

Sección: Concientífica

La medicina del futuro basada en un material biomimético inspirado en el esmalte dental

The medicine of the future based on a biomimetic material inspired by tooth enamel

Néstor Méndez-Lozano^{1,2*}

Eric Rivera-Muñoz³

Rodrigo Velazquez-Castillo¹

¹División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, C.P. 76010 Querétaro, Querétaro, Mexico.

²Universidad del Valle de México, Campus Querétaro, Blvd. Juriquilla no. 1000 A Del. Santa Rosa Jáuregui, C.P. 76230, Querétaro, Querétaro, México.

³Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 1-1010, C.P. 76000, Querétaro, Querétaro, México.

*Autor para la correspondencia: nestor.mendez@uvmnet.edu

RESUMEN

La naturaleza ha desarrollado materiales con propiedades excepcionales que representan un desafío para la ingeniería molecular moderna. El esmalte dental, el tejido más duro del cuerpo humano, debe su resistencia a la organización molecular de nanocristales de hidroxiapatita. Investigadores han desarrollado nanofibras de hidroxiapatita inspirados en esta arquitectura, capaces de favorecer la regeneración ósea y, mediante la incorporación de iones de europio y gadolinio, adquirir propiedades ópticas y magnéticas para aplicaciones biomédicas. Este artículo presenta cómo el biomimetismo impulsa el desarrollo de biomateriales inteligentes que podrían transformar la medicina regenerativa, el diagnóstico por imagen y la liberación controlada de fármacos.

Palabras clave: Biomateriales inteligentes, nanofibras de hidroxiapatita, materiales teranósticos.

SUMMARY

Nature has developed materials with exceptional properties that continue to challenge modern molecular engineering. Dental enamel, the hardest tissue in the human body, owes its remarkable strength to the molecular organization of hydroxyapatite nanocrystals. Inspired by this natural architecture, researchers have developed hydroxyapatite nanofibers capable of promoting bone regeneration while, through the incorporation of europium and gadolinium ions, acquiring optical and magnetic properties for biomedical applications. This article explains how biomimetics is driving the development of smart biomaterials that could transform regenerative medicine, medical imaging, and controlled drug delivery.

Keywords: Smart biomaterials, hydroxyapatite nanofibers, theranostic materials.

Introducción

Generalmente cuando pensamos en los materiales más resistentes conocidos por el ser humano pensamos en materiales metálicos como el acero o el titanio, incluso en algunos materiales compuestos como polímeros reforzados con nanofibras utilizados en la industria aeroespacial. Sin embargo, uno de los materiales más resistentes y sorprendente se encuentra más cerca de nosotros: el esmalte dental.

El esmalte dental es una delgada capa que cubre nuestros dientes y es el tejido más duro de cuerpo humano ya que puede soportar millones de ciclos de masticación. Además, está expuesto a cambios bruscos de temperatura y ambientes altamente corrosivos sin perder su funcionalidad [1]. Lo más sorprendente e interesante es que su extraordinaria resistencia no depende únicamente de su composición química, sino en la manera de que millones de nanocristales de hidroxiapatita se organizan en distintos niveles, desde nanoestructuras hasta estructuras microscópicas que resultan altamente eficientes. Durante millones de años la naturaleza ha evolucionado hasta perfeccionar esa arquitectura natural, en la actualidad científicos e ingenieros buscan comprender los principios creados por la naturaleza para diseñar materiales capaces de imitar algunas de sus propiedades. Esta nueva área de conocimiento conocida como biomimetismo ha dado origen a una nueva generación de biomateriales inspirados en la naturaleza.

Hoy en día una de las investigaciones de mayor relevancia en esta área se centra en el desarrollo de nanofibras

de hidroxiapatita, materiales que reproducen parcialmente la organización del esmalte dental y que, por otro lado, al incorporar elementos de metales alcalino térreos como el magnesio y tierras raras como europio y gadolinio adquieren propiedades que van más allá de la regeneración ósea, permitiendo su uso como bactericida y en aplicaciones de diagnóstico por imagen y medicina personalizada como se observa en la Figura 1.

