



Facultad de Odontología
Programa de Especialización en Ortodoncia y Ortopedia Dentomaxilofacial

**EFFECTIVIDAD DEL MOVIMIENTO DENTARIO
POSTERIOR A LA REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA,
REVISIÓN DE LA LITERATURA**

Para optar al Título de Especialista en
Ortodoncia y Ortopedia Dentomaxilofacial

Autoras

Dra. Melissa Ponce Pérez
Dra. M. Fernanda Vera Calcina

Docente Guía

Dra. M. Antonieta San Juan Zamora

Viña del Mar, Chile

2023

AGRADECIMIENTOS

A nuestro querido amigo Daniel Arraya, por su ayuda incondicional.

A Dra. San Juan por su tiempo involucrado y dedicación en la guía de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN	1
2. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MARCO TEÓRICO	4
4.1 CAPÍTULO I: REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA	5
4.1.1 Definición	6
4.1.2 Mecanismos biológicos de la regeneración ósea guiada ...	7
4.1.3 Proceso de remodelación ósea	9
4.1.4 Fisiología del remodelado óseo	13
4.1.5 Factores del remodelado óseo	15
4.1.6 Materiales utilizados en regeneración ósea guiada	17
4.2 CAPITULO II: MOVIMIENTO DENTARIO EN ORTODONCIA	28
4.2.1 Definición	29
4.2.2 Electricidad biológica	31
4.2.3 Efectos de la magnitud de la fuerza	32
4.2.4 Efectos de la distribución de las fuerzas y tipos de movimiento dentario	34
4.2.5 Efecto de la duración de las fuerzas y la disminución de estas	34
4.2.6 Transducción de señales mecánicas	35
4.3 CAPITULO III: EFECTIVIDAD DEL MOVIMIENTO DENTARIO EN ORTODONCIA POSTERIOR A REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA ..	37
4.3.1 Tabla	39
5. DISCUSIÓN	44
6. CONCLUSIÓN	48
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. RESUMEN

La terapia regenerativa ha evolucionado como componente esencial en odontología, siendo fundamental para la recuperación integral de estructuras periodontales afectadas. Se emplean diversas técnicas y materiales avanzados, como injertos óseos, derivados de matriz de esmalte, barreras de membrana y sistemas de crecimiento. Esta aproximación busca restaurar forma y función, contribuyendo a la salud bucal y calidad de vida del paciente (1).

Los primeros informes sobre regeneración ósea guiada (ROG) datan de la década de 1950, validando su eficacia y marcando su desarrollo continuo. La ROG utiliza membranas de barrera para guiar la regeneración ósea, y excluir células no deseadas. La mineralización del osteoide lleva a la formación de tejido óseo, completándose en 3 a 4 meses (1).

Los materiales de injerto óseo incluyen hueso autógeno, aloinjertos, xenoinjertos y aloplastos, cada uno con mecanismos específicos. El autógeno aprovecha células del propio paciente, mientras que los aloinjertos y xenoinjertos son principalmente osteoconductivos (2).

En ortodoncia, el movimiento dental se logra aplicando fuerza mecánica, desencadenando respuestas inflamatorias y remodelación ósea continua. La revisión se centra en la efectividad del movimiento dentario posterior a ROG en ortodoncia, identificando estudios relevantes en bases de datos clave como PubMed, EBSCO y Cochrane.

2. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

El día 12 de octubre de 2023, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda de estudios producidos entre 2013 y 2023 en tres bases de datos: PubMed (1190 artículos), Cochrane Library (27 artículos) y EBSCO (100 artículos), con la finalidad de responder la pregunta de investigación ¿Es efectivo el movimiento ortodóncico posterior a regeneración ósea guiada?. Se complementó esta búsqueda utilizando métodos manuales al revisar las listas de referencias de los artículos relacionados. Se utilizaron los términos MESH: regeneración ósea guiada, movimiento dentario, movimiento ortodóncico y ortodoncia. De los artículos obtenidos, se seleccionaron 7 estudios para ser incluidos en la revisión (Tabla 1).

Nuestros criterios de inclusión fueron aquellos estudios en que analizaban el movimiento ortodóncico medido en milímetros posterior a la regeneración ósea guiada con diferentes materiales, en pacientes adultos o en modelos animales. Nuestros criterios de exclusión fueron aquellos estudios que no estaban relacionados con el tema de interés y que no medían los parámetros antes mencionados.

Nuestro objetivo es describir la efectividad del movimiento dentario en ortodoncia posterior a procedimientos de regeneración ósea guiada.

Tabla 1. Estrategia de búsqueda

Base de datos	Estrategia de búsqueda
PubMed	Bone regeneration AND Tooth Movement /Bone regeneration AND Orthodontic / Bone regeneration AND Orthodontic Movement
Cochrane Library	
EBSCO	

3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad nos enfrentamos a diversos defectos óseos que limitan la efectividad del movimiento dentario en los tratamientos de ortodoncia. Estas limitaciones se presentan tanto en niños con labio y paladar hendido, como también en pacientes adultos con defectos óseos, debido a pérdidas de piezas dentarias de larga data, con la consiguiente reabsorción del hueso alveolar.

En este contexto, la regeneración ósea guiada destaca como una herramienta valiosa en la ortodoncia del siglo XXI. Su aplicación no solo promete resultados positivos en términos de regeneración de tejidos, sino que también contribuye a mejorar la calidad de los resultados en tratamientos ortodóncicos. Esto es especialmente evidente en situaciones donde la regeneración ósea es esencial para el éxito del tratamiento.

La regeneración ósea guiada, posiblemente combinada con el uso de factores de crecimiento, injertos óseos (autoinjertos, aloinjertos, xenoinjertos y aloplastos) o con técnicas de corticotomía y el uso de piezoeléctrico, se presenta como una estrategia fundamental durante los tratamientos de ortodoncia. Esto permite obtener resultados más estables y estéticamente satisfactorios, sobre todo al abordar las deficiencias en el hueso alveolar, mejorando la calidad del soporte óseo, reduciendo las complicaciones asociadas, como las recesiones gingivales, y creando un entorno más favorable para el éxito del tratamiento.

Sin embargo, y a pesar de la diversidad de biomateriales disponibles, la evidencia actual sugiere que el autoinjerto se considera el "Gold Standard" debido a su biocompatibilidad con el huésped. Cabe destacar que la eficiencia del movimiento dentario ortodóncico (MDO) después de procedimientos de regeneración ósea guiada no ha sido concluyente debido a la escasez de evidencia. Por lo anterior es que el objetivo de esta revisión es describir la efectividad del movimiento dentario en ortodoncia posterior a procedimientos de regeneración ósea guiada.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CAPÍTULO I
REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA

4.1.1 DEFINICIÓN

La terapia regenerativa ha evolucionado para convertirse en un componente esencial en el campo de la odontología, ofreciendo una opción de tratamiento fundamental. Su propósito primordial radica en la recuperación integral de las estructuras periodontales afectadas, con el objetivo de restaurar tanto la forma como la función que pueden verse comprometidas. Este enfoque terapéutico abarca una diversidad de técnicas avanzadas y materiales innovadores, que incluyen diversos tipos de injertos óseos, derivados de la matriz del esmalte, barreras de membrana especializadas y sistemas de crecimiento. El uso de la regeneración ósea permite a los profesionales de la odontología abordar de manera integral y personalizada las pérdidas estructurales, ofreciendo soluciones efectivas y contribuyendo significativamente a la mejora de la salud bucal y la calidad de vida de los pacientes (1).

Los primeros informes científicos sobre la regeneración ósea guiada datan de finales de la década de los años 50, momento en el cual se evidenció el crecimiento de nuevo tejido óseo en áreas como el fémur, la cresta ilíaca y la columna vertebral mediante el uso estratégico de barreras destinadas a prevenir la invasión de tejidos blandos. Estos hallazgos marcaron un hito significativo al validar la eficacia de la técnica, sentando las bases para el desarrollo continuo de la regeneración ósea guiada como una herramienta fundamental en el ámbito científico y clínico.

Por definición, la regeneración ósea guiada, se establece como aquella que utiliza membranas de barrera bioabsorbibles o no reabsorbibles, que actúan como una barrera para prevenir la invasión de tejidos blandos en el defecto y forma una "cámara" para "guiar" el proceso de regeneración ósea. Se excluyen ciertos tipos de células, como el epitelio y el tejido conectivo que proliferan rápidamente, promoviendo así el crecimiento de células de crecimiento más lento capaces de formar hueso (3, 4). Se fundamenta en la migración de células pluripotenciales y osteogénicas, como los osteoblastos derivados del periostio, hueso circundante y médula ósea, hacia la zona del defecto óseo. Simultáneamente, resulta crucial excluir células que podrían obstaculizar la formación ósea, tales como las células epiteliales y fibroblastos. Para que la regeneración guiada del hueso (ROG) alcance el éxito, la tasa de formación ósea u osteogénesis, originada

en los márgenes óseos adyacentes, debe superar la tasa de formación de tejido conectivo o fibrogénesis, proveniente de los tejidos blandos circundantes. La mineralización del osteoide da lugar a la formación de tejido óseo, que actúa como una plantilla para la deposición de hueso laminar. Con el tiempo, esta transformación del tejido esponjoso inicial evoluciona hacia hueso compacto y reticular, acompañada de la maduración de la médula ósea. Estos procesos culminan aproximadamente entre 3 y 4 meses después de la cirugía o intervención, completando de manera exitosa el proceso de regeneración ósea (2).

Por otra parte, es importante destacar que el abordaje de grandes defectos óseos presenta un desafío significativo, ya que la magnitud de la regeneración requerida puede superar el potencial natural de autocuración del organismo. En el ámbito de la odontología y sus diversas especialidades, la ROG se presenta como una estrategia crucial para el tratamiento de defectos óseos originados por diversas condiciones. Esto abarca desde la destrucción ósea traumática hasta la extirpación de tumores, anomalías esqueléticas, infecciones óseas como la osteomielitis, defectos congénitos como las fisuras labio palatinas, y la reabsorción ósea alveolar vinculada a enfermedades periodontales como periodontitis y periimplantitis, así como la pérdida de dientes. En este contexto, la ROG emerge como una herramienta versátil y eficaz, proporcionando soluciones adaptadas a una amplia gama de condiciones clínicas (4, 5).

4.1.2 MECANISMOS BIOLÓGICOS DE LA REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA

Como se indicó previamente, la ROG se logra al permitir que las células osteoprogenitoras repueblen de manera exclusiva el sitio del defecto óseo, evitando la entrada de tejidos no osteogénicos (3). Este proceso implica el uso de membranas con funciones de barrera diseñadas para prevenir la infiltración de componentes celulares no deseados, como células epiteliales y conjuntivas, en la zona de reparación.

La regeneración que tiene lugar dentro de la membrana de barrera comprende la angiogénesis y la migración de células osteogénicas desde la periferia hacia el centro,

dando como resultado la formación de un tejido de granulación bien vascularizado. Después de la organización inicial del coágulo sanguíneo, se produce el crecimiento vascular y el depósito de hueso entretejido, seguido por la formación subsiguiente de hueso laminar y, finalmente, la remodelación, replicando el proceso natural de crecimiento óseo.

