperación de los pacientes y la prestación de tratamientos personalizados (17,19,26,27). Al permitir la creación de soluciones médicas complejas, personalizables y coste-efectivas, la impresión 3D está transformando la manera en que se conceptualiza y se proporciona la atención sanitaria en múltiples disciplinas. Sus aplicaciones abarcan prótesis, modelos anatómicos, implantes y dispositivos médicos específicos para el paciente, además de transformar áreas como la formación médica, la respuesta en salud pública y la innovación farmacológica.

3.1 Prótesis y ortesis

La impresión 3D facilita la producción rápida y asequible de prótesis y dispositivos ortésicos específicos para cada paciente. Estas soluciones personalizadas están diseñadas para ajustarse a la anatomía individual, lo que se traduce en una mejora de la movilidad, mayor confort físico y mejor funcionalidad. Materiales avanzados, como compuestos de fibra de carbono y elastómeros termoplásticos, permiten fabricar componentes ligeros y duraderos que favorecen un movimiento más natural.



El impacto es especialmente significativo en pacientes pediátricos, supervivientes de traumatismos y personas en entornos con recursos limitados, donde el acceso a prótesis tradicionales suele ser restringido. Además, la personalización estética de los dispositivos protésicos ayuda a aumentar la confianza del paciente y favorece el bienestar emocional. La impresión 3D también permite la fabricación bajo demanda, reduciendo los tiempos de espera y aumentando la accesibilidad (28–30).

3.2 Modelos anatómicos y guías quirúrgicas

Los modelos anatómicos derivados de imágenes de alta resolución, como tomografías computarizadas (TC) o resonancias magnéticas (RM), proporcionan a los clínicos visualizaciones táctiles detalladas de estructuras anatómicas complejas. Estos modelos impresos en 3D se utilizan para mejorar la planificación preoperatoria, facilitar la rehabilitación quirúrgica y optimizar los procesos de educación e información al paciente. Los cirujanos pueden practicar sobre réplicas anatómicas, reducir el tiempo intraoperatorio y minimizar riesgos (31).

El uso de dispositivos médicos impresos en 3D para el tratamiento directo de pacientes ha aumentado considerablemente desde 2015. Las aplicaciones más frecuentes corresponden a la impresión 3D metálica y no metálica en ortopedia y oncología ortopédica. Asimismo, existe una tendencia emergente hacia el uso de impresión 3D no metálica en medicina para dispositivos específicos del paciente y de precisión en neurocirugía y oncología (30).

Las guías quirúrgicas personalizadas según la anatomía única de cada paciente incrementan aún más la precisión de los procedimientos. Estos dispositivos ayudan a dirigir instrumentos de corte y a posicionar implantes con alta exactitud, reduciendo la variabilidad y mejorando los resultados clínicos. Sus aplicaciones abarcan la cirugía craneofacial, la ortopedia, la oncología y las intervenciones cardiovasculares.

3.3 Implantes personalizados

Los implantes personalizados impresos en 3D ofrecen una adaptación anatómica y una compatibilidad estructural sin precedentes. Se fabrican a partir de materiales biocompatibles, como aleaciones de titanio, PEEK o polímeros bioabsorbibles. Estos implantes son especialmente valiosos en situaciones donde las soluciones convencionales no son adecuadas, como reconstrucciones esqueléticas complejas, resecciones tumorales o malformaciones congénitas (4,32).

La capacidad de planificar y fabricar estos implantes de forma preoperatoria mediante software CAD permite reducir el tiempo quirúrgico, disminuir las complicaciones y acelerar la recuperación. Los cirujanos recurren cada vez más a este enfoque para ofrecer una atención personalizada, mejorando tanto los resultados funcionales como los estéticos.

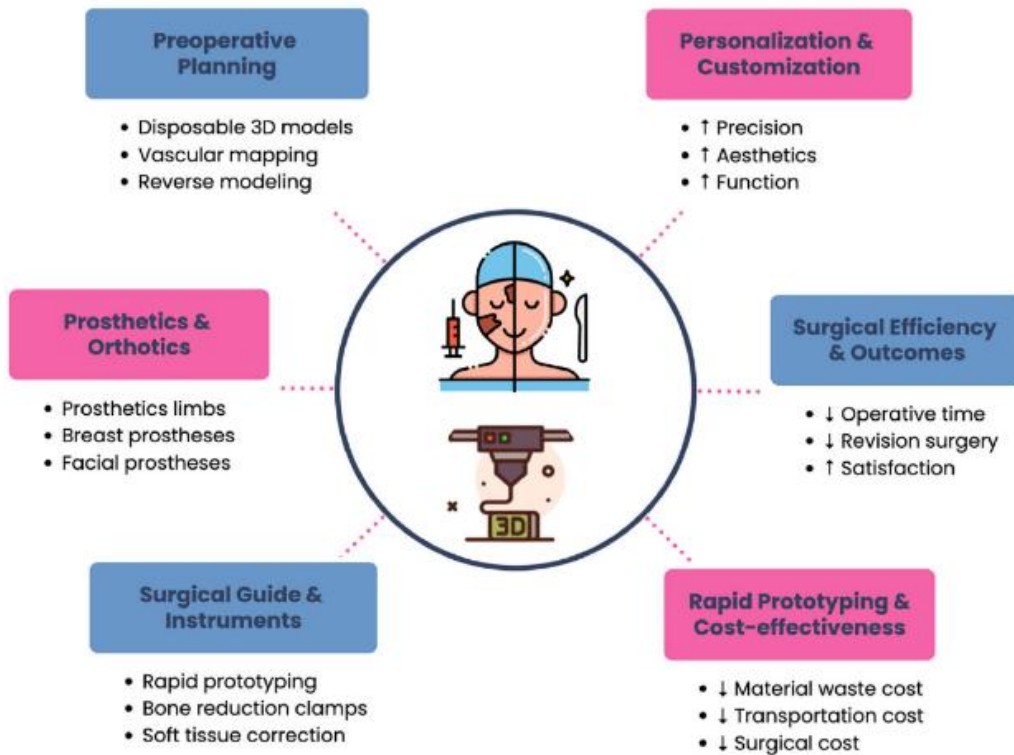


Figura 5: Ventajas de la impresión 3D en CCSS (4).

3.3 Implantes personalizados

Los implantes personalizados impresos en 3D ofrecen una adaptación anatómica y una compatibilidad estructural sin precedentes. Se fabrican a partir de materiales biocompatibles, como aleaciones de titanio, PEEK o polímeros bioabsorbibles. Estos implantes son especialmente valiosos en situaciones donde las soluciones convencionales no son adecuadas, como reconstrucciones esqueléticas complejas, resecciones tumorales o malformaciones congénitas (4,32).

La capacidad de planificar y fabricar estos implantes de forma preoperatoria mediante software CAD permite reducir el tiempo quirúrgico, disminuir las complicaciones y acelerar la recuperación. Los cirujanos recurren cada vez más a este enfoque para ofrecer una atención personalizada, mejorando tanto los resultados funcionales como los estéticos.

3.4 Dispositivos médicos personalizados

La versatilidad de la impresión 3D permite la producción de una amplia variedad de dispositivos médicos personalizados. Algunos ejemplos incluyen instrumentos quirúrgicos ergonómicos, ortesis ortopédicas, dispositivos portátiles de monitorización de la salud, audífonos, dispositivos dentales e implantes para liberación de fármacos. Estos dispositivos están diseñados no solo para ajustarse a la anatomía del paciente, sino también para integrarse en flujos de trabajo clínicos específicos (11).

