

Artículo de revisión

Injertos óseos nanoporosos 3D para preservación de cresta alveolar

3D nanoporous bone grafts for alveolar ridge preservation

Verónica Alejandra Salame Ortiz^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-7103-5804>

Rómulo Guillermo López Torres¹ <https://orcid.org/0000-0001-9315-3388>

Gabriela Monserrath Freire Neto¹ <https://orcid.org/0000-0002-7296-0268>

Daniela Judith Araujo Moreta¹ <https://orcid.org/0000-0002-0772-7064>

¹ Universidad Autónoma de los Andes (UNIANDES), Ambato, Ecuador.

*Autor para la correspondencia: ua.veronicasalame@uniandes.edu.ec

RESUMEN

La ingeniería de tejidos constituye una disciplina interdisciplinaria que aspira a sintetizar conocimientos de biología celular, biomateriales y factores bioquímicos pertinentes, con el fin de elaborar estructuras sustitutivas que orienten y promuevan la regeneración de nuevos tejidos. El objetivo del estudio fue interpretar la evidencia actual sobre la efectividad del injerto óseo de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D para la preservación de la cresta alveolar mediante una revisión bibliográfica. Se realizó una revisión sistemática utilizando la metodología PRISMA 2020, examinándose las bases de datos MEDLINE, LILACS y Elsevier, para identificar estudios relevantes enfocados en la regeneración ósea y las técnicas de

impresión en 3D. Los resultados indican que la hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D no solo es efectiva en la preservación de la cresta alveolar, sino que también promueve la osteogénesis de manera comparable o superior a los injertos óseos tradicionales, como los autógenos y alógenos. Además, se destacó la adaptabilidad biológica de estos biomateriales, permitiendo el uso de técnicas avanzadas para mejorar la personalización y eficacia del tratamiento en pacientes, reflejando un avance significativo en el campo de la ingeniería de tejidos y la implantología. En conclusión, los injertos de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D representan un prometedor avance en la tecnología de biomateriales para la odontología reconstructiva y regenerativa. Su capacidad para integrarse biológicamente y facilitar la regeneración ósea establece un nuevo estándar en la preservación de la cresta alveolar, ofreciendo nuevas posibilidades para tratamientos más eficaces y personalizados en la práctica clínica dental.

Palabras clave: Preservación de la cresta alveolar; estructuras nanoporosas; hidroxiapatita en huesos naturales; injertos óseos de hidroxiapatita impresos en 3D; biomateriales para la regeneración ósea.

ABSTRACT

Tissue engineering is an interdisciplinary discipline that aims to synthesize knowledge of cell biology, biomaterials, and relevant biochemical factors in order to develop substitute structures that guide and promote the regeneration of new tissues. The objective of the study was to interpret the current evidence on the effectiveness of 3D printed nanoporous hydroxyapatite bone grafts for the preservation of the alveolar ridge through a literature review. A systematic review was conducted using the PRISMA 2020 methodology, examining MEDLINE, LILACS, and Elsevier databases to identify relevant studies focused on bone

regeneration and 3D printing techniques. The results indicate that 3D printed nanoporous hydroxyapatite is not only effective in preserving the alveolar ridge but also promotes osteogenesis in a manner comparable to or superior to traditional bone grafts, such as autogenous and allogeneic grafts. Additionally, the biological adaptability of these biomaterials was highlighted, allowing the use of advanced techniques to enhance the customization and efficacy of treatment in patients, reflecting a significant advancement in the field of tissue engineering and implantology. In conclusion, 3D printed nanoporous hydroxyapatite grafts represent a promising advancement in biomaterial technology for reconstructive and regenerative dentistry. Their ability to biologically integrate and facilitate bone regeneration establishes a new standard in the preservation of the alveolar ridge, offering new possibilities for more effective and personalized treatments in dental clinical practice.

Keywords: Alveolar ridge preservation; nanoporous structures; hydroxyapatite in natural bones; 3D printed hydroxyapatite bone grafts; biomaterials for bone regeneration.

Recibido: 21/09/2023

Aprobado: 10/11/2023

Introducción

La preservación de la cresta alveolar post-extracción es un desafío crucial en la odontología restaurativa y la implantología, debido a la reabsorción ósea que se produce tras la pérdida dental. El uso de injertos óseos de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D representa una innovación significativa en este campo,

ofreciendo una alternativa prometedora para mantener la integridad estructural y estética de la cresta alveolar.

Los materiales de hidroxiapatita, dada su composición química similar al hueso humano, son bien conocidos por su biocompatibilidad y capacidad de promover la osteointegración. La porosidad a nivel nanométrico de estos injertos facilita la vascularización y el crecimiento celular, elementos cruciales para la regeneración ósea exitosa. Además, la tecnología de impresión en 3D permite una personalización precisa de los injertos, adecuándose a la morfología única de cada sitio de extracción dental.