El tejido óseo se regenera en etapas durante un período de aproximadamente 16 semanas. Las etapas enumeradas secuencialmente son las fases inflamatoria, proliferativa y de remodelación. Inicialmente, la curación depende de la formación de un hematoma y posteriormente de la angiogénesis y la invasión vascular del periostio y endostio circundante. Dentro de las 48 horas posteriores a la cirugía, se forma un hematoma con tejido blando organizado y depósito de colágeno. La disminución de la presión parcial de oxígeno en el tejido induce la liberación de factores de crecimiento y estimula la angiogénesis y la osteogénesis. Se forma una malla de fibrina que actúa como andamio para los fibroblastos y las yemas capilares. La adición de injerto óseo proporciona a los osteoblastos y fibroblastos marginales una macroestructura para depositar tejido nuevo (6).

Cuando se obstaculiza o retrasa el crecimiento interno de la médula ósea en el defecto óseo, también se retarda la regeneración del hueso mineralizado. No obstante, en el caso de defectos óseos extensos, la formación ósea se limita a la zona marginal estable, con una región central de tejido conectivo laxo y desorganizado. En tales casos, se hace necesario el uso adicional de materiales de injerto óseo, actuando el injerto como un andamio para la osteoconducción y como fuente de sustancias osteogénicas y osteoinductivas para la formación de hueso laminar (4).

En particular, la regeneración ósea se caracteriza por una respuesta en cascada acoplada a múltiples células, durante la cual las células inflamatorias, vasculares, progenitoras óseas, los osteoblastos y los osteoclastos desempeñan un papel principal (7). Siendo muy importante los mecanismos de: osteogénesis, osteoinducción y osteoconducción:

- a) La osteogénesis implica la formación y desarrollo del hueso, incluso en ausencia de células madre mesenquimales locales indiferenciadas. Este proceso es inherentemente capaz de generar tejido óseo de manera autónoma.
- b) Por otro lado, la osteoinducción se refiere a la transformación de células madre mesenquimales indiferenciadas en osteoblastos o condroblastos mediante factores de crecimiento presentes exclusivamente en el hueso vivo. Este mecanismo impulsa la diferenciación celular hacia la formación de hueso.
- c) La osteoconducción, por último, es un proceso que provee una estructura bioinerte o matriz física, propicia para el depósito de hueso nuevo desde el tejido óseo circundante o que estimula el crecimiento de células mesenquimales diferenciadas a lo largo de la superficie del injerto. En esencia, sirve como guía física para el desarrollo y disposición ordenada del nuevo tejido óseo. Estos tres mecanismos, trabajando de manera sinérgica o individual, son esenciales para lograr la regeneración exitosa de tejido óseo en diversos contextos clínicos (2).

4.1.3 PROCESO DE REMODELACIÓN ÓSEA

El hueso es un tejido dinámico en constante formación y reabsorción. Este fenómeno equilibrado, denominado proceso de remodelado, permite la renovación de un 5-15% del hueso total al año en condiciones normales. El remodelado óseo se basa en la reabsorción de una cantidad determinada de hueso llevada a cabo por los osteoclastos, así como la formación de la matriz osteoide por los osteoblastos y su posterior mineralización. Este fenómeno tiene lugar en pequeñas áreas de la cortical o de la superficie trabecular, llamadas “unidades básicas de remodelado óseo” (7). Por tanto, podemos afirmar que el remodelado representa una modificación que ocurre dentro del tejido mineralizado, sin una alteración concomitante de la arquitectura del tejido (8).

Desde un punto de vista histológico, el hueso es un tejido conjuntivo mineralizado muy vascularizado e innervado, que está estructurado en laminillas de matriz osteoide calcificada. La disposición de estas laminillas es la que determina que el hueso sea cortical o esponjoso. Ambos están constituidos por osteonas. El hueso cortical o

compacto se estructura en conductos de Havers recubiertos de laminillas en disposición concéntrica donde se sitúan los osteocitos. El hueso esponjoso o trabecular lo constituyen laminillas óseas en forma de red que delimitan cavidades areolares en cuyo interior se encuentra médula ósea (7).

En el hueso coexisten varios tipos de células. Las células óseas se hallan dentro del propio tejido óseo o en el estroma conjuntivo de la médula ósea, rico en células mesenquimales pluripotenciales indiferenciadas. Desde los trabajos de Friedenstein en 1976 se conoce que estas células madre pueden dar origen a cinco estirpes celulares distintas: fibroblastos, osteoblastos, condroblastos, adipocitos y mioblastos, en respuesta a diferentes señales moleculares que inician la cascada de activación de diferentes genes (7).

Estudios recientes han demostrado que «factores de crecimiento», en especial las proteínas morfogenéticas óseas (BMP), son mediadores naturales que inducen la formación de hueso y cartílago por estimulación de las células progenitoras mesenquimáticas. Sin embargo, solo un subgrupo de BMP, en especial las BMP 2, 4, 6, 7 y 9, tienen actividad osteoinductora, que es la propiedad de inducir por sí mismas la neoformación de hueso (8).

Además del tejido óseo, la matriz extracelular (MEC) también reacciona a cargas mecánicas externas y sufre remodelación. Varias enzimas, como las serinas proteasas, aspartato proteasas, cisteína proteasas y metaloproteinasas de matriz, están involucradas en la degradación del colágeno y otras macromoléculas en la MEC como parte de la remodelación del ligamento periodontal (LP) inducida por fuerza (9).

Dentro de las características generales de cada una de las células participantes en el proceso de remodelado óseo se encuentran:

Osteoblasto:

Los osteoblastos surgen de progenitores comunes con condrocitos, músculos y adipocitos, y diversas hormonas y factores locales regulan su diferenciación (10) Son

células grandes (20-30 μm), que proceden de las células mesenquimales pluripotenciales de la médula ósea, endostio, periostio y pericitos perivasculares.

Los osteoblastos y osteocitos se comunican entre sí por proteínas transmembrana o integrinas, que actúan de enlace entre células o entre una célula y la matriz extracelular, permitiendo el paso de mensajeros como calcio, citoquinas o prostaglandinas. Ambos tipos celulares representan estadios más avanzados de maduración (7).

Actualmente, se reconoce que estas células:

- **Sintetizan proteínas colágenas y no colágenas de la matriz orgánica del hueso:** Las células osteoblásticas desempeñan un papel fundamental en la producción de componentes esenciales de la matriz ósea, incluyendo tanto proteínas colágenas como no colágenas. Estas proteínas son cruciales para la estructura y resistencia del tejido óseo.
- **Dirigen la disposición de las fibrillas de la matriz extracelular:** Las células osteoblásticas no solo producen las proteínas de la matriz, sino que también tienen un papel activo en la organización y disposición tridimensional de las fibrillas en la MEC del hueso.
- **Contribuyen a la mineralización de la sustancia osteoide:** Gracias a la acción de la fosfatasa alcalina, las células osteoblásticas desempeñan un papel crucial en el proceso de mineralización de la sustancia osteoide, convirtiéndola en hueso mineralizado.
- **Median en la reabsorción llevada a cabo por los osteoclastos:** Las células osteoblásticas participan en el proceso de reabsorción ósea mediante la síntesis de citoquinas específicas que regulan la actividad de los osteoclastos, células especializadas en la resorción del hueso.
- **Sintetizan factores de crecimiento:** Además de su función en la matriz y la mineralización, las células osteoblásticas también sintetizan factores de crecimiento que desempeñan un papel crucial en la regulación del crecimiento y la diferenciación celular en el entorno óseo.

Esta capacidad multifuncional de las células osteoblásticas subraya su importancia integral en la homeostasis y el mantenimiento del tejido óseo

Osteocito:

Los osteocitos constituyen el estadio final desde la línea osteoblástica y son incapaces de renovarse. Poseen los mismos marcadores que los osteoblastos, pero tienen como marcador específico el CD44, receptor de membrana que se expresa fuertemente en osteocitos y es negativo en osteoblastos y células limitantes. Poseen forma estrellada y su cuerpo se sitúa en el interior de lagunas u osteoplasmas y los procesos citoplasmáticos se comunican entre sí a través de los conductos calcóforos que están llenos de fluido óseo extracelular. De esta forma, los osteocitos se organizan formando un sincitio de células interconectadas que representa una única estructura, con la ventaja de que existe una gran superficie de contacto en el interior y hacia la superficie ósea, para asegurarse oxígeno y nutrientes. Cuando se produce un trauma en el hueso el cese de la circulación sanguínea origina hipoxia y necrosis de los osteocitos que estén a más de 0.1 mm de un capilar intacto. Los osteocitos también participan en la síntesis y mineralización de la matriz osteoide, pero se cree que su función principal es la de controlar el remodelado óseo, detectando las variaciones mecánicas de las cargas, fenómeno denominado mecano transducción (7).

Osteoclastos:

Son células encargadas de la reabsorción, se caracterizan por ser grandes (100 μm), multinucleadas, ricas en mitocondrias y vacuolas. Contienen fosfatasa ácida tartrato resistente, que permite la desfosforilación de las proteínas, cuya actividad es aprovechada para su identificación, tanto in vivo como in vitro. Poseen además receptores para calcitonina y sus propiedades únicas incluyen la adherencia al hueso matriz y secreción de enzimas ácidas y líticas que destruyen estructuras minerales y proteicas (11).

Respecto a la osteoclastogénesis actualmente se sabe que los osteoblastos son fundamentales para la formación de osteoclastos. Así, el factor estimulante de las

colonias de macrófagos, producido por los osteoblastos es requerido en las primeras fases de la osteoclastogénesis para la formación de células gigantes multinucleadas. Los conocimientos actuales acerca de la regulación de la osteoclastogénesis se basan en la existencia de 3 moléculas clave: osteoprotegerina (OPG), proteína sintetizada por osteoblastos y pre-osteoblastos, RANKL (ligando situado en la superficie de osteoblastos y pre-osteoblastos) y RANK (receptor del anterior situado en la membrana de osteoclastos y pre-osteoclastos). El RANKL es una citoquina transmembrana perteneciente a la familia del factor de necrosis tumoral. La interacción entre RANKL y su receptor RANK produce una activación de la diferenciación y de la actividad osteoclástica, aumentando la reabsorción. Asimismo, los efectos del RANKL tanto in vivo, como in vitro son inhibidos por la OPG, proteína circulante producida por los osteoblastos y pre-osteoblastos perteneciente a la superfamilia de los receptores del factor de necrosis tumoral. Cuando se unen OPG y RANKL se inhibe la unión de RANKL a RANK y se inhibe la diferenciación osteoclástica. Por ello OPG, RANK y RANKL son importantes reguladores de la osteoclastogénesis (7).

Además, la actividad osteoclástica también cumple con la importante labor de movilizar o retirar hueso del esqueleto, rol que resulta crucial en la mantención de niveles adecuados de calcemia, especialmente cuando deficiencias nutricionales y otros cuadros patológicos concomitantes no aseguran un aporte suficiente de calcio (8).