Esta adaptabilidad permite realizar mejoras iterativas basadas en retroalimentación clínica en tiempo real. Además, mejora la adherencia del paciente a los tratamientos al incrementar el confort, la usabilidad y el rendimiento de los dispositivos. En contextos de rehabilitación postquirúrgica o atención a enfermedades crónicas, estos dispositivos personalizados pueden resultar transformadores.

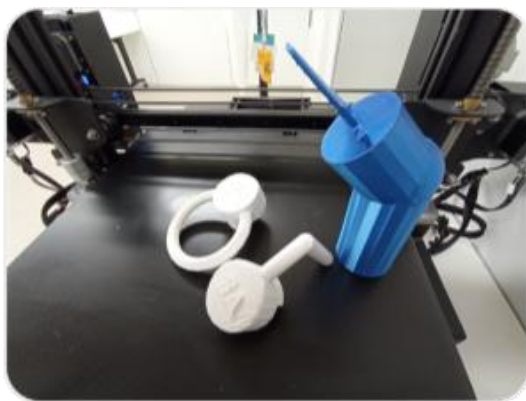
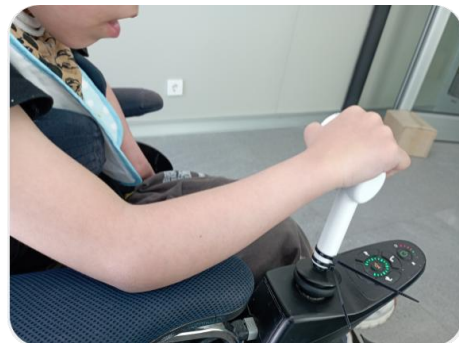


Figura 6: Dispositivos asistenciales fabricados en [SOUL Fab Lab, FSJD, Madrid](#).



3.5 Fabricación descentralizada y coste-efectiva

La impresión 3D permite la producción rápida y localizada de artículos médicos de pequeño volumen o de un solo uso. Esto resulta especialmente ventajoso en situaciones en las que las cadenas de suministro tradicionales se ven interrumpidas o son insuficientes, como durante emergencias sanitarias globales. Durante la pandemia de COVID-19, la impresión 3D se utilizó ampliamente para fabricar hisopos nasales y componentes de ventiladores mecánicos, demostrando su papel en la resiliencia de los sistemas de salud pública.

La capacidad de descentralizar la fabricación reduce los costes de transporte, acorta los tiempos de entrega y favorece sistemas de inventario *just-in-time* en entornos sanitarios. Esta descentralización también puede fomentar la innovación en regiones rurales o con escasos recursos al posibilitar la fabricación en el punto de atención (*point-of-care fabrication*) (8,14,33,34).

En conclusión, más allá de las principales áreas de aplicación, el impacto de la impresión 3D se ha extendido a una amplia variedad de especialidades médicas adicionales, incluyendo la oftalmología, donde permite la fabricación de lentes intraoculares personalizadas y andamiajes corneales; la otorrinolaringología (ORL), mediante la impresión de modelos sinusales, implantes auditivos y férulas para vías respiratorias; la cirugía vascular, con el desarrollo de *stents* personalizados, injertos vasculares y modelos anatómicos para la planificación de reparaciones de aneurismas; la odontología, mediante la producción de coronas, puentes, prótesis dentales, guías quirúrgicas y alineadores ortodóncicos; la oncología, a través del diseño de dispositivos de protección radiológica y guías quirúrgicas específicas para el paciente; y la pediatría, donde facilita la creación de prótesis ajustables, modelos de vías respiratorias y herramientas educativas adaptadas. Esta diversidad pone de manifiesto el carácter transversal y cada vez más integrado de la impresión 3D en la práctica sanitaria contemporánea (33).

4. Innovaciones y tendencias futuras: bioimpresión y medicina regenerativa

A medida que la impresión 3D continúa evolucionando, se adentra cada vez más en los ámbitos biológico y celular. La bioimpresión representa la convergencia entre la fabricación aditiva y la medicina regenerativa, utilizando bio-tintas compuestas por células, factores de crecimiento y biomateriales para fabricar tejidos vivos funcionales e, incluso potencialmente, órganos completos en el futuro.

4.1 Ingeniería de tejidos y órganos

La bioimpresión permite la construcción de tejidos viables como capas dérmicas, cartílago, hueso, implantes corneales y conductos vasculares. Estos tejidos bioimpresos se utilizan tanto en investigación como en aplicaciones clínicas y ofrecen alternativas a los injertos de donantes y a los sustitutos sintéticos. Los científicos también están avanzando hacia la impresión de componentes de órganos, incluyendo lóbulos hepáticos, túbulos renales y parches cardíacos (2).

Mediante el uso de células madre derivadas del propio paciente en el proceso de bioimpresión, puede minimizarse el riesgo de rechazo inmunológico. Estos avances podrían llegar a eliminar las listas de espera para trasplantes de órganos, permitiendo en el futuro el reemplazo autólogo de órganos.

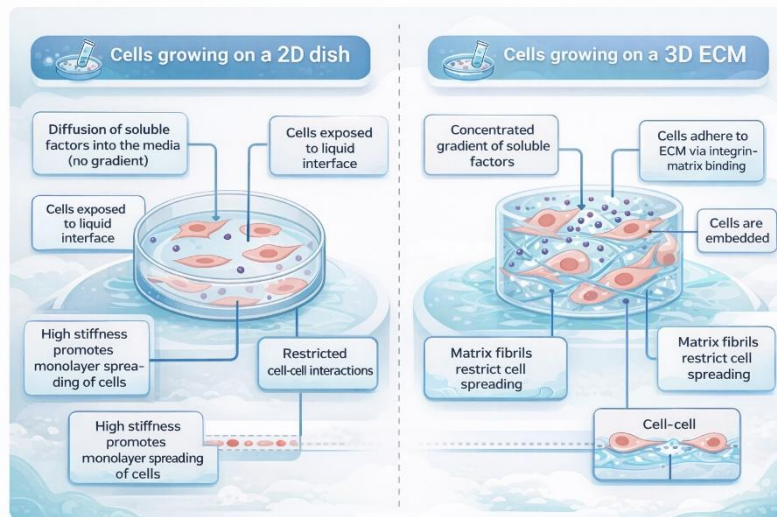


Figura 7: ventajas de la impresión 3D en ingeniería de tejidos (2)

4.2 Modelización de enfermedades y ensayo de fármacos

Las plataformas de tejidos bioimpresos en 3D simulan el complejo microambiente de enfermedades como el cáncer, la enfermedad de Alzheimer y las patologías fibróticas. Estas plataformas sirven como modelos para estudiar los mecanismos de enfermedad y evaluar fármacos en condiciones fisiológicamente relevantes.

Mediante el uso de líneas celulares específicas de cada paciente, estos sistemas bioimpresos también favorecen la farmacología personalizada, permitiendo evaluar cómo diferentes pacientes pueden responder a diversos tratamientos. Este enfoque agiliza los procesos de desarrollo de medicamentos y reduce la dependencia de la experimentación animal (35).

