

**Revisión general sobre técnica de bioimpresión 3D  
estereolitográfica y su aplicación en la  
medicina: Materiales, avances y tendencias.**

**A review on 3D bioprinting stereolithographic technique  
and its applications: Materials, advances and trends.**

**Nikolay Estiven Gómez Mesa**

Ingeniero químico, investigador colaborador en semillero de nanobioingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. Contacto: *niegomez@correo.udistrital.edu.co*

**Rodolfo Steven Castañeda Roncancio**

Ingeniero mecánico, Diseñador de ingeniería egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. Contacto: *rscastanedar@correo.udistrital.edu.co*

**Myriam Moreno Amado**

Licenciada en Física, Ingeniera química, Magister en docencia de la química, Doctora en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. Contacto: *mmoreno@udistrital.edu.co*

## **RESUMEN**

El inicio del siglo XXI marcó la implementación de los avances tecnológicos para la obtención de nuevos materiales y nuevas técnicas dirigidas al desarrollo de órganos, tejidos y células deterioradas, enfermas o metabólicamente deficientes. Una de las técnicas utilizadas para la obtención de órganos y tejidos es la bioimpresión 3D. Con el presente trabajo se busca hacer una revisión de la información presentada sobre la técnica de bioimpresión 3D, más reconocida como estereolitografía, con el fin de identificar las condiciones de operación, los equipos utilizados y buscar los avances que esta técnica ha presentado para aplicaciones en la medicina con el fin de proyectar las investigaciones aplicadas en el área de la bioingeniería. Se hizo la búsqueda de artículos científicos publicados en los últimos 10 años en revistas indexadas, utilizando la palabra clave estereolitografía y seleccionando los trabajos cuyas aplicaciones han aportado en la innovación de la ingeniería de tejidos, la fabricación de órganos y en la administración de fármacos. Se encontraron documentos que presentan avances de la técnica, aplicaciones en la medicina, diversos materiales utilizados y cómo se proyecta al futuro.

***Palabras clave:*** Bioimpresión 3D, estereolitografía, tejidos, bioingeniería.

## **ABSTRACT**

Technological advances to obtain new materials and new techniques aimed at tissue engineering, organ manufacture and repair of damaged, diseased or metabolically deficient cells, has been developed in the 21st century. One of the techniques used to obtain organs and tissues is 3D bioprinting. The present work seeks to review the information presented on the stereolithographic 3D bioprinting technique, in order to identify the operating conditions,

the equipment used and advances in the technique presented for applications in biomedicine in order to project research in the area of bioengineering. A search of scientific articles published in the last 10 years in indexed journals was carried out, using the keyword stereolithography and selecting the works of applications that have contributed to the innovation of tissue engineering, organ manufacturing and drug administration. Documents were found that present advances in the technique, applications in biomedical engineering, various materials used and how it is projected into the future.

**Keywords:** 3D Bioprinting, Stereolithography, tissue, bioengineering.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la búsqueda de nuevas alternativas de solución para apoyar a la biomedicina, aparece la bioimpresión 3D, técnica que se está expandiendo globalmente y representa una gran oportunidad para innovar la tecnología requerida en medicina, además de optimizar en la industria farmacéutica (Aimar et al., 2019) y revolucionar la atención médica (Schubert et al., 2014). La tecnología de bioimpresión 3D se usa en medicina desde hace décadas, teniendo su primera aparición en aplicaciones odontológicas con la necesidad de fabricar implantes y modelos necesarios en procesos quirúrgicos (Teerdha et al., 2019). Después, fue teniendo más relevancia en el campo biomédico y de bioingeniería, puesto que se han presentado grandes retos para combatir las disfunciones del cuerpo humano y las enfermedades infecciosas (Zimmerling & Chen, 2020).

En la actualidad, cada vez se presentan más usos médicos de la impresión 3D abarcando diversos campos entre ellos, la innovación en materiales para la generación de tejidos y

órganos, la manipulación de bioenlaces cargados de células para fabricar estructuras vivas (Gu et al., 2020) y en nuevas formas de dosificación y fármacos (Lee Ventola, 2014).

La implementación de esta tecnología desarrolló diferentes procesos de fabricación aditiva para crear objetos 3D a partir de ciertas materias primas (Mason et al., 2016). Entre ellos se encuentra la bioimpresión basada en inyección de tinta, la bioimpresión asistida por presión o láser y la estereolitografía (J. Li et al., 2016). Esta última sigue siendo una de las más poderosas y versátiles de todas las técnicas, y la que proporciona más nivel de detalle y de alta eficiencia de diseño (Kuo et al., 2019).

La estereolitografía por sus siglas en inglés SLA (Stereo Litography Apparatus) es una técnica de prototipado rápido que se utiliza para crear modelos 3D a partir de resinas sensibles a los rayos UV. Su funcionamiento consiste en formar redes de polímeros foto-reticulados cuando se colocan bajo una fuente de luz. Durante la preparación del preprocesamiento de SLA, el modelo 3D se corta en varias capas según el grosor de capa deseado (Derakhshanfar et al., 2018). La impresión 3D basada en esta técnica permite un control preciso de la geometría bruta de los andamios fabricados y proporciona variedad de incorporación (Manapat et al., 2017) y colocación espacial de nanomateriales incorporados.

Este trabajo tiene como fin hacer una revisión general sobre la técnica de estereolitografía, sus componentes y el principio de su funcionamiento. Además, mencionar los materiales que requiere el proceso, identificar las aplicaciones principales que han surgido en los últimos 10 años y las tendencias que está trazando esta técnica como aporte fundamental en la innovación de bioingeniería y potencial biomédico.

## 2. METODOLOGÍA

Para la búsqueda de información se realizó una vigilancia tecnológica de literatura existente mediante el uso de bases de datos tales como Science Direct, IEEE, Pubmed, Lilacs, SpringerLink, Web of Science y Embase.

Los temas de búsqueda fueron “tissue printing” (1301 resultados), “organ printing”(789), “Stereolithographic bioprinting” (59) y “3D printing stem cell” (646). También se agregaron artículos relevantes encontrados en referencias ya leídas. La búsqueda se realizó en los meses de febrero a mayo del año 2021. Los artículos que fueron tomados en cuenta una vez analizados los títulos y resúmenes fueron aquellos que presentaran todo tipo de avances investigativos en la fabricación de estructuras y tejidos a partir de la bioimpresión estereolitográfica, así como materiales y técnicas en desarrollo. También fueron tomados en cuenta artículos de revisión los cuales dieran un panorama de los trabajos realizados hasta el momento de su elaboración.

Se excluyeron los ejemplos de modelado y renderizado virtual en 3D sin modelos físicos en 3D, así como las aplicaciones de esta técnica en usos no médicos. Solo se consideraron los usos clínicos, estudios in vitro, in vivo y en animales. No se conservaron los estudios en cadáveres.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Bioimpresión 3D.**

Inicialmente la impresión 3D surge como una alternativa para desarrollar prototipos creados a partir de un diseño asistido por computadora (CAD) y su posterior manufactura asistida por computadora (CAM) (J. H. Park et al., 2017). Este proceso se da mediante la deposición capa a capa de material con espesores de 0,001 a 0,1 pulgadas. Esta técnica se diferencia de las tecnologías de manufactura por sustracción de material ya que en este no hay eliminación de material; Entre los equipos de impresión 3D se pueden encontrar máquinas de pequeño tamaño para uso personal con requerimientos mínimos para el usuario hasta máquinas más robustas de uso industrial que exigen personal capacitado y que puedan fabricar una considerable cantidad de productos con amplios resultados en tiempos muy reducidos (Tejo-Otero et al., 2020).

