



La ingeniería de tejidos: una herramienta importante en la medicina regenerativa¹

Rafael Álvarez Chimal², Marco Antonio Álvarez Pérez³

Resumen. La ingeniería de tejidos es una disciplina que estudia y busca alternativas para regenerar estas estructuras dañadas mediante el uso de andamios diseñados con tecnologías como la impresión 3D y el electrohilado, que imitan la estructura del tejido natural. Estos andamios, combinados con células y factores bioactivos, se prueban en cultivos celulares 2D y 3D

para evaluar su eficacia y seguridad antes de aplicarlos en pacientes. Gracias a estas innovaciones, se han logrado avances en la reparación de tejidos como los huesos del cráneo, la mandíbula y las extremidades, con lo que se ofrecen tratamientos más personalizados y efectivos en medicina regenerativa.

Palabras clave. Impresión 3D, electrohilado, cultivo celular 2D y 3D, andamios, tejido óseo, regeneración, biocompatibilidad

Ingeniería de tejidos

La ingeniería de tejidos es un campo de la ciencia que está creciendo rápidamente y que busca crear reemplazos para partes del cuerpo que han resultado

1 Proyecto PAPIIT IN202924; IN213821: "Formación de esferoides de osteoblastos combinando la levitación magnética y la formación de microgotas como aplicación en la bioimpresión de microtejidos para ingeniería de tejido óseo"

2 Facultad de Odontología. rachimal65@comunidad.unam.mx

3 Facultad de Odontología. marcoalv@unam.mx



dañadas o que están enfermas, especialmente en casos donde el cuerpo no puede sanar por sí mismo.⁴

Para ayudar a que el tejido se regenere, se han desarrollado estructuras denominadas andamios.⁵ Aunque estos andamios no son como los de construcción, cumplen una función parecida: brindan soporte y orientación a las células para que puedan crecer, multiplicarse y formar tejido nuevo.⁶ La idea está inspirada en la naturaleza, pues en el cuerpo existe una estructura llamada matriz extracelular que cumple esta misma función de guía y sostén para las células.⁷

Los andamios buscan imitar esa matriz extracelular ofreciendo el entorno adecuado para que las células puedan vivir y a su vez estimular la formación de tejido. Para lograr este propósito, es muy importante elegir los materiales correctos, diseñar bien la forma y el tamaño de los poros, asegurarse de que tengan la resistencia adecuada y, en muchos casos, añadir sustancias que estimulen a las células para que crezcan más rápido y en un ambiente idóneo, lo que se conoce como la triada de la ingeniería de tejidos: células, andamios y moléculas bioactivas (figura 1).⁸ Todo esto influye en qué tan efectivo será el andamio en la regeneración del tejido.

4 Robert Langer y Joseph P. Vacanti, "Tissue Engineering," *Science* 260, núm. 5110 (1993): 920–26, <https://doi.org/10.1126/science.8493529>.

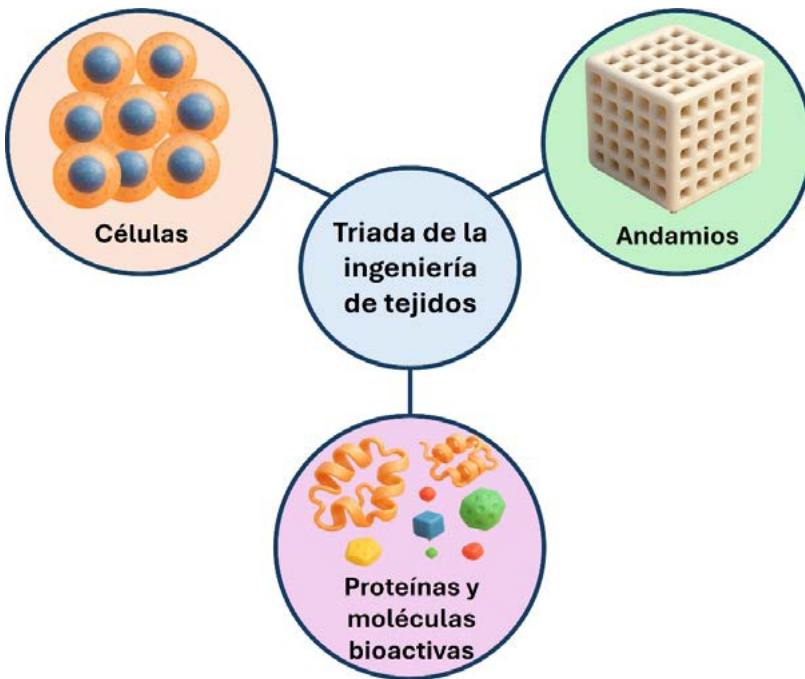
5 Molly M. Stevens, "Biomaterials for Bone Tissue Engineering," *Materials Today* 11, núm. 5 (2008): 18–25, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(08\)70086-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70086-5).

