

Regeneración pulpar con células madre y andamiajes bioactivos, un vistazo al futuro de la endodoncia.

Pulp regeneration with stem cells and bioactive scaffolds: a glimpse into the future of endodontics.

Gustavo Adrián Morales Valladares,^{*,‡} Kerly Valeria Chicaiza Bermeo,^{*,§} Karina Viviana Salazar Villacís,^{*,§} Mery de los Ángeles Yaguachi Granda,^{*,§} Mónica Gabriela Yáñez Vinocunga,^{*,§} Juan Martín Larco Zurita^{*,¶}

RESUMEN

Introducción: en los últimos 15 años, la investigación odontológica ha avanzado en la regeneración y reemplazo de tejidos dentales dañados mediante procedimientos de restauración radicular. La ingeniería de tejidos, basada en células madre, biomateriales y moléculas bioactivas, está revolucionando tratamientos en endodoncia y periodoncia, promoviendo la regeneración dental, periodontal y maxilofacial. **Objetivo:** revisar las estrategias de regeneración pulpar utilizando células madre y andamiajes bioactivos, analizando su potencial en el futuro de la endodoncia para restaurar tejidos dentales dañados y promover la regeneración del tejido pulpar. **Material y métodos:** la búsqueda de información se realizó en las bases de datos *EBSCO Dentistry & Oral Sciences Source*, *Science Direct* y *Google Académico*, utilizando palabras clave relacionadas con la regeneración pulpar, células madre, andamiajes bioactivos y endodoncia. **Resultados:** la revisión de la literatura mostró avances en la regeneración pulpar con células madre y andamiajes bioactivos, promoviendo la revitalización del tejido y el desarrollo de la raíz. Los biomateriales favorecen la biomineralización y mejores resultados a largo plazo en comparación con tratamientos convencionales, aunque se necesitan más investigaciones para optimizar su eficacia. **Conclusiones:** la regeneración pulpar mediante células madre y andamiajes bioactivos representa un avance en la endodoncia moderna, ofreciendo tratamientos conservadores y biológicos para restaurar la vitalidad del tejido pulpar. Aunque los resultados son prometedores, se necesita más investigación para estandarizar protocolos y validar su efectividad clínica a largo plazo.

Palabras clave: células madre, endodoncia, biomateriales, ingeniería de tejidos.

ABSTRACT

Introduction: in the last 15 years, dental research has advanced in the regeneration and replacement of damaged dental tissues through root canal restoration procedures. Tissue engineering, based on stem cells, biomaterials, and bioactive molecules, is revolutionizing treatments in endodontics and periodontics, promoting dental and maxillofacial regeneration. **Objective:** the objective of this study is to review pulp regeneration strategies using stem cells and bioactive scaffolds, analyzing their potential in the future of endodontics to restore damaged dental tissues and promote pulp tissue regeneration. **Material and methods:** the information search was conducted in the databases *EBSCO Dentistry & Oral Sciences Source*, *Science Direct*, and *Google Scholar*, using keywords related to pulp regeneration, stem cells, bioactive scaffolds, and endodontics. **Results:** the literature review showed advances in pulp regeneration with stem cells and bioactive scaffolds, promoting tissue revitalization and root development. Biomaterials favor biomineralization and better long-term outcomes compared to conventional treatments, although further research is needed to optimize their effectiveness. **Conclusions:** pulp regeneration using stem cells and bioactive scaffolds represents an advancement in modern endodontics, offering conservative and biological treatments to restore pulp tissue vitality. Although the results are promising, more research is needed to standardize protocols and validate their clinical effectiveness in the long term.

Keywords: stem cells, endodontics, biomaterials, tissue engineering.

* Facultad de Odontología de la Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

‡ Técnico Docente.

§ Estudiante.

¶ Docente Endodoncista.

Recibido: 02 de febrero de 2025. Aceptado: 08 de septiembre de 2025.

Citar como: Morales VGA, Chicaiza BKV, Salazar VKV, Yaguachi GMÁ, Yáñez VMG, Larco ZJM. Regeneración pulpar con células madre y andamiajes bioactivos, un vistazo al futuro de la endodoncia. Rev ADM. 2025; 82 (5): 283-290. <https://dx.doi.org/10.35366/121639>



Abreviaturas:

DPCs = células madre de la papila dental
 DPSCs = células madre de la pulpa dental
 MTA = Mineral Trioxide Aggregate
 PRF = fibrina rica en plaquetas
 PRP = plasma rico en plaquetas
 SCAPs = Células madre de la papila apical

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, particularmente en los últimos 15 años, se han realizado numerosos esfuerzos en el campo odontológico que han dirigido a que se despierte un gran interés por la realización de estudios con el fin de encontrar la mejor manera de regenerar y reemplazar tejidos, estructuras, y órganos dañados para restablecer la función normal del órgano dentario, dando lugar al aparecimiento de estrategias biológicas, en particular la ingeniería de tejidos, como una perspectiva destacada en la investigación odontológica en la era actual; en el campo de la endodoncia se denominan procedimientos de restauración radicular.^{1,2}