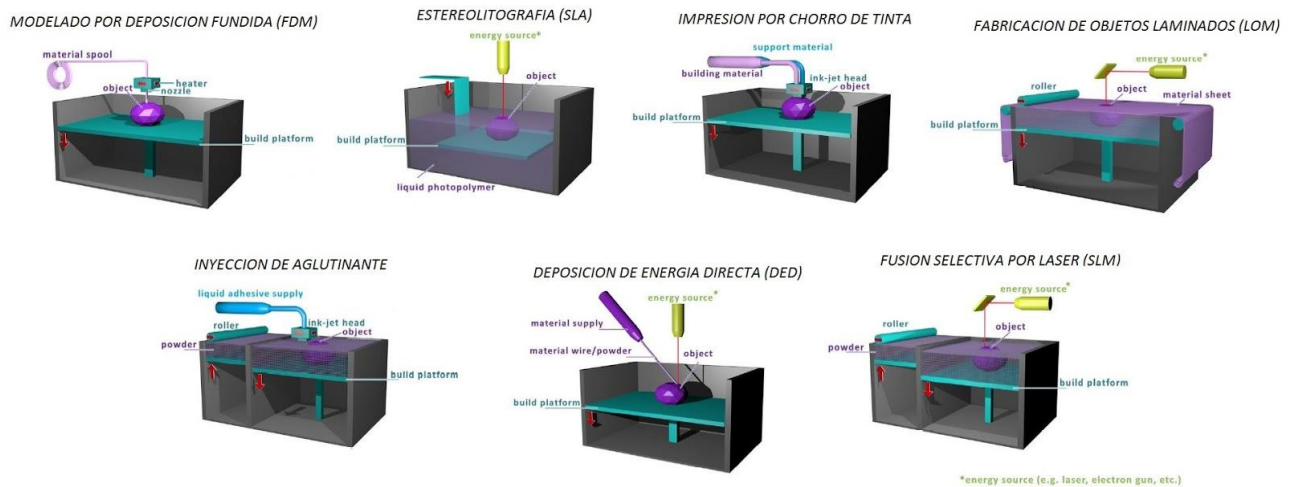
La bioimpresión 3D se ha utilizado durante los últimos años como una técnica flexible y poderosa para la fabricación avanzada en el cuidado de la salud. Aunque ha venido en desarrollo durante más de dos décadas hasta hace muy poco se ha perfeccionado para aplicaciones en la vida cotidiana. Esta tecnología ofrece una gran versatilidad para la construcción con materiales de estructuras internas y externas controladas con mucha precisión. Las técnicas de manufactura aditiva hacen posible el uso de casi cualquier diseño de micro arquitectura para lograr un conjunto deseado de características físicas, mecánicas y biológicas. La impresión 3D tiene gran cabida en el mercado pues puede suprimir la dependencia de proveedores puesto que crea sus propias piezas, explorando nuevos mercados, adicionalmente está revolucionando los procesos de fabricación pues aportan ventajas a los procesos de fabricación que se conocen hoy en día (Zadpoor & Malda, 2017) (J. Li et al., 2016c) (Vanaei et al., 2021)(Raman & Bashir, 2015).

Entre las técnicas más comunes de impresión 3D (Ngo et al., 2018)(Vanaei et al., 2021)(J. Li et al., 2016c) se encontraron los siguientes procesos:

- Modelado de deposición fundida (FDM)
- Estereolitografía (SLA)
- Impresión por chorro de tinta
- Fabricación de objetos laminados (LOM)
- Inyección de aglutinante
- Deposición de energía directa (DED)
- Fusión selectiva por láser (SLM) o ligadura líquida en impresión tridimensional (3DP).

Desde la década de los ochentas se han venido desarrollando investigaciones acerca de la estereolitografía, La empresa 3D SYSTEMS logra fabricar la primera pieza en 3D, inventa la estereolitografía y registra su patente, como resultado la empresa se posiciona como pionera en el mercado mundial de las impresiones 3D. A partir de esto se logran desarrollar nuevas técnicas que permitirá tener mayores aplicaciones (3D Systems, 2016).

## PROCESOS ADITIVOS DE MANUFACTURA



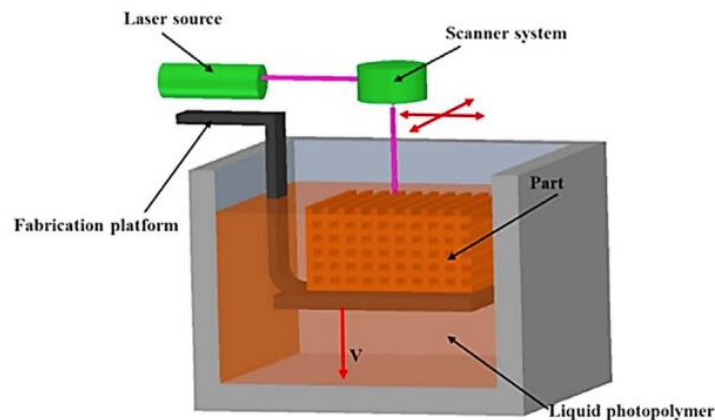
**Figura 1.** Procesos aditivos de manufactura, \*Imagen replicada.  
**Fuente:** (Zadpoor & Malda, 2017)

### 3.2. Estereolitografía.

La estereolitografía (SLA) es uno de los primeros métodos utilizados para la fabricación aditiva. Fue desarrollada en la década de 1980 (Ngo et al., 2018) (3D Systems, 2016) Esta técnica utiliza un haz de electrones para generar una reacción en cadena sobre una capa de resina o solución de monómero, la cual genera cadenas poliméricas y después de la polimerización, se solidifica un patrón dentro de la capa de resina para mantener las capas siguiente. La resina que no reaccionó en el proceso será eliminada al final de la impresión con un tratamiento posterior como calentamiento o fotopolimerización. unos de los factores que controlan el espesor de la capa son la energía de la fuente de luz y la exposición, la SLA utiliza matrices de microespejos digitales para controlar la intensidad de la luz para polimerizar materiales poliméricos sensibles a la luz. Una de las ventajas de la SLA es que se puede utilizar de manera eficaz para la fabricación aditiva de nanocompuestos complejos (Zadpoor & Malda, 2017) (J. Li et al., 2016c).



Se han usado fotoiniciadores sensibles a los rayos UV, pero se detectó que los rayos UV son dañinos para el ADN celular y causan cáncer de piel, debido a ello se adelantaron investigaciones en 2015 sobre el uso de luz visible personalizada en un sistema SLA, incluido un proyector de haz comercial y bioenlaces. Dentro de las aplicaciones de esta técnica tenemos la impresión de hidrogeles sensibles a la luz capa por capa, en el cual el tiempo total de impresión depende solo del grosor de la estructura. En combinación con datos obtenidos mediante resonancia magnética y tomografía computarizada resulta una técnica poderosa y precisa para aplicaciones de regeneración, rehabilitación y reconstrucción de órganos y tejidos para pacientes. En comparación con otras técnicas sólidas de forma libre, SLA tiene la mayor precisión de fabricación y en este proceso se pueden utilizar un número cada vez mayor de materiales (J. Li et al., 2016c) (Raman & Bashir, 2015).



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento impresión por estereolitografía.

**Fuente:** (Ngo et al., 2018)

### **3.3. Biomateriales usados en la técnica estereolitográfica.**

Esta técnica de fotopolimerización requiere de un material de impresión que permita el proceso de estereolitografía, el cual consiste en depositar capas adyacentes de una geometría 3D específica mediante un material fotosensible, entre ellos, resinas (Mirkhalaf et al., 2021). Este tipo de materia garantiza la reacción espontánea bajo luz ultravioleta que permite la bioimpresión, por ejemplo, de implantes que requieren de geometrías complejas (Grix et al., 2018). Es de vital importancia que esta base cumpla con criterios de biocompatibilidad (Hoffmann et al., 2017) para que se asimile el material como potencial biomédico y proporcione las propiedades físicas adecuadas.