4.1.4 FISIOLÓGÍA DEL REMODELADO ÓSEO

A nivel microscópico el remodelado óseo se produce en pequeñas áreas de la cortical o de la superficie trabecular, llamadas unidades básicas multicelulares o BMU (basic multicellular units). La reabsorción siempre precede a la formación y en el esqueleto joven las cantidades de hueso absorbidas son similares a las neoformadas. Por esto se dice que es un proceso balanceado, acoplado en condiciones normales (8) tanto en el espacio como en el tiempo. La vida media de cada unidad de remodelado en humanos es de 2 a 8 meses y la mayor parte de este período está ocupado por la formación ósea, la cual

requiere no solo requiere reclutamiento y migración de células con potencial osteogénico, sino que también de diferenciación celular dada por células secretoras (12).

Existen en el esqueleto humano 35 millones de unidades básicas multicelulares y cada año se activan 3-4 millones, por lo que el esqueleto se renueva totalmente cada 10 años. Después de 4 días, el tejido blando se organiza con un contenido reducido de fibrina. El estado fibroblástico depende de la migración de células osteoprogenitoras y fibroblastos (13).

- a) Fase quiescente: Se dice del hueso en condiciones de reposo. Los factores que inician el proceso de remodelado aún no son conocidos.
- b) Fase de activación: El primer fenómeno que tiene lugar es la activación de la superficie ósea previa a la reabsorción, mediante la retracción de las células limitantes (osteoblastos maduros elongados existentes en la superficie endóstica) y la digestión de la membrana endóstica por la acción de las colagenasas. Al quedar expuesta la superficie mineralizada se produce la atracción de osteoclastos circulantes procedentes de los vasos próximos.
- c) Fase de reabsorción: Seguidamente, los osteoclastos comienzan a disolver la matriz mineral y a descomponer la matriz osteoide. Este proceso es acabado por los macrófagos y permite la liberación de los factores de crecimiento contenidos en la matriz, fundamentalmente TGF- β (factor transformante del crecimiento β), PDGF (factor de crecimiento derivado de las plaquetas), IGF-I y II (factor análogo a la insulina I y II).
- d) Fase de formación: Simultáneamente en las zonas reabsorbidas se produce el fenómeno de agrupamiento de preosteoblastos, atraídos por los factores de crecimiento que se liberaron de la matriz que actúan como quimiotácticos y además estimulan su proliferación. Los preosteoblastos sintetizan una sustancia cementante sobre la que se va a adherir el nuevo tejido y expresan BMP, responsables de la diferenciación. A los pocos días, los osteoblastos ya diferenciados van a sintetizar la sustancia osteoide que rellenará las zonas horadadas.

- e) Fase de mineralización: A los 30 días del depósito de osteoide comienza la mineralización, que finalizará a los 130 días en el hueso cortical y a 90 días en el trabecular. Y de nuevo empieza la fase quiescente o de descanso (13).

4.1.5 FACTORES DEL REMODELADO ÓSEO

El balance entre la reabsorción y la formación ósea está influido por una serie de factores, interrelacionados entre sí, como son factores genéticos, mecánicos, vasculares, nutricionales, hormonales y locales (13).

Factores genéticos

Los determinantes genéticos son factores muy significativos en el pico de masa ósea, ya que entre el 60% y el 80% de esta masa está influenciada genéticamente. Por ejemplo, los individuos de raza negra tienden a tener una masa ósea mayor que los de raza blanca, y estos últimos a su vez suelen tener una masa ósea mayor que los de raza amarilla. La masa ósea tiene una transmisión de padres a hijos, por lo que la predisposición a desarrollar osteoporosis es más alta en hijas cuyas madres padecen esta condición.

Factores mecánicos

La actividad física es imprescindible para el correcto desarrollo del hueso. Se cree que la acción muscular transmite al hueso una tensión que es detectada por la red de osteocitos incluida en el interior del fluido óseo. Estos osteocitos producen mediadores como prostaglandinas y óxido nítrico, que estimulan tanto su actividad como la de los osteoblastos y originan una mayor formación ósea. Y, por el contrario, la falta de actividad muscular, el reposo o la ingravidez tienen un efecto deletéreo sobre el hueso, acelerando la reabsorción (13).

Factores vasculonerviosos

La vascularización desempeña un papel fundamental en el desarrollo óseo normal, facilitando el suministro de células sanguíneas, oxígeno, minerales, iones, glucosa, hormonas y factores de crecimiento. Este proceso constituye el primer paso crucial para

la osificación, donde los vasos sanguíneos invaden el cartílago y, posteriormente, se produce la reabsorción ósea por parte de los osteoclastos originados en los vasos cercanos. De manera similar, la neoformación vascular marca el inicio del fenómeno de la reparación de fracturas o regeneración ósea. La presencia de oxígeno es esencial para la restitución e integración, evitando la formación de tejido fibroso (13).

La inervación también desempeña un papel esencial en la fisiología ósea normal. El hueso está inervado tanto por el sistema nervioso autónomo como por fibras nerviosas sensoriales. Se han identificado fibras autónomas en el periostio, endostio, hueso cortical y asociadas a los vasos sanguíneos de los conductos de Volkmann, junto con neuropéptidos y sus receptores en el tejido óseo. Ejemplos destacados de la importancia de la inervación en la fisiología ósea incluyen la osteopenia y la fragilidad ósea en pacientes con trastornos neurológicos, así como la disminución de la densidad mineral ósea en mandíbulas desnervadas (13).

Factores nutricionales

Es interesante este factor porque puede ser modificado. Se necesita un mínimo de calcio para permitir la mineralización que la mayoría de los autores cifran en unos 1.200 mg diarios hasta los 25 años; después y hasta los 45 no debe ser inferior a 1 gramo y tras la menopausia debe ser por lo menos 1.500 mg al día. Asimismo, se conoce qué hábitos tóxicos como tabaco, cafeína, alcohol y exceso de sal constituyen factores de riesgo para la aparición de osteopenia (13).

Factores hormonales

El desarrollo normal del esqueleto está condicionado por el correcto funcionamiento del sistema endocrino, fundamentalmente de la hormona somatotropa y las hormonas calcitrópicas (paratohormona, calcitonina y metabolitos de la vitamina D). Las hormonas son mensajeros sistémicos que actúan a distancia de su lugar de producción, pero también regulan la síntesis y acción de los factores locales, que intervienen directamente en el metabolismo celular (efectos autocrino y paracrino). Las hormonas más importantes

que intervienen en la fisiología ósea son: estrógenos, hormona de crecimiento, hormonas tiroideas, andrógenos, vitamina D y calcitonina, entre otras (13).

Factores locales:

El remodelado óseo también está regulado por factores locales, entre los que destacan los factores de crecimiento, las citoquinas y recientemente se han implicado las proteínas de la matriz ósea, como moduladoras de la acción de otros factores locales. Las células del hueso también juegan un papel importante por la producción de prostaglandinas y óxido nítrico, así como de citoquinas y factores de crecimiento (13).

Factores de crecimiento

Son polipéptidos producidos por las propias células óseas o en tejidos extra-óseos, que actúan como moduladores de las funciones celulares, fundamentalmente sobre el crecimiento, diferenciación y proliferación celular (13).

4.1.6 MATERIALES UTILIZADOS EN REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA

Autoinjertos, aloinjertos, xenoinjertos y aloplastos

Los materiales de injerto óseo primordiales incluyen el hueso autógeno, los aloinjertos, los xenoinjertos y los aloplastos. Cada uno de estos materiales posee uno o más de los tres mecanismos fundamentales de acción en la regeneración ósea. Estos mecanismos suelen estar determinados por el origen y la composición del injerto. Sin embargo, la elección del material de injerto óseo dependerá de las necesidades específicas del paciente y de los mecanismos de regeneración ósea deseados en el contexto clínico (2).

El hueso autógeno, extraído del propio paciente, promueve la formación de hueso nuevo mediante osteogénesis, osteoinducción y osteoconducción. Este tipo de injerto aprovecha las propias células y componentes biológicos del paciente para impulsar la regeneración ósea.

En cambio, los aloinjertos, obtenidos de donantes cadavéricos, exhiben propiedades principalmente osteoconductoras y posiblemente osteoinductivas, pero no son intrínsecamente osteogénicos. Estos injertos proveen una estructura física para la regeneración del hueso, facilitando el crecimiento ordenado de nuevo tejido óseo.

Los xenoinjertos y los aloplastos, por otro lado, tienden a ser principalmente osteoconductoras. Estos materiales ofrecen una matriz física adecuada que guía la regeneración ósea, pero no contienen elementos biológicos propios del paciente que puedan inducir la formación de hueso (2).

a) Autoinjertos

El hueso autógeno se ha destacado como una opción muy utilizada para la corrección de defectos óseos, ya que proviene directamente del paciente el cual puede provenir de hueso esponjoso o cortical. Este tipo de hueso fomenta la proliferación y diferenciación de células progenitoras. Este proceso impulsa la liberación de proteínas morfogenéticas óseas, creando un entorno propicio para la osteogénesis. Además, la ventaja de utilizar material autógeno reside en su capacidad para eludir respuestas inmunológicas, proporcionando así un marco ideal para la angiogénesis y la migración de células osteoprogenitoras (14). Este tipo de injertos se describen agentes osteoinductores, osteoconductoras y osteogénicos, constituyendo una opción integral para la regeneración ósea (2). Sin embargo, otros estudios mencionan que además de tener dichas propiedades, la morbilidad del sitio donante y la sustancial reabsorción del injerto hace que esta opción sea menos favorable en los casos clínicos (15).

Las partículas autógenas de hueso esponjoso y médula permiten buenos resultados de MDO en el área de la hendidura con resultados periodontales adecuados (9).

Los autoinjertos, se extraen de diversas fuentes, como por ejemplo la rama y sínfisis mandibular, costillas, tibia, piezas sólidas de hueso iliaco, cresta, partículas de cresta iliaca e injertos corticales de cresta iliaca (6,14). Dado que el material del injerto se obtiene de tejido vivo, un manejo adecuado durante la cirugía garantiza que las células

viables y sus factores de crecimiento asociados se trasplantan junto con el injerto. Las células osteoprogenitoras presentes en el periostio y el endostio, al estimularse, se diferencian en osteoblastos, facilitando la deposición de nuevos osteoides (6).

El hueso autógeno injertado puede ser trabecular, cortical o corticotrabecular. En general, el hueso esponjoso tiene mayor potencial osteogénico que el hueso cortical, debido a la presencia de médula hematopoyética y una mayor cantidad de células pluripotenciales en el hueso esponjoso (2).

El injerto cortical exhibe una menor cantidad de células osteogénicas sobrevivientes, sin embargo, ofrece una concentración significativa de BMP. Esta, desencadena la diferenciación de las células mesenquimales del huésped en osteoblastos. Además de su papel crucial en la formación ósea, contribuye a una mayor resistencia contra la reabsorción de la estructura del injerto, lo que evita el crecimiento interno de tejido blando. Aunque esta característica puede retardar la infiltración de vasos sanguíneos en el injerto, también proporciona una defensa efectiva contra la pérdida de integridad estructural a largo plazo (2).

El tamaño de injerto es otra característica por considerar, ya que aquellos con partículas grandes podrían obstaculizar la migración celular y potencialmente inhibir la formación de nuevos vasos y hueso. Tanto el tamaño como la viabilidad celular de los autoinjertos son susceptibles a la metodología de recolección. Existen diversas formas de obtener hueso autógeno, cada una de las cuales produce respuestas osteogénicas distintas (2).

