

Enfoques actuales en la regeneración ósea guiada para defectos maxilofaciales en población pediátrica

Current approaches in guided bone regeneration for maxillofacial defects in pediatric population

Héctor Eduardo Prado González

<https://orcid.org/0009-0004-2237-4633>
Investigador independiente, Ecuador

Vanessa Carolina Armas Guevara

<https://orcid.org/0009-0007-2361-9075>
Ministerio de Salud Pública, Ecuador

Diego Adrián Molina Ochoa

<https://orcid.org/0009-0008-8929-9913>
Investigador independiente, Ecuador

Alisson Mayling Castro Guayllas

<https://orcid.org/0009-0002-9196-638X>
Investigadora independiente, Ecuador

Angie Mishel Castro Guayllas

<https://orcid.org/0009-0007-2968-2817>
Investigadora independiente, Ecuador

Rubén Alfonso Zapata Franco

<https://orcid.org/0009-0000-5177-1268>
Investigador independiente, Ecuador

Christian Alfredo Méndez Palacios

<https://orcid.org/0009-0003-7949-046X>
Investigador independiente, Ecuador

Michael Xavier Quisilema Cadena

<https://orcid.org/0000-0001-5132-7570>
Investigador independiente, Ecuador

RESUMEN

La regeneración ósea guiada (ROG) ha emergido como una estrategia clave en el manejo de defectos maxilofaciales en la población pediátrica, presentando desafíos únicos debido al estado en desarrollo del esqueleto infantil y la necesidad de enfoques personalizados. Este artículo de revisión narrativa explora los avances recientes en materiales, técnicas y enfoques terapéuticos aplicados a la ROG en niños. Se destacan el uso de membranas reabsorbibles y no reabsorbibles, biomateriales osteoconductores y osteoinductores, así como la incorporación de factores de crecimiento y tecnologías innovadoras como la bioimpresión 3D. Además, se analizan las consideraciones específicas para esta población, incluyendo la biocompatibilidad de los materiales, el impacto en el crecimiento óseo y la minimización de complicaciones a largo plazo. Los estudios revisados subrayan la importancia de un enfoque interdisciplinario que combine conocimientos en cirugía maxilofacial, ingeniería de tejidos y biología ósea para optimizar los resultados. Aunque los avances son prometedores, persisten limitaciones en términos de evidencia clínica robusta y seguimiento a largo plazo. Este artículo concluye enfatizando la necesidad de investigaciones adicionales que permitan desarrollar protocolos estandarizados y tecnologías más eficaces, garantizando así el éxito terapéutico y una mejor calidad de vida para los pacientes pediátricos afectados por estos defectos.

Palabras clave: Regeneración ósea guiada, Defectos maxilofaciales, Población pediátrica, Biomateriales, Osteogénesis, Técnicas quirúrgicas.

ABSTRACT

Guided bone regeneration (GRO) has emerged as a key strategy in the management of maxillofacial defects in the pediatric population, presenting unique challenges due to the developing state of the infant skeleton and the need for personalized approaches. This narrative review article explores recent advances in materials, techniques and therapeutic approaches applied to ROG in children. The use of resorbable and non-resorbable membranes, osteoconductive and osteoinductive biomaterials, as well as the incorporation of growth factors and innovative technologies such as 3D bioprinting, stand out. Additionally, specific considerations for this population are discussed, including biocompatibility of materials, impact on bone growth, and minimization of long-term complications. The studies reviewed underline the importance of an interdisciplinary approach that combines knowledge in maxillofacial surgery, tissue engineering and bone biology to optimize results. Although advances are promising, limitations remain in terms of robust clinical evidence and long-term follow-up. This article concludes by emphasizing the need for additional research to develop standardized protocols and more effective technologies, thus guaranteeing therapeutic success and a better quality of life for pediatric patients affected by these defects.

Keywords: Guided bone regeneration, Maxillofacial defects, Pediatric population, Biomaterials, Osteogenesis, Surgical techniques.