El objetivo de estos procedimientos es reemplazar las estructuras dentales dañadas, como las estructuras dentinarias y radiculares, así como las células del complejo dentinopulpar proporcionando revitalización del tejido pulpar junto con el proceso de continuación del desarrollo de la raíz, el engrosamiento de la pared dentinaria, el alargamiento radicular y el cierre del ápice mediante métodos de base biológica, enfocándose en la regeneración y biominerilización de los tejidos dentales que se han perdido; para que se lleve a cabo este complejo proceso es necesario que se den las interacciones entre varios elementos como células madre, moléculas de señalización, andamios, biomateriales y el microambiente en la región periapical. Una ventaja significativa de las técnicas de reconstrucción es la capacidad de recrear la textura y la arquitectura originales del área afectada.²⁻⁴

Las terapias de regeneración en odontología están avanzando rápidamente, impulsadas por los avances en la investigación en ingeniería biomédica y por las crecientes expectativas de mejorar los tratamientos convencionales. La ingeniería tisular, que constituye la base de la odontología regenerativa, se centra principalmente en tres componentes clave: células madre, moléculas bioactivas y biomateriales, los cuales actúan como andamios para promover el crecimiento y la diferenciación celular.⁵⁻⁷

Las técnicas regenerativas han proporcionado enfoques novedosos para muchas estrategias de tratamientos convencionales en varios campos de la odontología. Un

claro ejemplo de ello es en la práctica endodóntica, donde la revascularización pulpar se está posicionando como una alternativa al tratamiento convencional del conducto radicular. Por otro lado, en el campo de la periodoncia, los métodos tradicionales están siendo reemplazados por enfoques innovadores, como la regeneración tisular guiada. Estas investigaciones están revolucionando la ingeniería tisular oral y maxilofacial.^{5,8,9}

Principios básicos de la regeneración pulpar

Los principios básicos de la regeneración pulpar, según la literatura científica actual, se basan en un enfoque biológico y celular que busca la reparación y revitalización de la pulpa dental, continúan evolucionando con el uso de nuevas tecnologías, materiales y enfoques biológicos. Los estudios recientes resaltan la importancia de la biocompatibilidad, la estimulación de las células madre, la creación de un ambiente propicio para la regeneración y el control de infecciones. Estos principios se desarrollan a partir de las investigaciones sobre la biología de la pulpa, el uso de tecnologías avanzadas y el aprovechamiento de los mecanismos de curación del propio organismo. Los artículos científicos sobre regeneración pulpar destacan los siguientes principios clave:¹⁰⁻¹²

Células madre y estimulación celular

Para la estimulación de la pulpa dental, el objetivo es activar las células madre dentro de la pulpa o en su entorno para que inicien procesos de reparación. Esto se logra mediante el uso de diversos agentes biológicos o materiales bioactivos que favorezcan la regeneración.

La regeneración pulpar depende en gran medida de las células madre presentes en los tejidos circundantes, que tienen la capacidad de diferenciarse en diversas células especializadas, como odontoblastos y fibroblastos que generan tejido pulpar nuevo. El uso de materiales que favorecen la proliferación y diferenciación de estas células es uno de los aspectos más destacados de la investigación actual. Las investigaciones recientes refuerzan la idea de que las células madre de la pulpa dental (DPSCs) y células madre de la papila dental (DPCs) son esenciales para la regeneración exitosa.^{12,13}

1. Células madre de la pulpa dental (DPSCs): estas células tienen un alto potencial regenerativo y son capaces de formar dentina y tejido pulpar.
2. Células madre de la papila dental (DPCs): estas también pueden contribuir a la formación de tejido pulpar.

Las DPSCs y DPCs tienen una alta capacidad regenerativa. Se ha demostrado que estas células pueden ser activadas y diferenciadas mediante el uso de factores bioactivos y materiales que estimulan su proliferación y diferenciación hacia odontoblastos.^{12,13}

Factores de crecimiento

Son esenciales para promover la diferenciación celular y la angiogénesis y la mineralización del tejido pulpar en la pulpa regenerada, además se puede utilizar tejido de la propia pulpa dental o materiales que contengan células madre y factores de crecimiento, como los factores de crecimiento derivados de plaquetas (PDGF [*Platelet-Derived Growth*]), que son fundamentales para la formación de nuevo tejido pulpar.¹³⁻¹⁵

Entre estos factores, los más destacados incluyen: factor de crecimiento fibroblástico, factor de crecimiento endotelial vascular, que promueve la formación de vasos sanguíneos y TGF- β (*Transforming Growth Factor beta*), que estimula la formación de dentina.