6 Mirko Filippi, Gordian Born, Mansoor Chaaban y Arnaud Scherberich, "Natural Polymeric Scaffolds in Bone Regeneration," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020), <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00474>.

7 Christian Frantz, Kathleen M. Stewart y Valerie M. Weaver, "The Extracellular Matrix at a Glance," *Journal of Cell Science* 123, núm. 24 (2010): 4195–4200, <https://doi.org/10.1242/jcs.023820>.

8 Kenneth S. Ogueri, Tahereh Jafari, Jorge L. Escobar Ivirico y Cato T. Laurencin, "Polymeric Biomaterials for Scaffold-Based Bone Regenerative Engineering," *Regenerative Engineering and Translational Medicine* 5, núm. 2 (2019): 128–54, <https://doi.org/10.1007/s40883-018-0072-0>.

Figura 1. La triada de la ingeniería de tejidos



Fuente: Elaboración propia.

Diseño de andamios

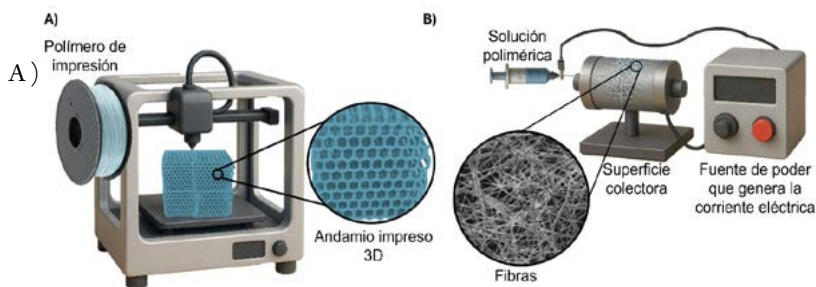
El diseño de andamios en ingeniería de tejidos es uno de los factores más importantes para lograr que un tejido dañado pueda regenerarse de forma efectiva. Los andamios son estructuras tridimensionales que se colocan en la zona afectada para dar soporte a las células y guiarlas en el proceso de reconstrucción del tejido.⁹ Para que funcionen correctamente, deben parecerse lo más posible al entorno natural del cuerpo, imitando tanto la forma como las señales que las células reciben en un tejido sano. Por eso, al diseñarlos, se presta especial atención

⁹ Young-Hyeon Kim, Saradaprasan Vijayavenkataraman y Gianluca Cidonio, "Biomaterials and Scaffolds for Tissue Engineering and Regenerative Medicine", *BMC Methods* 1, núm. 1 (2024): 2, <https://doi.org/10.1186/s44330-024-00002-7>.

a detalles como el tamaño de los poros (para que el oxígeno y los nutrientes circulen adecuadamente), la rigidez del material (que debe parecerse a la del tejido original) y la incorporación de sustancias bioactivas que estimulen el crecimiento celular.¹⁰

Entre las tecnologías que existen para diseñar y elaborar andamios, se encuentra la impresión 3D, que permite fabricarlos con una precisión milimétrica y adaptarlos a las necesidades de cada paciente o del tipo de tejido (figura 2);¹¹ otra opción es el electrohilado, que genera andamios mediante la formación de redes de fibras que dan lugar a tamaños de poro micrométricos o más pequeños, que se asemejan a la matriz extracelular (figura 2).¹² Así, el diseño de andamios se convierte en una herramienta clave para avanzar en tratamientos que buscan no solo reemplazar lo perdido, sino ayudar al cuerpo a regenerarse por sí mismo.