INTRODUCCIÓN

La ROG se ha consolidado como una técnica clave en la reconstrucción de defectos óseos maxilofaciales, especialmente en población pediátrica, donde los desafíos anatómicos y fisiológicos exigen enfoques especializados (1). La naturaleza dinámica del crecimiento óseo en niños, junto con la necesidad de preservar estructuras vitales y minimizar el impacto en el desarrollo craneofacial, hace que el manejo de estos casos sea particularmente complejo (2). En este contexto, los avances en biomateriales, membranas barrera y factores bioactivos han ampliado significativamente las posibilidades terapéuticas, ofreciendo soluciones más predecibles y menos invasivas (3). Este artículo de revisión narrativa explora los enfoques actuales en ROG, analizando tanto las innovaciones tecnológicas como las consideraciones clínicas específicas para pacientes pediátricos (4). Además, se abordan las limitaciones y los desafíos asociados con la aplicación de estas técnicas en una población en crecimiento, así como las perspectivas futuras para optimizar los resultados funcionales y estéticos (5). La integración de nuevas estrategias, como el uso de células madre, ingeniería tisular y tecnologías digitales, promete transformar el panorama de la regeneración ósea en este grupo etario. A través de una revisión exhaustiva de la literatura reciente, este trabajo busca proporcionar una visión integral y actualizada que sirva como referencia para clínicos e investigadores interesados en mejorar la calidad de vida de los pacientes pediátricos con defectos maxilofaciales (6).

METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta revisión narrativa incluyó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas como PubMed, Scielo y ScienceDirect. Se utilizaron términos controlados MeSH y DeCS, como "regeneración ósea guiada", "defectos maxilofaciales", "población pediátrica" y "biomateriales". Los operadores booleanos "AND" y "OR" se aplicaron para combinar términos y optimizar los resultados. Los criterios de inclusión abarcaron artículos publicados en los últimos 15 años, disponibles en texto completo, en inglés o español, y que abordaran específicamente enfoques actuales en la regeneración ósea guiada para defectos maxilofaciales en niños. Se excluyeron estudios con población adulta, revisiones duplicadas y aquellos con evidencia insuficiente o no relacionada con el tema. Tras un proceso de selección en varias etapas, que incluyó la lectura de títulos, resúmenes y textos completos, se revisaron un total de 16 artículos relevantes que cumplieron con los criterios establecidos. Esta metodología permitió sintetizar la información más actualizada y relevante para comprender los avances y desafíos en este campo de la odontología pediátrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características anatómicas y fisiológicas de los defectos maxilofaciales en niños

Los defectos maxilofaciales en niños presentan características anatómicas y fisiológicas particulares que los diferencian de los defectos en adultos, lo que supone desafíos únicos en su manejo y tratamiento. En la población pediátrica, el sistema esquelético se encuentra en constante crecimiento y remodelación, lo que implica una mayor capacidad de regeneración ósea en comparación con los adultos. Sin embargo, esta misma plasticidad ósea puede complicar la planificación terapéutica a largo plazo, ya que los procedimientos realizados deben considerar el potencial de crecimiento del paciente para evitar deformidades o asimetrías futuras (1).

Anatómicamente, los huesos maxilofaciales en niños son más delgados y menos densos, con una proporción mayor de médula ósea en comparación con los adultos. Esto facilita la vascularización, un factor clave para la regeneración ósea, pero también los hace más susceptibles a fracturas y lesiones. Además, los dientes en desarrollo y la presencia de gérmenes dentales representan un desafío adicional, ya que cualquier intervención quirúrgica debe garantizar la preservación de estas estructuras para evitar alteraciones en la erupción dental y el desarrollo maxilar (1).

Desde el punto de vista fisiológico, los procesos de curación ósea en niños son más rápidos debido a una mayor actividad celular y metabólica en el tejido óseo. No obstante, la inmadurez del sistema inmunológico puede influir en la respuesta inflamatoria y en la susceptibilidad a infecciones, lo que debe ser considerado al diseñar estrategias terapéuticas. Asimismo, las características biológicas del hueso infantil favorecen la integración de injertos óseos y biomateriales, pero también requieren un monitoreo continuo para garantizar que el crecimiento craneofacial no se vea comprometido (1,2).