Este estudio se justifica por la necesidad de revisar exhaustivamente la literatura existente para evaluar la eficacia de los injertos óseos de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D. Al sintetizar los resultados de estudios previos, este análisis proporcionará una base de evidencia más robusta para las prácticas clínicas, ayudando a determinar la viabilidad de esta técnica como estándar en la preservación de la cresta alveolar.

La pérdida de hueso alveolar como resultado de la pérdida de un diente, una infección, un traumatismo o la resección de un tumor requiere la reconstrucción de los defectos óseos para permitir la implantación de los dientes.⁽¹⁾ Después de la extracción dental, se desencadena una cascada de eventos biológicos que generalmente resultan en cambios anatómicos locales significativos. La reabsorción de la cresta después de la extracción del diente puede reducirse mediante la preservación de la cresta alveolar (ARP).⁽²⁾

La ingeniería de tejidos es un campo interdisciplinario que tiene como objetivo combinar el conocimiento de las células, los biomateriales y los factores bioquímicos adecuados para crear una estructura sustituta para guiar y regenerar nuevos tejidos. Idealmente, el componente estructural de esta estrategia,

denominado andamio, debe estar hecho de biomateriales apropiados y fabricado para imitar la estructura física y química del tejido huésped.⁽³⁾

Se han desarrollado andamios nanofibrosos sintéticos con una morfología similar a la de las fibras de colágeno naturales bajo la hipótesis de que los andamios nanofibrosos sintéticos imitarían la función morfológica de las fibras de colágeno y crearían un microambiente más favorable para las células en comparación con los andamios de paredes sólidas, se ha encontrado resultados que la morfología nanofibrosa promueve la diferenciación y biomineralización de osteoblastos.⁽⁴⁾

La aplicación de bioandamios en la ingeniería de tejidos muestra una regeneración ósea ventajosa en el área del defecto óseo, por lo que vale la pena emplear materiales de bioandamios de alto rendimiento para la preservación de la cresta alveolar. La combinación de hidrogel, fosfatos tricálcicos, seda, combinados con hidroxiapatita se ha utilizado para estudiar la expresión osteogénica de células madre mesenquimales, cartílago y regeneración de tejido óseo.⁽⁵⁾

Aparte de esto, los hidrogeles y los materiales de nanohidroxiapatita se están introduciendo gradualmente en los estudios dentales, como la proliferación y diferenciación de las células madre de la pulpa dental, la regeneración del tejido periodontal y regeneración del hueso de la mandíbula. El uso de materiales de bioandamios para la preservación de los rebordes alveolares es menos común, y el uso de andamios de hidrogel con preservación de los rebordes alveolares en áreas estéticas es aún más raro.⁽⁵⁾

La hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (HA) es la cerámica de fosfato de calcio más investigada en comparación con otros fosfatos de calcio porque presenta la misma estructura, función y composición química que los huesos y los dientes. El hueso humano constituye hasta un 70 % de HA (componente inorgánico), un 25 % de materia orgánica y un 5 % de agua. Se ha demostrado que la hidroxiapatita

exhibe una buena afinidad celular, lo que promueve la adhesión y proliferación de los osteoblastos y la integración ósea directa.⁽⁶⁾ La HA es la forma menos soluble de las sales de fosfato de calcio naturales y proporciona una función de andamiaje osteoconductor, siendo altamente resistente a la reabsorción fisiológica.⁽⁷⁾

Se ha utilizado la impresión 3D para generar andamios con geometrías y arquitecturas controladas que promueven la osteointegración.⁽⁸⁾ La impresión 3D puede imitar de cerca la arquitectura interna de los huesos al recrear estructuras jerárquicas como los canales Haversianos.⁽⁹⁾ Para tratar defectos óseos a gran escala, el desarrollo de andamios porosos tridimensionales (3D) ha recibido una atención considerable dentro de la ingeniería ósea. Ha surgido una variedad de biomateriales y métodos de fabricación, incluida la impresión 3D, para fabricar andamios bioactivos específicos para pacientes que poseen microarquitecturas controladas para unir defectos óseos en configuraciones complejas.

Durante la última década, con el desarrollo de la industria de la impresión 3D, se ha creado una gran cantidad de andamios de ingeniería tisular para aplicaciones preclínicas y clínicas utilizando materiales novedosos y tecnologías innovadoras. La impresión 3D está vinculada al futuro de los injertos óseos para crear andamios específicos del paciente. Es fundamental lograr un equilibrio exitoso de la función celular, la viabilidad celular y la integridad mecánica en condiciones de carga.⁽¹⁰⁾

Esta revisión sistemática tiene como objetivo interpretar la evidencia actual sobre la efectividad del injerto óseo de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D para la preservación de la cresta alveolar mediante una revisión bibliográfica.

Métodos

El estudio actual adoptó un enfoque cualitativo, llevando a cabo una revisión exhaustiva de la literatura derivada de publicaciones científicas. La integridad del diseño investigativo fue esencial, orientando la búsqueda de información en varias

bases de datos, centrando la atención en la eficacia del injerto óseo de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D en la preservación de la cresta alveolar. Este análisis bibliográfico fue meticuloso, con el objetivo de recopilar datos sustanciales sobre esta técnica innovadora.