Figura 2. Tecnologías para diseñar andamios



Impresión 3D; B) electrohilado. Fuente: Elaboración propia.

10 Monica I. Echeverría Molina, Ketki G. Malollari y Kyriakos Komvopoulos, “Design Challenges in Polymeric Scaffolds for Tissue Engineering”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 9 (2021), <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.617141>.

11 Mohammad Vaezi, Gaoyan Zhong, Hamed Kalami y Shoufeng Yang, “Extrusion-Based 3D Printing Technologies for 3D Scaffold Engineering”, en *Functional 3D Tissue Engineering Scaffolds* (Elsevier, 2018), 235–54, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100979-6.00010-0>. Ritu Raman y Rashid Bashir, “Stereolithographic 3D Bioprinting for Biomedical Applications”, en *Essentials of 3D Biofabrication and Translation* (Elsevier, 2015), 89–121, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800972-7.00006-2>.

12 Govind Kumar Sharma y Nirmala Rachel James, “Electrospinning: The Technique and Applications”, en *Recent Developments in Nanofibers Research* (IntechOpen, 2023), <https://doi.org/10.5772/intechopen.105804>. Neha Bhardwaj y Subhas C. Kundu, “Electrospinning: A Fascinating Fiber Fabrication Technique”, *Biotechnology Advances* 28, núm. 3 (2010): 325–47, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>.

Electrohilado

El electrohilado es una técnica innovadora que permite fabricar fibras extremadamente delgadas, incluso más finas que un cabello humano, a partir de polímeros disueltos en solventes adecuados para esta técnica, como el ácido acético.¹³ Estas fibras se producen aplicando una corriente eléctrica a la solución líquida del polímero o polímeros a utilizar, el cual se estira hasta formar un hilo muy delgado que se va depositando sobre una superficie colectora.¹⁴ Lo interesante de este proceso, como se mencionó antes, es que permite crear estructuras porosas similares a las redes naturales que existen en el cuerpo humano, como la matriz extracelular que rodea a las células.¹⁵

Gracias a esta capacidad de imitar entornos biológicos, el electrohilado se ha convertido en una herramienta muy útil en la ingeniería de tejidos. Estas fibras pueden ser biodegradables, biocompatibles e incluso cargadas con medicamentos o factores de crecimiento que ayudan a acelerar la regeneración del tejido.¹⁶

Lo más destacado de esta técnica es que, a pesar de su sencillez, ofrece un control muy preciso sobre la forma, el tamaño y la composición de las fibras, lo que la hace ideal para diseñar soluciones a medida para distintos retos tanto de la medicina regenerativa como de otros campos tecnológicos.¹⁷

13 John Lannutti, Darrell H. Reneker, Teng Ma, David Lane Tomasko y Dave F. Farson, "Electrospinning for Tissue Engineering Scaffolds", *Materials Science and Engineering: C* 27, núm. 3 (2007): 504-9, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.05.019>.

14 Bhardwaj y Kundu, "Electrospinning".

15 Balu A. Venmathi Maran, Stalin Jeyachandran y Motoharu Kimura, "A Review on the Electrospinning of Polymer Nanofibers and Its Biomedical Applications", *Journal of Composites Science* 8, núm. 1 (2024): 32, <https://doi.org/10.3390/jcs8010032>.

16 Sharma y Nirmala Rachel James, "Electrospinning: The Technique". Seema Agarwal, Joachim H. Wendorff y Andreas Greiner, "Use of Electrospinning Technique for Biomedical Applications", *Polymer* 49, núm. 26 (2008): 5603-21, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.09.014>.