Se ha encontrado que el plasma rico en plaquetas (PRP) y la fibrina rica en plaquetas (PRF) son útiles para la liberación controlada de factores de crecimiento que favorecen la revascularización y regeneración del tejido pulpar. Estos factores pueden ser aplicados localmente a través de proteínas recombinantes, geles o mediante el uso de PRP.¹³⁻¹⁵

Materiales bioactivos

La regeneración pulpar no sólo implica la restauración del tejido pulpar, sino también la formación de dentina nueva. Los materiales bioactivos, como el hidróxido de calcio y los materiales de silicato de calcio, favorecen la reparación dentinaria al inducir la mineralización de la pulpa y la formación de una barrera de dentina reparadora. Estos materiales tienen propiedades bioactivas que estimulan la respuesta de las células madre pulpares y permiten la regeneración de la dentina.^{10,14,16}

Los materiales bioactivos como el hidróxido de calcio y el silicato de calcio continúan siendo fundamentales para inducir la formación de dentina en los procedimientos de regeneración pulpar. Estos materiales promueven la respuesta biológica adecuada y la formación de una capa dentinaria que protege la pulpa.^{10,14,16}

Los materiales como *Mineral Trioxide Aggregate* (MTA) y *Biodentine* se utilizan en la reparación de la pulpa dental, creando una barrera biocompatible que favorece la regeneración de la pulpa y la formación de dentina.^{10,14,16}

Revascularización pulpar

La revascularización es clave para restaurar la función del tejido pulpar. Se busca la restauración del flujo sanguíneo en los canales radiculares mediante el uso de materiales que estimulen la formación de nuevos vasos sanguíneos, esto permite el suministro adecuado de oxígeno y nutrición adecuada de las células pulpares regeneradas, favoreciendo la regeneración de los tejidos.^{11,12}

Estudios recientes han demostrado que el uso de ácido etidrónico y ácido hialurónico en combinación con factores de crecimiento puede mejorar la revascularización en dientes con pulpa necrosada, promoviendo un entorno favorable para la regeneración.^{11,12}

Control de infecciones para la regeneración

Un aspecto clave en la regeneración pulpar es el control de la infección. Para evitar complicaciones y asegurar que el proceso regenerativo sea exitoso, se debe eliminar cualquier infección bacteriana en el canal radicular y garantizar que el ambiente esté libre de patógenos.^{10,14}

La regeneración pulpar requiere un ambiente estéril y adecuado para las células madre. Esto implica:^{10,14}

1. *Control de infecciones*: evitar la contaminación bacteriana a través de la eliminación de la infección y el uso de antibióticos locales.
2. *Uso de barreras biocompatibles*: materiales que sellan el acceso a la pulpa, previenen la filtración y protegen el área regenerativa.

Además, se busca mantener la vitalidad de la pulpa mediante la adecuada revascularización de los tejidos. Los antibióticos locales, como la clorhexidina, siguen siendo recomendados en la desinfección de los conductos radiculares antes de iniciar los procedimientos regenerativos.^{10,14}

Técnicas avanzadas y tecnología

El uso de tecnologías avanzadas, como el láser y la electroestimulación, se está investigando como métodos adicionales para promover la regeneración pulpar. Estas técnicas pueden mejorar la proliferación celular y aumentar la eficacia de los tratamientos regenerativos.^{10,11}

En los últimos años, las tecnologías avanzadas, como los láseres, la electroestimulación y la ingeniería de tejidos, se han explorado como posibles herramientas para mejorar la regeneración pulpar. La electroestimulación se

utiliza para mejorar la proliferación celular y la diferenciación de las células madre en el sitio de la lesión.^{10,11}

Se han reportado avances en el uso de láseres de baja potencia para estimular la reparación de la pulpa dental y mejorar la función de los factores de crecimiento.^{10,11}

Células madre en la regeneración pulpar

La regeneración pulpar a partir de células madre dentales es un punto clave en la odontología. Estas son mesenquimales, es decir, que tienen la capacidad de diferenciarse en células especializadas: osteodentoblasticas, adipogénicas y neurogénicas. Tras la diferenciación, es posible la regeneración de la pulpa y el mantenimiento de la homeostasis, previniendo así un tratamiento endodóntico.^{17,18}

El mecanismo de acción de las células madre comienza en la capacidad que tienen de diferenciar las células específicas del tejido dañado por medio de transdiferenciación o fusión celular, consecuentemente estas migran a la zona lesionada, donde emiten señales para llevar a cabo el reclutamiento de otras células madre. Además, tienen la gran capacidad de autorrenovarse, proliferar y dar un importante efecto antiinflamatorio. También inhiben la apoptosis, e incrementan la vascularización del tejido dañado, además de estimular a células sanas que se encuentran en un estado quiescente, presentes en la región lesionada.¹⁹ Las células madre dentales se clasifican según su ubicación:

Células madre de la pulpa dental (DPSCs): estas células son accesibles y no invasivas debido a que se encuentran en la pulpa de los dientes permanentes, por lo tanto, también se pueden criopreservar y restaurar cuando sea necesario. El potencial de proliferación, autorrenovación y capacidad de multilinaje es alto. Cumple con la capacidad de regenerar el complejo dentino pulpar, dado especialmente a partir de células extraídas de los terceros molares. Además, estas células madre son capaces de generar odontoblastos, los cuales están encargados de formar dentina reparadora.^{8,17,20}

Células madre de los dientes temporales exfoliados humanos (SHEDs): la ubicación de estas células es en los dientes deciduos. Son sometidas a un proceso enzimático y a factores tisulares de crecimiento, por lo tanto, tienen la capacidad de diferenciarse en células nerviosas, adipocitos y odontogénicas.^{17,20,21}