Se implementó la metodología PRISMA 2020, un protocolo que delineó una serie de etapas clave para filtrar artículos científicos, garantizando la extracción de la información más pertinente y crítica acerca del tema investigado. Se definieron criterios de elegibilidad precisos para la inclusión y exclusión, asegurando la pertinencia y relevancia de las fuentes. Las búsquedas se llevaron a cabo en tres bases de datos electrónicas destacadas: MEDLINE (a través de PubMed), LILACS y Elsevier, empleando términos y operadores booleanos específicos para afinar la búsqueda.

El proceso de selección fue inclusivo, abarcando ensayos controlados tanto aleatorios como no aleatorios, estudios de cohortes, e informes de casos, y se extendió a la revisión manual de las referencias de los artículos seleccionados para descubrir literatura adicionalmente relevante.

La recopilación de datos se fundamentó en artículos indexados que disponían de código DOI en plataformas como PubMed y The Cochrane. Los términos MeSH utilizados incluyeron 'alveolar crest', 'nanopores', y 'hydroxyapatite in natural bones', así como 'Nanoporous hydroxyapatite bone graft on 3D printer'.

Para la síntesis de la información, los hallazgos de los estudios incluidos se presentaron previamente en tablas, facilitando así una interpretación clara y estructurada. Los criterios de inclusión se aplicaron a documentos originales con resultados en pacientes que aportaran datos sobre el uso del injerto óseo de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D en el campo odontológico, abarcando

investigaciones con resultados a corto y largo plazo y limitando la selección a documentos en inglés, español, portugués y chino, publicados entre 2006 y 2023.

Se establecieron criterios de exclusión rigurosos para descartar ciertos tipos de documentos, incluyendo tesis y aquellos que tratasen el uso de injertos de hidroxiapatita en procedimientos de cirugía oral distintos o que fuesen meramente estudios in vitro. También se omitieron documentos que no aportaran información pertinente sobre la técnica investigada, así como cartas, comenta.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo, el cual ilustra claramente cómo se llevaron a cabo las búsquedas, selección y filtrado de estudios, lo cual permite entender y evaluar la rigurosidad del proceso empleado para llegar a los estudios que finalmente se analizan en el apartado de Resultados.

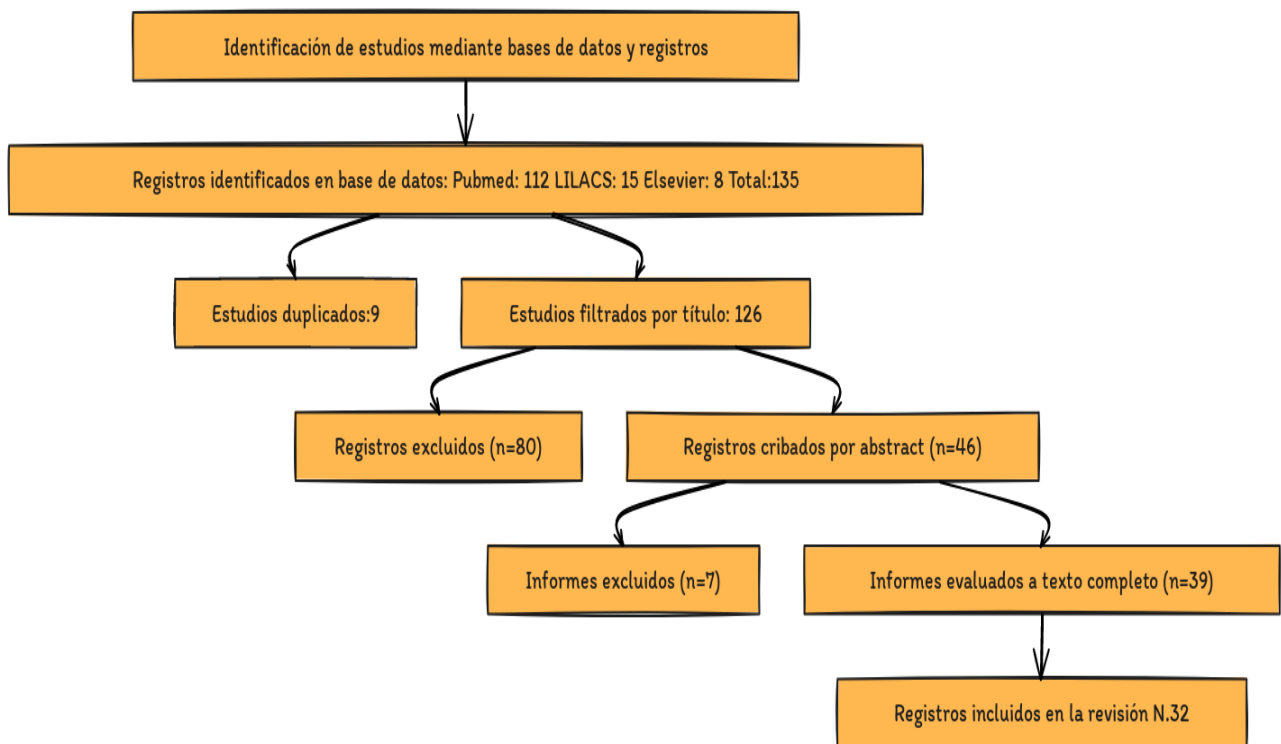


Fig. 1- Diagrama de flujo.