17 Yingchun Su, Mette Steen Toftdal, Alice Le Fric, Mingdong Dong, Xiaojun Han y Menglin Chen, "3D Electrospun Synthetic Extracellular Matrix for Tissue Regeneration", *Small Science* 1, núm. 7 (2021), <https://doi.org/10.1002/smssc.202100003>.

Impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es una tecnología que permite crear objetos tridimensionales a partir de modelos digitales, capa por capa, utilizando diferentes tipos de materiales como polímeros, resinas, cerámicas e incluso células.¹⁸ En los últimos años, esta técnica ha revolucionado múltiples áreas, desde la industria automotriz hasta la moda, pero uno de sus avances más prometedores se encuentra en el campo de la medicina regenerativa y la ingeniería de tejidos.¹⁹

Gracias a la impresión 3D, hoy es posible fabricar andamios personalizados que imitan con gran precisión la forma y estructura de los tejidos humanos. Estos andamios sirven como soporte para que las células se adhieran, crezcan y formen nuevo tejido, ya sea piel, cartílago o hueso.²⁰ Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que permite diseñar soluciones a medida para cada paciente, basadas en imágenes médicas como tomografías o resonancias, lo que aumenta las posibilidades de éxito en tratamientos de regeneración.²¹

Además, existen técnicas avanzadas, como la bioimpresión 3D, que utilizan materiales cargados con células vivas para construir tejidos funcionales de manera directa. Aunque aún se encuentra en desarrollo, esta tecnología abre la puerta a crear órganos completos en el futuro.²² La impresión 3D representa así una herramienta clave para el avance de la medicina personalizada, pues combina

18 Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen y David Hui, "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges", *Composites Part B: Engineering* 143 (2018): 172-96, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

19 Yajing Gao, Jacques Lalevée y Angélique Simon-Masseron, "An Overview on 3D Printing of Structured Porous Materials and Their Applications", *Advanced Materials Technologies* 8, núm. 17 (2023), <https://doi.org/10.1002/admt.202300377>.

20 Vaezi et al., "Extrusion-Based 3D Printing".

21 Timothy Tracy, Lei Wu, Xin Liu, Senping Cheng y Xiaoling Li, "3D Printing: Innovative Solutions for Patients and Pharmaceutical Industry", *International Journal of Pharmaceutics* 631 (2023): 122480, <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122480>.

22 P. Selcan Gungor-Ozkerim, Ilyas Inci, Yu Shrike Zhang, Ali Khademhosseini y Mehmet Remzi Dokmeci, "Bioinks for 3D Bioprinting: An Overview", *Biomaterials Science* 6, núm. 5 (2018): 915-46, <https://doi.org/10.1039/C7BM00765E>.

precisión, versatilidad y la posibilidad de crear estructuras altamente complejas que imitan la naturaleza del cuerpo humano.²³

Análisis de andamios

El análisis de los andamios es una etapa crucial en la investigación y desarrollo de materiales para la ingeniería de tejidos. Antes de probarse en organismos vivos, los andamios deben demostrar que son seguros y funcionales. Este se logra mediante pruebas en laboratorios, y para ello se utilizan células humanas o de animales, que se cultivan directamente sobre estas estructuras.²⁴

Se distinguen dos tipos de cultivos: los 2D o monocapa, donde las células se adhieren al fondo de la placa de cultivo (figura 3), y los 3D, en los que las células forman estructuras más complejas imitando un entorno más realista (figura 3). Estos procesos permiten observar cómo responden las células al material: si pueden diferenciarse, es decir, convertirse en células especializadas y formar tejido nuevo;²⁵ su viabilidad, que indica si las células sobreviven al contacto con el andamio;²⁶ la forma de las células, que muestra cómo se adhieren, multiplican, distribuyen y organizan sobre la superficie,²⁷ y la actividad metabólica, que da

23 Susmita Bose, Sahar Vahabzadeh y Amit Bandyopadhyay, “Bone Tissue Engineering Using 3D Printing”, *Materials Today* 16, núm. 12 (2013): 496–504, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.017>.