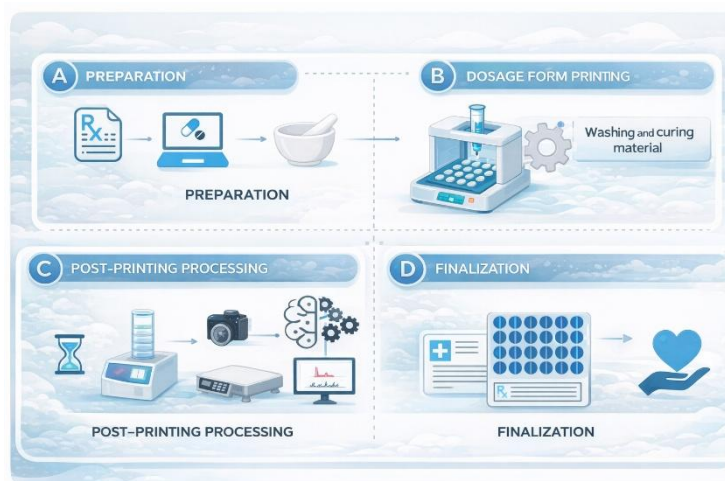


Figura 8: Proceso de farmacología personalizada (35)

4.3 Medicina regenerativa e ingeniería de andamiajes

La ingeniería de soportes y matrices mediante impresión 3D permite la organización espacial precisa de células y biomateriales para regenerar tejidos dañados o enfermos. Estos soportes suelen incorporar factores de crecimiento o proteínas de la matriz extracelular (ECM) que favorecen la adhesión y proliferación celular. Sus aplicaciones incluyen la reparación musculoesquelética, la regeneración cutánea en quemaduras, la reconstrucción de tejido cardíaco y la ingeniería de tejido neural. Los soportes pueden diseñarse para degradarse de manera sincronizada con la regeneración tisular, eliminando la necesidad de una cirugía secundaria (36,37).

4.4 Terapias inteligentes y micro-robótica

Las investigaciones más avanzadas están combinando la impresión 3D con sensores, actuadores y módulos de comunicación inalámbrica para producir dispositivos terapéuticos inteligentes.

Entre ellos se incluyen implantes ortopédicos inteligentes capaces de monitorizar el estrés mecánico, biosensores para detectar infecciones y neuroestimuladores destinados al manejo del dolor o de los temblores. Paralelamente, el desarrollo de dispositivos robóticos a microescala, como los “micro-swimmers”, ofrece grandes posibilidades para intervenciones de precisión, incluyendo la liberación dirigida de fármacos, la disrupción de coágulos y los diagnósticos mínimamente invasivos (38,39).

Estas innovaciones se alinean con la transición hacia una medicina predictiva, preventiva y personalizada, favoreciendo tratamientos más adaptados y sensibles a los datos fisiológicos específicos de cada paciente.

5. Implicaciones educativas y formativas

La impresión 3D se ha consolidado como un elemento transformador en la educación médica. Los modelos anatómicos impresos proporcionan réplicas táctiles a escala 1:1 que permiten a los estudiantes explorar la anatomía humana y practicar técnicas quirúrgicas. Estos modelos superan las limitaciones relacionadas con la disponibilidad de cadáveres, los costes y las consideraciones éticas (7,40).

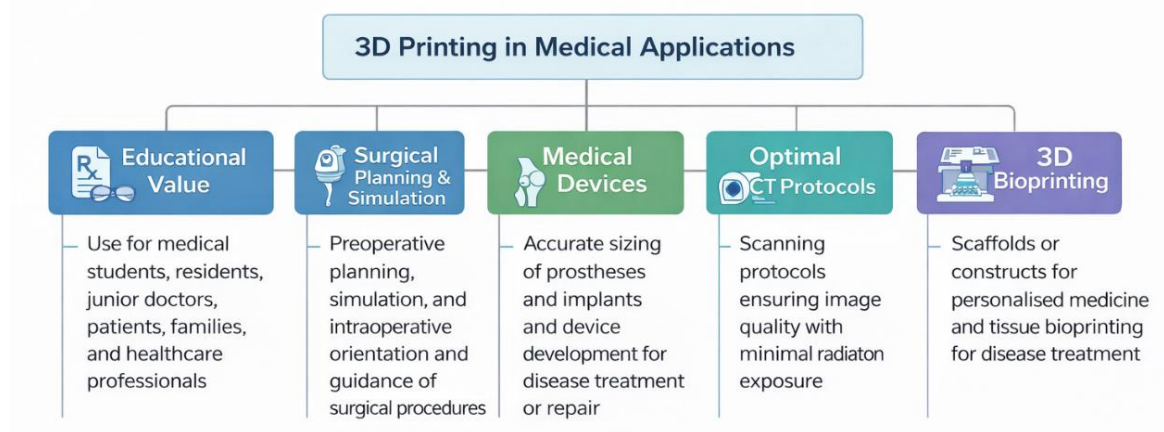


Figura 9: implicaciones formativas y educativas (7)

Los modelos patológicos simulados permiten a los estudiantes y profesionales en formación practicar procedimientos en condiciones poco frecuentes o complejas. Las instituciones integran la impresión 3D en laboratorios de simulación y programas formativos, ofreciendo a los alumnos un entorno de bajo riesgo para desarrollar habilidades técnicas y de toma de decisiones. Además, las herramientas impresas favorecen la formación interprofesional y fomentan la práctica colaborativa en escenarios clínicos reales (7).

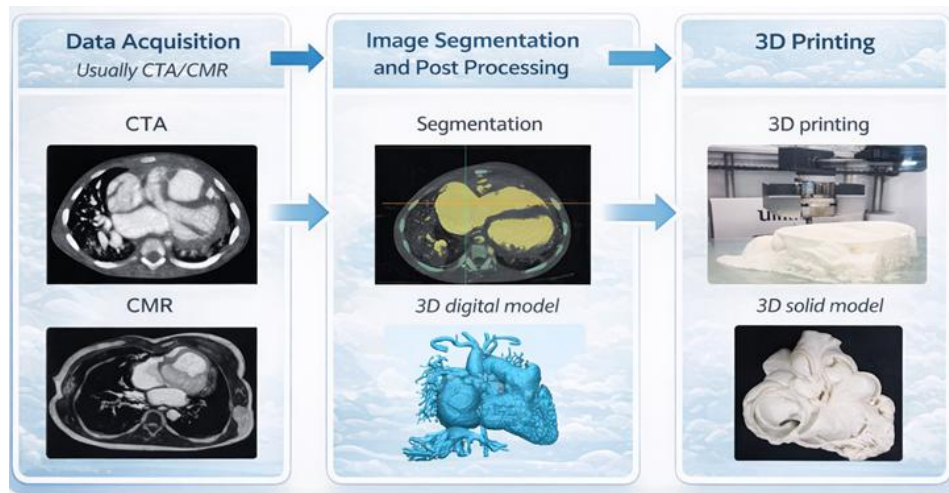


Figura 10: ejemplo aplicación formativa (7)

El futuro de la educación sanitaria reside en entornos de aprendizaje experiencial potenciados por la tecnología; la impresión 3D se sitúa en el centro de esta transformación.

6. Desafíos, consideraciones estratégicas y el futuro de la impresión 3D en medicina

Aunque la impresión 3D está transformando el ámbito sanitario al ofrecer soluciones innovadoras que mejoran la precisión clínica, optimizan la atención al paciente y reducen los riesgos procedimentales (1,2,5,6,11,14–16,19,21,25), su integración segura y sostenible en la práctica clínica habitual requiere prestar atención a diversos desafíos críticos.