Resultados

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de las búsquedas efectuadas, tal como se describe en el diagrama de cribado de la Figura 1.

La hidroxiapatita (HA) es capaz de formar estructuras sólidas en escalas macro, micro y nanoporosas. Esta también puede presentarse como HA particulado, caracterizado por una estructura altamente porosa. Es utilizada como recubrimiento para implantes metálicos, con espesores que varían desde cientos de micras hasta cientos de nanómetros. Además, se ha desarrollado HA en forma de fibras similares a la lana de algodón, las cuales pueden ser electrohiladas con o sin polímeros para su uso en andamios de ingeniería de tejidos (TE).⁽¹²⁾

En años recientes, se han intensificado los esfuerzos para crear hueso artificial empleando técnicas de ingeniería tisular y la impresión 3D de HA, la cual podría ser un material alternativo para injertos óseos destinados a la preservación de la cresta alveolar.⁽⁷⁾ Numerosos estudios destacan a la HA como un biomaterial prometedor para la ingeniería de tejido óseo. A pesar de ser un biomaterial de biodegradación lenta, la HA demuestra una alta biocompatibilidad.⁽¹³⁾

En relación al proceso de degradación del andamio, se ha observado una reacción inmunológica favorable y un bajo número de linfocitos, indicando una excelente biocompatibilidad in vivo.⁽¹³⁾ HA, siendo el principal componente inorgánico del tejido óseo humano, es altamente biocompatible, bioactivo y osteoconductor, lo que facilita una interacción química efectiva con las células huésped. No obstante, presenta desafíos como su insuficiente resistencia mecánica y fragilidad que restringen su uso clínico.⁽¹³⁾

En cuanto a la preservación alveolar, este procedimiento quirúrgico busca limitar la reabsorción fisiológica del reborde alveolar post-extracción para asegurar suficiente hueso para futuros implantes. La revisión de literatura reveló varios artículos que describen técnicas efectivas de preservación del alvéolo, especialmente tras extracciones atraumáticas, utilizando biomateriales y membranas. Es crucial considerar los factores predictivos tanto locales como sistémicos en estos procedimientos.⁽¹⁴⁾

Aunque la colocación inmediata de implantes ha sido propuesta como técnica de preservación, los ensayos clínicos no han confirmado su eficacia. Actualmente, las técnicas más adoptadas por los profesionales incluyen el uso de injertos óseos, sustitutos óseos, membranas de barrera y combinaciones de estos. Al igual que en el tratamiento de defectos periodontales, estos materiales han demostrado ser efectivos en la regeneración del hueso alveolar y la preservación de la cresta. Los injertos óseos dentales, tanto autógenos como alógenos, se han propuesto recientemente como una opción preferente por su similitud química con el hueso y su capacidad para inducir osteogénesis.⁽¹⁵⁾

Se resumen algunos de los hallazgos principales de varios estudios incluidos en esta investigación, destacando la diversidad de aplicaciones y los resultados obtenidos con la hidroxiapatita nanoporosa (HA) en diversos contextos clínicos:⁽¹⁶⁾

- Mangano et al., 2007, realizaron un ensayo comparativo que demostró que la HA nanoporosa puede usarse con éxito en injertos óseos para la elevación del seno maxilar.
- Schwarz et al., 2009, observaron que mientras la aplicación combinada de NBM y CM resultó en mejoras clínicas sostenidas durante 4 años, los resultados a largo plazo de la HA sin uso de membrana de barrera fueron pobres.
- Pietruska et al., 2012, concluyeron que el uso adicional de nano hidroxiapatita como injerto óseo tras una cirugía a colgajo abierto no mejora los resultados clínicos ni radiográficos previamente obtenidos.
- Heinz et al., 2009, informaron que, a partir de los 6 meses posteriores a una cirugía, el tratamiento de defectos intraóseos con una técnica de preservación de tejidos blandos y la aplicación de HA mejoró significativamente los resultados clínicos en cuanto a la altura ósea en comparación con la técnica de preservación de tejidos blandos sola.

Estos estudios evidencian la viabilidad y los desafíos de la HA como material en procedimientos de regeneración ósea y preservación alveolar, subrayando tanto sus potenciales como sus limitaciones en la práctica clínica. Además, ilustran cómo la

tecnología de impresión 3D ha permitido el desarrollo de soluciones personalizadas que mejoran la adaptación de los injertos a las necesidades específicas de los pacientes.