24 Johan Morales-Sánchez, Andrea Ulloa-Fernández, Silvia Castro-Piedra, Carolina Centeno-Cerdas y Laura A. Calvo-Castro, “Cultivo Celular e Ingeniería de Tejidos: Aplicaciones En Biomedicina”, *Revista Tecnología en Marcha* (2019), <https://doi.org/10.18845/tm.v32i9.4628>.

25 Charles James Kirkpatrick, Sabine Fuchs, Maria Iris Hermanns, Kirsten Peters y Ronald E. Unger, “Cell Culture Models of Higher Complexity in Tissue Engineering and Regenerative Medicine”, *Biomaterials* 28, núm. 34 (2007): 5193–98, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.08.012>.

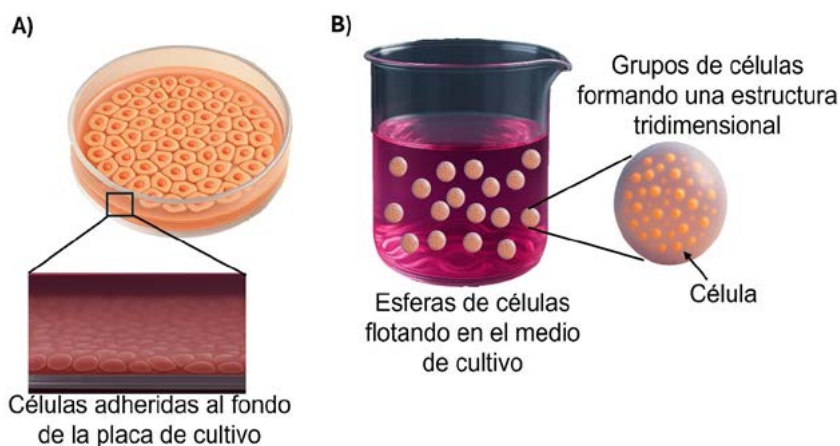
26 Amr F. Aly, Ahmed S. Eldesouky y Khaled A. M. Eid, “Evaluation, Characterization and Cell Viability of Ceramic Scaffold and Nano-Gold Loaded Ceramic Scaffold for Bone Tissue Engineering”, *American Journal of Biomedical Sciences* 4, núm. 4 (2012): 316–26, <https://doi.org/10.5099/aj120400316>.

27 James H. Purk, “Morphologic and Structural Analysis of Material-Tissue Interfaces Relevant to Dental Reconstruction”, en *Material-Tissue Interfacial Phenomena* (Elsevier, 2017), 205–29, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100330-5.00008-X>.

pistas sobre el nivel de salud y crecimiento celular.²⁸ También se puede estudiar si el andamio favorece la producción de proteínas o señales necesarias para la regeneración del tejido específico.²⁹

Estos estudios *in vitro* permiten identificar los materiales más prometedores y biocompatibles optimizando su diseño para que cumplan con su función regenerativa antes de pasar a ensayos más complejos, con lo que se reduce, por ejemplo, el uso de animales en etapas tempranas de la investigación.

Figura 3. Análisis de andamios



A) Cultivo 2D; B) cultivo 3D. Fuente: Elaboración propia.

28 Khoa-Ngoc Tran, Ashokkumar Kumaravel y Soon Ho Hong, “Impact of the Synthetic Scaffold Strategy on the Metabolic Pathway Engineering”, *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 28, núm. 3 (2023): 379–85, <https://doi.org/10.1007/s12257-022-0350-z>.

29 Mari Nagasawa, Mai Onuki, Natsuki Imoto, Kazuomi Tanaka, Ryo Tanaka, Moeka Kawada, Keiichi Imato, Kenta Iitani, Yuji Tsuchido y Naoya Takeda, “Fabrication of 3D Engineered Intestinal Tissue Producing Abundant Mucus by Air-Liquid Interface Culture Using Paper-Based Dual-Layer Scaffold”, *Biofabrication* 16, núm. 3 (2024): 035029, <https://doi.org/10.1088/1758-5090/ad504b>.