Se ha observado que las partículas recolectadas mediante el piezoeléctrico presentan una menor tasa de unión de los osteoblastos y diferenciación en comparación con aquellas obtenidas mediante un molino de hueso o un raspador de hueso. Es decir, la elección de la técnica de recolección puede tener un impacto significativo en la eficacia y respuesta osteogénica del injerto (2).

Dentro de las complicaciones encontradas en este tipo de injerto se incluyen: formación de hematomas, lesión nerviosa, formación de hernia, pérdida de sangre, fractura por lesión ureteral, inestabilidad pélvica, defectos cosméticos y algunos casos de dolor

crónico en el sitio donante con relación a la cresta iliaca. La extracción de la sínfisis de la mandíbula a menudo se asocia con cambios sensoriales temporales o permanentes del labio y el mentón (6, 16).

b) Aloinjertos

Este tipo de material óseo proviene de la misma especie y se deriva de tejido cadavérico, sometido a procesamiento para su posterior uso (6). En el proceso de preparación, se utilizan diversas técnicas, como la liofilización o la exposición a la radiación. En comparación con el material de injerto óseo mineralizado, los injertos desmineralizados ofrecen la ventaja de ser tanto osteoinductivos como osteoconductivos. Los factores de crecimiento residuales, como la BMP presente en el hueso alogénico, tiene la capacidad de inducir la diferenciación de las células mesenquimales óseas vecinas, llevándolas a convertirse en osteoblastos.

El proceso de desmineralización elimina el fosfato cálcico, exponiendo así las BMP inherentes contenidas en la matriz ósea. Esta proteína desencadena la diferenciación de células progenitoras, estimulándolas a depositar nuevo hueso. La naturaleza porosa del material facilita el movimiento de osteoblastos y osteoclastos hacia el injerto, promoviendo la angiogénesis y favoreciendo la interacción celular con el material del injerto (6). Existen dos tipos principales de hueso alogénico disponibles: injerto óseo mineralizado e injerto óseo desmineralizado. Los dos materiales se diferencian en el procesamiento de cada tejido.

Una desventaja importante del aloinjerto es que tiene un riesgo, aunque mínimo, de transmisión de enfermedades. Si queda algún componente celular dentro del injerto, existe un riesgo adicional de que el huésped produzca una reacción inmunológica al material del injerto (6).

Dentro de los aloinjertos más conocidos está el aloinjerto óseo liofilizado (FDBA), aloinjerto óseo descalcificado y liofilizado (DFDBA), estos son osteoconductores, pero el segundo tiene el mayor potencial de osteoinducción (capacidad dependiente del contenido de BMP. Se compararon los efectos de FDBA y DFDBA en la preservación de

la cresta alveolar y hubo diferencias insignificantes en los cambios de la dimensión de la cresta alveolar, sin embargo el porcentaje de huesos vitales en el grupo de DFDBA fue significativamente mayor respecto a FDBA, por lo que se podría postular que DFDBA como un mejor material de injerto en la reconstrucción de defectos óseos alveolares en MDO (14) por su mayor formación de hueso viable y menores partículas de injerto residual (9).

La matriz ósea desmineralizada es otro tipo de injerto alógeno, el cual es fabricado a partir de la descalcificación ácida. Este último es superior a DFDBA en término de capacidad de inducción ósea, ya que, proporciona un andamio para la multiplicación celular y osteogénesis tras la eliminación desmineralización. Este tipo de injerto se usa en fisuras alveolares. Convencionalmente se usaba hueso autólogo de cresta iliaca (14) pero la alta incidencia de complicaciones postoperatorias como un riesgo significativo de alterar la marcha, lo que resulta en dificultad para caminar y dolor en el sitio donante han hecho aumentar el uso de matriz ósea desmineralizada (6).

Los injertos autógenos se diferencian a los alógenos según su respuesta biológica, el primero puede inducir proliferación angioblástica en el sitio receptor a partir de la primera semana postoperatoria en cambio el hueso alógeno presenta una revascularización retardada, retrasando la migración y proliferación de células endoteliales durante 1 a 2 semanas después, además la osteointegración de este tipo de hueso puede verse retrasada por procesos inflamatorios del huésped lo que produce fibrosis alrededor del injerto por los aloinjertos trasplantados atrapados y no absorbidos.

c) Xenoinjertos

Los xenoinjertos, son injertos óseos derivados de especies distintas a la humana. Las propiedades de estos dependen del origen, constitución y la técnica de procesamiento (14).

La evidencia en la literatura muestra que para lograr una regeneración ósea sólida con xenoinjertos se deben utilizar moléculas de señalización conjuntiva, como BMP, o plasma rico en plaquetas. Por otra parte, este tipo de injerto puede tener malas propiedades de

manipulación, lo que requiere la colocación de una membrana para garantizar la estabilidad (6).

Los xenoinjertos se procesan para eliminar todos sus constituyentes orgánicos. El material restante está compuesto únicamente de minerales (6). Estos pueden ser procesados a altas temperaturas 200°C- 600°C o ultra altas 900°C- 1200°C, lo que les otorga mayor cristalinidad y lenta reabsorción. Los procesados a bajas temperaturas tienen menor proporción de calcio a fosfato en comparación a los procesados a altas temperatura, lo cual hay que considerar al momento de elegir el material.

Un tipo de xenoinjerto, muy comercializado de origen bovino, en la actualidad es el Bio-Oss®. En este las proteínas del hueso cortical y esponjoso son eliminadas para crear una matriz mineral a baja temperatura. Contiene cristales de hidroxiapatita con alta porosidad, lo que confiere alta compatibilidad y mecánica, hueso bovino esponjoso, matriz ósea cortical bovina orgánica, BMP bovinas combinadas con hidroxiapatita en polvo de ultratina y aglutinante de colágeno óseo (6). Bajo el microscopio electrónico, Bio-Oss® es muy similar al hueso humano, por lo que se establece mucho éxito en el proceso de formación de hueso nuevo. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que este xenoinjerto, es impredecible en cuanto a la cantidad de formación ósea y no es totalmente reabsorbible (17). Otros autores mencionan que la lenta degradación de este material teóricamente dificultará el MDO, no obstante, falta evidencia para utilizar Bio-Oss® solo en el aumento de crestas en MDO (9,18).

d) Aloplastos o Injertos óseos sintéticos

Los aloplastos son un grupo de materiales sintéticos con bajo riesgo de transmisión de enfermedades. Los más utilizados son la hidroxiapatita (HA) y el β -fosfato tricálcico (β -TCP) (15).

Los materiales de injerto aloplásticos se han diseñado para mejorar las propiedades de manipulación y el uso especializado. Los injertos óseos aloplásticos se definen como materiales de injerto o sustitutos óseos fabricados sintéticamente o derivados de coral de alga hidroxiapatita (HA). El hueso se compone de materiales tanto orgánicos como

minerales inorgánicos. Dada la similitud entre los materiales de fosfato cálcico y los minerales óseos, así como su capacidad osteoinductiva, se han convertido en sustitutos óseos sintéticos comunes utilizados en la actualidad para la regeneración ósea guiada. Existen tres composiciones importantes de fosfato cálcico: hidroxiapatita, fosfato beta-tricálcico y fosfato cálcico bifásico (HA/c-TCP) (9). Este tipo de injerto tienen propiedades de ser radiopacos y no se reabsorben, lo que proporciona soporte al injerto contra las fuerzas contráctiles de la membrana durante la curación (6).

- **Hidroxiapatita:** La hidroxiapatita representa el material de fosfato de calcio más empleado en la estructura ósea debido a su notable semejanza con el mineral óseo. Su destacada biocompatibilidad y osteoconductividad la posicionan como una opción preferida en aplicaciones médicas. A pesar de su consideración como un material relativamente frágil, investigaciones han confirmado sus propiedades mecánicas adecuadas, lo que permite a las membranas elaboradas con este material resistir la presión estática del tejido blando. Esta resistencia contribuye a preservar un mayor espacio para el proceso de regeneración ósea.

La utilización del polvo de hidroxiapatita es fundamental en la confección de membranas cerámicas puras, así como en la elaboración de membranas compuestas (3).

Un ejemplo comercialmente disponible es el NanoBone®, una variante de hidroxiapatita sometida a tratamientos específicos para optimizar su biodegradabilidad y simular las características del hueso natural. En estudios como el realizado por Proff y cols. en 2006, se reportó un aumento exitoso en la regeneración ósea con el uso de NanoBone® previo a procedimientos de expansión ósea maxilofacial, sin observarse complicaciones significativas (9).

- **Cerámica de fosfato beta-tricálcico:** La cerámica de fosfato beta-tricálcico (β -TCP) se destaca por su rápida degradación y absorción debido a su baja relación de calcio/fosfato, lo que la convierte en un excelente material de injerto previo al MDO. Estudios respaldan su uso como sustituto óseo sin efectos adversos en la densidad ósea. La combinación de células estromales de médula ósea osteogénicas con β -TCP mejora la osteogénesis y la mineralización (9).

- **Fosfato de calcio bifásico** : En la actualidad, el fosfato de calcio bifásico (BCP), una combinación de hidroxiapatita (HA) y fosfato tricálcico beta (β -TCP), ha ganado relevancia debido a su capacidad para aprovechar las propiedades de ambos materiales. Esta combinación favorece una regeneración ósea acelerada, al mismo tiempo que facilita el desarrollo vascular y la unión de osteoblastos, gracias a la presencia de HA de reabsorción gradual (9).

Un ejemplo representativo de BCP es el BoneCeramic®, compuesto por un 60% de HA y un 40% de β -TCP. En un estudio comparativo con Bio-Oss, se observó que el BoneCeramic® mostraba un retraso en la tasa de movimiento dental ortodóntico. Esta ralentización podría asociarse a una mayor calidad del hueso injertado y a una menor reabsorción radicular tras la expansión ósea maxilofacial (9).

A pesar de que el BCP ofrece mejoras significativas en la generación ósea, aún no alcanza la comparabilidad con los injertos autólogos y xenoinjertos humanos (9).

Los estudios de Zhang y Tanimono han destacado que la combinación de células del estroma de la médula ósea y fosfato de calcio promueve la formación ósea y permite una tasa de MDO más consistente en comparación con el injerto exclusivo de fosfato de calcio. No obstante, se requieren investigaciones más amplias con muestras de mayor tamaño para establecer de manera más precisa el efecto del injerto que utilice células madre obtenidas mediante ingeniería tisular en combinación con fosfato de calcio en el contexto de la MDO (9).

- **Sulfato de calcio**: Es uno de los compuestos inorgánicos ampliamente utilizados en la fabricación de membranas para la ROG. El sulfato de calcio se destaca por ser biocompatible, osteoinductivo y bioabsorbible. Este compuesto se encuentra de manera natural y también puede ser producido mediante métodos sintéticos. Las membranas basadas en sulfato de calcio se elaboran mediante la hidratación del hemihidrato de sulfato de calcio, conocido como yeso París. Este proceso genera una pasta maleable que puede ser conformada y fijada a un material rígido, dando lugar a cristales relativamente estables y menos reabsorbibles (3).