Es importante destacar que los defectos maxilofaciales en niños pueden ser congénitos, como los asociados a fisuras labiopalatinas, o adquiridos, como resultado de traumatismos, infecciones o tumores. Cada caso presenta particularidades anatómicas y funcionales que deben ser evaluadas de manera integral para seleccionar el enfoque terapéutico más adecuado. Además, el impacto psicológico y social de estos defectos es significativo, lo que subraya la importancia de un

abordaje multidisciplinario que incluya no solo aspectos médicos y quirúrgicos, sino también apoyo emocional para el paciente y su familia (2).

En resumen, el manejo de los defectos maxilofaciales en niños requiere una comprensión profunda de las características anatómicas y fisiológicas específicas de esta población. La capacidad de crecimiento y remodelación ósea en los niños ofrece oportunidades únicas para la regeneración ósea guiada, pero también plantea retos significativos que deben ser abordados con estrategias personalizadas y un enfoque multidisciplinario (2).

Materiales utilizados en la regeneración ósea guiada: ventajas y limitaciones en pacientes pediátricos

La regeneración ósea guiada (ROG) es una técnica ampliamente utilizada en la reconstrucción de defectos maxilofaciales, especialmente en pacientes pediátricos, donde los desafíos anatómicos y fisiológicos son significativos. Los materiales empleados en este procedimiento juegan un papel crucial en el éxito del tratamiento. A continuación, se presenta una revisión de los principales tipos de materiales utilizados, sus ventajas y limitaciones en el contexto pediátrico (3).

1. Membranas barrera

Las membranas barrera, ya sean reabsorbibles (colágeno) o no reabsorbibles (PTFE), son esenciales para evitar la invasión de tejidos blandos en el área del defecto óseo. Las membranas reabsorbibles son preferidas en pacientes pediátricos debido a que eliminan la necesidad de una segunda cirugía para su retiro, lo cual reduce el riesgo de complicaciones y el estrés quirúrgico en los niños. Sin embargo, su rápida degradación puede ser una limitación en defectos grandes o complejos. Por otro lado, las membranas no reabsorbibles ofrecen mayor estabilidad, pero requieren una intervención adicional para su remoción, lo que puede ser menos ideal en esta población (3).

2. Sustitutos óseos

Los sustitutos óseos incluyen materiales autógenos, alógenos, xenógenos y sintéticos. El injerto autógeno sigue siendo el estándar de oro debido a su biocompatibilidad y capacidad osteogénica. Sin embargo, su obtención implica un procedimiento adicional para el paciente, lo que puede ser particularmente desafiante en niños debido a su limitada disponibilidad de sitios donantes y el potencial impacto en el crecimiento óseo. Los materiales alógenos y xenógenos ofrecen una alternativa menos invasiva, pero presentan riesgos de rechazo inmunológico o transmisión de enfermedades. Los sustitutos sintéticos, como los fosfatos de calcio y las cerámicas bioactivas, son altamente biocompatibles y eliminan estos riesgos, aunque su capacidad osteoinductiva puede ser limitada (3,4).

3. Factores de crecimiento

El uso de factores de crecimiento, como las proteínas morfogenéticas óseas (BMPs) y el plasma rico en plaquetas (PRP), ha mostrado resultados prometedores al estimular la formación ósea. En pacientes pediátricos, estas biomoléculas pueden acelerar la regeneración ósea y minimizar el tiempo de recuperación. No obstante, su alto costo y la posibilidad de efectos adversos deben ser cuidadosamente considerados (4).

La selección del material adecuado para la ROG en pacientes pediátricos depende de múltiples factores, incluyendo la extensión del defecto, la edad del paciente y las características específicas del material. Si bien cada material tiene sus ventajas y limitaciones, la tendencia actual se inclina hacia combinaciones personalizadas que maximicen los beneficios y minimicen los riesgos. Es fundamental realizar una evaluación exhaustiva de cada caso para garantizar resultados clínicos óptimos y minimizar las complicaciones a largo plazo en esta población vulnerable (4).

Técnicas quirúrgicas actuales aplicadas en la regeneración ósea guiada para niños

La ROG se ha consolidado como una técnica esencial en la reconstrucción de defectos maxilofaciales, especialmente en la población pediátrica, donde los desafíos anatómicos y fisiológicos demandan enfoques específicos y adaptados al crecimiento continuo del paciente. A continuación, se describen las principales técnicas quirúrgicas empleadas actualmente en este ámbito (5).