Así mismo, las propiedades del material a elegir también dependen de los componentes que se tienen en la reacción de polimerización, la cual consta de 3 fases: Iniciación, propagación y finalización, en sí el proceso termina con un polímero, por ejemplo, en odontología, que parte en estado líquido y finaliza en sólido (Pratap et al., 2019). Inicialmente, se tiene una matriz orgánica compuesta por cadena de monómeros como diluyentes clave e iniciadores de la fotopolimerización (Quisiguiña Guevara, 2017). Este iniciador es un compuesto químico que comienza la reacción en secuencia, por lo tanto, debe generar radicales libres, que, para el caso de los fotopolimerizables este agente activo se obtiene con la utilización de sistemas de emisión de luz (Quispe, 2018).

Debido a que la mayoría de resinas no se reticulan fácilmente mediante la aplicación de un espectro de luz, requieren un fotoiniciador. En la tabla 1 se observan algunos de los fotoiniciadores y sus características.

**Tabla 1.** Algunos fotoiniciadores usados en la técnica de estereolitografía para bioimpresión 3D.

**Fuente:** Elaboración propia.

<b>Fotoiniciador</b>	<b>Uso destacado</b>	<b>Pico longitud de onda</b>	<b>Características</b>	<b>Referencias</b>
Irgacure 2959	Armazones en ingeniería de tejidos y cultivo celular 3D.	257 – 276 nm	-De los fotoiniciadores Irgacure es el menos tóxico. -Es el más utilizado, debido a su moderada solubilidad en agua y baja citotoxicidad.	(Lee & Kim, 2020) (Guerra et al., 2019) (Mondschein et al., 2017) (Shim et al., 2017)
Canforquinona	Formulaciones dentales poliméricas, andamios con incorporación de células vivas, administración de fármacos.	400 nm >	Tiene una buena aceptación clínica, pero tiene baja foto reactividad y escasa solubilidad en agua. Aun así, se siguen mejorando formulaciones estereolitográficas.	(Kamoun et al., 2016) (Xu et al., 2021) (Qi et al., 2013)
Lucirin TPO-L	Armazones porosos en el campo de la ingeniería de tejidos óseos.	365 nm	-Líquido con amplia solubilidad.	(Guillaume et al., 2017) (R. Zhou et al., 2019) (Mendonca et al., 2008)
BAPO	Restauración dental.	405 nm	-No necesitan ningún co-iniciador ya que presenta escisión homolítica. - Pueden activarse con luz visible pero se colorea. -Menor toxicidad.	(Barcelos et al., 2020) (Besse et al., 2016)
DPTBP	Objetos de consumo que requieran mostrar transparencia y fuerte resistencia mecánica.	400 nm	-Puede ser activado por una fuente de luz visible pero es casi incoloro	(H. K. Park et al., 2018)

El siguiente componente que compone la matriz extracelular corresponde a los líquidos fotocurables que son la base para el proceso de fabricación aditiva; conocidos como resinas (X. R. Li et al., 2019). El desarrollo tecnológico en bioimpresión 3D depende de nuevos materiales estructurados y composiciones de materiales en gradiente como las resinas y otros

compuestos, por ejemplo, la adición de partículas micrométricas de alúmina (Kurimoto et al., 2018). Los componentes adicionales suelen ser disolventes orgánicos que permiten la síntesis de polímero, entre los diluentes menos reactivos están: lactato de etilo, NMP y carbonato de propileno (van Bochove et al., 2016). En la literatura se pueden encontrar investigaciones de solventes que agregados al fotopolímero base actúan como plastificantes, lo cual genera una disminución en la viscosidad de las resinas imprimibles (Mondschein et al., 2017). Otro ejemplo, abarca cómo un buen disolvente aumenta las relaciones de hinchamiento de redes poliméricas, dependiendo los pesos moleculares de las resinas a usar (van Bochove & Grijpma, 2019). Un procesamiento preciso mediante estereolitografía, debe garantizar que la viscosidad de la resina fotocurable sea baja para permitir el flujo y una distribución adecuada del producto (van Bochove et al., 2016) durante la fabricación de un dispositivo biomédico o implante.

A medida que la tecnología de fabricación estereolitográfica se expande, las resinas deben ser más específicas y con procesos que no tengan altos efectos citotóxicos. Estas resinas fotosensibles para aplicaciones biomédicas, además de absorber y curar eficazmente en respuesta a la irradiación de la luz, deben ser biocompatibles. Gran cantidad de los oligómeros que se utilizan actualmente para SLA son derivados de poliacrilato, grupos vinilo se entrecruzan con diferentes monómeros. Entre las resinas a base de acrilato, los monómeros a base de metacrilato se utilizan ampliamente debido a su alta resistencia al calor, en la Tabla 2, se presentan las principales resinas y sus características.

**Tabla 2.** Principales resinas mencionas en literatura en técnica de estereolitografía para bioimpresión 3D.

**Fuente:** Elaboración propia.

Material	Descripción	Características	Uso destacado.	Referencias
Gelatin methacrylate (GelMA).	Hidrogel fotorreticulable sintetizado mediante la introducción de un grupo metacrilato en la gelatina.	- Material de bioenlace adecuado para la maduración aditiva. - Aumenta la viabilidad celular porque se produce reticulación en el material, debido a irradiación de luz durante un corto tiempo.	Ingeniería de tejidos y medicina regenerativa	(Shirahama et al., 2016) (Ko & Kwon, 2020)
Methacrylated hyaluronic acid (MeHA)	Hidrogel a base de ácido hialurónico de alto peso molecular modificado con grupos metacrilato.	-Fotopolimerizables con mayor rigidez y más resistentes a la degradación.	Medicina regenerativa ósea, tecnología reparadora en ortopedia.	(J.A. et al., 2020) (Zheng et al., 2020) (Poldervaart et al., 2017)
Poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA)	PEG se foto-reticula mediante la adición de grupos acrilato fotosensibles al final de la cadena del polímero, formando un hidrogel de diacrilato de polietilenglicol fotosensible.	-Capacidad para modificarse con las funcionalidades de superficie o péptidos deseados. -Propiedades mecánicas pueden modificarse en función de su peso molecular. -Efectivo para la encapsulación celular.	Regeneración de varios tejidos (generalmente los blandos).	(Anandakrishnan, 2015) (Warr et al., 2020) (A et al., 2020)
Poly(trimethylene carbonate) (PTMC)	Homopolímero que se obtiene apartir de la polimerización por apertura de anillo del carbonato de trimetileno.	-Peculiar mecanismo de degradación (erosión superficial impulsada por erosión enzimática).	Ingeniería de tejido óseo.	(Márquez Lobato, 2011) (Schüller-Ravoo et al., 2013) (Weisgrab et al., 2020)

		-Forma redes que muestran una buena compatibilidad con diferentes tipos de células.		
Polylactic acid	Polímeros sintéticos aprobado por la FDA para uso biomédico debido a la no toxicidad del ácido láctico.	-Tiene una red porosa altamente interconectada y una gran relación de superficie a volumen.  -Punto de fusión relativamente alto.	Ingeniería de tejidos, materiales sustitutivos óseos e implantación quirúrgica.	(Kolan et al., 2020) (Velioglu et al., 2019)

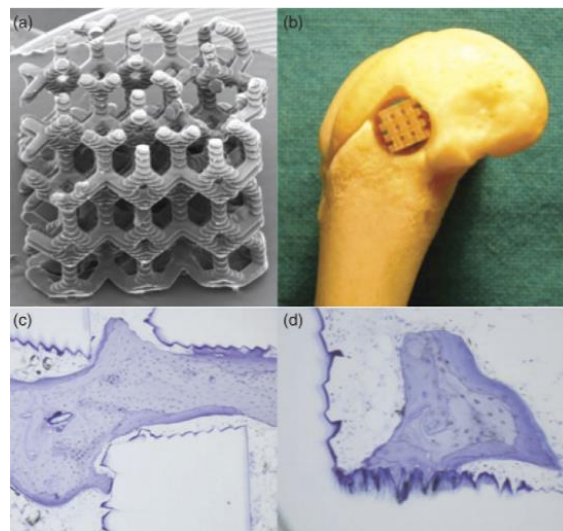
### 3.4. Aplicaciones en ingeniería de tejidos, medicina y fármacos.