La técnica de impresión tridimensional (3DP) se ha establecido como un método eficaz para la fabricación de andamios de biomateriales utilizados en la ingeniería de tejidos. Entre las cerámicas empleadas en este proceso se destaca la hidroxiapatita (HA), el componente inorgánico principal del hueso de los vertebrados. La técnica 3DP utiliza un polvo y un líquido aglutinante para unir las partículas, siendo esencial la optimización de los parámetros del proceso. Los andamios de hidroxiapatita deben poseer una porosidad significativa, generalmente entre el 40 y el 80 %.⁽¹⁷⁾

La hidroxiapatita, un material biocerámico basado en fosfato cálcico, ofrece reservas de fosfato y calcio que son cruciales para los procesos de biomineralización y regeneración ósea cuando se implanta en sitios óseos que se reabsorben lentamente (Heinz, 2009). El proceso de regeneración ósea involucra tres componentes principales: señalización osteoinductiva en el sitio de aplicación, una matriz que sirve como andamio para la formación de hueso y células huésped que pueden diferenciarse en osteocitos (Mangano *et al.*, 2015, 2003).⁽¹⁸⁾

La aplicación de hidroxiapatita se realiza mediante una jeringa en un túnel subperióstico previamente formado en la cresta ósea, seguido por el aumento del volumen del hueso alveolar usando hidroxiapatita nanoporosa tunelizada, culminando con la inserción del material.⁽¹⁹⁾

HA se caracteriza por ser la forma menos soluble de las sales de fosfato de calcio naturales, proporcionando una función de andamiaje osteoconductor resistente a la resorción fisiológica. La técnica para introducir hidroxiapatita en los injertos combina la impresión en polvo tridimensional con una transformación de fase a baja temperatura, lo que resulta en una estructura de nanohidroxiapatita poco

cristalina. Este método de baja temperatura favorece la producción de material de injerto óseo con propiedades osteoconductoras y una reabsorción osteoclástica in vivo menos intensa debido a su baja cristalinidad en comparación con los métodos de sinterización a alta temperatura.⁽²⁰⁾

Estos injertos de HA impresos en 3D se personalizan mediante tecnologías de fabricación aditiva, que incluyen el modelado computacional con datos anatómicos específicos del paciente.⁽²¹⁾ Los archivos DICOM de las exploraciones CBCT de un defecto específico se importan a un software de planificación de implantes dentales (Denti Plan, NECTEC, Tailandia), se convierten en archivos STL y luego se exportan a un software de diseño 3D (Geomagic Freeform®, 3D Systems, EE. UU.) y a un dispositivo háptico profesional (The Touch™ Haptic Device, 3D Systems, EE. UU.) para crear un bloque óseo 3D personalizado.⁽²²⁾

Un modelo de plantilla del injerto en bloque óseo se construye utilizando un contorno ideal en la superficie del hueso del paciente, adecuado para la posición final del implante dental. Finalmente, el injerto en bloque personalizado se construye capa por capa en una impresora 3D ProJet160 (3D Systems, EE. UU.) con una resolución de 300 x 450 ppp y un espesor de capa de 0,1 mm, usando hemihidrato de sulfato de calcio en combinación con un aglutinante a base de agua. Después de la construcción, los injertos impresos se sumergen en una solución de hidrogenofosfato disódico durante 24 horas para convertirlos en una estructura de hidroxiapatita. Todos los injertos de 3DHA se secan y esterilizan usando gas óxido de etileno.⁽²³⁾

Discusión

En la revisión de la literatura, se encuentra que el material de injerto óseo de hidroxiapatita impreso en 3D (3DP HA) tiene potencial para ser utilizado en la preservación de la cresta alveolar. Tradicionalmente, se consideran normales

aquellas crestas alveolares que mantienen las dimensiones bucolingual y mesiodistal del proceso alveolar tras la pérdida o extracción del diente. Sin embargo, la ausencia de papilas apicales e interdetales plantea dudas sobre si estas pueden clasificarse realmente como "normales".⁽²⁴⁾

Según García Gargallo M (2016), la pérdida de dientes puede resultar en una disponibilidad limitada de hueso para intervenciones restauradoras y estéticas adicionales, incluyendo la protrusión radicular y la pérdida de papilas y encía queratinizada, además de insensibilidad a las prótesis parciales fijas que pueden generar triángulos negros y columnas pónicas.⁽²⁵⁾

Seibert (1983) clasifica los defectos del reborde alveolar en tres clases, atendiendo a los componentes horizontal y vertical del defecto.⁽²⁶⁾

1. Clase I: Pérdida de la dimensión vestibulolingual con conservación de una altura normal (dimensión apicocoronaria) de la cresta.
2. Clase II: Pérdida de la dimensión apicocoronaria con conservación de una anchura normal (dimensión vestibulolingual) de la cresta.
3. Clase III: Pérdida tanto de la dimensión vestibulolingual como apicocoronaria, afectando la altura y anchura normales de la cresta