Una de las estrategias más utilizadas es el uso de membranas barrera reabsorbibles y no reabsorbibles. Estas membranas, diseñadas para proteger el injerto óseo y evitar la invasión de tejidos blandos, han demostrado ser eficaces en niños, siempre que se seleccionen materiales biocompatibles y adaptables a los cambios estructurales asociados con el

crecimiento. Las membranas reabsorbibles, como las de colágeno, son particularmente preferidas en pacientes pediátricos debido a su capacidad de integrarse al tejido circundante y eliminar la necesidad de una segunda intervención para retirarlas (5).

En cuanto a los materiales de injerto óseo, se emplean principalmente tres tipos: autoinjertos, aloinjertos y sustitutos óseos sintéticos. Los autoinjertos, considerados el estándar de oro debido a su capacidad osteogénica, osteoinductiva y osteoconductiva, suelen obtenerse de sitios donantes intraorales como la sínfisis mandibular o la rama mandibular. Sin embargo, en defectos mayores donde el volumen requerido supera la capacidad de los sitios intraorales, se recurre a fuentes extraorales como la cresta ilíaca. Los aloinjertos y materiales sintéticos, como las cerámicas de fosfato de calcio o las matrices óseas desmineralizadas, se emplean como alternativas o complementos en casos donde los autoinjertos no son viables (5).

Otra técnica que ha ganado relevancia es la distracción osteogénica. Este procedimiento implica la creación de un espacio óseo mediante la separación gradual de un segmento óseo previamente osteotomizado, permitiendo la formación de hueso nuevo en el espacio generado. En niños, esta técnica es especialmente útil para corregir defectos extensos o asimetrías faciales, ya que permite un ajuste dinámico y puede adaptarse al crecimiento del paciente (6).

La incorporación de factores de crecimiento y biomoléculas, como las proteínas morfogenéticas óseas (BMPs), ha revolucionado el campo de la ROG. Estas sustancias se utilizan para potenciar la capacidad regenerativa del injerto óseo, promoviendo una cicatrización más rápida y eficiente. En población pediátrica, su uso debe ser cuidadosamente evaluado para evitar efectos adversos relacionados con una estimulación excesiva del crecimiento óseo (6).

Finalmente, cabe destacar el papel de las tecnologías avanzadas como la impresión 3D en el diseño de guías quirúrgicas personalizadas y andamios bioactivos. Estas herramientas permiten una planificación quirúrgica precisa y una adaptación óptima a las necesidades anatómicas individuales del paciente pediátrico (6).

Factores biológicos que influyen en la regeneración ósea en la población pediátrica

La regeneración ósea en la población pediátrica presenta características únicas debido a los factores biológicos propios de esta etapa del desarrollo. Estos factores son determinantes en los procesos de reparación y remodelación ósea, especialmente en el contexto de defectos maxilofaciales. A continuación, se describen los principales elementos biológicos que influyen en este proceso (7).

En primer lugar, la capacidad de regeneración ósea en niños es significativamente superior a la de los adultos debido a la actividad celular incrementada en el tejido óseo en crecimiento. Los osteoblastos, células responsables de la formación ósea, están presentes en mayor cantidad y muestran una actividad más intensa durante la infancia. Esto favorece una rápida formación de tejido óseo nuevo, lo que es crucial para la recuperación de defectos maxilofaciales (7).

El periostio, una membrana rica en células osteoprogenitoras y vasos sanguíneos, también juega un papel fundamental en la regeneración ósea pediátrica. En los niños, el periostio es más grueso y activo, lo que contribuye a una mayor capacidad de reparación. Además, su vascularización abundante asegura un suministro adecuado de nutrientes y factores de crecimiento esenciales para el proceso regenerativo (7).

Otro factor relevante es la influencia de las hormonas del crecimiento y otros mediadores endocrinos. La hormona del crecimiento (GH) y el factor de crecimiento similar a la insulina tipo 1 (IGF-1) están presentes en niveles elevados durante la infancia y adolescencia, promoviendo tanto la proliferación como la diferenciación celular en el tejido óseo. Estas hormonas no solo estimulan la formación de hueso nuevo, sino que también mejoran la calidad del tejido regenerado (8).