- **Biovidrio:** El biovidrio, un material compuesto principalmente de sílice presenta una marcada afinidad física con el hueso huésped. Su estructura porosa facilita el desarrollo de la vasculatura y su tasa de reabsorción se muestra propicia para el proceso de osteogénesis. Cuando el líquido intersticial entra en contacto con el injerto óseo, los iones de silicio se activan, elevando el pH e induciendo la formación de una capa de fosfato cálcico. Algunos autores han que este material muestra una mejora en las actividades osteogénicas (3).

Membranas de barrera

Las membranas desempeñan un papel fundamental en diversas aplicaciones odontológicas. En el ámbito de la odontología regenerativa, se emplean para estimular el crecimiento de poblaciones celulares específicas, cubrir defectos, fijar injertos óseos o proteínas en la zona de implantación. Al igual que los injertos óseos mencionados anteriormente, estas membranas se clasifican según su origen o capacidad de reabsorción, siendo las no reabsorbentes aquellas que requieren una segunda intervención para su retirada (1).

En distintas especialidades odontológicas, estas membranas se utilizan para crear una barrera contra el crecimiento interno de células epiteliales y fomentar la proliferación y diferenciación de células del ligamento periodontal. Este enfoque proporciona una ventaja localizada y evita su desplazamiento causado por células epiteliales de crecimiento más rápido. En casos particulares, se ha observado que el uso de estas membranas logra prevenir el desarrollo de uniones epiteliales, destacando así su eficacia en situaciones específicas (1).

La utilización de membranas es una estrategia adicional para la regeneración ósea, especialmente en casos de grandes defectos óseos derivados de traumatismos, infecciones o extirpación de tumores. Este enfoque implica un procedimiento de dos etapas, donde se induce una membrana "biológica" al tratarla como un cuerpo extraño. Esta respuesta se desencadena tras la aplicación de un espaciador de cemento en la primera etapa, actuando esencialmente como una "cámara" para la inserción de

autoinjertos óseos en la segunda etapa. Este enfoque de dos etapas ofrece una estrategia integral para abordar defectos óseos significativos, permitiendo una regeneración estructurada y funcional del hueso afectado. La combinación de propiedades osteoinductivas, osteogénicas y angiogénicas de la membrana inducida respalda la formación de nuevo tejido óseo y la vascularización necesaria para lograr resultados exitosos en la regeneración ósea en situaciones clínicas complejas (4).

En cuanto a las características de las membranas de ROG, debe ser lo suficientemente rígida para soportar la presión del tejido blando suprayacente. También debe poseer un grado de plasticidad para poder contornear fácilmente y moldearse a la forma del defecto óseo. Por lo tanto, se requiere un balance entre estas propiedades para lograr un tratamiento exitoso (3).

La porosidad es una propiedad importante del material de regeneración. Los estudios han abordado el papel de esta propiedad en la respuesta biológica in vivo utilizando membranas reabsorbibles y no reabsorbibles. El tamaño de los poros influye en el grado de regeneración del tejido subyacente y se relaciona directamente con el tejido (3).

Se ha descrito también que el tamaño de los poros facilita la difusión de líquidos, oxígeno, nutrientes y sustancias bioactivas para el crecimiento celular, lo cual es vital para la regeneración de huesos y tejido blando. Sin embargo, la presencia de poros de gran tamaño puede afectar la capacidad oclusiva de las células de la membrana al permitir que las células de los tejidos blandos migren a través de la membrana, sobrepoblando el sitio del defecto e inhibiendo la infiltración y actividad de las células formadoras de hueso (3).

Técnicas combinadas

Los tratamientos de ortodoncia en combinación con técnicas quirúrgicas como osteotomías alveolares, han sido descritos detalladamente en cuanto a su eficacia para acelerar el tratamiento de ortodoncia, desde los más invasivos como la corticotomía hasta

los menos invasivos como la piezocisión. Esto se basa en el fenómeno de aceleración rápida debido a una lesión ósea. Tiene como característica una disminución ósea transitoria y un aumento de recambio óseo, lo cual provoca un movimiento dentario más rápido y un tiempo de tratamiento menor. Este tipo de técnicas puede implementarse con regeneración ósea mediante biomateriales. Se denomina a estas técnicas como ortodoncia osteogénica periodontalmente acelerada. Su objetivo es aumentar el volumen alveolar existente, ampliar la gama de opciones de tratamiento, el alcance del movimiento de los dientes y posiblemente reducir la necesidad de extracción en el contexto del tratamiento de ortodoncia. Fue descrita para prevenir dehiscencias y fenestraciones que pueden ocurrir en casos de expansión de arco y corregir las discrepancias óseas preexistentes antes del tratamiento de ortodoncia. Se ha demostrado también su eficiencia para reducir la recidiva ortodóncica. Sin embargo, el procedimiento implica colgajos de espesor total y por lo tanto un cierto nivel de morbilidad (19).

4.2 CAPÍTULO II

MOVIMIENTO DENTARIO EN ORTODONCIA

4.2.1 DEFINICIÓN

El movimiento dental en ortodoncia (MDO) se produce mediante la aplicación de una fuerza mecánica que desencadena una respuesta inflamatoria aséptica en los tejidos periodontales. Este proceso inflamatorio conduce a un subsiguiente, y coordinado, ciclo de resorción y aposición ósea (20).

A las pocas horas de la aplicación de la fuerza, la agresión mecánica desencadena una reacción inflamatoria aguda, que evoca a las células residentes del ligamento periodontal (LP) para que produzcan mediadores inflamatorios, proceso que dura hasta 3 días. Al mismo tiempo, la fuerza estimula las fibras nerviosas periféricas para la producción de neuropéptidos, provocando vasodilatación y extravasación de leucocitos de los capilares (20).

El hueso, al ser un tejido dinámico, experimenta una remodelación continua. Este proceso es esencial para permitir que los huesos respondan y se adapten a las tensiones generadas por la carga mecánica asociada con MDO (21). La remodelación ósea, estimulada por fuerzas mecánicas, involucra diversos procesos celulares, incluyendo la proliferación, la apoptosis, la migración y la diferenciación (22). Estos mecanismos celulares trabajan en conjunto para facilitar la adaptación del tejido óseo a las demandas cambiantes, asegurando una respuesta eficaz a las tensiones y contribuyendo al proceso dinámico de remodelación que sustenta la salud y la funcionalidad ósea (23).

El tratamiento ortodóncico se basa en que, al aplicar una presión prolongada sobre un diente, se producirá una movilización de este al remodelarse el hueso que lo rodea. El hueso desaparece selectivamente de unas zonas y va añadiendo a otras. El diente se desplaza a través del hueso, arrastrando consigo su aparato de anclaje, al producirse la migración del alvéolo dental (23).

La presión hidráulica de los líquidos del espacio periodontal, constituidos por la corriente sanguínea y material conectivo de relleno, son el primer amortiguador de la fuerza externa, este impacto se transmite uniformemente a todo el espacio periodontal y provoca un escape de líquido hacia el exterior a través del sistema circulatorio. Una vez superada

la amortiguación hidráulica, es la barrera fibrilar la que se opone al desplazamiento dentario y si la fuerza vence la resistencia de las fibras colágenas, entonces el hueso alveolar se adaptará al movimiento dentario por medio de un remodelamiento osteogénico y osteolítico.

Se ha observado que el LP comprimido y desorganizado induce la resorción ósea, mientras que las fibras estiradas, conducen a la deposición ósea, los estímulos mecánicos son cruciales para mantener el metabolismo óseo y regular la diferenciación osteogénica y la formación ósea (22).

Las dos teorías principales sobre el movimiento dental ortodóncico señalan dos posibles elementos de control: la *electricidad biológica* y la *presión-tensión* del LP que afecta al flujo sanguíneo. En la teoría bioeléctrica, se atribuye, al menos en parte, el movimiento dental a cambios en el metabolismo óseo controlados por señales eléctricas generadas por una leve presión contra los dientes. Por otro lado, la teoría de la presión-tensión sugiere que el movimiento dental experimenta cambios celulares inducidos por mensajeros químicos, presumiblemente generados por alteraciones en el flujo sanguíneo a través del LP. Es probable que la presión y la tensión dentro del LP puedan modificar el flujo sanguíneo, ya sea reduciendo (presión) o aumentando (tensión) el diámetro de los vasos sanguíneos. Ambas teorías no son incompatibles ni mutuamente excluyentes. Al contrario, parece que ambos mecanismos pueden intervenir de manera conjunta en el control biológico del movimiento dental, proporcionando una visión más completa de los procesos involucrados en la ortodoncia (23).

Es importante mencionar que un hueso alveolar suficiente es una garantía para lograr los resultados deseados en el tratamiento de ortodoncia. Mover un diente hacia un defecto óseo alveolar puede provocar un defecto periodontal o, peor aún, la pérdida de dientes. Por lo tanto, cuando se enfrenta una situación patológica como pérdida de hueso periodontal, hendiduras alveolares, pérdida de dientes a largo plazo, traumatismo y fenotipo delgado, a menudo es necesario un injerto óseo para aumentar el hueso con fines de tratamiento de ortodoncia (24).

4.2.2 ELECTRICIDAD BIOLÓGICA

Se pensaba que las señales eléctricas que podrían iniciar el movimiento dental en un primer momento eran de tipo piezoeléctrico. La piezoelectricidad es un fenómeno observado en muchas sustancias cristalinas por el que la deformación de la estructura cristalina produce un flujo de corriente eléctrica al desplazar los electrones de una parte de la red cristalina a otra (23).

Las señales piezoeléctricas tienen dos características poco habituales:

1. Una decadencia muy rápida (es decir, cuando se aplica la fuerza, se crea una señal piezoeléctrica como respuesta, que baja rápidamente a cero, aunque se mantenga la fuerza).
2. La producción de una señal equivalente, de dirección opuesta, cuando la fuerza deja de actuar.

Ambas características se explican por la migración de los electrones en el seno de la red cristalina al distorsionarse con la presión. Cuando se deforma la estructura cristalina, los electrones migran de un punto a otro y se observa un flujo de corriente eléctrica. Mientras la fuerza siga actuando, la estructura cristalina permanece estable y no se observan más fenómenos eléctricos. Sin embargo, cuando deja de actuar, el cristal recupera su forma original y se observa un flujo inverso de electrones. Con esta disposición, la actividad rítmica produciría una interrelación constante de flujos de corriente en una dirección y después en la otra (23).

Ahora bien, ¿qué sucede durante las primeras horas de actuación de una fuerza mantenida sobre un diente, entre el comienzo de la presión y la tensión sobre el LP y la aparición de segundos mensajeros al cabo de unas horas? Estudios experimentales han demostrado que los niveles de prostaglandinas y de interleucina-1 aumentan en el LP poco tiempo después de aplicar la presión. La liberación de las prostaglandinas es una respuesta a la deformación mecánica y esta liberación constituye más una respuesta primaria que una respuesta secundaria a la presión. A nivel molecular, la cinasa de adhesión focal parece ser el mecanorreceptor presente en las células del LP y su compresión es la razón de la liberación de la PgE2. Diversos experimentos han

demostrado que las concentraciones de RANKL y OPG en el líquido del surco gingival aumentan durante el movimiento ortodóncico de los dientes, lo que parece indicar que las células del LP sometidas a tensión pueden inducir la formación de osteoclastos mediante una regulación al alza del RANKL (23).