#### 3.4.1. Ingeniería de tejidos.

Un campo interdisciplinario que ha venido aplicando principios de bioingeniería para desarrollar sustitutos biológicos, con el fin de restaurar y mejorar las funciones de los tejidos que componen la ciencia de la vida, es la ingeniería de tejidos. Hoy en día, la mayoría de experimentaciones con tejidos están basados en hidrogeles, que se fabrican como armazones o andamios por capas (Kamali & Shamloo, 2020), permitiendo la creación de materiales imprimibles biocompatibles con total flexibilidad en el diseño y la forma, además del desarrollo en cultivo, integración y remodelación de células (Qi et al., 2013). El mayor desafío es encontrar la formulación óptima de materiales para la elaboración de andamios porosos como investigaciones que describen una serie de arquitecturas de andamios fabricadas mediante deposición capa por capa de mezclas precursoras de biovidrio (45S5) y fotopolímeros (Ma et al., 2021) (Thavornyutikarn et al., 2017), siendo el principio para aplicaciones en crecimiento de líneas celulares intestinales (Creff et al., 2019) con bioimpresión estereolitográfica.

También se han reportado aplicaciones en evaluación de andamios para ingeniería de tejido óseo, por ejemplo, Wang et al. consideró una guía donde se evaluaba el buen comportamiento

biológico y mecánico de la hidroxiapatita, y de su compatibilidad con células madre mesenquimales de la médula ósea, que con base a la porosidad del hueso se obtuvo un buen efecto sobre la proliferación celular (Wang et al., 2020). Adicionalmente, se ha abarcado estereolitografía en la bioimpresión de huesos usando nanopartículas de fosfato de calcio (Ullah et al., 2021), bioenlaces compuestos con óxido de grafeno (J. Zhang et al., 2021) y también en aplicaciones de huesos o tejidos de la cadera dañados (Okolie et al., 2020). Con el uso de andamios como implantes se pretende biomimetizar los intrincados diseños que se encuentran en la naturaleza, viéndose también el potencial significativo como técnica de fabricación eficiente en órganos.



**Figura 3.** Andamios biocompatibles para la ingeniería de tejidos óseos fabricados mediante estereolitografía. (a) andamio fabricado con una resina de éster vinílico biocompatible; (b) colocación de andamios fabricados con SLA in situ; (c) vista ampliada mostrando integración del sistema huésped; (d) proliferación y crecimiento en respuesta a la arquitectura de andamio a microescala

**Fuente:** (Salonitis, 2014).

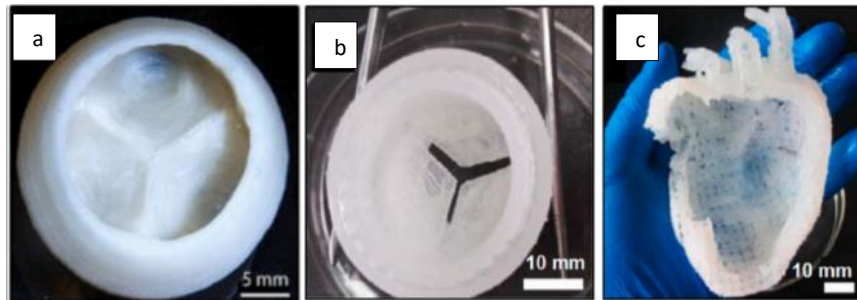
### *3.4.2. Órganos para medicina regenerativa.*

El nivel de detalle de la bioimpresión 3D estereolitográfica ha logrado desarrollar la fabricación de estructuras complejas que no se logran con métodos convencionales. Actualmente, sistemas de impresión se encargan de adaptar materiales como prototipos donde van células humanas, por consiguiente, moléculas específicas que permiten la construcción de órganos comenzando por la piel y lo que abarca la construcción de tejido (Murr, 2016). Recientemente, se han reportado avances en la fabricación de hidrogel para desbloquear la libertad de diseño en la ingeniería de órganos, algunos de ellos, con aplicaciones destacables en vascularización, por ejemplo, impresión 3D de sistemas intravasculares y multivasculares en material fotopolimerizable con estereolitografía de proyección (Miller et al., 2012; B. Zhang & Radisic, 2020). A pesar de que se abarca una implementación técnica complicada, actualmente, las investigaciones están desarrollando biomateriales de alto rendimiento que significan avances en tejidos biológicos vascularizados. En Thomas et al. examinan múltiples formulaciones de fotoenlaces, basadas en ácido hialurónico, con el fin de encontrar un sistema de materiales que logre la fabricación y modelación de cultivos celulares en 3D con canales revestidos de células endoteliales perfundibles (Thomas et al., 2020). Krishnamoorthy et al. logra la fabricación de estructuras de tipo vascular 3D encapsuladas en células utilizando GelMA y una máscara que cambia dinámicamente permitiendo exponer los materiales fotorreticulables a patrones fotónicos, cambios de concentración y la relevancia de sus propiedades ópticas (Krishnamoorthy et al., 2020). Esta bioingeniería también ha logrado que la ciencia pueda abordar el diseño de construcciones valvulares, donde se han fabricado desde una válvula aórtica porcina (Hockaday et al., 2012; Hussain & Butcher, 2018), estructuras cardíacas completas de alta resolución con inyección de tinta combinada y estereolitografía guiada (Liu et al., 2021);



hasta intentos basados en soportes de hidrogel para que investigadores hayan logrado bioimprimir la estructura general del corazón (Hinton et al., 2015).

Entre otras aplicaciones biomédicas, el uso urológico se encuentra en etapa temprana de desarrollo, aun así ya se ha abarcado moldes de la superficie del pene que utiliza la técnica expuesta para imprimir un aplicador personalizado para tratamientos del cáncer (D'Alimonte et al., 2019; J. et al., 2015). También se mencionan usos en cirugía ortopédica, la neurocirugía (Colaco et al., 2018) y con gran uso en una variedad de aplicaciones odontológicas como implantes y cirugía maxilofacial (Etemad-Shahidi et al., 2020; Revilla-León et al., 2019). Por último, no solo en lo que concierne al sistema cardiovascular, si no también se reportó información sobre tejidos traqueales y como la estereolitografía es el método más prometedor para la bioimpresión del parénquima pulmonar, tráqueas, donde revisa los criterios para realizar una construcción integrada de pulmón (Mahfouzi et al., 2021).