Células madre del ligamento periodontal (PDLSCs): su ubicación se da en el ligamento periodontal, adyacentes a los vasos sanguíneos, además, tienen la facultad de

diferenciarse en odontoblastos y cementoblastos.^{17,20,21} Tras una respuesta inflamatoria de la pulpa coronal, tanto estas células madre como las células madre de la papila apical, son viables para la regeneración del complejo dentino pulpar, debido a que las señales bioactivas, permiten que estas células se movilicen y apliquen su capacidad inherente.^{8,21}

Células madre de la papila apical (SCAPs): se ubican en el ápice dental. Son precursoras de los odontoblastos primarios, los cuales cumplen la función de formar la dentina radicular.^{17,20}

Como se mencionó, uno de los mecanismos por los que estas células actúan es la migración. Este proceso se da gracias a que las SCAPs son quimoatraídas a través del eje SDF-1α/CXCR4, por lo tanto, es una fuente endógena para la regeneración dentino pulpar. Estas células son las que mayor capacidad de regeneración tienen a comparación de las otras células madre. Los agregados celulares de SCAP, expresan marcadores odonto y osteogénicos como ALP, BSP, Runx2 y DSSP que, tras estudios, destaca que pueden formar tejidos altamente vascularizados y con densidad celular muy similares a la pulpa.^{8,21}

Células madre del folículo dental (DFSCs): estas células provienen del folículo dental, especialmente de los terceros molares, y son consideradas multipotentes, porque tienen la capacidad de diferenciarse en linajes osteogénicos y son una fuente importante para la regeneración de tejidos dentales.^{8,21}

Andamiajes bioactivos

Las estrategias regenerativas que emplean andamiajes bioactivos han abierto nuevas posibilidades en el campo de la ingeniería tisular, especialmente en la regeneración pulpar. Un andamiaje es una estructura bioactiva que actúa como una base para la adhesión celular, regulando la proliferación y diferenciación de las células, facilitando la formación de tejido. En términos simples, los andamiajes son estructuras tridimensionales que las células utilizan como matriz extracelular durante un periodo determinado, creando un entorno favorable para su desarrollo. Estos andamiajes deben establecer un microambiente tridimensional que permita a las células madre o progenitoras unirse, migrar, proliferar y organizarse de forma espacial, favoreciendo su diferenciación en linajes odontogénicos, vasculogénicos y neurogénicos, al mismo tiempo que facilitan la angiogénesis y la neurogénesis.^{6,7}

Para ser efectivos, los andamiajes bioactivos deben cumplir con varias características clave, entre ellas: biocompatibilidad, biodegradabilidad controlada y

porosidad interconectada. La biocompatibilidad es crucial para evitar respuestas inmunológicas adversas, mientras que la biodegradabilidad permite que la tasa de degradación del andamiaje coincida con la tasa de regeneración tisular. Además, la porosidad interconectada es esencial para garantizar la difusión de nutrientes y la migración celular.^{6,22}

Los andamiajes bioactivos pueden clasificarse según su origen en naturales y sintéticos. Los biomateriales naturales, como el colágeno, poseen propiedades de biocompatibilidad y biodegradabilidad intrínsecas. Sin embargo, su tasa de degradación y sus propiedades mecánicas suelen ser insuficientes sin modificaciones. Otros materiales naturales empleados en la regeneración de la pulpa dental incluyen el quitosano, fibroína de seda, gelatina, alginato y concentrado de plaquetas.^{6,23}

Por otro lado, los andamiajes sintéticos se dividen en materiales poliméricos, biocerámicos y metálicos. Estos materiales ofrecen un mayor control sobre las propiedades mecánicas y la microarquitectura del andamiaje, aunque pueden inducir respuestas inflamatorias o inmuno- genéricas y producir subproductos catabólicos tóxicos. Los andamiajes híbridos, que combinan biomateriales naturales y sintéticos, permiten mejorar las propiedades fisicomecánicas de los biomateriales naturales, a la vez que atenúan las preocupaciones de biocompatibilidad asociadas a los sintéticos.^{6,24}

Según Quigley,⁶ se han desarrollado materiales bioactivos derivados de los tejidos de la dentina, conocidos como matriz dentinaria tratada (TDM) o matriz dentinaria desmineralizada (DDM). Estos biomateriales preservan los componentes de la matriz dentinaria y actúan como un portador o andamiaje para la regeneración pulpar. Se ha demostrado que la TDM/DDM favorece la formación de tejido vascularizado similar al de la pulpa dental. Además, se están investigando materiales bioactivos derivados del huésped, como los coágulos sanguíneos, que sirven tanto como andamios como fuentes de células endógenas y factores de crecimiento.