4.2.3 EFECTOS DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA

Para evitar fenestraciones y dehiscencias durante el movimiento dental ortodóncico, es fundamental que el hueso alveolar posea un contorno, grosor y calidad adecuados (24). La intensidad de la presión sostenida juega un papel crucial en la reducción del flujo sanguíneo a través de las zonas comprimidas del LP, llegando incluso al punto en que los vasos sanguíneos quedan totalmente colapsados, interrumpiendo el flujo de sangre. Cuando se aplica una fuerza leve pero constante sobre un diente, el flujo sanguíneo a través del LP parcialmente comprimido disminuye rápidamente a medida que los líquidos abandonan el espacio del LP y el diente se desplaza en su alvéolo, generalmente en cuestión de segundos. Después de algunas horas, como máximo, los cambios en el entorno químico inducen un patrón de actividad celular diferente. Como se mencionó previamente, se produce un aumento en los niveles de adenosín monofosfato cíclico (AMPC), en diversas funciones celulares críticas, como la diferenciación, aproximadamente después de unas 4 horas de mantener la presión. Este proceso refleja la complejidad de la respuesta celular y química en el ligamento periodontal ante las fuerzas ortodóncicas, contribuyendo a la comprensión de los mecanismos implicados en el movimiento dental (25).

Ahora bien, para que un diente se mueva, deben existir osteoclastos que puedan eliminar tejido óseo de la zona adyacente a la parte comprimida del LP. También se requiere la presencia de osteoblastos para formar nuevo tejido óseo en el lado sometido a tensión y para remodelar las zonas reabsorbidas en el lado de la presión.

Las prostaglandinas tienen la propiedad de estimular la actividad osteoclástica y osteoblástica, por lo que resultan especialmente adecuadas como mediadoras del

movimiento dental. Estas células atacan la lámina dura adyacente, eliminando hueso mediante el proceso de «reabsorción frontal», y el movimiento dental comienza poco después. Al mismo tiempo, pero con algún retraso, de tal forma que el espacio del LP aumenta de tamaño, los osteoblastos forman tejido óseo en el lado de la tensión e inician la actividad remodeladora en el lado de la presión (23).

El desarrollo de los acontecimientos es diferente si la fuerza mantenida que actúa sobre el diente es lo bastante intensa como para ocluir totalmente los vasos sanguíneos y cortar el suministro de sangre a una zona del LP. Cuando así sucede, en vez del estímulo de las células de la zona comprimida del LP para que se conviertan en osteoclastos, se produce una necrosis aséptica en la zona comprimida. En ortodoncia clínica es difícil evitar las presiones que al menos algunas zonas avasculares producen en el LP, y se ha sugerido la posibilidad de mantener la vitalidad tisular liberando a intervalos la presión soportada por un diente, manteniéndola durante las horas necesarias para inducir la respuesta biológica (23).

La microvasculatura produce el evento inflamatorio inicial en el sitio de compresión, lo que conduce a una necrosis focal con una apariencia histológica conocida como degeneración hialina. Por el contrario, las regiones tensas en muestras de ortodoncia se caracterizan frecuentemente por ser predominantemente osteogénicas sin componente inflamatorio aparente. La transducción de señales mecánicas ocurre cuando se transforman los impulsos mecánicos en señales bioquímicas a través de una serie de mecanorreceptores y canales de señalización (22).

Cuando se aplica una fuerza de gran intensidad sobre el diente, se origina una oclusión vascular y se corta el suministro de sangre al LP. En este caso, en lugar de estimular a las células de la zona comprimida del LP para que se diferencien en osteoclastos, se produce una necrosis aséptica, fenómeno que se denomina hialinización, debido a su aspecto histológico, en donde desaparece la organización fibrilar y cesa toda actividad celular. Cuando se produce este fenómeno, células procedentes de regiones adyacentes intactas deben encargarse de remodelar el hueso adyacente a la zona necrosada. Tras una demora de varios días, elementos celulares de zonas adyacentes intactas del LP

empiezan a invadir la parte necrosada, y lo que es más importante, aparecen osteoclastos en los espacios adyacentes de médula ósea que empiezan a atacar la base ósea inmediatamente adyacente a la zona necrosada del LP. Este proceso recibe el nombre de reabsorción basal, dado que el ataque se efectúa desde la parte inferior de la lámina dura. Cuando se producen la hialinización y la reabsorción basal, se retrasa inevitablemente el movimiento dental. Esto se debe en primer lugar a una demora en el estímulo para la diferenciación de las células en los espacios medulares, y en segundo lugar a que hay que eliminar un considerable espesor de hueso de la parte inferior antes de que el diente pueda moverse (23).

4.2.4 EFECTOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS Y TIPOS DE MOVIMIENTO DENTARIO

Los niveles de fuerza óptimos para la movilización ortodóncica de los dientes deben ser lo bastante elevados como para estimular la actividad celular sin llegar a ocluir por completo los vasos sanguíneos del LP. Para determinar el efecto biológico, son importantes la intensidad de la fuerza aplicada sobre un diente y la zona del LP por la que se distribuye dicha fuerza. La respuesta del LP no solo viene determinada por la propia fuerza, sino por la presión o fuerza por unidad de superficie. Dado que la distribución de las fuerzas en el LP difiere en función de los diferentes tipos de movimiento dental, habrá que especificar el tipo de movimiento dental, además de la cuantía de la fuerza a la hora de determinar los niveles de fuerzas óptimos para el tratamiento ortodóncico (23).

4.2.5 EFECTOS DE LA DURACIÓN DE LAS FUERZAS Y LA DISMINUCIÓN DE ESTAS

La clave para lograr el movimiento ortodóncico reside en la aplicación de una fuerza sostenida, lo que implica que la fuerza no necesariamente debe ser constante, pero sí debe estar presente durante una parte significativa del tiempo, generalmente durante

varias horas al día. La experiencia clínica sugiere que existe un umbral de aproximadamente 4-8 horas para la duración de la fuerza en los seres humanos. Se observa que, si las fuerzas se mantienen durante un período más prolongado, se logra una movilización dental cada vez más eficaz. Este enfoque respalda la idea de que la consistencia y la duración adecuada de la fuerza aplicada son factores determinantes en el éxito del tratamiento ortodóncico, permitiendo la adaptación gradual de los tejidos dentales y periodontales al estímulo ortodóncico (23).

Desde este punto de vista, la duración de las fuerzas ortodóncicas se clasifica según el índice de decadencia en:

- **Continua:** fuerza que se mantiene en un porcentaje apreciable de la original entre una visita del paciente y la siguiente.
- **Interrumpida:** El nivel de la fuerza disminuye a cero entre las activaciones. Tanto las fuerzas continuas como las interrumpidas pueden conseguirse con aparatos fijos que se llevan en todo momento.
- **Intermitente:** Los niveles de fuerza descienden bruscamente a cero de manera intermitente, cuando el paciente se quita un aparato ortodóncico o un elástico unido a un aparato fijo, y poco después vuelven a los niveles originales. Cuando los dientes se mueven, el nivel de las fuerzas disminuye igual que con un aparato fijo, es decir, la fuerza intermitente se puede convertir en interrumpida entre los ajustes del aparato.

4.2.6 TRANSDUCCIÓN DE SEÑALES MECÁNICAS

La transducción de señales mecánicas es la capacidad de las células para detectar señales mecánicas de su microambiente y convertirlas en señales bioquímicas que desencadenan respuestas celulares, como la transcripción adaptativa. En la superficie celular, las proteínas mecanorreceptoras detectan cambios en el entorno mecánico externo a través de cambios conformacionales inducidos por la fosforilación y los convierten en eventos bioquímicos dentro de la célula. Esto da como resultado cambios

en la expresión genética en el núcleo, en última instancia, activación o inhibición de una serie de señales posteriores que alteran la morfología celular (23).

Los mecanorreceptores se pueden clasificar en dos grupos: mecano sensores proximales, que consisten en integrinas, cilios primarios, canales iónicos, citoesqueleto y proteínas de la envoltura nuclear. Las integrinas son heterodímeros compuestos de subunidades α y β unidas de forma no covalente para detectar estímulos físicos o bioquímicos en la MEC mediante la unión a ligandos extracelulares y, además, a través de cambios conformacionales, median en la transmisión de señales mecánicas a las células para inducir sus actividades biológicas. Al igual que las integrinas, los cilios primarios son omnipresentes en los osteocitos osteoblastos; y responden a la estimulación mecánica y la inducción de carga coordinada. Cuando un estímulo mecánico dobla los cilios primarios, el aumento de tensión en la membrana activa los canales iónicos mecano sensibles, lo que resulta en la entrada de calcio en la célula, después de lo cual la célula es estimulada mecánicamente (22).

4.3 CAPÍTULO III
EFFECTIVIDAD DEL MOVIMIENTO DENTARIO DE ORTODONCIA
POSTERIOR A REGENERACIÓN ÓSEA GUIADA

En esta revisión abordamos la efectividad del movimiento dentario posterior a procedimientos de ROG en ortodoncia. La estrategia de búsqueda en bases de datos clave como PubMed, Cochrane y EBSCO permitió la identificación de estudios relevantes que cumplen con los criterios de inclusión y exclusión.

Se detallan en la siguiente tabla los estudios recopilados son los criterios antes mencionados, las cuales se discutirán más adelante para el análisis de sus resultados (Tabla 2).