Cultivos 2D

Los cultivos celulares 2D son una de las herramientas más utilizadas en los laboratorios de biología y medicina para estudiar el comportamiento de las células fuera del cuerpo humano. En este tipo de cultivo, las células se hacen crecer sobre superficies planas, como placas de Petri o frascos de cultivo, formando una sola capa que se adhiere al fondo.³⁰

Esta técnica, desarrollada hace más de un siglo, ha sido clave para descubrir cómo funcionan las células, cómo responden a los andamios a ciertos estímulos y cómo se ven afectadas por enfermedades o medicamentos. Para esto, las células son desprendidas del fondo y después colocadas en el andamio para evaluar su comportamiento.³¹

Una de las grandes ventajas de los cultivos 2D es su simplicidad y bajo costo, lo que permite realizar experimentos repetibles y controlados. Gracias a estos cultivos, por ejemplo, se han podido estudiar los efectos de sustancias químicas, identificar genes implicados en enfermedades y probar nuevos tratamientos en etapas tempranas.³² Sin embargo, su principal limitación es que no reproducen completamente el entorno tridimensional en el que viven las células dentro del cuerpo, lo que puede afectar su comportamiento.³³

A pesar de esta desventaja, los cultivos 2D siguen siendo una herramienta fundamental, sobre todo en estudios preliminares, pruebas de toxicidad, ensayos con fármacos y análisis genéticos. Actualmente se utilizan como punto de partida para investigaciones más avanzadas, como los cultivos 3D, que buscan imitar con mayor realismo los tejidos humanos.³⁴ En conjunto, los cultivos 2D

30 Yuliang Li y Kristopher A. Kilian, “Bridging the Gap: From 2D Cell Culture to 3D Microengineered Extracellular Matrices”, *Advanced Healthcare Materials* 4, núm. 18 (2015): 2780–96, <https://doi.org/10.1002/adhm.201500427>.

31 Tomasz Górnicki et al., “Biomimetic Scaffolds—A Novel Approach to Three Dimensional Cell Culture Techniques for Potential Implementation in Tissue Engineering”, *Nanomaterials* 14, núm. 6 (2024): 531, <https://doi.org/10.3390/nano14060531>.

32 Tomasz Górnicki et al., “Biomimetic Scaffolds”.

33 Fabian Langenbach, Christian Naujoks, Ralf Smeets, Karin Berr, Rita Depprich, Norbert Kübler y Jörg Handschel, “Scaffold-Free Microtissues: Differences from Monolayer Cultures and Their Potential in Bone Tissue Engineering”, *Clinical Oral Investigations* 17, núm. 1 (2013): 9–17, <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0763-8>.

34 Marta Kapalczyńska, Tomasz Kolenda, Weronika Przybyła, Maria Zajączkowska, Anna Teresiak, Violetta Filas, Matthew Ibbs, Renata Bliźniak, Łukasz Łuczewski y Katarzyna

siguen siendo un pilar esencial en la ciencia biomédica y en la comprensión de los procesos celulares.

Cultivos 3D

Los cultivos celulares 3D representan una evolución significativa en el estudio con células, puesto que permiten recrear de forma más realista el entorno en el que estas se desarrollan dentro del cuerpo humano.³⁵ A diferencia de los cultivos 2D, donde, como se mencionó, las células crecen en una superficie plana formando una sola capa, en los cultivos 3D las células pueden organizarse en todas las direcciones y formar estructuras tridimensionales tipo esferas, denominadas esferoides (formadas por un tipo celular) u organoides (formadas por varios tipos celulares), similares a los tejidos reales.³⁶ Esto les permite comunicarse entre sí, formar uniones celulares más complejas y responder a estímulos de una manera más parecida a como lo harían en un organismo vivo.