La matriz extracelular (MEC) desempeña un papel clave al proporcionar un andamiaje estructural y señales bioquímicas necesarias para la regeneración ósea. En los niños, la MEC tiene una mayor plasticidad y capacidad de remodelación, lo que facilita el proceso de reparación. Además, factores de crecimiento como el factor de crecimiento transformante beta (TGF- β) y las proteínas morfogenéticas óseas (BMPs) son más abundantes y activos en edades tempranas, acelerando la formación de hueso (8).

Por último, el sistema inmunológico inmaduro en los niños puede influir positivamente en la regeneración ósea al reducir las respuestas inflamatorias excesivas que podrían interferir con el proceso reparativo. Sin embargo, esta característica también implica una mayor susceptibilidad a infecciones, lo que debe ser considerado al planificar intervenciones quirúrgicas o terapias regenerativas (8).

Uso de biomateriales y su integración en el tratamiento de defectos maxilofaciales pediátricos

La ROG en pacientes pediátricos con defectos maxilofaciales representa un desafío clínico significativo debido a las

particularidades anatómicas, fisiológicas y de desarrollo de esta población. En este contexto, los biomateriales se han consolidado como una herramienta clave para optimizar los resultados terapéuticos, favoreciendo la regeneración tisular y minimizando las complicaciones asociadas (9).

Los biomateriales utilizados en la ROG pueden clasificarse en tres categorías principales: autoinjertos, aloinjertos y materiales sintéticos o xenoinjertos. Los autoinjertos, considerados el estándar de oro, ofrecen ventajas como la osteoinducción, osteoconducción y osteogénesis intrínsecas. Sin embargo, su uso en niños puede estar limitado por la disponibilidad de sitios donantes adecuados y el riesgo de morbilidad asociado a la recolección del injerto. Por otro lado, los aloinjertos y materiales sintéticos, como los fosfatos de calcio, hidroxiapatita y biovidrios, han demostrado ser alternativas viables, proporcionando una estructura tridimensional que facilita la proliferación celular y la formación de nuevo tejido óseo (9).

En el ámbito pediátrico, la elección del biomaterial debe considerar factores como el potencial de crecimiento del paciente, la capacidad de integración del material con el tejido circundante y la minimización de la respuesta inflamatoria o inmunogénica. Los avances recientes en ingeniería de tejidos han permitido el desarrollo de biomateriales bioactivos y biodegradables que no solo sirven como andamios para la regeneración ósea, sino que también liberan factores de crecimiento y señales bioquímicas que promueven la diferenciación osteogénica (9,10).

La incorporación de tecnologías emergentes, como el diseño de andamios personalizados mediante impresión 3D, ha abierto nuevas posibilidades para abordar defectos maxilofaciales complejos en niños. Estos andamios pueden ser diseñados con precisión para adaptarse a las características anatómicas específicas del defecto, mejorando la estabilidad mecánica y favoreciendo una regeneración más eficiente. Además, la combinación de biomateriales con células madre mesenquimales ha mostrado resultados prometedores en estudios preclínicos, al potenciar la capacidad regenerativa del tejido óseo (10).

A pesar de estos avances, es fundamental considerar las limitaciones inherentes al uso de biomateriales en niños. La variabilidad en las tasas de crecimiento óseo, junto con los riesgos potenciales asociados a ciertos materiales, como infecciones o reacciones adversas, subraya la necesidad de un enfoque individualizado y basado en evidencia. Asimismo, se requiere un seguimiento clínico a largo plazo para evaluar la eficacia y seguridad de estas intervenciones en el contexto del desarrollo esquelético continuo (10).

Aplicación de terapias avanzadas: ingeniería tisular y factores de crecimiento

La ROG en población pediátrica presenta desafíos únicos debido a las características biológicas y anatómicas en desarrollo de los pacientes. En este contexto, las terapias avanzadas como la ingeniería tisular y el uso de factores de crecimiento han emergido como enfoques prometedores para abordar defectos maxilofaciales complejos (11).