La elección del biomaterial es esencial en las estrategias de medicina regenerativa, pero también lo es el método de fabricación del andamiaje, ya que este puede influir significativamente en su idoneidad para diferentes aplicaciones. Las estrategias más comunes para la regeneración de la pulpa dental incluyen el uso de hidrogeles, microesferas, láminas celulares y andamios nanofibrosos. Sin embargo, han surgido técnicas más avanzadas como la impresión 3D, el electrofibrado y el moldeo por inyección.^{6,25}

La impresión 3D es particularmente ventajosa porque permite diseñar andamiajes personalizados que se ajustan a las necesidades anatómicas del diente, controlando variables como la geometría y el tamaño de los poros. El electrofibrado, por su parte, produce estructuras altamente porosas que favorecen la adhesión celular, aunque presenta limitaciones en la precisión geométrica. El moldeo por inyección sigue siendo una técnica tradicional y rentable, adecuada para la fabricación de andamiajes con formas simples.^{6,25}

A pesar de los avances en el diseño de andamiajes y técnicas de fabricación, la selección de los métodos ideales para la regeneración pulpar sigue siendo un desafío. Esto incluye la elección de las células apropiadas, los factores de crecimiento y los andamiajes adecuados para garantizar la regeneración funcional de la pulpa dental. Aunque la investigación ha avanzado considerablemente, la ingeniería de tejidos para la regeneración funcional de la pulpa requiere un estudio más profundo de los mecanismos moleculares que subyacen en este proceso y de las interacciones entre las células, el andamiaje y las moléculas bioactivas.^{24,25}

PROCESO DE REGENERACIÓN PULPAR: DE LA INVESTIGACIÓN A LA CLÍNICA

Kaury y colaboradores realizaron un seguimiento radiográfico de cuatro años en un premolar mandibular inmaduro con *dens evaginatus* que había sido sometido a un procedimiento endodóntico regenerativo. Cuatro años después, el diente fue extraído por razones ortodóncicas, lo que permitió examinar los hallazgos histológicos. Como conclusión, se observó que, tras cuatro años del REP en un premolar inmaduro con periodontitis apical, se había desarrollado tejido de granulación en el conducto radicular, lo cual sugiere un proceso de reparación en lugar de regeneración.²⁶

Cehreli y su equipo trajeron cinco incisivos maxilares previamente traumatizados de cuatro pacientes de ocho a 11.5 años de edad con un protocolo RET (*regenerative endodontic treatment*) que utilizó irrigación con NaOCl al 2.5% y colocación de un apósito de hidróxido de calcio en la primera visita. Después de cuatro semanas, se retiró la medicación intraconducto y todo el tejido pulpar extraído del canino maxilar deciduo vecino se trasplantó al conducto radicular desinfectado sin inducir sangrado apical; realizaron un seguimiento de tres pacientes durante 24 meses y de un paciente durante 12 meses. Todos los dientes demostraron evidencia radiográfica de curación periapical completa, ligero aumento del espesor de la pared dentinaria y cierre apical continuo en ausencia de síntomas clínicos.²⁷

AVANCES Y RESULTADOS CLÍNICOS EN REGENERACIÓN PULPAR

Dentro de los tratamientos de regeneración pulpar en los últimos cinco años existen numerosos estudios realizados dentro de los cuáles uno de ellos es el estudio realizado por Ulusoy y su grupo²⁸ en el año 2019 en 88 pacientes (niños y niñas) entre los ocho y 11 años, quienes presentaron fracturas coronarias complicadas de incisivos maxilares, con diagnóstico de necrosis pulpar, con o sin afectación apical y con evidencia radiográfica de raíz incompleta. Dicho diagnóstico se realizó con base a la prueba aleatoria en frío con spray de cloruro de etilo.

El tratamiento realizado en esta investigación, consistió en la irrigación suave de los conductos radiculares, con 20 mL de hipoclorito de sodio al 1.25%. No se realizó instrumentación y los conductos fueron secados con puntas de papel estériles, se colocó pasta tri antibiótica con tres partes iguales de 20 mg de clindamicina, ciprofloxacina y metronidazol, mezclado con 1 mL de agua estéril, la cual se colocó en la cámara pulpar y fue empaquetada sin generar presión en los conductos radiculares, con bolitas de algodón estéril. Posterior a dicho tratamiento, se realizaron controles clínicos cada tres meses, y radiográficos cada seis meses durante el primer año, luego dichos controles fueron anuales.

Los resultados obtenidos por Ulsoy y su grupo fueron favorables para 71 dientes, los cuales presentaron un éxito clínico y radiográfico con la resolución de la enfermedad y mayor desarrollo de raíz radiográficamente observable, con respuesta positiva a pruebas de sensibilidad. Únicamente dos dientes presentaron síntomas de falla que incluyeron dolor espontáneo y sensibilidad extrema, obteniendo una significancia estadística de $p > 0.05$.

Un año más tarde en el año 2020 se realiza un ensayo clínico aleatorizado llevado a cabo por Rizk y colaboradores,²⁹ el estudio comenzó con 15 pacientes con incisivos centrales permanentes superiores bilaterales necróticos con ápice abierto. Se utilizaron tablas generadas por computadora para asignar los tratamientos. Los dos incisivos centrales superiores se asignaron aleatoriamente al grupo de control (andamio BC) o al grupo examinado (andamio PRF). Participantes: 13 pacientes de ocho a 14 años cumplieron con los requisitos del estudio. Se realizó un seguimiento durante tres, seis, nueve y 12 meses.