Para lograr este tipo de cultivo, se utilizan estructuras porosas, geles o sistemas especiales de suspensión, que proporcionan un soporte físico para que las células se adhieran y crezcan en volumen.³⁷ Gracias a estas tecnologías, los cultivos 3D se han convertido en herramientas fundamentales en la ingeniería de tejidos, la investigación del cáncer, el desarrollo de fármacos y la medicina personalizada.³⁸

Una de sus principales ventajas es que permiten estudiar el comportamiento celular de manera más cercana a la realidad, y aunque su manipulación es más compleja y costosa que en los cultivos 2D, su valor científico es cada vez mayor.³⁹ Los cultivos celulares 3D no solo mejoran la calidad de la investigación

Lamperska, “2D and 3D Cell Cultures – a Comparison of Different Types of Cancer Cell Cultures”, *Archives of Medical Science* (2016), <https://doi.org/10.5114/aoms.2016.63743>.

35 Li y Kilian, “Bridging the Gap”; Kapalczyńska et al. “2D and 3D Cell Cultures”.

36 Langenbach et al., “Scaffold-Free Microtissues”.

37 Xiaowen Wu, Junxiang Su, Jizhen Wei, Nan Jiang y Xuejun Ge, “Recent Advances in Three-Dimensional Stem Cell Culture Systems and Applications”, *Stem Cells International* 2021 (2021): 1–13, <https://doi.org/10.1155/2021/9477332>.

38 Tina Sara Biju, Veeraraghavan Vishnu Priya y Arul Prakash Francis, “Role of Three-Dimensional Cell Culture in Therapeutics and Diagnostics: An Updated Review”, *Drug Delivery and Translational Research* 13, núm. 9 (2023): 2239–53, <https://doi.org/10.1007/s13346-023-01327-6>.

39 Górnicki et al., “Biomimetic Scaffolds”.

biomédica, sino que también abren la puerta a nuevas terapias, más efectivas y personalizadas.

Aplicaciones en regeneración de hueso

Las nuevas tecnologías en medicina regenerativa están revolucionando la manera en que se tratan las lesiones graves en los huesos. En lugar de depender únicamente de injertos óseos, que pueden requerir tomar hueso de otra parte del cuerpo o usar material de donante,⁴⁰ la ingeniería de tejidos ofrece una alternativa innovadora: ayudar al cuerpo a regenerar su propio hueso mediante andamios combinados con células y sustancias bioactivas.⁴¹

Gracias a la impresión 3D, se han podido fabricar andamios personalizados, con la forma exacta del hueso dañado. Estas estructuras incluyen pequeños poros y canales que permiten que las células se acomoden, respiren y comiencen a formar nuevo tejido óseo.⁴² Además, pueden estar cargadas con factores de crecimiento o células troncales, también conocidas como células madre, que aceleran la reparación.⁴³ Una técnica complementaria es el electrohilado, que permite cubrir estos andamios con fibras ultrafinas parecidas a las que el cuerpo produce naturalmente. Estas fibras mejoran la adhesión celular y crean un entorno más favorable para la regeneración del hueso.⁴⁴

40 Giannotti, Laura, Benedetta Di Chiara Stanca, Francesco Spedicato, Paola Nitti, Fabrizio Damiano, Christian Demitri, Nadia Calabriso, Maria Annunziata Carluccio, Andrea Palermo, Luisa Siculella y Eleonora Stanca, “Progress in Regenerative Medicine: Exploring Autologous Platelet Concentrates and Their Clinical Applications”, *Genes* 14, núm. 9 (2023): 1669, <https://doi.org/10.3390/genes14091669>.

41 Petra Chocholata, Vlastimil Kulda y Václav Babuska, “Fabrication of Scaffolds for Bone-Tissue Regeneration”, *Materials* 12, núm. 4 (2019): 568, <https://doi.org/10.3390/ma12040568>.