- **El cumplimiento normativo** sigue siendo esencial, exigiendo estándares rigurosos de calidad y vías de aprobación claramente definidas para los productos médicos impresos en 3D, con el fin de garantizar la seguridad del paciente (1,6,7,11,15,41).
- **Las consideraciones éticas** también deben abordarse, especialmente en relación con la transparencia en aplicaciones específicas para cada paciente y la implementación de protocolos sólidos de seguridad de datos (42,43).
- **Desde una perspectiva medioambiental**, la sostenibilidad requiere evaluar el consumo de materiales, el uso energético y la generación de residuos para minimizar el impacto ecológico (44).
- **La accesibilidad económica** continúa representando una barrera, ya que los sistemas de impresión de alta precisión y los materiales biocompatibles certificados pueden limitar su implantación generalizada (17,45). Además, la escalabilidad de la producción será crucial para responder al aumento de la demanda clínica y permitir una adopción más amplia en los sistemas sanitarios.

Para aprovechar plenamente el potencial transformador de la impresión 3D, los profesionales sanitarios deberían:

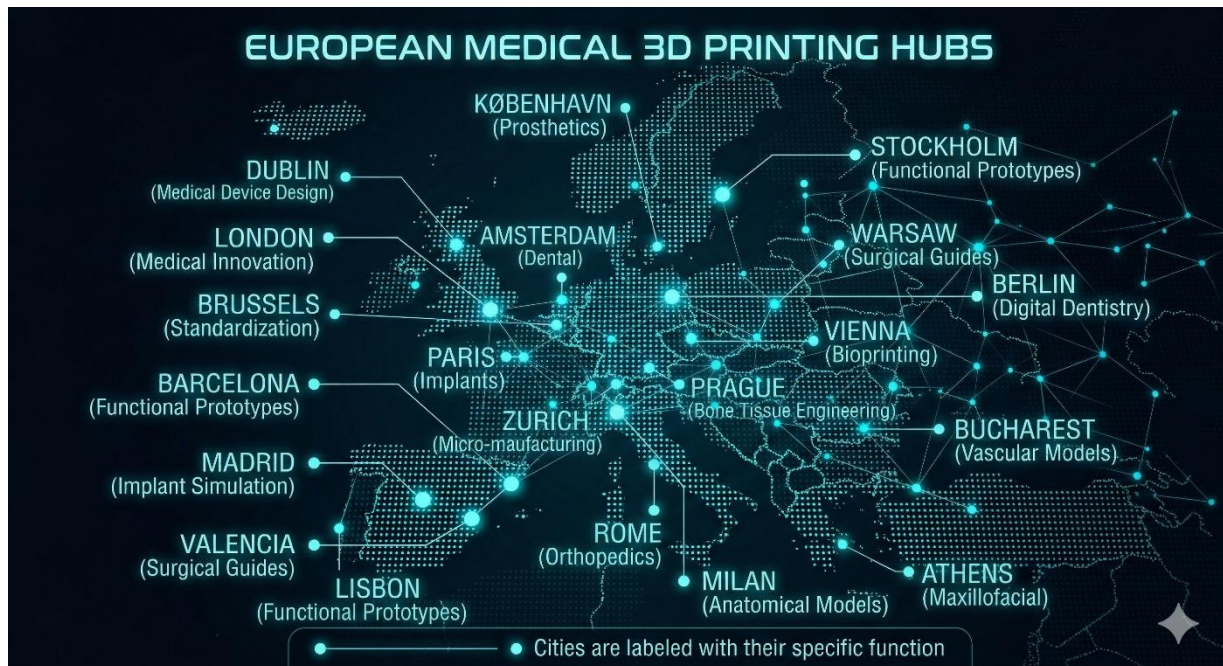
- Desarrollar un conocimiento profundo de sus aplicaciones clínicas.
- Participar en colaboraciones multidisciplinares con ingenieros, científicos de materiales y especialistas en regulación para impulsar una innovación responsable.
- Apoyar iniciativas de investigación rigurosas que fortalezcan la evidencia científica disponible, así como fomentar la educación y la sensibilización mediante programas estructurados de formación dirigidos a profesionales actuales y futuros.

A medida que este campo continúa evolucionando, abordar estas consideraciones regulatorias, éticas, económicas y de sostenibilidad será fundamental para garantizar que la impresión 3D cumpla su promesa de ofrecer tratamientos personalizados, mejores resultados clínicos y una atención verdaderamente centrada en el paciente.



Figura 11: Modelos fabricados en SOUL Fab Lab, FSJD, Madrid.

7. Mapeo de los Hubs europeos de innovación sanitaria



El panorama de la innovación sanitaria en Europa está experimentando una transformación estructural impulsada por la convergencia de la fabricación aditiva, las tecnologías de gemelo digital y los sistemas robóticos asistenciales. Esta transición desde dispositivos médicos estandarizados y producidos en masa hacia intervenciones específicas para cada paciente está siendo catalizada por una red distribuida de centros de excelencia que conectan la ingeniería académica con la práctica clínica. Dentro de la Unión Europea, el marco regulatorio — especialmente el Reglamento de Productos Sanitarios (MDR 2017/745)— ha redefinido los parámetros de la fabricación en el punto de atención (*point-of-care*, POC), permitiendo que los hospitales pasen de ser meros consumidores de tecnología a convertirse en diseñadores y fabricantes activos de soluciones clínicas personalizadas.

7.1 La arquitectura estratégica del biomodelado 3D y la bioimpresión médica

El desarrollo de biomodelos 3D constituye una de las principales puertas de entrada para la integración tecnológica en entornos hospitalarios. Al convertir datos radiológicos complejos en representaciones físicas o virtuales de alta fidelidad, los equipos clínicos pueden mejorar significativamente la planificación preoperatoria, la precisión intraoperatoria y la comunicación con el paciente.

7.1.1 El ecosistema catalán: Barcelona como líder global en innovación pediátrica en 3D

Barcelona se ha consolidado como un referente internacional en aplicaciones pediátricas de impresión 3D, principalmente gracias al liderazgo del [Hospital Sant Joan de Déu Barcelona](#) y del Hospital Universitario Vall d'Hebron.

La Unidad 3D del Hospital Sant Joan de Déu Barcelona, conocida como **3DForHealth (3D4H)**, ejemplifica la naturaleza multidisciplinar de la ingeniería médica moderna. Constituida formalmente en 2016, aunque operativa desde 2013, esta unidad integra radiólogos, cirujanos e ingenieros de innovación para dar soporte a más de 500 proyectos anuales.



Imagen: Educación anatómica (40)

Un componente clave del modelo del SJD es la integración de la unidad 3D directamente dentro del flujo de trabajo clínico del hospital. Este enfoque de fabricación en el punto de atención (*point-of-care*) permite la colaboración en tiempo real entre el equipo quirúrgico y el personal de ingeniería. Por ejemplo, en casos oncológicos complejos, como los neuroblastomas, los cirujanos utilizan modelos impresos en 3D a tamaño real de tumores y estructuras vasculares circundantes para ensayar el proceso de resección e identificar posibles complicaciones antes de que el paciente entre en quirófano. Se ha atribuido a esta práctica una reducción de más del 50 % del tiempo quirúrgico en determinados procedimientos complejos, disminuyendo así la duración de la anestesia y el riesgo de infección postoperatoria.

El cumplimiento regulatorio del hub de Barcelona constituye un importante indicador de su madurez. El Hospital Sant Joan de Déu Barcelona fue uno de los primeros centros de Europa en obtener la licencia EU MDR para la producción de productos sanitarios personalizados, un proceso regulado bajo el sistema de gestión de calidad ISO 13485:2016. Esta certificación garantiza que las guías e implantes impresos en 3D cumplen los mismos estándares de seguridad que los producidos por fabricantes industriales a gran escala.