El microorganismo identifica los nanoporos como un material compatible, iniciando el proceso natural de formación ósea; los osteoclastos fagocitan los gránulos mientras que los osteoblastos forman hueso autógeno. A diferencia de los materiales de injerto xenogénicos, el nanoporo se sustituye completamente por hueso sin dejar residuos extraños que puedan alterar la biomecánica natural. Se ha observado que aproximadamente un 16% de estos materiales de reemplazo pueden ser detectados incluso después de 10 años.⁽²⁷⁾

En un estudio de Kai-Olaf Henkel, se observa que ocho meses después de la implantación de nuevos biomateriales nanoporosos, la formación ósea fue

completa en el área del defecto y el material extraño se reabsorbió casi por completo, mientras que con los tipos clásicos de cerámica nanoporosa se observa una formación ósea incompleta y una menor tasa de reabsorción de los cuerpos extraños.⁽²⁸⁾

La diferencia en la tasa de formación ósea es significativa: más del 93 % para los nuevos biomateriales de fosfato de calcio (CaP) versus menos del 58 % para los tipos clásicos de cerámica ($P < 0,01$), demostrando un mejor comportamiento biológico de los nuevos biomateriales CaP en comparación con los materiales cerámicos sinterizados para injertos óseos de tipo antiguo. Estas nuevas matrices de CaP son adecuadas para rellenar defectos óseos y son de interés para odontólogos, implantólogos, cirujanos craneomaxilofaciales, ortopédicos y traumatólogos.⁽²⁹⁾

Las cerámicas de hidroxiapatita (HA) se utilizan ampliamente para la reconstrucción ósea, funcionan como osteoconductores y sirven como andamios estructurales para el depósito de nuevo hueso. Generalmente, los materiales de la estructura deben ser degradables, ya que afectan negativamente las propiedades mecánicas del hueso reconstruido.⁽³⁰⁾

En casos de preservación de reborde en alvéolos con defectos óseos de más de 5 mm en la pared bucal, la HA puede disminuir la reabsorción de la cresta alveolar tras la extracción dentaria, resultando en una mejor regeneración horizontal de la pared bucal (Sisti *et al.*, 2012) lo que coincide con los resultados obtenidos por Prosper *et al.* (2003), quienes evalúan el uso de la HA en alvéolos post-extracción para luego rehabilitar con implantes, obteniendo un éxito del 98,2 % a los cuatro años. Esto es especialmente útil en casos donde se rehabilitará de manera fija un diente extraído, ya sea con implante o con prótesis fija, ya que se puede disminuir la inminente reabsorción ósea que se produce tras la extracción.⁽²⁷⁾

Recientemente, se utiliza una combinación de un proceso de impresión en polvo tridimensional y una transformación de fase a baja temperatura para producir una nueva estructura de nanohidroxiapatita poco cristalina (3DHA).⁽³¹⁾ Esta técnica de baja temperatura permite la creación de materiales de injerto óseo con osteoconductividad y reabsorción osteoclástica in vivo debido a su baja cristalinidad, en comparación con la ruta típica de sinterización a alta temperatura. Este material se avalúa por su pureza de composición, toxicidad, biocompatibilidad con células óseas, microestructura, seguridad in vivo y eficacia clínica como injerto óseo y también por su capacidad de impregnación con antibióticos para su uso como perla antibiótica administrada localmente.^(32,33)

Dada la creciente aplicación de la hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D para la preservación de la cresta alveolar, y la necesidad de profundizar en el entendimiento de sus efectos y eficacia, resulta crucial incorporar enfoques innovadores en las metodologías de investigación. Uno de estos enfoques es el análisis neutrosófico, que ya ha sido empleado satisfactoriamente en otros contextos médicos y científicos.⁽³⁴⁻³⁶⁾ Este método, que considera el grado de verdad, falsedad e indeterminación de las afirmaciones, podría aportar una nueva dimensión en el análisis de los resultados clínicos y bioquímicos de los injertos óseos.

Futuros estudios podrían explorar cómo la neutrosofía puede ayudar a interpretar de manera más efectiva las variaciones en las respuestas individuales a estos injertos, evaluando no solo los éxitos o fallos, sino también los grados de incertidumbre y las variables indeterminadas que afectan la integración del biomaterial y la regeneración ósea. La implementación de la neutrosofía en la evaluación de los injertos de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D permitiría una comprensión más profunda y holística de su comportamiento biológico y su

interacción con el tejido host, facilitando así el desarrollo de estrategias más personalizadas y efectivas en la regeneración de tejidos.

Conclusión

La evidencia recopilada en esta revisión bibliográfica sobre el uso de injertos óseos de hidroxiapatita nanoporosa impresa en 3D para la preservación de la cresta alveolar sugiere que estos biomateriales innovadores están adecuadamente adaptados para integrarse de manera biológica. Esto permite el uso de nuevas técnicas que amplían la gama de biomateriales disponibles, ofreciendo mejoras significativas en los tratamientos para la preservación de la cresta alveolar. Además, facilita la combinación de técnicas existentes, potenciando su aplicabilidad y propiciando avances en el campo de la tecnología odontológica.