El esmalte dental está formado por pequeños prismas los cuales están compactamente unidos cubriendo totalmente la superficie de la pieza dental. Estos prismas están colocados longitudinalmente a lo largo del espesor del esmalte dental, y a su vez, dichos prismas están compuestos por un conjunto de nanofibras con perfil hexagonal, las cuales también están altamente compactadas. Las nanofibras son cristalitos de hidroxiapatita que han crecido

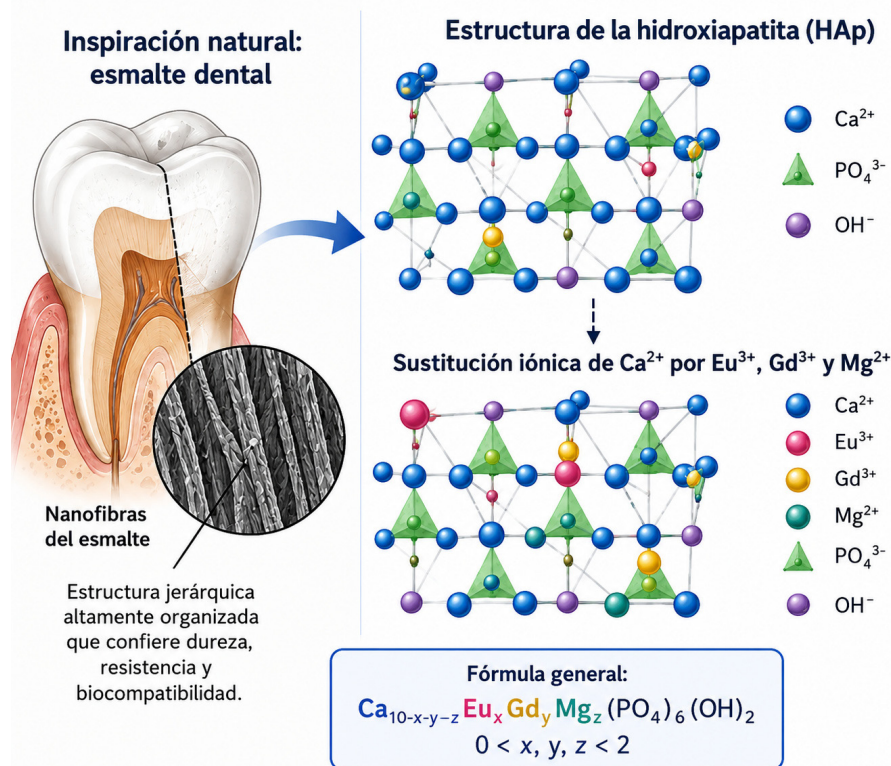


Figura 1. El esmalte dental como fuente de inspiración para el desarrollo de nanofibras de hidroxiapatita biomiméticas dopadas con europio, gadolinio y magnesio. Ilustración generada con asistencia de inteligencia artificial y revisada por los autores para verificar la correcta representación del contenido científico.

teniendo una orientación cristalina preferencial a lo largo de la dirección “c” de la estructura cristalina de la hidroxiapatita [1], y esta dirección preferencial de crecimiento del cristal se localiza a lo largo del espesor del esmalte dental. Esta característica cristalina es una de las más importantes que aportan una alta resistencia mecánica para el esmalte dental, lo cual hace que dicho material resista muchos procesos de masticación y también tenga cierta resistencia al impacto. En la Figura 2 se puede observar cómo se forma la microestructura del esmalte dental compuesto de estos prismas y de las nanofibras. En la parte inferior derecha de esta figura se observa una imagen real de microscopía electrónica de barrido del esmalte dental en un corte longitudinal [2].