Se recogieron radiografías estandarizadas cada tres meses y se calculó la diferencia en las mediciones utilizando el software ImageJ.ⁱ Los resultados primarios medidos fueron la formación de senos nasales/fístulas, las quejas de dolor, el grado de movilidad y la presencia/

ausencia de hinchazón. Radiográficos: elongación de la longitud de la raíz y aumento del grosor de la raíz. Los resultados secundarios fueron la prueba de sensibilidad y el cambio de color de la corona. Radiográficos: cambio en la densidad ósea y el diámetro apical. Las radiografías que se estandarizaron se utilizaron durante el tiempo de seguimiento y los cambios ocurridos se calcularon utilizando el software ImageJ demostró que los dientes en los que se usó de fibrina rica en plaquetas (grupo examinado) mostraron un crecimiento estadísticamente significativo en la longitud y el ancho de la raíz radiográfica, un aumento de la densidad ósea periapical y una reducción en el diámetro apical en comparación con el grupo control (a los que se les indujo el sangrado, formándose un coágulo de sangre). Al final del período de seguimiento, todos los dientes tratados dieron negativo en la prueba de sensibilidad. El grupo control mostró una mayor decoloración de la corona en comparación con el grupo examinado.

Otro estudio realizado fue el de Yang y colaboradores³⁰ en el año 2022, en el cual se realizó la revascularización pulpar del diente de un paciente de 26 años utilizando cefaclor en lugar de minociclina e iRoot BP en lugar de agregado de trióxido mineral como medicación intraconducto. Se realizó un seguimiento del caso durante 36 meses. Las observaciones mostraron evidencia de regresión de los signos y síntomas clínicos, resolución de la periodontitis apical y ausencia de decoloración de los dientes afectados además realizaron un seguimiento a los seis, 12, 24 y 36 meses, demostrando que la revascularización pulpar en un diente necrótico inmaduro mostró evidencia radiográfica adicional de curación.

En el mismo año de 2022, Wikstrom y su equipo³¹ realizaron un estudio prospectivo en el que se realizó revitalización pulpar en 75 incisivos inmaduros necróticos traumatizados de 71 pacientes. Se midieron radiográficamente la formación radicular continua (ancho y largo), reabsorción radicular, cierre del ápice, índice periapical y etapa de desarrollo radicular. Clínicamente se midió el dolor a la percusión, dolor a la palpación, movilidad dental patológica, hinchazón, trayecto sinusal, anquilosis, decoloración de la corona, respuesta a la prueba de sensibilidad pulpar y dolor subjetivo. Los resultados del tratamiento se categorizaron como éxito según la ausencia de síntomas clínicos y cuando había evidencia radiográfica

ⁱ Nota del editor: ImageJ es un software de procesamiento y análisis de imágenes de código abierto, especialmente popular en el ámbito científico y de la investigación. Es gratuito y permite visualizar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir diferentes tipos de imágenes. <https://imagej.net/ij/download.html>

de curación apical y desarrollo radicular continuo como resultado se obtuvo que la revitalización pulpar tuvo éxito con la resolución de los signos clínicos y radiográficos y el desarrollo radicular continuo en 60% de los dientes en los que se realizó y que los casos fallidos se relacionaron con la falta de sangrado ($n = 19$) y las infecciones persistentes ($n = 11$), además de por fracturas de corona, lo que indica que se necesitan nuevas técnicas para mejorar la predictibilidad de la revitalización pulpar endodóntica.

En el estudio de Tawfeek y colaboradores³² (2023) se realizó un procedimiento de revascularización en 30 dientes anteriores permanentes inmaduros no vitales que se asignaron aleatoriamente a dos grupos iguales ($n = 15$). Se utilizó NeoMTA como material de tapón coronal en el grupo experimental (N), mientras que se utilizó agregado de trióxido mineral blanco convencional como material de tapón coronal en el grupo de control (W). Todos los dientes tratados se evaluaron clínicamente a la semana, a los uno, tres y 12 meses y radiográficamente a los 12 meses se demostró que el éxito clínico y radiográfico, ya sea usando NeoMTA o MTA convencional fue de 100%. La decoloración se detectó en un solo diente con NeoMTA (9.1%) y en tres dientes (27.3%) con MTA, pero la diferencia entre los grupos no fue estadísticamente significativa.

CONCLUSIONES

La regeneración pulpar es un área de investigación emergente en odontología que busca restaurar la función y estructura de la pulpa dental dañada, es una opción terapéutica viable que sigue principios fundamentales de biocompatibilidad, desinfección adecuada y estimulación celular, con el fin de restaurar la función del diente y evitar la necesidad de tratamientos más invasivos como la extracción. Al implementar nuevas técnicas y la aplicación de los principios básicos de la regeneración pulpar, favorecen la desinfección adecuada, la revascularización y la conservación de las células madre dentro del conducto, se puede mejorar los pronósticos a largo plazo del diente y reducir la necesidad de tratamientos invasivos adicionales. Entonces, la regeneración pulpar representa un avance significativo en la odontología moderna, orientándose hacia un enfoque más conservador y biológico en el tratamiento.