El I3PT Parc Taulí 3D Lab constituye otro de los pilares del ecosistema catalán. Inicialmente centrado en traumatología ortopédica, el laboratorio ha evolucionado hacia una instalación multidisciplinar que actúa como punto de encuentro entre la medicina y la ingeniería. El laboratorio colabora con pymes externas, como Tailor Surgery, para proporcionar implantes y guías quirúrgicas específicas para cada paciente, estableciendo así un puente entre la investigación hospitalaria y la producción industrial.

Center	Focus Area	Technology Implementation	Regulatory Standing
SJD Barcelona Children's Hospital	Pediatrics, Oncology, Orthopedics	FDM, SLA, MJ, Virtual Reality	EU MDR 2017/745, ISO 13485
Vall d'Hebron University Hospital	Multi-specialty, Trauma	Mixed (In-house and Outsourced)	Hospital QMS Art. 5(5) Compliant
I3PT Parc Taulí 3D Lab	Orthopedic Trauma, Maxillofacial	FDM, SLA, MJ, Metal Printing	Manufacturer License EU MDR

7.1.2 El corredor sanitario de Madrid: investigación avanzada y unidades hospitalarias públicas

El ecosistema madrileño se caracteriza por una alta densidad de unidades 3D integradas en hospitales públicos y profundamente conectadas con la red nacional de investigación. La unidad **UPAM3D** del [Hospital General Universitario Gregorio Marañón](#) y el Laboratorio de Gestión 3D del Hospital Universitario La Paz representan la vanguardia de este desarrollo.

La unidad del Hospital Gregorio Marañón, establecida en 2015, funciona como un hub hospitalario para una amplia variedad de especialidades, con un fuerte énfasis en traumatología ortopédica. Utiliza un amplio abanico de tecnologías, incluyendo modelado por deposición fundida (FDM), estereolitografía (SLA) y fusión en lecho de polvo (PBF), además de capacidades de impresión metálica para la creación de implantes permanentes de titanio. Esta instalación ha sido fundamental para demostrar la rentabilidad de la impresión 3D hospitalaria, evidenciando que la reducción del tiempo quirúrgico y la mejora de los resultados clínicos pueden compensar la inversión inicial en hardware de impresión y personal especializado.

El Hospital Universitario La Paz, a través de su instituto de investigación IdiPAZ, opera un Laboratorio de Gestión 3D fundado en 2021. Sus líneas de trabajo incluyen la creación de ortesis personalizadas para pacientes pediátricos con problemas de movilidad y el desarrollo de prototipos de nuevos dispositivos médicos. Estas unidades también forman parte de la Plataforma de Biobancos y Biomodelos del Instituto de Salud Carlos III (ISCI3), una red nacional que facilita el intercambio de biomodelos y servicios de bioimpresión entre 15 unidades distribuidas por toda España.



7.2 Cirugía de precisión y desarrollo de guías quirúrgicas

Las guías quirúrgicas representan una de las aplicaciones más prácticas e inmediatas de la tecnología 3D en los quirófanos. Estas plantillas específicas para cada paciente permiten a los cirujanos trasladar la planificación preoperatoria con precisión submilimétrica, especialmente en casos complejos de traumatología y cirugía reconstructiva.

7.2.1 *El proyecto Trauma3D: colaboración interhospitalaria entre Sevilla y Cádiz*

La región sur de España, concretamente el eje entre Sevilla y Cádiz ha desarrollado un modelo especializado en traumatología ortopédica a través del proyecto “Hospital 3D”. Esta iniciativa constituye un esfuerzo colaborativo entre la Universidad de Cádiz, el Hospital Universitario Puerta del Mar y el Hospital Universitario Virgen del Rocío.

El Hospital Puerta del Mar de Cádiz ha establecido un laboratorio 3D dedicado a la producción de réplicas de órganos y fracturas óseas. Esto permite realizar una “simulación” previa de la cirugía, posibilitando que el equipo clínico seleccione y preconfigure las placas de osteosíntesis antes de que el paciente entre en quirófano. La naturaleza interhospitalaria de esta colaboración garantiza que los recursos especializados de ingeniería a nivel universitario sean directamente accesibles para los clínicos de distintos hospitales públicos, creando una base compartida de conocimiento y optimizando el uso de los recursos.

7.2.2 *IRCAD y la integración de la inteligencia artificial y la realidad aumentada*

En Francia, el IRCAD (Instituto de Investigación contra el Cáncer Digestivo) ha redefinido el papel del modelado 3D mediante su departamento de *Surgical Data Science* (SDS). Bajo el liderazgo del Dr. Alexandre Hostettler, el equipo SDS está desarrollando sistemas de software basados en inteligencia artificial que proporcionan una visualización “transparente” de la anatomía del paciente durante la cirugía.

La investigación de IRCAD se centra en la superposición de imágenes médicas 3D (tomografía computarizada o resonancia magnética) sobre vídeo laparoscópico en tiempo real, una técnica conocida como cirugía con realidad aumentada (AR). Esto permite a los cirujanos visualizar estructuras internas, como tumores profundos o vasos sanguíneos ocultos, en tiempo real. Para apoyar esta investigación, IRCAD ha desarrollado “Sight” (*Surgical Image Guidance and Healthcare Toolkit*), un framework *open source* en C++ diseñado para facilitar la creación de software de imagen médica.

<i>Software Component</i>	<i>Functionality</i>	<i>Primary Application</i>
<i>Sight Framework</i>	Modular medical imaging toolkit	Navigation systems, planning software
<i>SightViewer</i>	2D/3D medical image viewer	Diagnostic review of DICOM/VTK data
<i>SightCalibrator</i>	Camera calibration tool	AR synchronization for mono/stereo cameras

7.3 Aplicaciones odontológicas y maxilofaciales: UMCG y 2INGIS

El campo de la implantología dental ha adoptado rápidamente las guías quirúrgicas impresas en 3D. En el University Medical Centre Groningen (UMCG), la investigación se ha centrado en comparar los métodos digitales y convencionales de fabricación de guías quirúrgicas. Sus hallazgos indican que los métodos digitales mejoran significativamente la eficacia en la colocación de las guías quirúrgicas, especialmente en profesionales con menor experiencia.

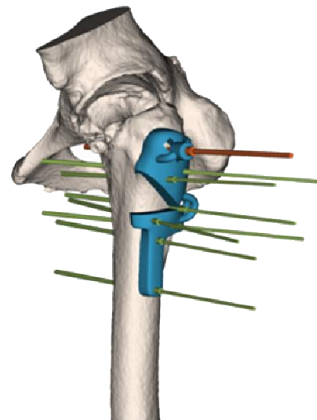


Imagen: [Guías de corte impresas en 3D](#) (orthopaediatrics)

7.4 Robótica de rehabilitación: la interfaz universidad-ingeniería

El desarrollo de exoesqueletos robóticos y sistemas de neurorrehabilitación representa una de las áreas más complejas de la innovación médica, ya que requiere una integración fluida entre la ingeniería mecánica, la tecnología de sensores y las neurociencias.

7.4.1 El hub de Alicante: UMH y la Universidad de Alicante

La provincia de Alicante, en España, se ha consolidado como un importante centro de robótica de rehabilitación, caracterizado por una sólida “interfaz universidad-ingeniería”. Investigadores de la Universidad Miguel Hernández de Elche y de la Universidad de Alicante se sitúan a la vanguardia de esta línea de investigación.