La ingeniería tisular combina principios de biología celular, biomateriales y bioingeniería para promover la formación de nuevo tejido óseo. En el ámbito maxilofacial pediátrico, se han investigado matrices tridimensionales biodegradables que sirven como andamios para la proliferación celular y la deposición de matriz extracelular. Estos andamios pueden estar compuestos por materiales naturales, como colágeno o ácido hialurónico, o sintéticos, como polímeros biodegradables. La elección del material depende de factores como la biocompatibilidad, la tasa de degradación y la capacidad para soportar la vascularización necesaria para el desarrollo óseo (11).

Por otro lado, los factores de crecimiento desempeñan un papel crucial en la señalización celular y en la estimulación de los procesos regenerativos. Entre los más estudiados se encuentran el factor de crecimiento transformante beta (TGF- β), el factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF) y las proteínas morfogenéticas óseas (BMPs). Estos factores pueden ser liberados localmente a través de sistemas controlados, como nanopartículas o hidrogeles, lo que permite una liberación sostenida y dirigida en el sitio del defecto óseo. En particular, las BMPs han demostrado ser altamente efectivas para inducir la diferenciación osteogénica de células madre mesenquimales, favoreciendo la formación de hueso nuevo en defectos críticos (11,12).

Un aspecto clave en la aplicación de estas terapias avanzadas es el uso de células madre mesenquimales (CMM), que pueden ser aisladas de diversas fuentes como médula ósea, tejido adiposo o pulpa dental. Estas células poseen una notable capacidad de diferenciación hacia linajes osteogénicos y juegan un papel esencial en la regeneración ósea. La combinación de CMM con andamios bioactivos impregnados con factores de crecimiento ha mostrado resultados alentadores en modelos preclínicos y clínicos (12).

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones y los retos asociados con estas estrategias. Entre ellos se encuentran los costos elevados, los posibles efectos adversos relacionados con el uso inadecuado de factores de crecimiento y las dificultades técnicas en la manipulación celular y biomateriales. Además, en pacientes pediátricos, es crucial evaluar

cuidadosamente el impacto de estas terapias en el crecimiento craneofacial a largo plazo (12).

Complicaciones y desafíos específicos en la regeneración ósea guiada en niños

La ROG en la población pediátrica presenta una serie de complicaciones y desafíos únicos debido a las características biológicas y anatómicas propias de esta etapa del desarrollo. A continuación, se analizan los principales factores que influyen en el éxito de este procedimiento en niños (13).

En primer lugar, el crecimiento óseo continuo representa un desafío significativo. A diferencia de los adultos, los huesos en los niños están en constante remodelación y crecimiento, lo que puede alterar la estabilidad de los injertos o membranas utilizadas en la ROG. Además, la presencia de cartilago de crecimiento en las zonas maxilofaciales implica que cualquier intervención quirúrgica debe ser cuidadosamente planificada para evitar interferencias con el desarrollo normal de las estructuras óseas (13).

Otro aspecto crítico es la limitada cooperación del paciente pediátrico. Los niños pueden tener dificultades para seguir las indicaciones postoperatorias, como mantener una buena higiene oral o evitar traumatismos en la zona tratada. Esto puede aumentar el riesgo de complicaciones como infecciones o exposición prematura de las membranas utilizadas en el procedimiento (13).

La biología ósea infantil también puede influir en la elección de los materiales para la ROG. Aunque los niños tienen una capacidad osteogénica elevada, los biomateriales deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar su compatibilidad con el tejido en desarrollo. Por ejemplo, algunos materiales aloplásticos o xenoinjertos pueden no integrarse adecuadamente o incluso generar respuestas inflamatorias adversas. En este contexto, los injertos autólogos suelen ser la opción preferida, aunque su obtención puede ser más invasiva (14).

Las infecciones representan otra complicación frecuente en esta población. La cavidad oral es un ambiente altamente contaminado, y la exposición accidental de las membranas puede facilitar la colonización bacteriana y comprometer el éxito del procedimiento. Por lo tanto, es esencial implementar protocolos estrictos de control de infecciones y considerar el uso de membranas con propiedades antimicrobianas (14).

