

Diagnóstico Capilaroscópico de la Salud Ósea. Parte 1.- Definición Capilaroscópica Operativa

Capillaroscopic Classification of Bone Health. Part 1.- Operational Capillaroscopic Definition

VICTOR ALFONSO ABUADILI GARZA

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Ciudad de México, México

abuadili@yahoo.com.mx

<https://orcid.org/0009-0004-5466-1880>

Recibido: 30-Jul-2026

| Aceptado: 30-Jul-2026

| Publicado: 01-Ago-2026

*Autor de correspondencia: abuadili@yahoo.com.mx

Cómo citar este artículo: Abuadili Garza, V. A (2026). Diagnóstico Capilaroscópico de la Salud Ósea, Parte 1.- Definición Capilaroscópica Operativa. México. *Revista IECCMEXICO*, 5(2, Tomo I) 347-365. Quality Consulting Instituto de Educación Capacitación y Certificación de México. <https://ieccmexico.com/publishing>

Copyright (c) 2026 Abuadili Garza, V. A.; Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Attribution 4.0 International ([CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)) Revista IECCMEXICO, México / Vol. 5, N. 2 / pp. 347-365/ Julio-Diciembre, 2026 / E-ISSN: 3061-8045, P-ISSN: 3061-8517. Artículo de Investigación.

RESUMEN

La calidad ósea es un concepto multidimensional que integra la densidad mineral ósea, la microarquitectura trabecular y cortical, la tasa de remodelado y el grado de mineralización de la matriz extracelular. Aunque la absorciometría dual de rayos X (DXA) constituye el método de referencia para evaluar la densidad mineral ósea, no permite valorar en tiempo real los procesos funcionales del remodelado óseo. En este contexto, la Capilaroscopia digital representa una alternativa prometedora para investigar biomarcadores funcionales derivados de la microcirculación y la bioreflectancia tisular. **Objetivo:** Desarrollar una definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea y proponer una clasificación basada en patrones capilaroscópicos relacionados con la homeostasis metabólica del tejido óseo. **Metodología:** Se realizó un estudio observacional, transversal y mecanicista, sustentado en la Biosemiómica Clínica Aplicada y la metodología iterativa del Sistema ATDM, donde a partir de la evidencia fisiológica del remodelado óseo, se integraron cuatro dominios fundamentales: densidad mineral ósea, microarquitectura, tasa de remodelado y mineralización de la matriz ósea, los cuales fueron correlacionados con patrones de bioreflectancia obtenidos mediante Capilaroscopia para construir una clasificación funcional de cinco fases. **Resultados:** Fue posible establecer una definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea e identificar cuatro patrones capilaroscópicos susceptibles de integrarse en una clasificación progresiva que refleja el equilibrio funcional entre formación y resorción ósea. La metodología propuesta permite evaluar, de manera in vivo, modificaciones funcionales potencialmente relacionadas con el metabolismo mineral y el remodelado del tejido óseo, sin procedimientos invasivos ni exposición a radiación ionizante. **Conclusiones:** Hemos podido desarrollar una definición capilaroscópica operativa para el diagnóstico de la Calidad ósea, así mismo esta sirve como base para determinar una clasificación que constituye un modelo diagnóstico funcional innovador para el estudio de la calidad ósea mediante Capilaroscopia. Los resultados demuestran la factibilidad de desarrollar

un sistema de evaluación metabólica en tiempo real, no invasivo y libre de radiación, con potencial aplicación en la detección temprana y seguimiento de las alteraciones del tejido óseo.

PALABRAS CLAVE

Capillaroscopia; Calidad Ósea; Remodelación Ósea; Metales de Transición; Sistema ATDM.

ABSTRACT

Bone quality is a multidimensional concept that integrates bone mineral density, trabecular and cortical microarchitecture, the remodeling rate, and the degree of extracellular matrix mineralization. Although dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) is the gold standard for assessing bone mineral density, it does not allow for the real-time evaluation of functional bone remodeling processes. In this context, digital capillaroscopy represents a promising alternative for investigating functional biomarkers derived from microcirculation and tissue bioreflectance. Objective: To develop an operational capillaroscopic definition of bone quality and propose a classification based on capillaroscopic patterns related to bone tissue metabolic homeostasis. Methodology: An observational, cross-sectional, and mechanistic study was conducted, grounded in Applied Clinical Biosemiotics and the iterative methodology of the ATDM System. Based on physiological evidence of bone remodeling, four fundamental domains—bone mineral density, microarchitecture, remodeling rate, and bone matrix mineralization—were integrated and correlated with bioreflectance patterns obtained via capillaroscopy to construct a five-phase functional classification. Results: It was possible to establish an operational capillaroscopic definition of bone quality and to identify four capillaroscopic patterns suitable for integration into a progressive classification reflecting the functional balance between bone formation and resorption. The proposed methodology allows for the *in vivo* assessment of functional changes potentially linked to mineral metabolism and bone tissue remodeling, without invasive procedures or exposure to ionizing radiation. Conclusions: We have developed an operational capillaroscopic definition for assessing bone quality; this definition serves as the basis for a classification system that constitutes an innovative functional diagnostic model for studying bone quality via capillaroscopy. The results demonstrate the feasibility of developing a real-time, non-invasive, and radiation-free metabolic assessment system with potential applications in the early detection and monitoring of bone tissue abnormalities.