La impresión 3D representa un futuro prometedor para la fabricación de andamios óseos personalizados, esencial para asegurar un equilibrio óptimo entre función celular, viabilidad celular e integridad mecánica bajo condiciones de carga.

Las técnicas de ingeniería tisular que emplean hidroxiapatita nanoporosa y la tecnología de impresión 3D podrían convertirse en una alternativa viable para injertos óseos en la preservación de la cresta alveolar. El cuerpo reconoce estos materiales como compatibles, desencadenando un proceso de regeneración ósea natural, lo que subraya su potencial como solución efectiva en el campo de la regeneración ósea.

Referencias bibliográficas

1. Keestra JAJ, Barry O, Jong L de, Wahl G. Long-term effects of vertical bone augmentation: a systematic review. *J Appl Oral Sci.* febrero de 2016;24:3-17.

2. Solyom E, Szalai E, Czumbel ML, Szabo B, Vánca S, Mikulas K, *et al.* The use of autogenous tooth bone graft is an efficient method of alveolar ridge preservation - meta-analysis and systematic review. *BMC Oral Health*. 19 de abril de 2023;23(1):226.
3. Cox SC, Thornby JA, Gibbons GJ, Williams MA, Mallick KK. 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. febrero de 2015;47:237-47.
4. Woo KM, Jun JH, Chen VJ, Seo J, Baek JH, Ryoo HM, *et al.* Nano-fibrous scaffolding promotes osteoblast differentiation and biomineralization. *Biomaterials*. 1 de enero de 2007;28(2):335-43.
5. Pan Y, Zhao Y, Kuang R, Liu H, Sun D, Mao T, *et al.* Injectable hydrogel-loaded nano-hydroxyapatite that improves bone regeneration and alveolar ridge promotion. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. noviembre de 2020;116:111158.
6. Mohd N, Razali M, Ghazali MJ, Abu Kasim NH. 3D-Printed Hydroxyapatite and Tricalcium Phosphates-Based Scaffolds for Alveolar Bone Regeneration in Animal Models: A Scoping Review. *Materials*. 2 de abril de 2022;15(7):2621.
7. Kijartorn P, Wongpairojpanich J, Thammarakcharoen F, Suwanprateeb J, Buranawat B. Clinical evaluation of 3D printed nano-porous hydroxyapatite bone graft for alveolar ridge preservation: A randomized controlled trial. *J Dent Sci*. enero de 2022;17(1):194-203.
8. Fitzpatrick V, Moldes ZM, Deck A, Torres-Sanchez R, Valat A, Cairns D, *et al.* Functionalized 3D-printed silk-hydroxyapatite scaffolds for enhanced bone regeneration with innervation and vascularization. *Biomaterials*. septiembre de 2021;276:120995.

9. Zhang M, Lin R, Wang X, Xue J, Deng C, Feng C, *et al.* 3D printing of Haversian bone-mimicking scaffolds for multicellular delivery in bone regeneration. *Sci Adv.* marzo de 2020;6(12):eaaz6725.
10. Zhang L, Yang G, Johnson BN, Jia X. Three-dimensional (3D) printed scaffold and material selection for bone repair. *Acta Biomater.* 15 de enero de 2019;84:16-33.
11. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 29 de marzo de 2021;372:n71.
12. Tuukkanen J, Nakamura M. Hydroxyapatite as a Nanomaterial for Advanced Tissue Engineering and Drug Therapy. *Curr Pharm Des.* 2017;23(26):3786-93.
13. Saleem M, Rasheed S, Yougen C. Silk fibroin/hydroxyapatite scaffold: a highly compatible material for bone regeneration. *Sci Technol Adv Mater.* 21(1):242-66.
14. De Santis D, Sinigaglia S, Pancera P, Faccioni P, Portelli M, Luciano U, *et al.* An overview of socket preservation. *J Biol Regul Homeost Agents.* 2019;33(1 Suppl. 1):55-9.
15. Jafer MA, Salem RM, Hakami FB, Ageeli RE, Alhazmi TA, Bhandi S, *et al.* Techniques for Extraction Socket Regeneration for Alveolar Ridge Preservation. *J Contemp Dent Pract.* 1 de febrero de 2022;23(2):245-50.
16. Pereira G Á, Oliva M P. Eficacia de la Hidroxiapatita en la Cicatrización de Injertos Oseos e Implantes Dentales: Una Revisión Sistemática de la Literatura. *Int J Odontostomatol.* diciembre de 2016;10(3):373-80.
17. Rios . - Fabricación de andamios de hidroxiapatita por impr.pdf [Internet]. [citado 29 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://ve.scielo.org/pdf/rlmm/v34n2/art09.pdf>