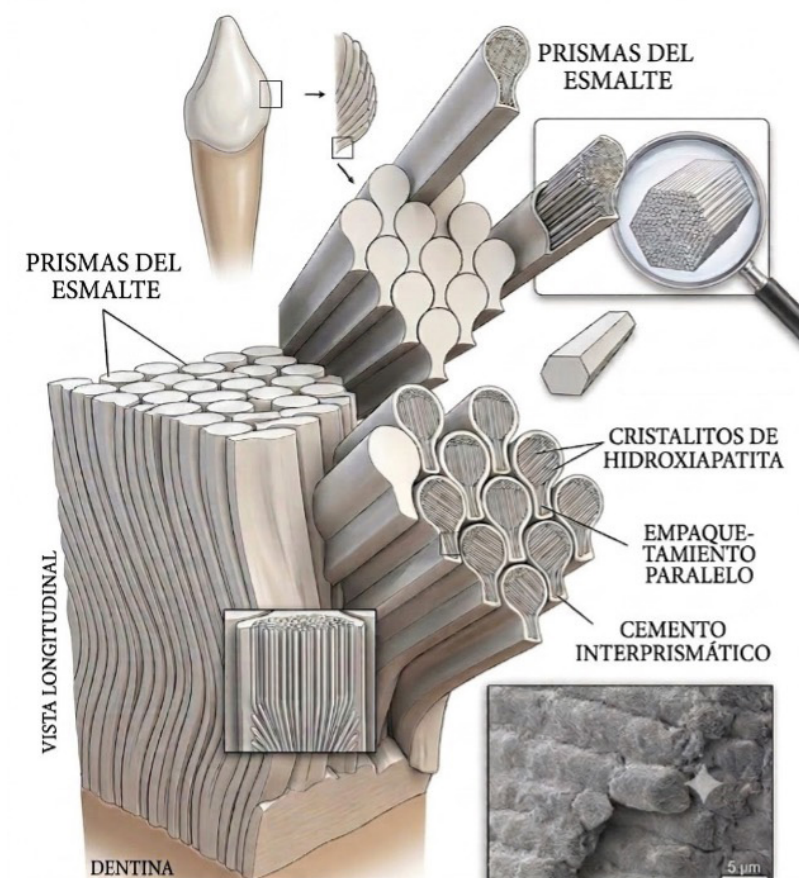


Figura 2. Diagrama de la microestructura del esmalte dental en donde se destaca la forma de los nanocristales de hidroxiapatita con perfil hexagonal. Ilustración generada con asistencia de inteligencia artificial y revisada por los autores para verificar la correcta representación del contenido científico.

Desarrollo

El esmalte dental está compuesto aproximadamente por un 96% de hidroxiapatita, la cual es un fosfato de calcio compuesto por átomos de calcio, oxígeno, hidrógeno y fósforo dispuestos en una estructura hexagonal apilada y que también constituye el principal componente inorgánico de los huesos [2]. Sin embargo, la clave de su resistencia no reside únicamente en su composición química, sino en su organización molecular. Millones de nanocristales de hidroxiapatita con sección transversal hexagonal se agrupan formando prismas hexagonales perfectamente orientados. Esta disposición estructural permite distribuir las cargas mecánicas de forma eficiente y evitar la propagación de fracturas, proporcionando dureza y tenacidad al mismo tiempo, dos propiedades que son difíciles de combinar en un mismo material. Este ejemplo representa uno de los principales casos del diseño natural y es la fuente de inspiración para investigadores de diversas áreas que buscan desarrollar materiales capaces de reproducir algunas de estas características.

El esmalte dental no se forma de manera instantánea, durante el desarrollo de los dientes las células llamadas ameloblastos organizan los nanocristales de hidroxiapatita orientándolos en una dirección específica hasta llegar a una estructura altamente resistente. Este proceso se lleva a cabo con una precisión extraordinaria y representa uno de los mejores ejemplos de ingeniería desarrollados por la naturaleza. A diferencia de muchos materiales sintéticos, que adquieren su resistencia debido a su composición química, el esmalte combina composición y organización estructural. Gracias a esta organización jerárquica el esmalte puede soportar años de uso y esfuerzos de

masticación a pesar de tener un espesor de apenas unos cuantos milímetros.