KEYWORDS

Capillaroscopy; Bone Quality; Bone Remodeling; Transition Metals; ATDM System.

INTRODUCCIÓN

El tejido óseo es un órgano metabólicamente dinámico, cuya responsabilidad no se limita meramente a la integridad estructural, sino que se extiende por todo el cuerpo para mantener en equilibrio el calcio, el fósforo y otros minerales. Este equilibrio depende del acoplamiento fisiológico entre la formación ósea, mediada por los osteoblastos, y la resorción ósea, llevada a cabo por los osteoclastos, en un proceso continuo conocido como remodelación ósea. Los osteocitos, como mecanosensores centrales del esqueleto, coordinan esta interacción regulando cascadas de señalización que incluyen RANK/RANKL/OPG, Wnt/ β -catenina y esclerostina, que permiten que el metabolismo óseo responda a los requerimientos mecánicos y metabólicos del huésped. Concurrentemente, la absorción intestinal de calcio y fósforo, mediada principalmente por la vitamina D activa (calcitriol), así como la reabsorción renal gobernada por la hormona paratiroidea (PTH), conduce al suplemento mineral adecuado para mantener intacta la mineralización de la matriz ósea y controlar las concentraciones séricas de estos electrolitos. Es una actividad estrictamente regulada que involucra actividades endocrinas, celulares y moleculares que responden de manera sincronizada a los cambios en la disponibilidad de nutrientes, el envejecimiento, la inflamación y el estrés mecánico.(Abuadili Garza V.A., 2026c) Cuando este equilibrio se altera, es más probable que ocurran condiciones de pérdida de masa ósea o deficiencia en la mineralización, como es el caso de la osteoporosis, la osteomalacia y otras enfermedades metabólicas óseas. Desde este punto de vista, la correcta congruencia entre la resorción osteoclástica y la producción osteoblástica es fundamental no solo para preservar la estructura esquelética, sino también para preservar las reservas minerales del cuerpo que desempeñan un papel en funciones fisiológicas cruciales como la contracción muscular, la neurotransmisión y la señalización intracelular. Los mecanismos que controlan la homeostasis son de importancia crítica en el desarrollo de estrategias diagnósticas y terapéuticas para prevenir la degradación del metabolismo óseo y su carga clínica.(Abuadili Garza V.A. 2026b)

En ese orden de ideas, en la literatura científica, ha habido diferentes clasificaciones, todas con enfoque desde el efecto, es decir, desde la descripción de la enfermedad, en términos generales, existen cientos de miles de artículos sobre salud ósea en la literatura científica global, reflejados en plataformas como PubMed y Scopus. No hay un número exacto único debido a la variación de los términos de búsqueda, pero se contabilizan más de 150,000 documentos si se consideran temas afines, de los cuales se estima que 130,000 se refieren a osteoporosis. (Li, M., Yu, B., Yang, H., et. A.I., 2024)

La clasificación médica y científica de la salud ósea se rige de manera universal por los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS), basados en la Densidad Mineral Ósea (DMO) obtenida mediante una densitometría DXA. Los artículos científicos clasifican el estado de los huesos utilizando el T-score (para adultos mayores de 50 años o postmenopáusicas) o el Z-score (para jóvenes, niños y mujeres premenopáusicas). (World Health Organization, 1994)

Sin embargo, una investigación contemporánea indica que la densidad no lo es todo. Artículos especializados como ¿Qué significa la calidad ósea? de Elsevier España clasifican la salud del hueso según sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y estructurales, evaluando la microarquitectura, el grado de mineralización y la geometría del tejido óseo.

La “calidad ósea” es un nuevo concepto en la medicina moderna basada en evidencias, que determina no sólo la masa o densidad ósea, sino también la calidad ósea, condicionada por la geometría, la microarquitectura, la ultraestructura ósea, la homeostasis de minerales y las características de la matriz proteínica.