Finalmente, los factores psicológicos y emocionales también desempeñan un papel importante. Los procedimientos quirúrgicos pueden generar ansiedad significativa en los niños y sus familias, lo que podría dificultar tanto la preparación preoperatoria como el manejo postoperatorio. Un enfoque multidisciplinario que incluya odontopediatras, cirujanos maxilofaciales y psicólogos puede ser crucial para abordar estas inquietudes (14).

Perspectivas futuras y avances tecnológicos en el manejo de defectos maxilofaciales pediátricos

El manejo de defectos maxilofaciales en población pediátrica continúa siendo un desafío clínico significativo, dada la complejidad anatómica y las consideraciones relacionadas con el crecimiento y desarrollo de los pacientes. Sin embargo, los avances tecnológicos y las investigaciones emergentes en el campo de la regeneración ósea guiada (ROG) están transformando las perspectivas para el tratamiento de estos casos, ofreciendo soluciones más efectivas y menos invasivas (15).

Uno de los desarrollos más prometedores es la aplicación de biomateriales avanzados. Los andamios bioactivos, diseñados para imitar las propiedades del hueso natural, han demostrado un gran potencial en la promoción de la osteogénesis. Materiales como los compuestos cerámicos a base de hidroxapatita y fosfato tricálcico, combinados con polímeros biodegradables, están siendo optimizados para mejorar su biocompatibilidad y capacidad de integración. Además, la incorporación de factores de crecimiento, como el factor de crecimiento transformante beta (TGF- β) y el factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF), en estos andamios está potenciando significativamente los procesos de regeneración ósea (15).

La ingeniería de tejidos también está emergiendo como una estrategia revolucionaria. El uso de células madre mesenquimales (CMM) ha mostrado resultados alentadores en estudios preclínicos y clínicos iniciales. Estas células, derivadas de médula ósea, tejido adiposo o cordón umbilical, poseen una notable capacidad para diferenciarse en tejido óseo y contribuir a la regeneración en defectos complejos. Los avances en biología celular y molecular están permitiendo una mejor comprensión de los mecanismos que regulan esta diferenciación, lo que podría facilitar su aplicación clínica en el futuro cercano (15,16).

Por otro lado, las tecnologías de impresión 3D están redefiniendo las posibilidades en el diseño y fabricación de implantes personalizados. Con esta técnica, es posible crear estructuras anatómicamente precisas que se ajusten perfectamente a los defectos específicos de cada paciente. Además, la impresión 4D, que incorpora materiales capaces de

cambiar sus propiedades con el tiempo o en respuesta a estímulos externos, podría revolucionar aún más este campo al permitir la adaptación dinámica de los implantes a medida que el niño crece (16).

Finalmente, los avances en bioinformática y modelado computacional están facilitando la planificación quirúrgica y la predicción de resultados terapéuticos. Estas herramientas permiten a los equipos médicos simular diferentes escenarios y optimizar los enfoques terapéuticos antes de su implementación (16).

CONCLUSIÓN

En conclusión, la ROG representa un enfoque prometedor y en constante evolución para el manejo de defectos maxilofaciales en la población pediátrica. Los avances en biomateriales, membranas reabsorbibles y técnicas quirúrgicas han permitido optimizar los resultados clínicos, promoviendo una adecuada regeneración ósea mientras se minimizan las complicaciones asociadas. Sin embargo, la complejidad inherente a las características anatómicas y biológicas de los pacientes pediátricos exige un enfoque individualizado que considere factores como el crecimiento óseo activo, la biocompatibilidad de los materiales utilizados y el impacto a largo plazo en el desarrollo craneofacial. Aunque los estudios actuales han proporcionado evidencia alentadora, persisten desafíos relacionados con la estandarización de protocolos y la necesidad de investigaciones de alta calidad que evalúen tanto la seguridad como la eficacia de estas intervenciones en el contexto pediátrico. Es fundamental fomentar la colaboración interdisciplinaria entre cirujanos, odontólogos, investigadores y fabricantes de biomateriales para continuar impulsando innovaciones que beneficien a esta población vulnerable. En última instancia, el objetivo debe ser garantizar soluciones terapéuticas que no solo restauren la funcionalidad y la estética, sino que también contribuyan al bienestar integral del paciente pediátrico a lo largo de su desarrollo.