42 Davut Ege y Vasif Hasirci, “Is 3D Printing Promising for Osteochondral Tissue Regeneration?”, *ACS Applied Bio Materials* 6, núm. 4 (2023): 1431-44, <https://doi.org/10.1021/acsa-bm.3c00093>.

43 Sarah Sundelacruz y David L. Kaplan, “Stem Cell- and Scaffold-Based Tissue Engineering Approaches to Osteochondral Regenerative Medicine”, *Seminars in Cell & Developmental Biology* 20, núm. 6 (2009): 646-55, <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2009.03.017>.

44 Venmathi Maran, Jeyachandran y Kimura, “A Review on the Electrospinning”.

Con estos avances ya se están obteniendo resultados prometedores en la regeneración de varios tipos de huesos (tabla 1), ofreciendo tratamientos más personalizados, efectivos y con mejores tiempos de recuperación.

Tabla 1. Algunos huesos del cuerpo ayudados a regenerar usando la ingeniería de tejidos

Hueso	Tipo de andamio
Cráneo	Impreso 3D ⁴⁵
Mandíbula	Impreso 3D ⁴⁶
Columna	Impreso 3D ⁴⁷
Extremidades	Impreso 3D y electrohilado ⁴⁸
Subcondral (articulaciones)	Impreso 3D y electrohilado ⁴⁹

Fuente: Elaboración propia.

45 Ehsan Khorasani y Bahareh Vahidi, “3D-Printed Scaffolds for Cranial Bone Regeneration: A Systematic Review of Design, Materials, and Computational Optimization”, *Biotechnology and Bioengineering* (2025), <https://doi.org/10.1002/bit.28994>.

46 Sophia Dalfino, Paolo Savadori, Marco Piazzoni, Stephen Thaddeus Connelly, Aldo Bruno Gianni, Massimo Del Fabbro, Gianluca Martino Tartaglia, Lorenzo Moroni, “Regeneration of Critical-Sized Mandibular Defects Using 3D-Printed Composite Scaffolds: A Quantitative Evaluation of New Bone Formation in In Vivo Studies”, *Advanced Healthcare Materials* 12, núm. 21 (2023), <https://doi.org/10.1002/adhm.202300128>.

47 Tian-Yang Yuan, Jun Zhang, Tong Yu, Jiu-Ping Wu, Qin-Yi Liu, “3D Bioprinting for Spinal Cord Injury Repair”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10 (2022), <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.847344>.

48 Davood Kharaghani, Elmira Kaffashsaei, Kaiser Haider y Soo Kim, “The Effect of Polymeric Nanofibers Used for 3D-Printed Scaffolds on Cellular Activity in Tissue Engineering: A Review”, *International Journal of Molecular Sciences** 24, núm. 11 (2023): 9464, <https://doi.org/10.3390/ijms24119464>.

49 Yanyan Cao, Lei Sun, Zixian Liu, Zhizhong Shen, Wendan Jia, Peiyi Hou, Shengbo Sang, “3D Printed-Electrospun PCL/Hydroxyapatite/MWCNTs Scaffolds for the Repair of Subchondral Bone”, *Regenerative Biomaterials* 10 (2023), <https://doi.org/10.1093/rb/rbact104>.

Conclusiones

La ingeniería de tejidos representa una de las áreas más prometedoras de la medicina regenerativa, en particular en la regeneración de hueso. Gracias a tecnologías como la impresión 3D y el electrohilado, es posible diseñar andamios que imitan la estructura natural del tejido a reparar y que pueden adaptarse a las necesidades específicas de cada paciente. La evaluación de estos andamios mediante cultivos celulares 2D y 3D permite asegurar su biocompatibilidad y eficacia antes de aplicarlos en tratamientos clínicos. Estos avances están revolucionando la forma en que se abordan las lesiones óseas, ofreciendo alternativas más personalizadas, eficientes y con mayor potencial de éxito.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo UNAM-DGAPA por el financiamiento del proyecto PAPIIT IN202924. Rafael Álvarez Chimal agradece el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación a través de la beca postdoctoral.