Tabla 2: Tabla Descriptiva de los estudios incluidos en la revisión

Autor, año	Tipo	Diseño de estudio	Población	Intervención	Comparación	Resultado
Machibya F. 2017 (5)	In vivo	Experimental: ECCA	6 perros Beagle Macho de 18 meses	<p>Cada sujeto fue sometido a la creación de 4 defectos óseos (1 en cada cuadrante). Posteriormente fue sometido a asignación aleatoria de regeneración ósea guiada con β-TCP®, Bio-Oss® o una zona de defecto control la cual no fue regenerada.</p> <p>Posteriormente se sometió a una fuerza de mesialización con 150 gr el segundo premolar.</p> <p>Se realizó posteriormente la Medición cuantitativa intraoral y en TCCB de la distancia segundo y tercer premolar.</p>	<p>1. Se compararon los movimientos promedio de los tres grupos en milímetros a 1-2 semanas, 2-3 semanas, 4-5 semanas y 7-8 semanas y el total del movimiento registrado.</p> <p>2. Se comparó el promedio de altura de hueso dentoalveolar de los tres grupos.</p> <p>3. Se comparó el movimiento ortodóncico en semanas en los diferentes grupos</p>	<p>1. Mesialización del segundo premolar en Grupo Bio-Oss 4.22 mm \pm 0.21, β-TCP 4.76 mm \pm 0.25, y Control 4.97 \pm 0.13.</p> <p>2. Altura de hueso dentoalveolar estadísticamente menor en el grupo de control en comparación con Bio-Oss y b-Grupos TCP (P<0.1)</p> <p>3. El mayor movimiento ortodóncico se manifiesta en los tres grupos a las 7 y 8 semanas, siendo equivalente entre el grupo control y el β-TCP, e inferior para Bio-Oss®.</p>
Jason B. 1999 (7) (26)	In vivo	Experimental: ECCA	2 perros Beagle macho adultos	<p>Cada sujeto fue sometido a 10 mm de alargamiento mandibular bilateral de la parte media del cuerpo mediante osteodistracción intraoral.</p> <p>Los procedimientos quirúrgicos previos: (1) se cementa el dispositivo híbrido (Modelo</p>	<p>1. Se compararon los cambios anteroposteriores en la longitud mandibular luego de la distracción</p> <p>2. Se compararon cambios en el movimiento dentario (retracción) a través de hueso regenerado</p>	<p>1. Medida entre cúspide 4to premolar al 1er molar antes de la retracción: Sujeto 1 en el lado derecho se logró distracción de 9.12 mm en comparación a sujeto 2 1ue fue de 8.04 mm. En el 1 en el lado izquierdo fue de</p>

				<p>620-13, Leone SpA, Firenze, Italia) a los primeros molares y adheridas a los dientes anteriores a través de una férula</p> <p>(2) apicalmente, los brazos ajustables del dispositivo fijados a la corteza inferior por 2 microtornillos 2.7 mm de manera bicortical</p> <p>(3) las corticotomías se colocaron entre los cuartos premolares y los primeros molares</p> <p>Se realizó MDO con segmento de Arco de TMA 0.017 x 0.025 con ansa en ambos perros beagle como mecánica de retracción</p>		<p>9.25 mm y en el 2 de 9.25 mm</p> <p>2. Medida entre cúspide 4to premolar al 1er molar luego de la retracción en lado derecho de sujeto 1 fue de 11.88 mm y en sujeto 2 de 5.02 mm. Mientras que en lado izquierdo en sujeto 1 fue de 9.72 mm y de 0.67 mm en sujeto 2.</p>
Araujo M. 2001 (14) (18)	In vivo	Experimental: ECC (No aleatorizado)	5 perros Beagle de 1 año de edad	<p>Cada sujeto fue sometido a la exodoncia del 1er, 2do y 4to premolar a ambos lados de la línea media con la resección del tabique interradicular entre ellos.</p> <p>Posteriormente el sitio del 4to Premolar fue sometido a regeneración ósea con Bio-Oss®. El resto de los sitios no fue regenerado.</p> <p>3 meses después se sometió a una fuerza de distalización con aparatología ortodóncica (coilspring) el 3er premolar</p>	Se compararon los movimientos promedio del sitio con regeneración v/s el lado control al mes.	Distalización de los terceros premolares fue de 3.85 ± 0.57 mm en el grupo que fue regenerado con Bio-Oss® y de 3.37 ± 0.45 mm en el grupo de control.

				al sitio del 4ro premolar regenerado y el del lado homólogo no regenerado con una fuerza de 30 a 50 cN		
Zhigui M. 2020 (18) (27)	In vivo	Experimental: ECC (no aleatorizado)	6 perros beagle machos de 1,5 años, de 15 - 16 kg de peso xenoinjerto	Se crearon 12 defectos óseos con relación a segundos premolares superiores bilateral de 6 mm de altura y 5 mm de ancho. Los defectos fueron rellenados con Bio-Oss® y Bio-Gide® Se dividieron 3 grupos según el momento de la aplicación postoperatoria de Fuerza ortodóncica (FO): inmediatamente (F-0), 4 semanas (F-4) y 8 semanas (F- 8) después del injerto de Bio- Oss® y membrana Bio- Gide® Se les aplicó una fuerza de 50 gr por lado con resorte helicoidal NiTi.	Se compararon los movimientos promedio de los tres grupos en milímetros inmediatamente, a las 4 y 8 semanas	El movimiento ortodóncico promedio del grupo F0 fue de 2.42 mm, de F4 fue de 1.25 mm y de F8 1.62 mm en los defectos óseos rellenados con Bio-Oss® y Bio-Gide®
Chen Lu Y. 2020 (23) (28)	In vivo	Reporte de caso	1 mujer de 18 años	Se realizó regeneración ósea con Bio-Oss® y membrana de colágeno Bio-Gide® en paciente que tuvo pérdida de incisivos centrales superiores por traumatismo dentoalveolar.		Se realizó un movimiento ortodóncico, con raíces dentro del hueso esponjoso, 6 meses después del cierre de espacio se evaluó con TCCB una masa de alta densidad ósea con un

				<p>Pasado 1 mes de la intervención comenzó a cerrarse el espacio perdiendo anclaje hacia la línea media.</p> <p>Se realizó medición cuantitativa de espesor óseo con CBCT</p>		<p>espesor de aproximadamente de 2 mm.</p> <p>Las raíces de dientes con defectos óseos a 9 mm de la cresta alveolar estaban a un ancho del hueso alveolar de 4.39 ± 2.65 mm 6 meses después de la cirugía</p>
	In vivo	Caso y control	<p>12 perros Beagle machos de entre 18 y 24 meses y que pesaban entre 10 y 13 kg.</p>	<p>Los sujetos fueron sometidos a exodoncia de primer molar superior, dejando un defecto óseo.</p> <p>Se dividieron aleatoriamente 2 grupos según el procedimiento quirúrgico: Grupo O: osteotomía alveolar sola (control) y Grupo (OG) osteotomía con injerto óseo Bio Oss (grupo experimental).</p> <p>Subgrupos: Cada grupo se dividió en 3 subgrupos (n52) según el momento de aplicación de la fuerza ortodóncica: inmediatamente (OG-0 y O-0), 2 semanas después de la cirugía (OG-2 y O-2) y 12 semanas después de la cirugía (OG-12 y O-12)</p>	<p>Comparar movimiento dentario en mm y a las 6 semanas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Todos los grupos alcanzan el mayor MDO a las 6 semanas. 2. Grupo OG-0 con O-2 tienen un rango de movimiento a las 6 semanas promedio de 3.5 mm \pm de 0.07. 3. Grupo OG-2 a las 6 semanas tiene un MDO de 4.2 mm \pm 0.14 4. Grupo O-0 a las 6 semanas tiene MDO de 2.3 mm \pm 0.07. 5. Grupo OG-12 a las 6 semanas tiene MDO de 1.75 mm \pm 0.09 6. Grupo O-12 a las 6 semanas tiene MDO de 1.18 mm \pm 0.04

<p>Shjie J. 2020 (26) (29)</p>	<p>In vivo</p>	<p>Experimental: ECCA</p>	<p>9 perros Beagle machos de 1 año de edad</p>	<p>Cada sujeto fue sometido a la creación de defectos óseos por extracción del primer premolar y posterior fresado de 4.5 mm de diámetro y 6 mm de profundidad. Posteriormente fue sometido a asignación aleatoria de regeneración ósea guiada con regeneración ósea guiada con Hueso bovino desproteínizado (DBB), Grupo con regeneración ósea guiada con BioCaP® (Fosfato de calcio biomimético) o una zona de defecto control la cual no fue regenerada.</p> <p>8 semanas después con fuerzas ortodóncicas fue mesializado con coilspring con una fuerza de 150 gr. el segundo premolar al sitio del primer premolar.</p> <p>Luego se realizó medición cuantitativa mediante TCCB.</p>	<p>1. Se compararon los movimientos promedio de los tres grupos en milímetros</p> <p>2. Se comparó la reducción del nivel la cresta alveolar en los tres grupos</p>	<p>1. Movimiento ortodóncico de mesialización fue de 2.9 ± 0.84 mm en el grupo de BioCaP, 3.59 ± 1.25 mm en el grupo de DBB y de 3.42 ± 1.55 mm en el grupo control. Sin diferencias estadísticamente significativas entre los grupos.</p> <p>2. Todos los sitios de los grupos repararon correctamente.</p> <p>3. La distancia de la unión amelocementaria a la cresta alveolar en el grupo control fue 1.45 y 1.69 veces respectivamente a los grupos de DBB y BioCaP.</p>
---	----------------	---------------------------	--	---	---	---

5. DISCUSIÓN

En esta revisión bibliográfica y análisis de la literatura hemos recopilado información valiosa sobre la utilización, pronóstico y resultados de las terapias de regeneración ósea que utilizan diversos biomateriales, como autoinjertos, aloinjertos, xenoinjertos o aloplastos. También hemos examinado combinaciones entre estos materiales, así como su asociación con matrices y/o membranas. El propósito de esta recopilación es proporcionar una base sólida para orientar la toma de decisiones en casos relacionados.

Es importante destacar que los estudios presentados se han llevado a cabo principalmente en modelos animales, y sus resultados se han extrapolado a la práctica clínica humana. Sin embargo, es crucial considerar ciertas limitaciones asociadas con esta extrapolación, como el tamaño de la muestra y las variadas metodologías empleadas. La falta de estandarización entre los estudios y los investigadores también contribuye a la variabilidad en los resultados.

La diversidad y las lagunas presentes en la literatura subrayan la necesidad de llevar a cabo investigaciones más extensas y estandarizadas. Este enfoque es fundamental para comprender completamente la relación entre la regeneración ósea guiada y el movimiento dentario en el contexto de la ortodoncia.

De los estudios revisados, se identificaron tres ensayos clínicos aleatorizados (5, 26, 29), dos ensayos clínicos no aleatorizados (18, 27), un reporte de caso (28) y un estudio de casos y control (24). De estos, seis se llevaron a cabo en modelos animales (5, 18, 26, 27, 30), y uno en seres humanos (28).

En cuanto a los injertos óseos utilizados, se observó una distribución variada: ningún estudio empleó injerto óseo autólogo ni aloinjertos, cinco utilizaron xenoinjertos (5, 18, 27, 28, 30), dos utilizaron aloplastos (5, 29), y uno solo trabaron con corticotomía. Es destacable que, independientemente del tipo de injerto empleado

en la técnica de ROG, todos los estudios arrojaron resultados satisfactorios. Este hallazgo sugiere la posibilidad de considerar xenoinjertos o aloinjertos como alternativas viables para los procedimientos de ROG, lo que podría reducir o incluso eliminar la necesidad de obtener injertos autólogos. Esta estrategia no solo ofrece resultados positivos, sino que también disminuiría la morbilidad para el paciente al minimizar los requisitos de hueso autólogo.

La aplicación de la regeneración ósea guiada en el tratamiento ortodóncico ha sido abordada de manera limitada, a pesar de la estrecha relación entre la ortodoncia y condiciones como enfermedades periodontales, paladar hendido y defectos alveolares. La complejidad de estas situaciones exige un enfoque interdisciplinario para la gestión integral de los pacientes.

Los estudios experimentales han generado resultados contradictorios en cuanto al momento adecuado para realizar el movimiento dental ortodóncico después de la regeneración ósea. Además, hasta el momento, no se han llevado a cabo comparaciones significativas entre el uso de diferentes materiales de regeneración ósea en combinación con el movimiento dental ortodóncico.

En cuanto a los materiales de regeneración ósea, los estudios de Machibya F. 2017 (5) y Shijie J. 2020 (29), abordan la importancia de los materiales de regeneración ósea. En el primero se observa la mesialización del segundo premolar con diferentes materiales, mientras que el segundo compara diferentes materiales sin encontrar diferencias significativas en el movimiento ortodóncico.