El biomimetismo consiste en estudiar las soluciones desarrolladas por los organismos vivos para resolver problemas tecnológicos [3]. En lugar de intentar superar la naturaleza, esta disciplina busca entender los principios fundamentales y adaptarlos a nuevos materiales y dispositivos. En el caso de medicina regenerativa, el esmalte dental representa un modelo de inspiración interesante para el desarrollo de biomateriales destinados a reparar tejidos mineralizados. Las nanofibras de hidroxiapatita sintetizadas en el laboratorio mediante síntesis hidrotermal asistida por microondas donde se mezclan soluciones que contienen principalmente calcio y fósforo y someténdolas a un calentamiento rápido y controlado para favorecer el crecimiento en forma de nanofibras buscan imitar parcialmente la estructura del esmalte, favoreciendo la interacción celular, la formación de tejido nuevo y mejor biointegración con el organismo, es decir, la capacidad del material para integrarse de forma adecuada con los tejidos del organismo sin provocar daño. La fabricación de hidroxiapatita en forma de nanofibras permite imitar la disposición alargada de los cristales presentes en el esmalte dental. Esta geometría favorece una mayor superficie de contacto con las células facilitando la adhesión celular y mejorando las propiedades mecánicas del biomaterial. Además, las nanofibras pueden entrelazarse formando estructuras tridimensionales similares a una red lo que proporciona un entorno adecuado para el crecimiento de nuevo tejido óseo. Otra ventaja de estas estructuras es que pueden tener una mayor capacidad para incorporar proteínas o fármacos que pueden liberarse gradualmente durante el proceso de regeneración.

Las nanofibras sintéticas de hidroxiapatita tienen una estructura cristalina hexagonal que es la misma que posee la hidroxiapatita que forma el esmalte dental [3]. Dicha estruc-

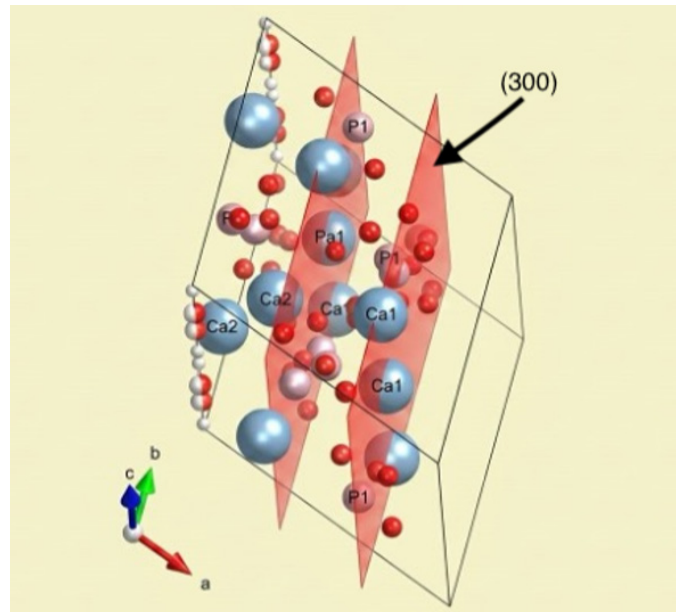


Figura 3. Estructura hexagonal de la hidroxiapatita mostrando los planos los planos (300) y los iones de calcio contenidos en ellos.