**Figura 4.** Estructuras cardíacas y de alta resolución diseñadas por bioimpresión 3D avanzada. a, b) estructura similar a una válvula cardíaca c) corazón izquierdo con una construcción similar a un vaso grande

**Fuente:** (Liu et al., 2021).

### *3.4.3. Administración de fármacos.*

La estandarización de tecnologías de impresión 3D que utilizan computadoras para el diseño, es la parte fundamental en el control de factores químicos apropiados a la hora de fabricar

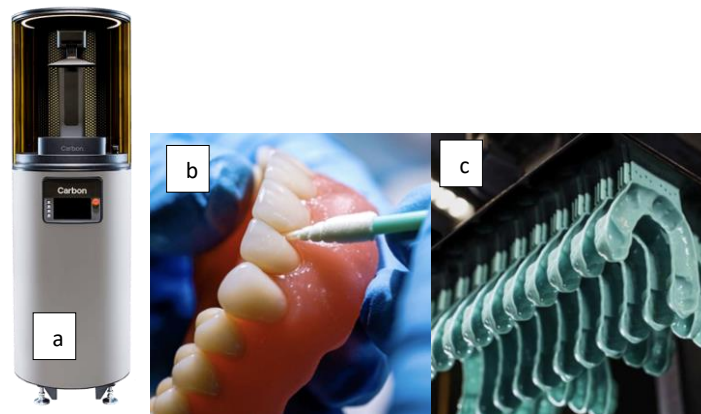
tejidos y órganos, por lo tanto, se han explorado sistemas de administración de fármacos con andamios 3D que permitan liberar estas biomoléculas (J.W. & D.-W., 2015). Es por esta razón que, la fabricación aditiva se está aplicando en innovaciones del desarrollo farmacéutico empezando los primeros medicamentos impresos en 3D (Khan et al., 2019). La síntesis directa de materiales porosos a través de copolímeros logra una integración de macroporos, esto indica que se aumenta el transporte de masa y se pueden implementar andamios (Limongi et al., 2020) para ponerse en práctica en la administración de fármacos. Xu et al. evalúa la viabilidad de la técnica estereolitográfica para fabricar una polipíldora antihipertensiva multicapa de cuatro fármacos estudiando su reacción química inesperada (Xu et al., 2020). Es importante resaltar como la bioimpresión 3D proporciona una flexibilidad en términos de formas de dosificación de medicamentos personalizadas (Warsi et al., 2018), de esta manera, se han logrado la creación de geometrías complejas que en tendencias futuras, se fabricarán a pedido del paciente con una cinética de liberación de medicamento específica.

### **3.5. Proyección de la técnica.**

De acuerdo a las múltiples aplicaciones, la estereolitografía ha venido tomando importancia en áreas de la medicina, encontrando aplicaciones en la odontología (Pratap et al., 2019), la oftalmología, la rehabilitación, la reconstrucción y/o regeneración de órganos y tejidos, también, es de suma importancia sus aportes a la enseñanza con modelos que ayuden en la planificación quirúrgica. Todos estos estudios dejan abiertos un sin número de caminos para proseguir con nuevas investigaciones (Tejo-Otero et al., 2020) (Y. Zhou, 2017) (Nyberg et al., 2017)(J. H. Park et al., 2017) (Liu et al., 2021) (Canabrava et al., 2015) (Alonzo et al., 2019) (Ostrovidov et al., 2019) (Castro & Zhang, 2016) (Leiva et al., 2017).

El área médica es uno de los campos más prometedores para la estereolitografía, la capacidad de imprimir andamios de hidrogel, vascularizados y altas velocidades abre camino en diversas aplicaciones tisulares, así mismo la generación de tejido cartilaginoso (3D Systems, 2016) (Agarwal et al., 2021).

En el año 2016 la empresa 3D SYSTEMS presenta la nueva tecnología “figure 4 SLA”, siendo esta la siguiente generación de la estereolitografía. Se han encontrado investigaciones que hacen uso de esta nueva técnica obteniendo tejidos con propiedades dinámicas en el tiempo (Miao et al., 2018) (3D Systems, 2016).



**Figura 5.** M2 3D printer de la marca CARBON. a) Equipo de impresión. b,c) Implantes dentales producto de la impresora.

**Fuente:** (Carbon, 2021)

Otra de las técnicas con miras al futuro es la microestereolitografía, la cual emplea tamaños de impresión mucho más pequeños que la técnica convencional, abriendo camino a aplicaciones que requieren mayor precisión como es el caso de microagujas desarrolladas por este método para la carga de medicamentos (Han et al., 2019) (Dubbin et al., 2021) (Lu et al., 2015).

Para algunas aplicaciones los tiempos de generación de prototipos mediante esta técnica son elevados dificultando su uso, se proyecta que estos tiempos tendrán mejoras con la elaboración de nuevas impresoras con más alta tecnología que permitan mejor precisión en menor tiempo. Los modelos generados suelen ser frágiles y no tan fuertes como los creados con otras tecnologías de impresión 3D; La búsqueda de nuevos materiales permitirá tener piezas finales con mejores características tales como biocompatibilidad, aspectos dinámicos, propiedades mecánicas específicas, dependiendo su aplicación (Miao et al., 2018)(3D Systems, 2016).

#### 4. CONCLUSIONES

La estereolitografía es una técnica de fabricación aditiva de gran versatilidad debido a la variedad de diseños y arquitecturas posibles, así como de su alto nivel de detalle. Se encontró que tiene fuertes proyecciones en aplicaciones biomédicas como ingeniería de tejidos, cultivo celular, fabricación de implantes, aplicaciones dentales, administración de fármacos, mediante el uso de materiales que permitan la fotopolimerización, por lo tanto, para el proceso se han implementado fotoiniciadores como Irgacure 2959, Canforquinona, Lucirin TPO-L, además de resinas hechas de hidrogel fotorreticulable (GelMA, MeHA) y sus respectivos solventes. Adicionalmente, esta técnica puede ser combinada con datos obtenidos mediante el diagnóstico médico, por ejemplo, en resonancia magnética o tomografía computarizada, brindando una mejora y facilidad en la calidad de procesos de rehabilitación, reconstrucción y regeneración tanto de tejidos como de órganos, lo cual ha logrado optimizar procesos médicos de intervención quirúrgica. A medida que avanzan las investigaciones se espera obtener mejoras en los tiempos y precisión de la técnica, así como en la implementación de nuevos materiales que permitan tener mejores características de biocompatibilidad y biodegradabilidad, ampliando así la gama de aplicaciones en la bioingeniería, ingeniería biomédica y la medicina regenerativa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3D Systems, I. (2016, May 2). *3D Systems Infocenter Documentation Library*. Nuestra Historia.
- A, T., P, E., E, K., S, T., E, K., I, S., V, D., & V, P. (2020). Stereolithographic fabrication of three-dimensional permeable scaffolds from CaP/PEGDA hydrogel biocomposites for use as bone grafts. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *110*, 103922. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32957218/>
- Agarwal, T., Chiesa, I., Presutti, D., Irawan, V., Vajanthri, K. Y., Costantini, M., Nakagawa, Y., Tan, S. A., Makvandi, P., Zare, E. N., Sharifi, E., De Maria, C., Ikoma, T., & Maiti, T. K. (2021). Recent advances in bioprinting technologies for engineering different cartilage-based tissues. *Materials Science and Engineering C*, *123*, 112005. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112005>
- Aimar, A., Palermo, A., & Innocenti, B. (2019). The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *Journal of Healthcare Engineering*, *2019*. <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>
- Alonzo, M., AnilKumar, S., Roman, B., Tasnim, N., & Joddar, B. (2019). 3D Bioprinting of cardiac tissue and cardiac stem cell therapy. *Translational Research*, *211*, 64–83. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2019.04.004>
- Anandakrishnan, N. (2015). Design And Optimization Of PEGDA As A Functional Material For 3d Printing Of Liver Tissue. *University at Buffalo, State University of New York, September 2015*, 1–63.
- Barcelos, L. M., Borges, M. G., Soares, C. J., Menezes, M. S., Huynh, V., Logan, M. G., Fugolin, A. P. P., & Pfeifer, C. S. (2020). Effect of the photoinitiator system on the polymerization of secondary methacrylamides of systematically varied structure for dental adhesive applications. *Dental Materials*, *36*(3), 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.01.020>
- Besse, V., Derbanne, M. A., Pham, T. N., Cook, W. D., & Le Pluart, L. (2016). Photopolymerization study and adhesive properties of self-etch adhesives containing bis(acyl)phosphine oxide initiator. *Dental Materials*, *32*(4), 561–569. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.01.005>
- Canabrava, S., Diniz-Filho, A., Schor, P., Fagundes, D. F., Lopes, A., & Batista, W. D. (2015). Production of an intraocular device using 3D printing: An innovative technology for ophthalmology. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, *78*(6), 393–394. <https://doi.org/10.5935/0004-2749.20150105>
- Carbon, I. (2021). REVOLUTIONIZING DENTAL LABS. *Carbon, Inc. 1089 Mills Way*.
- Castro, N. J., & Zhang, L. G. (2016). Biomimetic Nanocomposite Hydrogels for Cartilage Regeneration. In *Nanocomposites for Musculoskeletal Tissue Regeneration* (pp. 259–281). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-452-9.00012-1>
- Colaco, M., Igel, D. A., & Atala, A. (2018). The potential of 3D printing in urological