El laboratorio *Brain-Machine Interface Systems Lab* de la Universidad Miguel Hernández, liderado por investigadores especializados como la Dra. Marisol Rodríguez-Ugarte, centra su actividad en el control de exoesqueletos de miembros inferiores mediante imaginación motora

(*motor imagery*, MI) y señales de electroencefalografía (EEG). Sus investigaciones exploran el uso de algoritmos de *deep learning* para decodificar la intención del usuario de iniciar la marcha o cambiar la velocidad, permitiendo así un control más natural e intuitivo de los asistentes robóticos.

Research Topic	Institution	Key Finding/Focus
Brain-Machine Interfaces (BMI)	UMH Elche	Deep learning for exoskeleton gait control
Transcranial Stimulation (tDCS)	UMH Elche	Boosting accuracy of intention detection
Myoelectric Control	Univ. of Alicante	Low-cost non-intrusive gesture recognition
Neurorehabilitation Centers	NeuroVital (Alicante)	Clinical implementation of robotic gait training

En la Universidad de Alicante, el grupo de Robótica y Visión (fundado en 1996) centra su actividad en la neurorrobótica y el control mioeléctrico. Esto incluye el desarrollo de sistemas sensoricos que utilizan señales electromiográficas (EMG) para controlar manos protésicas o brazos robóticos. Estos avances académicos se trasladan a la práctica clínica en instalaciones como NeuroVital, un centro tecnológico ubicado en el Parque Científico de la Universidad Miguel Hernández, equipado con exoesqueletos robóticos y entornos de realidad virtual para la rehabilitación de pacientes con daño neurológico.



Image: [mano impresa en 3D \(youbionic\)](#)

7.4.2 Exoesqueletos para rehabilitación pediátrica y lesión medular: Marsi Bionics y ABLE

Las aplicaciones comerciales y clínicas de los exoesqueletos en España se ven reforzadas por empresas como Marsi Bionics y ABLE Human Motion.

Marsi Bionics, una pyme con sede en Madrid ha desarrollado el “EXPLORER”, el primer exoesqueleto pediátrico del mundo diseñado para niños con atrofia muscular espinal y parálisis cerebral. El dispositivo destaca por su capacidad de adaptarse a niños desde los dos años de edad, ofreciéndoles la posibilidad de movilidad en posición erguida durante etapas críticas de su desarrollo.



7.4.3 Universidad de Aalborg: robótica de rehabilitación interdisciplinar

En Dinamarca, la Aalborg University alberga el *Center for Rehabilitation Robotics*, una instalación interdisciplinar que reúne investigadores de ciencias de la salud, producción de materiales y sistemas electrónicos. El trabajo del centro se caracteriza por la participación activa de los usuarios finales en el proceso de diseño, garantizando que las soluciones robóticas resulten prácticas tanto para la terapia clínica como para su uso domiciliario.

Uno de sus proyectos más destacados es el desarrollo de un exoesqueleto inteligente y ligero para brazo basado en tendones. Este dispositivo utiliza un sistema de control híbrido capaz de adaptarse desde señales mioeléctricas hasta control mediante movimientos de la lengua o incluso interfaces cerebro-computador completas, dependiendo de la gravedad de la discapacidad del paciente. El centro mantiene una sólida red de colaboradores, incluyendo el Centro Danés de Rehabilitación para Enfermedades Neuromusculares y socios industriales como Life Science Robotics y Assistive Innovations.

7.5 Ortoprótisis: escala industrial y hubs locales de fabricación

El sector ortoprotésico en Europa combina la fabricación industrial a gran escala con talleres especializados locales que proporcionan adaptación y fabricación personalizada.

7.5.1 Líderes industriales globales: Ottobock, Proteor y Blatchford

Alemania y Francia albergan algunos de los mayores fabricantes de componentes protésicos y ortésicos del mundo. [Ottobock](#) (Alemania) y Proteor (Francia) dominan el mercado gracias a importantes inversiones en I+D y amplias redes de distribución global.

Proteor, por ejemplo, dispone de una planta central de fabricación en Borgoña, Francia, con capacidad para producir 22.000 dispositivos personalizados al año. Su unidad de I+D, integrada por más de 20 ingenieros y médicos, colabora con 24 hospitales universitarios para probar y perfeccionar nuevos diseños. Esta escala resulta esencial para la producción de componentes como rodillas controladas por microprocesadores y pies de fibra de carbono de alto rendimiento.

Manufacturer	Headquarters	Key Technologies	Manufacturing Capabilities
Ottobock	Germany	Microprocessor knees, myoelectric hands	Global distribution, digital workflows
Proteor	France	Custom spinal orthoses, CAD-CAM	22k items/year, 24 university partnerships
Blatchford	Germany/UK	Biomimetic ankles, high-end prosthetics	Central manufacturing in Raunheim/Basingstoke
Ortho Europe	UK	Bespoke devices, modular components	Seven production facilities across EU



8. Bibliografia

1. Baig MA, Norah A, Haifa A, Nouf A, Baig SM. Implementation of 3D Printing in Various Healthcare Settings: A Scoping Review. *Stud Health Technol Inform.* 2023 Jun 29;305:410–3. doi:10.3233/SHTI230518 PubMed PMID: 37387052.
2. Alzoubi L, Aljabali A, Tambuwala M. Empowering Precision Medicine: The Impact of 3D Printing on Personalized Therapeutic. *AAPS PharmSciTech.* 2023 Nov 14;24. doi:10.1208/s12249-023-02682-w
3. Li H, Fan W, Zhu X. Three-dimensional printing: The potential technology widely used in medical fields. *J Biomed Mater Res A.* 2020 Nov 1;108(11):2217–29. doi:10.1002/jbm.a.36979 PubMed PMID: 32363725.
4. Zahid MJ, Mavani P, Awuah WA, Alabdurahman M, Pudukollu R, Kundu A, et al. Sculpting the future: A narrative review of 3D printing in plastic surgery and prosthetic devices. *Health Sci Rep.* 2024 Jun;7(6):e2205. doi:10.1002/hsr2.2205 PubMed PMID: 38915353; PubMed Central PMCID: PMC11194296.
5. Bücking TM, Hill ER, Robertson JL, Maneas E, Plumb AA, Nikitichev DI. From medical imaging data to 3D printed anatomical models. *PLOS ONE.* 2017 May 31;12(5):e0178540. doi:10.1371/journal.pone.0178540
6. Choi JW, Kim N. Clinical application of three-dimensional printing technology in craniofacial plastic surgery. *Arch Plast Surg.* 2015 May;42(3):267–77. doi:10.5999/aps.2015.42.3.267 PubMed PMID: 26015880; PubMed Central PMCID: PMC4439584.
7. Sun Z, Wong Y, Yeong C. Patient-Specific 3D-Printed Low-Cost Models in Medical Education and Clinical Practice. *Micromachines.* 2023 Feb 1;14. doi:10.3390/mi14020464
8. Crafts TD, Ellsperman SE, Wannemuehler TJ, Bellicchi TD, Shipchandler TZ, Mantravadi AV. Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017 Jun;156(6):999–1010. doi:10.1177/0194599816678372 PubMed PMID: 28421875.
9. Marti P, Lampus F, Benevento D, Setacci C. Trends in use of 3D printing in vascular surgery: a survey. *Int Angiol.* 2019 Oct;38(5):418–24. doi:10.23736/S0392-9590.19.04148-8 PubMed PMID: 31560185.
10. Liew Y, Beveridge E, Demetriades AK, Hughes MA. 3D printing of patient-specific anatomy: A tool to improve patient consent and enhance imaging interpretation by trainees. *Br J Neurosurg.* 2015;29(5):712–4. doi:10.3109/02688697.2015.1026799 PubMed PMID: 25822093.
11. Ventola CL. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. *P T.* 2014 Oct;39(10):704–11. PubMed PMID: 25336867; PubMed Central PMCID: PMC4189697.
12. Kappanayil M, Koneti NR, Kannan RR, Kottayil BP, Kumar K. Three-dimensional-printed cardiac prototypes aid surgical decision-making and preoperative planning in selected cases of complex congenital heart diseases: Early experience and proof of concept in a resource-limited environment. *Annals of Pediatric Cardiology [Internet].* 2017;10(2). Available from:



https://journals.lww.com/aopc/fulltext/2017/10020/three_dimensional_printed_cardiac_prototypes_aid.3.aspx