Actualmente solo se puede verificar la “Calidad Ósea” mediante una serie de herramientas que nos permiten medir aspectos parciales y complementarios. Para lo cual es necesario: respecto de su remodelado, disponemos de la histomorfometría mediante biopsia ósea marcada con tetraciclinas, los marcadores bioquímicos de remodelado en sangre y en orina y la tomografía por emisión de positrones; para la valoración de la microarquitectura, tenemos la histomorfometría, la resonancia magnética (RM) y la microtomografía computarizada (μ TC) in vivo e in vitro, entre otros métodos, lo que nos permite una evaluación del hueso más allá de la puramente cuantitativa, aplicable en la clínica en un futuro cercano.

Sin embargo, es por ello que este autor hace un planteamiento propositivo diferente, en tiempo real, de tipo no invasivo y sin riesgo de radiación al paciente, para determinar la “Calidad Ósea”, mediante el uso de la Capilaroscopia, como una herramienta que nos permite identificar no sólo la densidad ósea, sino que además nos permite ver, en tiempo real, la Calidad Ósea, identificando diversos patrones imagenológicos. (Abuadili Garza V.A., 2026).

DESARROLLO

La Capilaroscopia es un procedimiento no invasivo, que consiste en la observación in vivo y en tiempo real de la microcirculación capilar, el estado del tejido, y evaluación del metabolismo; es un método sencillo, de alto impacto y de bajo costo, que se constituye como un tamizaje que nos permite, actuar tanto desde un paradigma enfocado en detectar las causas de diversas enfermedades, como en el diagnóstico de diversos estados anormales relacionados con diversas patologías, aplicando paradigmas enfocados desde el efecto, es decir identificar la enfermedad. (Abuadili Garza V.A. 2025c)

La Capilaroscopia es una técnica sencilla, inocua (no invasiva), elegante y no cruento, así como muy económica, que debería incluirse en el protocolo de estudio de todo paciente. (Gómez, M., Urquijo, P., Mela, M. & Pittana, P., 2011) Es una herramienta relativamente poco conocida en la medicina, fuera de las áreas de la dermatología, reumatología y angiología, quienes han hecho mayor uso de esta herramienta diagnóstica; históricamente su uso ha sido poco difundido, en parte por el requerimiento de entrenamiento y equipo especializado, así como la pobre estandarización de este método de diagnóstico. No obstante, en los últimos años, gracias al renovado interés y esfuerzo investigativo de la comunidad académica, se ha podido superar estos problemas, convirtiendo la Capilaroscopia en un recurso útil para el estudio, en tiempo real, de los pacientes. (Colmenares-Roldán, L.M., Vélasquez-Franco, C.J. y Mesa-Navas, M.A., 2016)

Así es como esta técnica diagnóstica, se erige como un elemento de gran importancia para diferentes áreas de la medicina moderna, (Franz Klein-Weigel, P., Sunderkötter, C. y Sander, O., 2016) ya que su funcionamiento del

Capilaroscopia, se basa en la interacción luz – materia, que es un mecanismo básico que se utiliza día a día, para obtener información acerca de la salud humana.(Abuadili Garza Victor Alfonso, 2021)

Es así como, la luz percibida (y la que no) lleva mucha más información de la que se puede analizar a simple vista. Al entrar la luz en contacto con cualquier material se verán modificadas varias de sus propiedades como color, ángulo, polarización, intensidad, etc. Se hace evidente que poder medir y cuantificar estos datos ayudaría a conocer mejor las propiedades del material. Es en este punto donde entran las técnicas ópticas: utilizan la luz como elemento interrogante y aprovechan los distintos tipos de interacciones para obtener los parámetros ópticos que caracterizan al material en cuestión. Una vez medidos los parámetros del material, se puede conocer datos como su composición y su estructura atómica.(Real-Peña, E., 2012)

La luz visible es una radiación electromagnética cuya frecuencia está comprendida entre los $7.5 \cdot 10^{14}$ y $4 \cdot 10^{14}$ Hertzios. En el vacío esta relación se traduce en un rango de longitudes de onda que va desde los 400 hasta 750 nanómetros. El concepto “luz” en realidad abarca todo el espectro de electromagnético, aunque en óptica es más normal trabajar en el rango espectral que abarca radiación ultravioleta (100 a 400 nm), visible (400 a 750 nm) e infrarrojo (750 nm a 1 mm). La longitud de onda es su parámetro más importante puesto que condiciona su interacción con la materia ya que ésta íntimamente relacionada con su energía. Es determinante la refracción, penetración en tejidos, absorción, etc.