- research and patient care. *Nature Reviews Urology*, *15*(4), 213–221.  
<https://doi.org/10.1038/nrurol.2018.6>
- Creff, J., Courson, R., Mangeat, T., Foncy, J., Souleille, S., Thibault, C., Besson, A., & Malaquin, L. (2019). Fabrication of 3D scaffolds reproducing intestinal epithelium topography by high-resolution 3D stereolithography. *Biomaterials*, *221*.  
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119404>
- D'Alimonte, L., Ravi, A., Helou, J., Morrison, D., Mendez, L. C., Easton, H., & Morton, G. (2019). Optimized penile surface mold brachytherapy using latest stereolithography techniques: A single-institution experience. *Brachytherapy*, *18*(3), 348–352.  
<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2019.01.002>
- Derakhshanfar, S., Mbeleck, R., Xu, K., Zhang, X., Zhong, W., & Xing, M. (2018). 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: A review of recent trends and advances. *Bioactive Materials*, *3*(2), 144–156.  
<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.11.008>
- Dubbin, K., Dong, Z., Park, D. M., Alvarado, J., Su, J., Wasson, E., Robertson, C., Jackson, J., Bose, A., Moya, M. L., Jiao, Y., & Hynes, W. F. (2021). Projection Microstereolithographic Microbial Bioprinting for Engineered Biofilms. *Nano Letters*, *21*(3), 1352–1359. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c04100>
- Etemad-Shahidi, Y., Qallandar, O. B., Evenden, J., Alifui-Segbaya, F., & Ahmed, K. E. (2020). Accuracy of 3-Dimensionally Printed Full-Arch Dental Models: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, *9*(10), 3357.  
<https://doi.org/10.3390/jcm9103357>
- Grix, T., Ruppelt, A., Thomas, A., Amler, A. K., Noichl, B. P., Lauster, R., & Kloke, L. (2018). Bioprinting perfusion-enabled liver equivalents for advanced organ-on-a-chip applications. *Genes*, *9*(4). <https://doi.org/10.3390/genes9040176>
- Gu, Z., Fu, J., Lin, H., & He, Y. (2020). Development of 3D bioprinting: From printing methods to biomedical applications. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *15*(5), 529–557. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2019.11.003>
- Guerra, A. J., Lara-Padilla, H., Becker, M. L., Rodriguez, C. A., & Dean, D. (2019). Photopolymerizable Resins for 3D-Printing Solid-Cured Tissue Engineered Implants. *Current Drug Targets*, *20*(8), 823–838.  
<https://doi.org/10.2174/1389450120666190114122815>
- Guillaume, O., Geven, M. A., Grijpma, D. W., Tang, T. T., Qin, L., Lai, Y. X., Yuan, H., Richards, R. G., & Eglin, D. (2017). Poly(trimethylene carbonate) and nano-hydroxyapatite porous scaffolds manufactured by stereolithography. *Polymers for Advanced Technologies*, *28*(10), 1219–1225. <https://doi.org/10.1002/pat.3892>
- Han, D., Yang, C., Fang, N. X., & Lee, H. (2019). Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control. *Additive Manufacturing*, *27*, 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.031>
- Hinton, T. J., Jallerat, Q., Palchesko, R. N., Park, J. H., Grodzicki, M. S., Shue, H. J.,

- Ramadan, M. H., Hudson, A. R., & Feinberg, A. W. (2015). Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels. *Science Advances*, *1*(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500758>
- Hockaday, L. A., Kang, K. H., Colangelo, N. W., Cheung, P. Y. C., Duan, B., Malone, E., Wu, J., Girardi, L. N., Bonassar, L. J., Lipson, H., Chu, C. C., & Butcher, J. T. (2012). Rapid 3D printing of anatomically accurate and mechanically heterogeneous aortic valve hydrogel scaffolds. *Biofabrication*, *4*(3). <https://doi.org/10.1088/1758-5082/4/3/035005>
- Hoffmann, A., Leonards, H., Tobies, N., Pongratz, L., Kreuels, K., Kreimendahl, F., Apel, C., Wehner, M., & Nottrodt, N. (2017). New stereolithographic resin providing functional surfaces for biocompatible three-dimensional printing. *Journal of Tissue Engineering*, *8*. <https://doi.org/10.1177/2041731417744485>
- Hussain, Y., & Butcher, J. T. (2018). Bioprinting cardiovascular organs. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, 163–187. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00009-2>
- J., H., G., M., H., E., L., J., L., D., & A., R. (2015). Customized penile plesiobrachytherapy using latest stereolithography techniques. *Brachytherapy*, *14*, S99–S100. <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L71881950%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.brachy.2015.02.373>
- J.A., S., A.A., M., & J.D., R. (2020). Introduction to the state-of-the-art 3D bioprinting methods, design, and applications in orthopedics. *Bioprinting*, *18*. <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L2004305765%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.bprint.2019.e00070>
- J.W., L., & D.-W., C. (2015). 3D printing technology over a drug delivery for tissue engineering. *Current Pharmaceutical Design*, *21*(12), 1606–1617. <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L604848500>
- Kamali, A., & Shamloo, A. (2020). Fabrication and evaluation of a bilayer hydrogel-electrospinning scaffold prepared by the freeze-gelation method. *Journal of Biomechanics*, *98*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109466>
- Kamoun, E. A., Winkel, A., Eisenburger, M., & Menzel, H. (2016). Carboxylated camphorquinone as visible-light photoinitiator for biomedical application: Synthesis, characterization, and application Carboxylated camphorquinone as visible-light photoinitiator. *Arabian Journal of Chemistry*, *9*(5), 745–754. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.03.008>
- Khan, F. A., Narasimhan, K., Swathi, C. S. V., Mustak, S., Mustafa, G., Ahmad, M. Z., & Akhter, S. (2019). 3D Printing Technology in Customized Drug Delivery System: Current State of the Art, Prospective and the Challenges. *Current Pharmaceutical Design*, *24*(42), 5049–5061. <https://doi.org/10.2174/1381612825666190110153742>
- Ko, Y. G., & Kwon, O. H. (2020). Reinforced gelatin-methacrylate hydrogels containing poly(lactic-co-glycolic acid) nanofiber fragments for 3D bioprinting. *Journal of*



*Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 147–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.021>