13. Nagarajan N, Dupret-Bories A, Karabulut E, Zorlutuna P, Vrana NE. Enabling personalized implant and controllable biosystem development through 3D printing. *Biotechnol Adv.* 2018 Apr;36(2):521–33. doi:10.1016/j.biotechadv.2018.02.004 PubMed PMID: 29428560.
14. Ballard DH, Mills P, Duszak RJ, Weisman JA, Rybicki FJ, Woodard PK. Medical 3D Printing Cost-Savings in Orthopedic and Maxillofacial Surgery: Cost Analysis of Operating Room Time Saved with 3D Printed Anatomic Models and Surgical Guides. *Acad Radiol.* 2020 Aug;27(8):1103–13. doi:10.1016/j.acra.2019.08.011 PubMed PMID: 31542197; PubMed Central PMCID: PMC7078060.
15. Trenfield SJ, Awad A, Madla CM, Hatton GB, Firth J, Goyanes A, et al. Shaping the future: recent advances of 3D printing in drug delivery and healthcare. *Expert Opinion on Drug Delivery.* 2019 Oct 3;16(10):1081–94. doi:10.1080/17425247.2019.1660318
16. Muwaffak Z, Goyanes A, Clark V, Basit AW, Hilton ST, Gaisford S. Patient-specific 3D scanned and 3D printed antimicrobial polycaprolactone wound dressings. *Int J Pharm.* 2017 Jul 15;527(1–2):161–70. doi:10.1016/j.ijpharm.2017.04.077 PubMed PMID: 28461267.
17. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *BioMedical Engineering OnLine.* 2016 Oct 21;15. doi:10.1186/s12938-016-0236-4
18. Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2021 [cited 2026 Mar 1]. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-56127-7> doi:10.1007/978-3-030-56127-7
19. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010 Jul;5(4):335–41. doi:10.1007/s11548-010-0476-x PubMed PMID: 20467825.
20. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering.* 2018 Jun 15;143:172–96. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
21. Martelli N, Serrano C, Van Den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery.* 2016 Jun 1;159 6:1485–500. doi:10.1016/j.surg.2015.12.017
22. Chua CK, Leong KF. *3d Printing And Additive Manufacturing: Principles And Applications (With Companion Media Pack) - Fourth Edition Of Rapid Prototyping.* World Scientific Publishing Company; 2014. 547 p.
23. Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons.* 2012 Mar 1;55(2):155–62. doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003
24. Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design.* 2014 Jun 1;58:242–6. doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038