La regeneración pulpar mediante el uso de células madre y andamiajes bioactivos representa un avance prometedor en la endodoncia moderna pues mediante estos procedimientos se busca restaurar la vitalidad y funcionalidad del tejido pulpar en dientes comprometidos

mediante estrategias biológicas avanzadas en particular la ingeniería de tejidos reemplazando tratamientos convencionales como la terapia de conductos que muchas de las veces pueden llegar a fracasar con opciones regenerativas que restablecen completamente la función y estructura del tejido pulpar.

La regeneración pulpar con células madre y andamiajes bioactivos está marcando un punto de inflexión en la endodoncia moderna, al ofrecer soluciones innovadoras para restaurar la vitalidad y funcionalidad de los dientes comprometidos. Este enfoque, basado en principios biológicos avanzados y respaldado por avances tecnológicos, está transformando los límites de los tratamientos convencionales al posibilitar la regeneración completa de tejidos dentales. A pesar de los retos pendientes, como la estandarización de protocolos y la validación en estudios clínicos a largo plazo, los resultados obtenidos hasta ahora destacan el enorme potencial de esta disciplina para redefinir el futuro de la odontología. Explorar más sobre estas tecnologías emergentes no solo permite entender su alcance, sino también participar activamente en el desarrollo de una odontología más biológica, efectiva y alineada con las necesidades del paciente.

La regeneración pulpar es un área de investigación prometedora dentro de la odontología, y representa un avance significativo para la endodoncia regenerativa. Este enfoque busca transformar los tratamientos endodónticos convencionales a nuevas alternativas de tratamientos mucho más conservadoras. El uso en conjunto de andamiajes bioactivos y células madre se ha demostrado ser eficaz para la regeneración del complejo dentinopulpar. Estos materiales bioactivos, como el hidróxido de calcio y MTA, favorecen a la mineralización y formación de nuevo tejido dentinario, lo que, a su vez, cumplirá la función de protección del tejido pulpar, el cual será regenerado gracias a la formación de nuevas células especializadas a partir de las células madre dentales, principalmente DPSCs y SCAPs. A pesar de este gran avance en dicha área, aún se considera un tema que requiere mucha más investigación para estandarizar protocolos clínicos que podrían ser utilizados en la práctica clínica diaria.

REFERENCIAS

- Sheikhshoaei F, Moradi S, Alavi-Niakoo SS. The analysis of co-citation and word co-occurrence networks of Iranian articles in the field of dentistry. *J Dent Med.* 2021; 34: 168-182.
- Mostafavi YS, Iranmanesh P, Khademi A, Mehrabi R, Sheikhshoaei F, Mohammadi M. Mapping global research in dental pulp regeneration: a 10-year bibliometric analysis. *Dent Res J (Isfahan).* 2024; 21: 31.
- Jayadevan V, Gehlot PM, Manjunath V, Madhunapantula SV, Lakshmikanth JS. A comparative evaluation of Advanced Platelet-

Rich Fibrin (A-PRF) and Platelet-Rich Fibrin (PRF) as a scaffold in regenerative endodontic treatment of traumatized immature non-vital permanent anterior teeth: a prospective clinical study. *J Clin Exp Dent.* 2021; 13 (5): e463-e472.