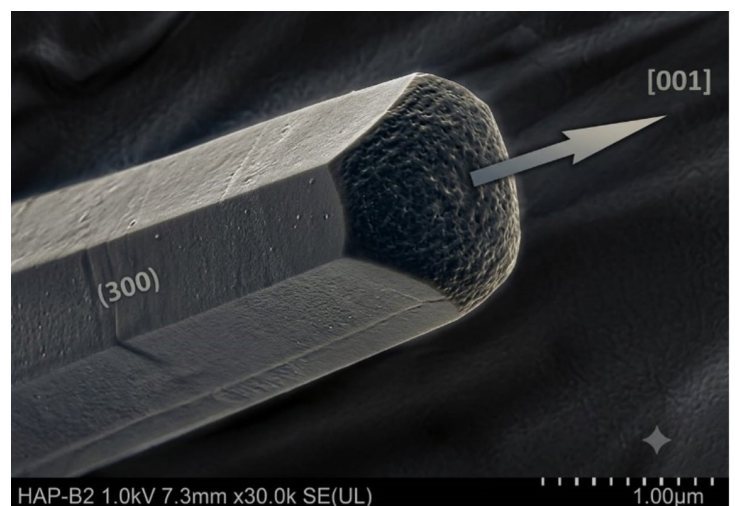


Figura 4. Nanofibra sintética de hidroxiapatita mostrando su sección transversal hexagonal y su superficie que está formada por los planos (300). Estas nanofibras tienen una dirección de crecimiento preferencial [001]. Ilustración generada con asistencia de inteligencia artificial y revisada por los autores para verificar la correcta representación del contenido científico.

tura cristalina contiene los planos cristalinos (300), los cuales son abundantes en iones de calcio.

Esta morfología de nanofibra totalmente inspirada en los nanocristales de hidroxiapatita presentes en el esmalte dental, también tienen una sección transversal hexagonal y los planos laterales que forman a dichas nanofibras

tienen expuestos en su superficie a estos planos (300). Esta característica cristalográfica permite que la superficie de estas nanofibras tenga disponibles varios iones de calcio, y estos pueden ser sustituidos con cierta facilidad por algunos iones dopantes, y así, modificar considerablemente las propiedades de la hidroxiapatita utilizando una baja concentración de iones dopantes.

Actualmente la ingeniería de materiales ha permitido incorporar pequeñas cantidades de determinados elementos dentro de la estructura cristalina de la hidroxiapatita mediante la sustitución de algunos iones de calcio por otros iones con características químicas similares, tales como europio, gadolinio o magnesio modificando sus propiedades sin alterar su estructura ni deteriorar su biocompatibilidad, es decir, su capacidad para interactuar con el organismo sin provocar efectos adversos [4]. Uno de estos elementos es el magnesio (Mg^{2+}) que al incorporarse a la estructura cristalina de la hidroxiapatita incrementa su biocompatibilidad, lo cual se traduce en una regeneración del tejido óseo más rápida, y con ello, se acortan considerablemente los tiempos de recuperación del tejido óseo dañado. Además, se ha observado que la hidroxiapatita dopada con magnesio actúa como un bactericida, lo cual evita que se lleven a cabo procesos de infección en el tejido óseo y tejidos circundantes en el caso de alguna lesión cuando se utiliza un material de implante elaborado con esta hidroxiapatita dopada.

Otros de los elementos prometedores son el europio (Eu^{3+}) y el gadolinio (Gd^{3+}), pertenecientes al grupo de las tierras raras. Estos elementos pueden sustituir parcialmente algunos iones de calcio presentes en la estructura cristalina de la hidroxiapatita, modificando sus propiedades funcionales sin perder su capacidad principal para la regeneración ósea.