- Kolan, K. C. R., Semon, J. A., Bindbeutel, A. T., Day, D. E., & Leu, M. C. (2020). Bioprinting with bioactive glass loaded polylactic acid composite and human adipose stem cells. *Bioprinting*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00075>
- Krishnamoorthy, S., Wadnap, S., Noorani, B., Xu, H., & Xu, C. (2020). Investigation of gelatin methacrylate working curves in dynamic optical projection stereolithography of vascular-like constructs. *European Polymer Journal*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109487>
- Kuo, A. P., Bhattacharjee, N., Lee, Y. S., Castro, K., Kim, Y. T., & Folch, A. (2019). High-Precision Stereolithography of Biomicrofluidic Devices. *Advanced Materials Technologies*, 4(6). <https://doi.org/10.1002/admt.201800395>
- Kurimoto, M., Sawada, T., Kato, T., & Suzuoki, Y. (2018). 3D Printing of 2 layered permittivity-graded material using UV-cured-resin/alumina composite. *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2018-May*, 1010–1013. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2018.8401209>
- Lee, J. Y., & Kim, G. H. (2020). A cryopreservable cell-laden GelMa-based scaffold fabricated using a 3D printing process supplemented with an in situ photo-crosslinking. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 85, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.02.007>
- Lee Ventola, C. (2014). Medical applications for 3D printing: Current and projected uses. *P and T*, 39(10), 704–711.
- Leiva, N., Carranza, F., & Sat, I. (2017). Estereolitografía en Odontología: Revisión bibliográfica. *Odontología Sanmarquina*, 20(1), 29. <https://doi.org/10.15381/os.v20i1.13542>
- Li, J., Chen, M., Fan, X., & Zhou, H. (2016). Recent advances in bioprinting techniques: Approaches, applications and future prospects. *Journal of Translational Medicine*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1028-0>
- Li, J., Chen, M., Fan, X., & Zhou, H. (2016c). Recent advances in bioprinting techniques: Approaches, applications and future prospects. *Journal of Translational Medicine*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1028-0>
- Li, X. R., Guo, J., Li, W. D., Zhang, L. Y., Wang, C., Guo, B. H., & Zhang, G. J. (2019). Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts. *ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642096>
- Limongi, T., Susa, F., Allione, M., & Fabrizio, E. Di. (2020). Drug delivery applications of three-dimensional printed (3DP) mesoporous scaffolds. *Pharmaceutics*, 12(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12090851>
- Liu, N., Ye, X., Yao, B., Zhao, M., Wu, P., Liu, G., Zhuang, D., Jiang, H., Chen, X., He, Y., Huang, S., & Zhu, P. (2021). Advances in 3D bioprinting technology for cardiac

- tissue engineering and regeneration. In *Bioactive Materials* (Vol. 6, Issue 5, pp. 1388–1401). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.10.021>
- Lu, Y., Mantha, S. N., Crowder, D. C., Chinchilla, S., Shah, K. N., Yun, Y. H., Wicker, R. B., & Choi, J. W. (2015). Microstereolithography and characterization of poly(propylene fumarate)-based drug-loaded microneedle arrays. *Biofabrication*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1758-5090/7/4/045001>
- Ma, Z., Xie, J., Shan, X. Z., Zhang, J., & Wang, Q. (2021). High solid content 45S5 Bioglass®-based scaffolds using stereolithographic ceramic manufacturing: process, structural and mechanical properties. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(2), 823–832. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0144-9>
- Mahfouzi, S. H., Safiabadi Tali, S. H., & Amoabediny, G. (2021). 3D bioprinting for lung and tracheal tissue engineering: Criteria, advances, challenges, and future directions. *Bioprinting*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00124>
- Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D Printing of Polymer Nanocomposites via Stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(9). <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
- Márquez Lobato, Y. (2011). Estudio de la degradación térmica de mezclas de polilactonas y poli(carbonato de trimetileno) con interés en aplicaciones biomédicas. *Universitat Politècnica de Catalunya*. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14477>
- Mason, J., Visintini, S., & Quay, T. (2016). An Overview of Clinical Applications of 3-D Printing and Bioprinting. *CADTH Issues in Emerging Health Technologies*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31211545>
- Mendonca, C. R., Correa, D. S., Baldacchini, T., Tayalia, P., & Mazur, E. (2008). Two-photon absorption spectrum of the photoinitiator Lucirin TPO-L. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 90(4), 633–636. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4367-0>
- Miao, S., Cui, H., Nowicki, M., Xia, L., Zhou, X., Lee, S. J., Zhu, W., Sarkar, K., Zhang, Z., & Zhang, L. G. (2018). Stereolithographic 4D Bioprinting of Multiresponsive Architectures for Neural Engineering. *Advanced Biosystems*, 2(9). <https://doi.org/10.1002/adbi.201800101>
- Miller, J. S., Stevens, K. R., Yang, M. T., Baker, B. M., Nguyen, D. T., Cohen, D. M., Toro, E., Chen, A. A., Galie, P. A., Yu, X., Chaturvedi, R., Bhatia, S. N., & Chen, C. S. (2012). Rapid casting of patterned vascular networks for perfusable engineered three-dimensional tissues. *Nature Mat.*, 11, 768–774.
- Mirkhalaf, M., Dao, A., Schindeler, A., Little, D. G., Dunstan, C. R., & Zreiqat, H. (2021). Personalized Baghdadite scaffolds: stereolithography, mechanics and in vivo testing. *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.03.012>
- Mondschein, R. J., Kanitkar, A., Williams, C. B., Verbridge, S. S., & Long, T. E. (2017). Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds. In *Biomaterials* (Vol. 140, pp. 170–188). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.06.005>

- Murr, L. E. (2016). Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication. *Journal of Materials Science and Technology*, 32(10), 987–995. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.011>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143(February), 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Nyberg, E. L., Farris, A. L., Hung, B. P., Dias, M., Garcia, J. R., Dorafshar, A. H., & Grayson, W. L. (2017). 3D-Printing Technologies for Craniofacial Rehabilitation, Reconstruction, and Regeneration. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1668-5>
- Okolie, O., Stachurek, I., Kandasubramanian, B., & Njuguna, J. (2020). 3d printing for hip implant applications: A review. *Polymers*, 12(11), 1–29. <https://doi.org/10.3390/polym12112682>
- Ostrovidov, S., Salehi, S., Costantini, M., Suthiwanich, K., Ebrahimi, M., Sadeghian, R. B., Fujie, T., Shi, X., Cannata, S., Gargioli, C., Tamayol, A., Dokmeci, M. R., Orive, G., Swieszkowski, W., & Khademhosseini, A. (2019). 3D Bioprinting in Skeletal Muscle Tissue Engineering. *Small*, 15(24), 1–14. <https://doi.org/10.1002/sml.201805530>
- Park, H. K., Shin, M., Kim, B., Park, J. W., & Lee, H. (2018). A visible light-curable yet visible wavelength-transparent resin for stereolithography 3D printing. *NPG Asia Materials*, 10(4), 82–89. <https://doi.org/10.1038/s41427-018-0021-x>
- Park, J. H., Jang, J., Lee, J. S., & Cho, D. W. (2017). Three-Dimensional Printing of Tissue/Organ Analogues Containing Living Cells. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), 180–194. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1611-9>
- Poldervaart, M. T., Goversen, B., De Ruijter, M., Abbadessa, A., Melchels, F. P. W., Öner, F. C., Dhert, W. J. A., Vermonden, T., & Alblas, J. (2017). 3D bioprinting of methacrylated hyaluronic acid (MeHA) hydrogel with intrinsic osteogenicity. *PLoS ONE*, 12(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177628>
- Pratap, B., Gupta, R. K., Bhardwaj, B., & Nag, M. (2019). Resin based restorative dental materials: characteristics and future perspectives. *Japanese Dental Science Review*, 55(1), 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2019.09.004>
- Qi, L., Kash, J. C., Dugan, V. G., Jagger, B. W., Lau, Y., Crouch, E. C., Hartshorn, K. L., & Taubenberger, J. K. (2013). Application of Visible Light-based Projection Stereolithography for Live Cell-Scaffold Fabrication with Designed Architecture. *Biomaterials*, 34(2), 331–339.
- Quisiguíña Guevara, S. M. (2017). Resistencia flexural y estabilidad de color de restauraciones indirectas entre resinas híbridas y cerómeros sometidos a termociclado. *Trabajo Teórico de Titulación Previo a La Obtención Del Grado de Especialista En Estética y Operatoria Dental*, 71. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/9480>