REFERENCIAS

1. Brierley DJ, Chee CK, Speight PM. A review of paediatric oral and maxillofacial pathology. *Int J Paediatr Dent*. 2013 Sep;23(5):319-29. doi: 10.1111/ipd.12029.
2. Shand JM. Paediatric oral & maxillofacial surgery. *Aust Dent J*. 2018 Mar;63 Suppl 1:S69-S78. doi: 10.1111/adj.12592.
3. Sabouri Z, Dequeecker M, Anees H, Adib FR, Jamous R, et al. Recent advances in biomaterials for bone regeneration: Bridging innovation and clinical translation. *Mater Today Bio*. 2025 Dec 17;36:102685. doi: 10.1016/j.mtbio.2025.102685.
4. Sheikh Z, Najeeb S, Khurshid Z, Verma V, Rashid H, et al. Biodegradable Materials for Bone Repair and Tissue Engineering Applications. *Materials*. 2015 Aug 31;8(9):5744-5794. doi: 10.3390/ma8095273.
5. De Santis D, Sinigaglia S, Pancera P, Faccioni P, Luciano U, Setti AP, Bursi P, Nocini R, Nocini PF, Bertossi D. An overview of guided bone regeneration. *J Biol Regul Homeost Agents*. 2019 Jan-Feb;33(1 Suppl. 1):49-53.
6. Miguel A, Galletti C, de Quixano J, Real F, Fiorillo L, et al. Options for Regenerative Treatment with Bone Grafts in Children with Anterior Lip/Palate Cleft-A Review. *Children (Basel)*. 2025 Apr 26;12(5):559. doi: 10.3390/children12050559.
7. Del Toro Runzer C, Balmayor ER, van Griensven M. Biologics for bone regeneration: advances in cell, protein, gene, and mRNA therapies. *Bone Res*. 2026 Jan 12;14(1):5. doi: 10.1038/s41413-025-00487-0.
8. Gómez E, Rosset P, Lozano D, Stanovici J, Ermthaller C, et al. Bone fracture healing: cell therapy in delayed unions and nonunions. *Bone*. 2015 Jan;70:93-101. doi: 10.1016/j.bone.2014.07.033.
9. Tevlin R, McArdle A, Atashroo D, Walmsley GG, Senarath K, et al. Biomaterials for craniofacial bone engineering. *J Dent Res*. 2014 Dec;93(12):1187-95. doi: 10.1177/0022034514547271.
10. He L. Biomaterials for Regenerative Cranioplasty: Current State of Clinical Application and Future Challenges. *J Funct Biomater*. 2024 Mar 28;15(4):84. doi: 10.3390/jfb15040084.
11. Olson JL, Atala A, Yoo JJ. Tissue engineering: current strategies and future directions. *Chonnam Med J*. 2011 Apr;47(1):1-13. doi: 10.4068/cmj.2011.47.1.1.
12. Mao AS, Mooney DJ. Regenerative medicine: Current therapies and future directions. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2015 Nov 24;112(47):14452-9. doi: 10.1073/pnas.1508520112.
13. Murthy PS, Shivamallu AB, Deshmukh S, Nandlal B, Thotappa SK. Guided bone regeneration: A novel approach in the treatment of pediatric dentoalveolar trauma. *Dent Res J (Isfahan)*. 2015 May-Jun;12(3):285-8.
14. Guerado E, Caso E. Challenges of bone tissue engineering in orthopaedic patients. *World J Orthop*. 2017 Feb 18;8(2):87-98. doi: 10.5312/wjo.v8.i2.87.
15. Dixit S, Shayeb MA, Kathayat G, Rokaya D. Clinical translation of 3D bioprinting in oral and maxillofacial reconstruction: Recent progress and future directions. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2026 Mar-Apr;16(2):101401. doi: 10.1016/j.jobocr.2026.01.005.

16. Borrelli MR, Hu MS, Longaker MT, Lorenz HP. Tissue Engineering and Regenerative Medicine in Craniofacial Reconstruction and Facial Aesthetics. *J Craniofac Surg*. 2020 Jan/Feb;31(1):15-27. doi: 10.1097/SCS.0000000000005840.