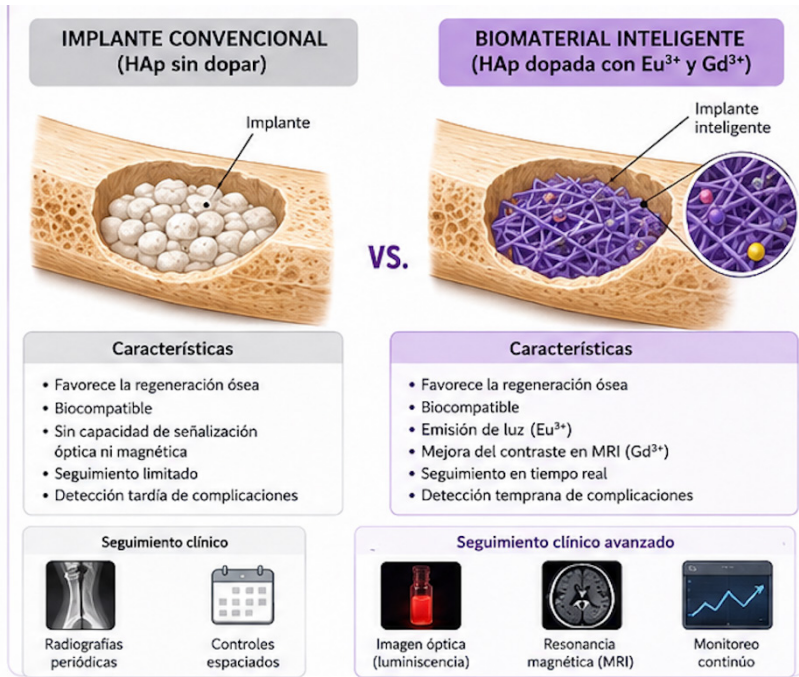


Figura 5. Sustitución parcial de iones calcio por europio y gadolinio dentro de la estructura de la hidroxiapatita biomimética. Ilustración generada con asistencia de inteligencia artificial y revisada por los autores para verificar la correcta representación del contenido científico.

El europio por su parte proporciona propiedades luminiscentes que permiten formar imágenes y visualizar órganos y tejidos mediante técnicas ópticas, mientras que el gadolinio aporta propiedades paramagnéticas utilizadas en estudios de resonancia magnética [5, 6]. El resultado final es un material que originalmente fue diseñado para regenerar tejido óseo y que al incorporar nuevos iones en la estructura adquiere funciones relacionadas con el diagnóstico y monitoreo clínico.

Tradicionalmente, los implantes tienen como única función reemplazar y reparar el tejido dañado. En la actualidad, los biomateriales inteligentes buscan ir más allá. Además de servir como un soporte para la regeneración ósea, ahora pueden proporcionar información sobre su localización, comportamiento e interacción con el organismo mediante diferentes técnicas de imagenología [7].

Las diferentes propiedades de estos biomateriales permiten sugerir aplicaciones que van desde la regeneración de tejidos hasta el

diagnóstico y la liberación de fármacos, como se resume en la Tabla 1.

El desarrollo de estos nuevos materiales podría facilitar el seguimiento clínico de los pacientes, detectar alguna complicación de manera temprana y ayudar en el desarrollo de tratamientos más especializados. Las posibles aplicaciones de estos materiales van desde la medicina hasta la odontología.

Aunque el desarrollo de estos biomateriales se encuentra en distintas etapas de investigación sus posibles beneficios son extraordinarios. En odontología por ejemplo se puede reducir el número de intervenciones para regenerar hueso antes de colocar un implante dental. En ortopedia se contribuiría a mejorar la recuperación de fracturas complejas, especialmente en adultos mayores, donde la capacidad natural de regeneración suele disminuir.

La posibilidad de combinar regeneración, diagnóstico y liberación controlada de fármacos en un mismo material representa un cambio de paradigma. Para esto la medicina del futuro busca desarrollar plataformas multifuncionales capaces de responder a varias necesidades clínicas de manera simultánea.

Finalmente, el desarrollo de biomateriales inteligentes da origen a una nueva área que combina el tratamiento y seguimiento en una misma plataforma tecnológica: la teranóstica. Aunque los resultados obtenidos en el laboratorio son prometedores, aun se necesita demostrar la seguridad de estos materiales a largo plazo, optimizar los procesos de fabricación y realizar estudios preclínicos y clínicos que validen su eficacia en el uso rutinario en hospitales [7]. Asimismo, es fundamental establecer procesos de producción reproducibles y cumplir con las regulaciones de calidad y seguridad a nivel internacional.

Conclusiones

La naturaleza sigue siendo una de las principales fuentes de inspiración para la innovación científica. El esmalte dental es la clara muestra de que la organización de la materia a escala nanométrica puede generar materiales con propiedades excepcionales que serían difíciles de reproducir por métodos convencionales. Las nanofibras de hidroxiapatita, inspiradas en esta arquitectura natural, representan una nueva generación de biomateriales

Tabla 1. Principales características y aplicaciones de los biomateriales inteligentes basados en hidroxiapatita.