Por otra parte, Zhigui M. 2020 (27) describe cómo el momento de la aplicación de la fuerza ortodóncica después de la regeneración ósea guiada afecta el movimiento dentario. Este aspecto destaca la relevancia del tiempo en el éxito del tratamiento ortodóncico después de procedimientos de regeneración ósea. La sincronización temporal entre la regeneración ósea y la aplicación de fuerzas ortodóncicas parece influir en el resultado final del movimiento dentario.

El estudio de Jason B. 1999 (26), centrado en la osteodistracción intraoral, y el estudio de Hyo W. 2014 (30), que aborda la exodoncia y osteotomía, analizan cómo procedimientos quirúrgicos específicos pueden influir en el movimiento dentario. Ambos estudios señalan la interconexión entre osteotomía y ortodoncia.

Araujo M. 2001 (18) analiza la distalización de terceros premolares después de la regeneración ósea guiada. Los resultados sugieren que la regeneración ósea con Bio-Oss® puede influir positivamente en la efectividad de la distalización ortodóncica, sugiere que la ubicación y extensión del defecto óseo pueden influir en el movimiento dentario posterior a la regeneración ósea. La relación entre la cantidad de hueso regenerado y su efecto en el movimiento dentario puede ser una consideración importante.

Chen Lu Y. 2020 (28) presenta un caso de regeneración ósea en una paciente con pérdida dental traumática. Este estudio destaca la aplicabilidad clínica de la regeneración ósea guiada en situaciones complejas y cómo puede facilitar el movimiento ortodóncico en casos especiales y evaluar la estabilidad del movimiento dentario después de la regeneración ósea.

Varios estudios utilizan como material de regeneración ósea Bio-Oss® (5, 18, 28, 30), y se puede concluir que el movimiento dentario ortodóncico pareciera ser eficiente dado que muestra magnitudes similares al grupo control. Por otra parte, otros autores (5, 27–30) indican que comenzaron el movimiento dentario ortodóncico de 6 a 8 semanas después del injerto óseo, lo cual podría tomarse como cierta recomendación clínica, porque además aparentemente mejora verticalmente el nivel óseo con los injertos.

Los avances recientes en materiales de injerto sintéticos reabsorbibles han marcado un hito significativo. Estos nuevos materiales prometen proporcionar volúmenes clínicamente significativos de aumento óseo con membranas reabsorbibles, lo que podría eliminar complicaciones importantes y ofrecer una mayor comodidad y seguridad para el paciente. Aunque es probable que los injertos óseos autólogos

continúen siendo el estándar de oro en la reconstrucción del esqueleto maxilofacial, se anticipa que los nuevos materiales sintéticos reabsorbibles cambiarán las filosofías médicas en torno a los injertos óseos en el futuro (6)

6. CONCLUSIÓN

La interrelación entre los estudios analizados destaca la complejidad del tema, subrayando así la necesidad imperante de obtener una comprensión más profunda sobre cómo la regeneración ósea incide en el movimiento dentario en diversos contextos clínicos. La integración de estos hallazgos no solo puede sentar las bases sólidas para investigaciones futuras, sino también orientar las prácticas clínicas en los ámbitos de la ortodoncia y la regeneración ósea.

Los desafíos centrales vinculados a nuestra especialidad, tales como los extensos tiempos de tratamiento, las complejidades asociadas al abordaje de maloclusiones esqueléticas y la resorción ósea, tanto radicular como alveolar, junto con los mayores riesgos de efectos adversos en dientes con soporte óseo reducido, han sido señalados como elementos de interés en la literatura (5).

Por otra parte, el movimiento dentario ortodóncico con la mayoría de los injertos en modelos animales o humanos muestra una efectividad similar a los controles. Además, aparentemente el nivel óseo en sentido vertical mejora con injertos óseos y el tiempo de inicio del movimiento ortodóncico pareciera ser mejor a las 6 u 8 semanas posterior al injerto.

No obstante, resulta crucial reconocer las limitaciones inherentes a esta revisión, entre las cuales se destacan la variabilidad en los diseños de los estudios, los tamaños de muestra y las metodologías empleadas. La falta de estandarización en los protocolos de tratamiento y la diversidad en los resultados subrayan la necesidad urgente de emprender investigaciones futuras con enfoques más uniformes y a largo plazo, con el fin de profundizar nuestra comprensión de la relación entre la ROG y el movimiento dentario en el contexto de la ortodoncia. Estas consideraciones resultan fundamentales para mejorar la aplicabilidad clínica de estos procedimientos combinados y optimizar los resultados en beneficio de los pacientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Reichert C, Deschner J, Kasaj A, Jäger A. Guided Tissue Regeneration and Orthodontics. A Review of the Literature. Vol. 70, Journal of Orofacial Orthopedics. 2009. p. 6–19.
2. Liu J, Kerns DG. Mechanisms of Guided Bone Regeneration: A Review. Vol. 8. 2014.
3. Elgali I, Omar O, Dahlin C, Thomsen P. Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited. Vol. 125, European Journal of Oral Sciences. Blackwell Munksgaard; 2017. p. 315–37.
4. Dimitriou R, Mataliotakis GI, Calori GM, Giannoudis P V. The role of barrier membranes for guided bone regeneration and restoration of large bone defects: Current experimental and clinical evidence. Vol. 10, BMC Medicine. 2012.
5. Machibya FM, Zhuang Y, Guo W, You D, Lin S, Wu D, et al. Effects of bone regeneration materials and tooth movement timing on canine experimental orthodontic treatment. Angle Orthodontist. 2018 Mar 1;88(2):171–8.
6. Moussa NT, Dym H. Maxillofacial Bone Grafting Materials. Vol. 64, Dental Clinics of North America. W.B. Saunders; 2020. p. 473–90.
7. Fernández-Tresguerres Hernández-Gil I, Angel Alobera Gracia M, del Canto Pingarrón M, Blanco Jerez L, Carlos J, Titular P. Bases fisiológicas de la regeneración ósea I. Histología y fisiología del tejido óseo. 2005.
8. Fernández E, González H, Castro Á, Lisboa D. Osteología: relevancia de conceptos médicos en el ámbito odontológico. Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral. 2015 Apr;8(1):83–92.
9. Lin Y, Fu ML, Harb I, Ma LX, Tran SD. Functional Biomaterials for Local Control of Orthodontic Tooth Movement. Vol. 14, Journal of Functional Biomaterials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023.
10. Yamaguchi A, Komori T, Suda T. Regulation of Osteoblast Differentiation Mediated by Bone Morphogenetic Proteins, Hedgehogs, and Cbfa1. 2000.

11. Masella RS, Meister M. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2006 Apr;129(4):458–68.
12. J. E. Davies, M.M Hosseini. Histodynamics of Endosseus wound healing.
13. Fernández-Tresguerres Hernández-Gil I, Angel Alobera Gracia M, del Canto Pingarrón M, Blanco Jerez L, Juan Carlos R, Titular DDS P. Bases fisiológicas de la regeneración ósea II. El proceso de remodelado. 2005.
14. Lu J, Wang Z, Zhang H, Xu W, Zhang C, Yang Y, et al. Bone Graft Materials for Alveolar Bone Defects in Orthodontic Tooth Movement. Vol. 28, *Tissue Engineering - Part B: Reviews*. Mary Ann Liebert Inc.; 2022. p. 35–51.
15. Klein Y, Kunthawong N, Fleissig O, Casap N, Polak D, Chaushu S. The impact of alloplast and allograft on bone homeostasis: Orthodontic tooth movement into regenerated bone. *J Periodontol*. 2020 Aug 1;91(8):1067–75.
16. Möhlhenrich SC, Kniha K, Magnuska Z, Hermanns-Sachweh B, Gremse F, Hölzle F, et al. Evaluation of different grafting materials for alveolar cleft repair in the context of orthodontic tooth movement in rats. *Sci Rep*. 2021 Dec 1;11(1).
17. Hassan KS, Marei HF, Alagl AS. Composite bone graft for treatment of osseous defects after surgical removal of impacted third and second molars: case report and review of the literature. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2011 Dec;112(6): e8–15.
18. Araújo Jo MG, Carmagnola D, Berglundh T, Thilander B, Lindhe J. Orthodontic movement in bone and J. Lindhe¹ Departments of ¹Periodontology, defects augmented with Bio-Oss. *J Clin Periodontol*. 2001; 28:73–80.
19. Charavet C, Lecloux G, Vandenberghe B, Lambert F. Buccal bone regeneration combined with piezocision in adult orthodontic patients: Clinical, 3D radiographic, and patient-reported outcomes. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*. 2021 Dec 1;122(6):549–56.
20. Chaushu S, Klein Y, Mandelboim O, Barenholz Y, Fleissig O. Immune Changes Induced by Orthodontic Forces: A Critical Review. Vol. 101, *Journal of Dental Research*. SAGE Publications Inc.; 2022. p. 11–20.

21. Gündüz E, Rodríguez-Torres C, Gahleitner A, Heissenberger G, Bantleon HP. Bone regeneration by bodily tooth movement: Dental computed tomography examination of a patient. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2004;125(1):100–6.
22. Yan L, Liao L, Su X. Role of mechano-sensitive non-coding RNAs in bone remodeling of orthodontic tooth movement: recent advances. Vol. 23, *Progress in Orthodontics*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2022.
23. William R Proffit, Henry W Fields, David M Sarver. *Ortodoncia Contemporánea*. 2014.
24. Miao Y, Chang YC, Tanna N, Almer N, Chung CH, Zou M, et al. Impact of Frontier Development of Alveolar Bone Grafting on Orthodontic Tooth Movement. Vol. 10, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Frontiers Media S.A.; 2022.
25. Zhai M, Cui S, Li L, Cheng C, Zhang Z, Liu J, et al. Mechanical Force Modulates Alveolar Bone Marrow Mesenchymal Cells Characteristics for Bone Remodeling during Orthodontic Tooth Movement through Lactate Production. *Cells*. 2022 Dec 1;11(23).
26. Jason B. Cope, Richard P. Harper, Mikhail L. Samchukov. *Experimental tooth movement through regenerate alveolar bone: A pilot study*. 1999.
27. Ma Z, Wang Z, Zheng J, Chen X, Xu W, Zou D, et al. Timing of force application on buccal tooth movement into bone-grafted alveolar defects: A pilot study in dogs. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2021 Feb 1;159(2): e123–34.
28. Luyi C, Min H, Jiaqi W, Jun L. Guided bone regeneration-assisted orthodontic treatment for closing the space of missing central incisors. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi / West China Journal of Stomatology*. 2021 Aug 1;39(4):482–8.
29. Jiang S, Liu T, Wu G, Li W, Feng X, Pathak JL, et al. BMP2-Functionalized Biomimetic Calcium Phosphate Graft Promotes Alveolar Defect Healing During Orthodontic Tooth Movement in Beagle Dogs. *Front Bioeng Biotechnol*. 2020 May 29;8.

30. Ahn HW, Ohe JY, Lee SH, Park YG, Kim SJ. Timing of force application affects the rate of tooth movement into surgical alveolar defects with grafts in beagles. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2014;145(4):486–95.