18. Schwarz F, Bieling K, Latz T, Nuesry E, Becker J. Healing of intrabony peri-implantitis defects following application of a nanocrystalline hydroxyapatite (Ostim) or a bovine-derived xenograft (Bio-Oss) in combination with a collagen membrane (Bio-Gide). A case series. *J Clin Periodontol.* julio de 2006;33(7):491-9.
19. Eick JD, Bear L, Cobb CM, Mosby EL, Hiatt WR. Mechanical behavior of mandibular continuity defects reconstructed using combinations of hydroxylapatite and autogenous bone. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* agosto de 1990;48(8):823-30.
20. Thammarakcharoen F, Palanuruxsa P, Suwanprateeb J. In Vitro Resorbability of Three Different Processed Hydroxyapatite. *Key Eng Mater.* 2015;659:3-7.
21. Moreno Madrid AP, Vrech SM, Sanchez MA, Rodriguez AP. Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* julio de 2019;100:631-44.
22. Sanz-Sánchez I, Ortiz-Vigón A, Sanz-Martín I, Figuero E, Sanz M. Effectiveness of Lateral Bone Augmentation on the Alveolar Crest Dimension: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res.* septiembre de 2015;94(9 Suppl):128S-42S.
23. Mekcha P, Wongpairojpanich J, Thammarakcharoen F, Suwanprateeb J, Buranawat B. Customized 3D printed nanohydroxyapatite bone block grafts for implant sites: A case series. *J Prosthodont Res.* 2022;67(2):311-20.
24. Oddó P, Klein C, Contreras A, Oddó P, Klein C, Contreras A. Preservación alveolar post extracción en zona estética: Decisiones clinicas predecibles en sitio severamente afectado. *Int J Interdiscip Dent.* abril de 2020;13(1):30-4.

25. Araújo MG, Lindhe J. Dimensional ridge alterations following tooth extraction. An experimental study in the dog. *J Clin Periodontol*. febrero de 2005;32(2):212-8.
26. Bassir SH, Alhareky M, Wangsrimongkol B, Jia Y, Karimbux N. Systematic Review and Meta-Analysis of Hard Tissue Outcomes of Alveolar Ridge Preservation. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2018;33(5):979-94.
27. Wenisch S, Stahl JP, Horas U, Heiss C, Kilian O, Trinkaus K, et al. In vivo mechanisms of hydroxyapatite ceramic degradation by osteoclasts: fine structural microscopy. *J Biomed Mater Res A*. 1 de diciembre de 2003;67(3):713-8.
28. Rumpel E, Wolf E, Kauschke E, Bienengraber V, Bayerlein T, Gedrange T, et al. The biodegradation of hydroxyapatite bone graft substitutes in vivo. *Folia Morphol*. febrero de 2006;65(1):43-8.
29. Gerike W, Bienengraber V, Henkel KO, Bayerlein T, Proff P, Gedrange T, et al. The manufacture of synthetic non-sintered and degradable bone grafting substitutes. *Folia Morphol*. febrero de 2006;65(1):54-5.
30. Porter AE, Buckland T, Hing K, Best SM, Bonfield W. The structure of the bond between bone and porous silicon-substituted hydroxyapatite bioceramic implants. *J Biomed Mater Res A*. julio de 2006;78(1):25-33.
31. Suwanprateeb J, Suvannapruk W, Wasoontararat K. Low temperature preparation of calcium phosphate structure via phosphorization of 3D-printed calcium sulfate hemihydrate based material. *J Mater Sci Mater Med*. 1 de febrero de 2010;21(2):419-29.
32. Jiamton C, Apivatgaroon A, Aunaramwat S, Chawalitrujiwong B, Chuaychoosakoon C, Suwannaphisit S, et al. Efficacy and Safety of Antibiotic

Impregnated Microporous Nanohydroxyapatite Beads for Chronic Osteomyelitis Treatment: A Multicenter, Open-Label, Prospective Cohort Study. *Antibiotics*. 15 de junio de 2023;12(6):1049.

33. Suwanprateeb J, Thammarakcharoen F, Phanphiriya P, Chokevivat W, Suvannapruk W, Chernchujit B. Preparation and characterizations of antibiotic impregnated microporous nano-hydroxyapatite for osteomyelitis treatment. *Biomed Eng Appl Basis Commun*. junio de 2014;26(03):1450041.

34. Prado Quilambaqui J, Reyes Salgado L, Valencia Herrera A, Rodríguez Reyes E. Estudio del cuidado materno y conocimientos ancestrales en el Ecuador con ayuda de mapas cognitivos neutrosóficos. *Revista Investigación Operacional*. 2022;43(3):340-348. Disponible en: <https://rev-inv-ope.pantheonsorbonne.fr/sites/default/files/inline-files/43322-06.pdf>

35. Ramos Argilagos M, Valencia Herrera Á, Vayas Valdiviezo W. Evaluación de estrategias de educación nutricional en escuelas del Ecuador utilizando TOPSIS neutrosófico. *Rev Int Cienc Neutrosóficas*. 2022;18(3):208-217.

36. González Chico MG, Hernández Bandera N, Herrera Lazo S, Laica Sailema N. Assessment of the Relevance of Intercultural Medical Care. Neutrosophic sampling. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2021;44(1). Disponible en: https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal/vol44/iss1/46