Característica	Función	Posible aplicación biomédica
Estructura similar a tejidos mineralizados	Favorece la interacción con el tejido	Regeneración ósea y dental
Presencia de europio	Proporciona propiedades luminiscentes	Bioimagen y seguimiento del material
Presencia de gadolinio	Aporta propiedades magnéticas	Diagnóstico por resonancia magnética
Estructura en forma de nanofibras	Ofrece una elevada superficie de interacción	Ingeniería de tejidos
Capacidad para transportar moléculas	Permite incorporar y liberar sustancias de forma gradual	Liberación controlada de fármacos
Multifuncionalidad	Integra propiedades regenerativas y de diagnóstico	Desarrollo de tratamientos personalizados

Tabla 2. Aplicaciones potenciales de las nanofibras biomiméticas de hidroxiapatita dopadas con europio y gadolinio.

Área	Aplicación
Odontología	Regeneración ósea alveolar, implantología y periodoncia.
Ortopedia	Reparación de fracturas y defectos óseos.
Ingeniería de tejidos	Andamios para regeneración ósea y diferenciación celular.
Liberación de fármacos	Sistemas para administración controlada de medicamentos.
Diagnóstico	Bioimagen óptica y resonancia magnética.

biomiméticos que son capaces de favorecer la regeneración del tejido óseo. Además, la incorporación de magnesio, europio y gadolinio amplía sus propiedades regenerativas, bactericidas, ópticas y magnéticas que potencializan las posibles aplicaciones de ingeniería de tejidos, diagnóstico y seguimiento clínico. Aunque existen muchos retos científicos y tecnológicos por superar, estos avances prometedores muestran la unión entre el biomimetismo, nanotecnología y biotecnología para impulsar el desarrollo de biomateriales inteligentes que podrían transformar la medicina regenerativa y la atención personalizada en los próximos años. Más que copiar sus formas, el biomimetismo busca aprender de sus principios para construir una nueva generación de biomateriales inteligentes que mejoren la calidad de vida de las personas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el uso de herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo para la revisión de ortografía, mejora de estilo y redacción del manuscrito. Asimismo, se utilizaron herramientas de inteligencia artificial para la elaboración de figuras e ilustraciones originales con fines exclusivamente gráficos y de divulgación. Los autores revisaron, editaron y validaron todo el contenido textual y visual, asumiendo la responsabilidad total por la exactitud, originalidad e integridad del manuscrito. Asimismo, los autores agradecen el apoyo financiero por parte del

SECIHTI CBF-2025-307.

Referencias

- [1] Reyes-Gasga, J., Koudriavtseva, O., Herrera-Becerra, R., & Escobosa, A. (2015). XRD characterization of crystallinity of human tooth enamel under influence of mechanical grinding. *Mater Sci Appl*, 6(6), 464-472. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2015.66050>
- [2] Johnson, C., Heiss, M., Kolar, L., & Luksha, L. (1998). *Biology of the human dentition*. Illinois University, Chicago College of Dentistry.
- [3] Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the royal society Interface*, 3(9), 471. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
- [4] Vallet-Regí, M., & Ruiz-Hernández, E. (2011). Bioceramics: from bone regeneration to cancer nanomedicine. *Advanced Materials*, 23(44), 5177-5218. <https://doi.org/10.1002/adma.201101586>
- [5] Bünzli, J. C. G. (2010). Lanthanide luminescence for biomedical analyses and imaging. *Chemical reviews*, 110(5), 2729-2755. <https://doi.org/10.1021/cr900362e>
- [6] Caravan, P. (2006). Strategies for increasing the sensitivity of gadolinium based MRI contrast agents. *Chemical Society Reviews*, 35(6), 512-523. <https://doi.org/10.1039/b510982p>[JS8.1][NM8.2]
- [7] Gai, S., Li, C., Yang, P., & Lin, J. (2014). Recent progress in rare earth micro/nanocrystals: soft chemical synthesis, luminescent properties, and biomedical applications. *Chemical reviews*, 114(4), 2343-2389. <https://doi.org/10.1021/cr4001594>