4. Kiaipour Z, Shafiee M, Ansari G. Role of platelet concentrates in dental-pulp regeneration: a systematic review of randomized clinical trials. *J Dent (Shiraz).* 2024; 25 (2): 97-107.
5. Thalakiriyawa D, Dissanayaka W. Advances in regenerative dentistry approaches: an update. *Int Dent J.* 2024; 74 (1): 25-34.
6. Quigley R, Kearney M, Kennedy O, Duncan H. Tissue engineering approaches for dental pulp regeneration: the development of novel bioactive materials using pharmacological epigenetic inhibitors. *Bioact Mater.* 2024; 40: 182-211.
7. Li X, Fan W, Fan B. Dental pulp regeneration strategies: a review of status quo and recent advances. *Bioact Mater.* 2024; 38: 258-275.
8. Shi X, Hu X, Jiang N, Mao J. Regenerative endodontic therapy: From laboratory bench to clinical practice. *J Adv Res.* 2025; 72: 229-263.
9. Minic S, Vital S, Chaussain C, Boukpassi T, Mangione F. Tissue characteristics in endodontic regeneration: a systematic review. *Int J Mol Sci.* 2022; 23 (18): 10534.
10. Xie Z, Shen Z, Zhan P, Yang J, Huang Q, Huang S et al. Functional dental pulp regeneration: basic research and clinical translation. *Int J Mol Sci.* 2021; 22 (16): 8991.
11. Yan H, De Deus G, Kristoffersen IM, Wiig E, Reseland JE, Johnsen GF et al. Regenerative endodontics by cell homing: a review of recent clinical trials. *J Endod.* 2023; 49 (1): 4-17.
12. Mousa DG, Aparicio C. Present and future of tissue engineering scaffolds for dentin-pulp complex regeneration. *J Tissue Eng Regen Med.* 2019; 13 (1): 58-75.
13. Sui B, Wu D, Xiang L, Fu Y, Kou X, Shi S. Dental pulp stem cells: from discovery to clinical application. *J Endod.* 2020; 46 (9S): S46-S55.
14. Nakashima M, Iohara K, Zayed M. Pulp regeneration: current approaches, challenges, and novel rejuvenating strategies for an aging population. *J Endod.* 2020; 46 (9S): S135-S142.
15. Metterska J, Fagogeni I, Nowicka A. Efficacy of autologous platelet concentrates in regenerative endodontic treatment: a systematic review of human studies. *J Endod.* 2019; 45 (1): 20-30.e1.
16. Smith AJ, Duncan HF, Diogenes A, Simon S, Cooper PR. Exploiting the bioactive properties of the dentin-pulp complex in regenerative endodontics. *J Endod.* 2016; 42 (1): 47-56.
17. Ramli H, Yusop N, Ramli R, Berahim Z, Peiris R, Ghani N. Application of neurotransmitters and dental stem cells for pulp regeneration: a review. *Saudi Dent J.* 2023; 35 (5): 387-394.
18. Miquet-Vega SA, Baéz-Ayala E. Células madre dentales, reparación y regeneración en pulpa. 16 de Abril. 2019; 58 (274): 126-130.
19. Valle MC, Martínez LIL, Vázquez IAP. Células madre y su aplicación en Estomatología. *Prog.* 2019; 2 (2): 137-152.
20. Matos MIC, Malpica LM, Peláez SYG. Consideraciones actuales sobre la aplicación de las células madre en Estomatología. *Rev Estud HolCien.* 2022; 3 (1): e97.
21. Barzallo S. Células madre en odontología. Nuevos paradigmas. *Rev Med Ateneo.* 2019; 21 (1): 93-103.
22. Mohd N, Razali M, Busra M, et al. *In vitro* and *in vivo* biological assessments of 3D-Bioprinted scaffolds for dental applications. *Int J Mol Sci.* 2023; 24 (16): 12881.
23. Liu H, Lu J, Jiang Q, Haapasalo M, Qian J, Tay FR et al. Biomaterial scaffolds for clinical procedures in endodontic regeneration. *Bioact Mater.* 2021; 12: 257-277.
24. Sequeira D, Diogo P, Gomes BPFA, Peca J, Santos JMM. Scaffolds for dentin-pulp complex regeneration. *Medicina (Kaunas).* 2023; 60 (1): 7.
25. Wu DT, Munguia-Lopez JC, Cho YW, Ma X, Song V, Zhu Z et al. Polymeric scaffolds for dental, oral, and craniofacial regenerative medicine. *Molecules.* 2021; 26 (22): 7043.
26. Kaur K, Varghese E, Eswara U, Goh Pei En J. Histologic and radiological observations of a human immature premolar with pulp necrosis treated with regenerative endodontic procedure - A case report of a four-year follow-up. *Saudi Dent J.* 2023; 35 (7): 869-875.
27. Cehreli ZC, Unverdi GE, Ballikaya E. Deciduous tooth pulp autotransplantation for the regenerative endodontic treatment of permanent teeth with pulp necrosis: a case series. *J Endod.* 2022; 48 (5): 669-674.
28. Ulusoy AT, Turedi I, Cimen M, Cehreli ZC. Evaluation of blood clot, platelet-rich plasma, platelet-rich fibrin, and platelet pellet as scaffolds in regenerative endodontic treatment: a prospective randomized trial. *J Endod.* 2019; 45 (5): 560-566.
29. Rizk HM, Salah Al-Deen MS, Emam AA. Pulp revascularization/revitalization of bilateral upper necrotic immature permanent central incisors with blood clot vs. platelet-rich fibrin scaffolds-a split-mouth double-blind randomized controlled trial. *Int J Clin Pediatr Dent.* 2020; 13 (4): 337-343.
30. Yang YQ, Wu BL, Zeng JK, Jiang C, Chen M. Pulp revascularization on an adult mandibular right second premolar: a case report. *World J Clin Cases.* 2022; 10 (17): 5833-5840.
31. Wikstrom A, Brundin M, Romani-Vestman N, Rakhimova O, Tsilingaridis G. Endodontic pulp revitalization in traumatized necrotic immature permanent incisors: early failures and long-term outcomes-A longitudinal cohort study. *Int Endod J.* 2022; 55 (6): 630-645.
32. Tawfeek HA, El-Bardissi AA, Abou ElYazeed M, Youssef R, Abd Alsamad AM. Clinical and radiographic evaluation of NeoMTA versus conventional white mineral trioxide aggregate in revascularization of non-vital immature permanent anterior teeth (A randomized controlled trial). *BJD Open.* 2023; 9 (1): 17.

Conflictos de intereses: los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Aspectos éticos: la información es verídica y confidencial.

Financiamiento: autofinanciamiento.

Correspondencia:
Gustavo Adrián Morales Valladares
E-mail: endogusm@gmail.com