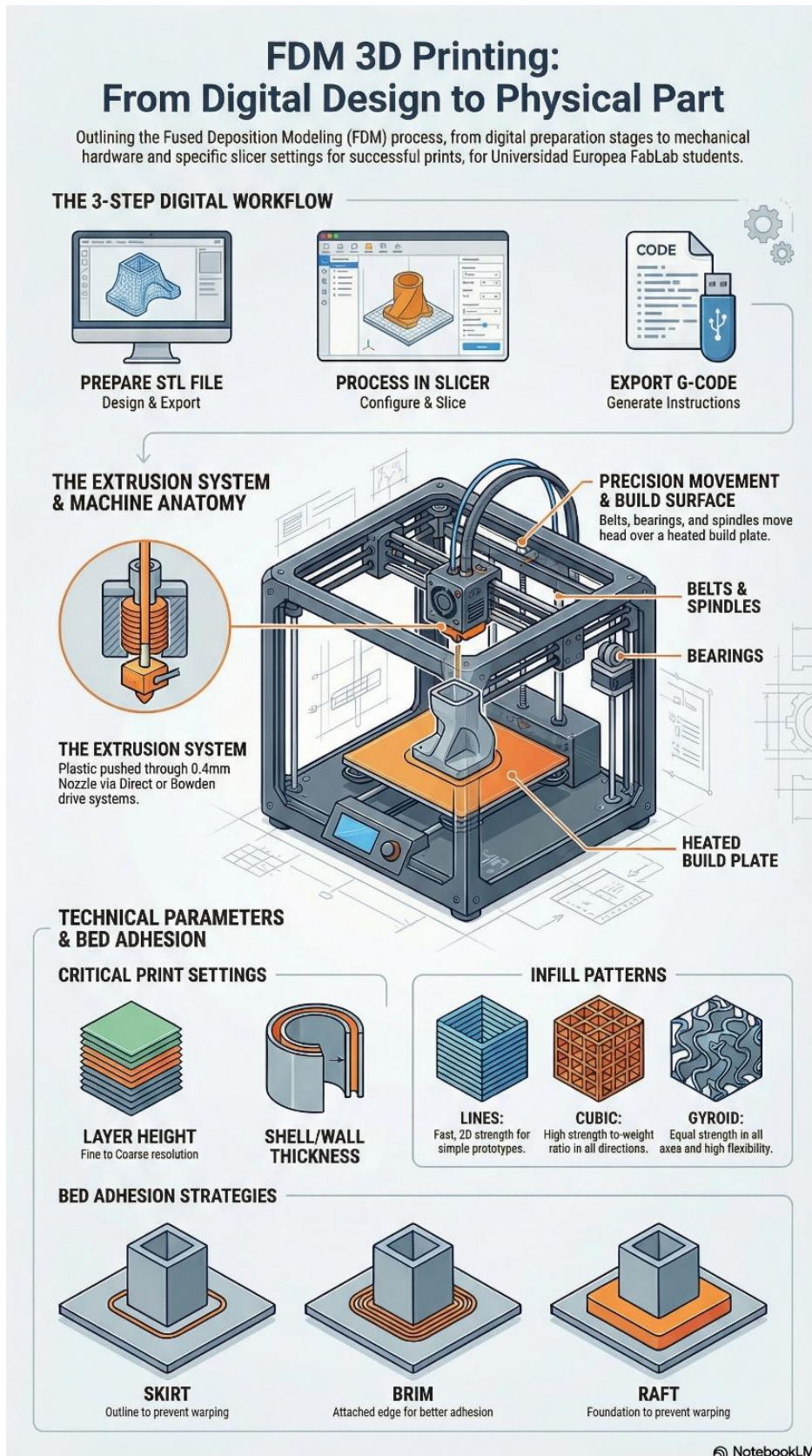


25. Li H, Lv H, Lin T. Comparison of efficacy of eight treatments for plantar fasciitis: A network meta-analysis. *Journal of Cellular Physiology*. 2018;234(1):860–70. doi:10.1002/jcp.26907
26. Liaw C, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication*. 2017 Jun 7;9. doi:10.1088/1758-5090/aa7279
27. Horta-Martínez L. 3D printing in the medical field. *Seminars in Medical Writing and Education*. 2022 Aug 31. doi:10.56294/mw20228
28. ŞENAYLI A, ÇANKAYA G, ÖZTORUN Cİ, OFLAZ H, ŞENEL E. Clinical trials of 3D printing splints to avoid contracture development in burned children. *Turk J Med Sci*. 2021 Oct 21;51(5):2543–53. doi:10.3906/sag-2104-170 PubMed PMID: 34174795; PubMed Central PMCID: PMC8742488.
29. Hassan BB, Wong MS. Contemporary and Future Development of 3D Printing Technology in the Field of Assistive Technology, Orthotics and Prosthetics. *Can Prosthet Orthot J*. 2023;6(2):42225. doi:10.33137/cpoj.v6i2.42225 PubMed PMID: 38873130; PubMed Central PMCID: PMC11168594.
30. Mendaza-DeCal R, Peso-Fernandez S, Rodriguez-Quiros J. Orthotics and prosthetics by 3D-printing: Accelerating its fabrication flow. *Res Vet Sci*. 2023 Sep;162:104960. doi:10.1016/j.rvsc.2023.104960 PubMed PMID: 37480718.
31. Kermavnar T, Shannon A, O’Sullivan KJ, McCarthy C, Dunne CP, O’Sullivan LW. Three-Dimensional Printing of Medical Devices Used Directly to Treat Patients: A Systematic Review. *3D Print Addit Manuf*. 2021 Dec 1;8(6):366–408. doi:10.1089/3dp.2020.0324 PubMed PMID: 36655011; PubMed Central PMCID: PMC9828627.
32. Kadakia RJ, Wixted CM, Allen NB, Hanselman AE, Adams SB. Clinical applications of custom 3D printed implants in complex lower extremity reconstruction. *3D Print Med*. 2020 Oct 2;6:29. doi:10.1186/s41205-020-00083-4 PubMed PMID: 33006702; PubMed Central PMCID: PMC7531160.
33. Choonara Y, Du Toit L, Kumar P, Kondiah P, Pillay V. 3D-printing and the effect on medical costs: a new era? *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research*. 2016 Jan 2;16:23–32. doi:10.1586/14737167.2016.1138860
34. Yasli M, Dabbagh SR, Tasoglu S, Aydin S. Additive manufacturing and three-dimensional printing in obstetrics and gynecology: a comprehensive review. *Arch Gynecol Obstet*. 2023 Dec;308(6):1679–90. doi:10.1007/s00404-023-06912-1 PubMed PMID: 36635490.
35. Melnyk LA, Oyewumi MO. Integration of 3D printing technology in pharmaceutical compounding: Progress, prospects, and challenges. *Annals of 3D Printed Medicine*. 2021;4:100035. doi:https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100035
36. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*. 2014 Aug;32(8):773–85. doi:10.1038/nbt.2958 PubMed PMID: 25093879.
37. Bose S, Vahabzadeh S, Bandyopadhyay A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*. 2013 Dec 1;16(12):496–504. doi:10.1016/j.mattod.2013.11.017
38. Gao Q, Lee JS, Kim BS, Gao G. Three-dimensional printing of smart constructs using stimuli-responsive biomaterials: A future direction of precision medicine. *Int J Bioprint*. 2022



- Nov 9;9(1):638. doi:10.18063/ijb.v9i1.638 PubMed PMID: 36636137; PubMed Central PMCID: PMC9830998.
39. Li J, Esteban-Fernández de Ávila B, Gao W, Zhang L, Wang J. Micro/Nanorobots for Biomedicine: Delivery, Surgery, Sensing, and Detoxification. *Sci Robot.* 2017 Mar 15;2(4):eaam6431. doi:10.1126/scirobotics.aam6431 PubMed PMID: 31552379; PubMed Central PMCID: PMC6759331.
40. Kulisch C, Langheinrich J, Heuckendorf E, Vida I, Brunk I. Challenges and implementation of the German maternity protection act for female medical students in macroscopic anatomical education. *GMS J Med Educ.* 2020;37(2):Doc17. doi:10.3205/zma001310 PubMed PMID: 32328519; PubMed Central PMCID: PMC7171363.
41. Morrison RJ, Kashlan KN, Flanagan CL, Wright JK, Green GE, Hollister SJ, et al. Regulatory Considerations in the Design and Manufacturing of Implantable 3D-Printed Medical Devices. *Clin Transl Sci.* 2015 Oct;8(5):594–600. doi:10.1111/cts.12315 PubMed PMID: 26243449; PubMed Central PMCID: PMC4626249.
42. Ballard DH, Trace AP, Ali S, Hodgdon T, Zygmunt ME, DeBenedictis CM, et al. Clinical Applications of 3D Printing: Primer for Radiologists. *Acad Radiol.* 2018 Jan;25(1):52–65. doi:10.1016/j.acra.2017.08.004 PubMed PMID: 29030285; PubMed Central PMCID: PMC6404775.
43. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol.* 2014 Aug;32(8):773–85. doi:10.1038/nbt.2958 PubMed PMID: 25093879.
44. Ford S, Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production.* 2016 Nov 20;137:1573–87. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.150
45. Thomas D. Costs, Benefits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016 Jul;85(5–8):1857–76. doi:10.1007/s00170-015-7973-6 PubMed PMID: 28747809; PubMed Central PMCID: PMC5524380.

Anexo I: Principios de la impresión 3D





Annex II. Comparative Overview of 3D Printing Technologies in Healthcare.

3D Process Type	Working Principle	Healthcare Applications	Advantages	Limitations
Powder Bed Fusion (SLS / SLM)	Thermal energy selectively fuses powdered material inside a chamber	Medical implants, fixation devices, lattice-structured models	Small-scale technology, economical, wide range of materials	Low speed, limited size, material properties depend on powder grain
Material Jetting (PolyJet / NJP)	Inkjet-like deposition of material (continuous or drop-on-demand)	Anatomical models, customized dental guides and implants	High precision, low waste, multi-material and multi-color capability	Limited to polymers and waxes, requires support material
Sheet Lamination	Bonding of layered sheets (typically metal) via ultrasonic welding	Surgical and orthopedic models	Fast, economical, easy material handling	Limited material range, requires post-processing
Directed Energy Deposition (DED, LMD, LENS)	Heat source melts material during deposition, often for repair	Limited healthcare applications; repair of specific components	Rapid layer deposition, dense parts, no supports required	Limited materials, lower surface finish quality
Vat Photopolymerization (SLA / DLP)	Liquid photopolymer resin cured by UV or laser light	Bone structures, dental models, implant guides, hearing aids	High resolution and surface finish, complex geometries	Limited durability, UV sensitivity, not suitable for intensive use
Material Extrusion (FDM / FFF)	Thermoplastic extruded through heated nozzle layer by layer	Medical devices, surgical tools, prostheses	Economical, widely accessible, good structural properties (ABS)	Lower precision, nozzle-dependent quality, low speed
Binder Jetting	Powder layers bonded by liquid binder	Educational anatomical models, colored models	Fast fabrication, wide color range	Not ideal for structural parts, extensive cleaning/post-processing required

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.
KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).
Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362



Fundación
San Juan de Dios
Madrid

Gemma Escobar Aguilar

María Simarro González

Manuel Lara Romero

Pedro Chana Valero