- Quispe, N. (2018). 60. Evaluación de tres técnicas de Fotopolimerización con Diodo Emisor de Luz en la Resistencia Compresiva de Resina Compuesta de Nanopartículas, Puno. *Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Magister en Salud*. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/1595>
- Raman, R., & Bashir, R. (2015). Stereolithographic 3D bioprinting for biomedical applications. *Essentials of 3D Biofabrication and Translation*, 89–121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800972-7.00006-2>
- Revilla-León, M., Meyers, M. J., Zandinejad, A., & Özcan, M. (2019). A review on chemical composition, mechanical properties, and manufacturing work flow of additively manufactured current polymers for interim dental restorations. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 31(1), 51–57. <https://doi.org/10.1111/jerd.12438>
- Salonitis, K. (2014). Stereolithography. In *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 10, pp. 19–67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3>
- Schubert, C., Van Langeveld, M. C., & Donoso, L. A. (2014). Innovations in 3D printing: A 3D overview from optics to organs. *British Journal of Ophthalmology*, 98(2), 159–161. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304446>
- Schüller-Ravoo, S., Teixeira, S. M., Feijen, J., Grijpma, D. W., & Poot, A. A. (2013). Flexible and elastic scaffolds for cartilage tissue engineering prepared by stereolithography using poly(trimethylene carbonate)-based resins. *Macromolecular Bioscience*, 13(12), 1711–1719. <https://doi.org/10.1002/mabi.201300399>
- Shim, K., Kim, S. H., Lee, D., Kim, B., Kim, T. H., Jung, Y., Choi, N., & Sung, J. H. (2017). Fabrication of micrometer-scale porous gelatin scaffolds for 3D cell culture. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 50, 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.02.012>
- Shirahama, H., Lee, B. H., Tan, L. P., & Cho, N. J. (2016). Precise tuning of facile one-pot gelatin methacryloyl (GelMA) synthesis. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep31036>
- Teerdha, P. D. A., Admali, M., Smriti, K., Pentapati, K. C., Vineetha, R., & Gadicherla, S. (2019). 3D Bio-Printing-A review on current application and future prospects in dentistry. *Journal of International Dental and Medical Research*, 12(3), 1202–1210.
- Tejo-Otero, A., Buj-Corral, I., & Fenollosa-Artés, F. (2020). 3D Printing in Medicine for Preoperative Surgical Planning: A Review. In *Annals of Biomedical Engineering* (Vol. 48, Issue 2, pp. 536–555). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02411-0>
- Thavornyutikarn, B., Tesavibul, P., Sitthiseripratip, K., Chatarapanich, N., Feltis, B., Wright, P. F. A., & Turney, T. W. (2017). Porous 45S5 Bioglass®-based scaffolds using stereolithography: Effect of partial pre-sintering on structural and mechanical properties of scaffolds. *Materials Science and Engineering C*, 75, 1281–1288. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.001>
- Thomas, A., Orellano, I., Lam, T., Noichl, B., Geiger, M. A., Amler, A. K., Kreuder, A. E., Palmer, C., Duda, G., Lauster, R., & Kloeke, L. (2020). Vascular bioprinting with

- enzymatically degradable bioinks via multi-material projection-based stereolithography. *Acta Biomaterialia*, *117*, 121–132.  
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.09.033>
- Ullah, I., Cao, L., Cui, W., Xu, Q., Yang, R., Tang, K. I., & Zhang, X. (2021). Stereolithography printing of bone scaffolds using biofunctional calcium phosphate nanoparticles. *Journal of Materials Science and Technology*, *88*, 99–108.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.062>
- van Bochove, B., & Grijpma, D. W. (2019). Photo-crosslinked synthetic biodegradable polymer networks for biomedical applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, *30*(2), 77–106. <https://doi.org/10.1080/09205063.2018.1553105>
- van Bochove, B., Hannink, G., Buma, P., & Grijpma, D. W. (2016). Preparation of Designed Poly(trimethylene carbonate) Meniscus Implants by Stereolithography: Challenges in Stereolithography. *Macromolecular Bioscience*, *16*(12), 1853–1863.  
<https://doi.org/10.1002/mabi.201600290>
- Vanaei, S., Parizi, M. S., Vanaei, S., Saleemizadehparizi, F., & Vanaei, H. R. (2021). An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application. *Engineered Regeneration*, *2*, 1–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.12.001>
- Velioglu, Z. B., Pulat, D., Demirbakan, B., Ozcan, B., Bayrak, E., & Erisken, C. (2019). 3D-printed poly(lactic acid) scaffolds for trabecular bone repair and regeneration: scaffold and native bone characterization. *Connective Tissue Research*, *60*(3), 274–282. <https://doi.org/10.1080/03008207.2018.1499732>
- Wang, Z., Huang, C., Wang, J., Zou, B., Abbas, C. A., & Wang, X. (2020). Design and Characterization of Hydroxyapatite Scaffolds Fabricated by Stereolithography for Bone Tissue Engineering Application. *Procedia CIRP*, *89*, 170–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.138>
- Warr, C., Valdoz, J. C., Bickham, B. P., Knight, C. J., Franks, N. A., Chartrand, N., Van Ry, P. M., Christensen, K. A., Nordin, G. P., & Cook, A. D. (2020). Biocompatible PEGDA Resin for 3D Printing. *ACS Applied Bio Materials*, *3*(4), 2239–2244.  
<https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00055>
- Warsi, M. H., Yusuf, M., Al Robaian, M., Khan, M., Muheem, A., & Khan, S. (2018). 3D Printing Methods for Pharmaceutical Manufacturing: Opportunity and Challenges. *Current Pharmaceutical Design*, *24*(42), 4949–4956.  
<https://doi.org/10.2174/1381612825666181206121701>
- Weisgrab, G., Guillaume, O., Guo, Z., Heimel, P., Slezak, P., Poot, A., Grijpma, D., & Ovsianikov, A. (2020). 3D printing of large-scale and highly porous biodegradable tissue engineering scaffolds from poly(trimethylene-carbonate) using two-photon-polymerization. *Biofabrication*, *12*(4). <https://doi.org/10.1088/1758-5090/abb539>
- Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., & Basit, A. W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, *329*, 743–757.

<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>

- Xu, X., Robles-Martinez, P., Madla, C. M., Joubert, F., Goyanes, A., Basit, A. W., & Gaisford, S. (2020). Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction. *Additive Manufacturing*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101071>
- Zadpoor, A. A., & Malda, J. (2017). Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1719-y>
- Zhang, B., & Radisic, M. (2020). Organ-level vascularization: The Mars mission of bioengineering. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 159(5), 2003–2007. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2019.08.128>
- Zhang, J., Eyisoğlu, H., Qin, X. H., Rubert, M., & Müller, R. (2021). 3D bioprinting of graphene oxide-incorporated cell-laden bone mimicking scaffolds for promoting scaffold fidelity, osteogenic differentiation and mineralization. *Acta Biomaterialia*, 121, 637–652. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.026>
- Zheng, Z., Eglin, D., Alini, M., Richards, G. R., Qin, L., & Lai, Y. (2020). Visible Light-Induced 3D Bioprinting Technologies and Corresponding Bioink Materials for Tissue Engineering: A Review. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.021>
- Zhou, R., Malval, J. P., Jin, M., Spangenberg, A., Pan, H., Wan, D., Morlet-Savary, F., & Knopf, S. (2019). A two-photon active chevron-shaped type i photoinitiator designed for 3D stereolithography. *Chemical Communications*, 55(44), 6233–6236. <https://doi.org/10.1039/c9cc02923k>
- Zhou, Y. (2017). The recent development and applications of fluidic channels by 3D printing. In *Journal of Biomedical Science* (Vol. 24, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12929-017-0384-2>
- Zimmerling, A., & Chen, X. (2020). Bioprinting for combating infectious diseases. *Bioprinting*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00104>