Cuando las ondas electromagnéticas interactúan con un medio se ponen de manifiesto muchos fenómenos, cuando la luz se pone en contacto con un material, su trayectoria se ve afectada, en general, parte de la luz es reflejada, parte transmitida y parte absorbida, fenómenos que se conocen como: fotoluminiscencia, absorbancia, reflectancia, transmitancia,(Real-Peña, E., 2012; Matiacevich, S.B., 2008) que a continuación se describen:

Radiación: Es la emisión de un halo de luz que se emite a una determinada longitud de onda del espectro electromagnético.

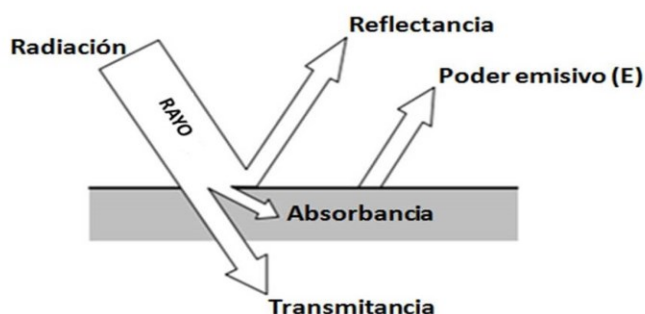
Reflectancia: Es la capacidad que tiene la materia de reflejar la radiación incidente. La reflexión es uno de los fenómenos ópticos básicos. Cuando un rayo de luz colisiona con una superficie, este rayo de ve reflejado y cambia su dirección. Se pueden distinguir tres tipos de reflexión: especular, compuesta y difusa. Los dos primeros casos se producen cuando el rayo incidente y el rayo reflejado forman el mismo ángulo con respecto a la perpendicular de la superficie. Si la superficie es lisa, será reflexión especular y los rayos paralelos entre sí. Si la superficie es rugosa, será reflexión compuesta y los rayos reflejados no serán paralelos, pero mantienen la misma potencia reflejada en el mismo ángulo que cuando era especular. El otro efecto es el que se da en los tejidos, cuando la luz entre en el tejido, interacciona con éste y sale de él. Si se analiza la reflexión en un tejido se tendrá reflexión difusa, que penetra en un material y por tanto la que interactúa con éste y nos da la información importante acerca de su composición.

Absorbancia: Es la capacidad que tiene la materia de absorber la luz incidente. La absorción es uno de los fenómenos ópticos más importantes. La luz reflejada es la que acaba llegando al ojo, pero si ésta tiene distintos colores se debe a que, el material que la refleja absorbe muchas de las longitudes de onda de la luz y sólo refleja unos pocos.

Transmitancia: Es la capacidad que tiene la luz de traspasar la materia.

Poder emisivo, esparcimiento o Scattering: Es la capacidad que tiene la materia de emitir una luz propia a determinada longitud de onda.

Figura 1.- Interacción de la radiación con la materia.



Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que cada reacción química, agente químico exógeno por exposición ya sea laboral, ambiental o por consumo adictivo, o los microorganismos del microbioma humano, y en el caso que nos ocupa, los minerales de transición, tienen su propia longitud de onda, por lo que sabiendo esto, el Capilaroscopio, como se mencionó en la introducción, emite una luz visible que incide una biofrecuencia y por ende puede medirse la longitud de onda por bioreflectancia de estos elementos. (Abuadili Garza V.A. 2025b, 2025c)

En ese orden de ideas, Canjura-Guzmán en 2014, en su trabajo de Investigación denominado “Determinación de compuestos de glicación avanzada (AGE) en el tejido humano por método no invasivo de espectroscopía óptica, determinó la medida de fluorescencia de la piel, en diferentes partes anatómicas, determinando que los dedos de las manos son la mejor región anatómica ya que la intensidad de la emisión es la que mejor valor proporciona, comparando resultados de investigaciones realizadas en Países Bajos, Bulgaria y Canadá. Demostrando que los diferentes componentes del tejido, emiten una longitud de onda diferente y con ello se puede determinar cada parte del tejido, los linfáticos, los capilares, y las diferentes capas de la piel, tienen una longitud de onda diferente, por lo que en ese sentido, las sustancias que se depositan en el tejido también tienen una reflectancia difusa a determinada longitud de onda. (Canjura Guzmán, R.A., 2014)

El color es una importante cualidad de los materiales y su percepción puede aportar datos sobre su calidad y estado de conservación. La percepción de color de un material no es un fenómeno simple e intervienen varios factores:

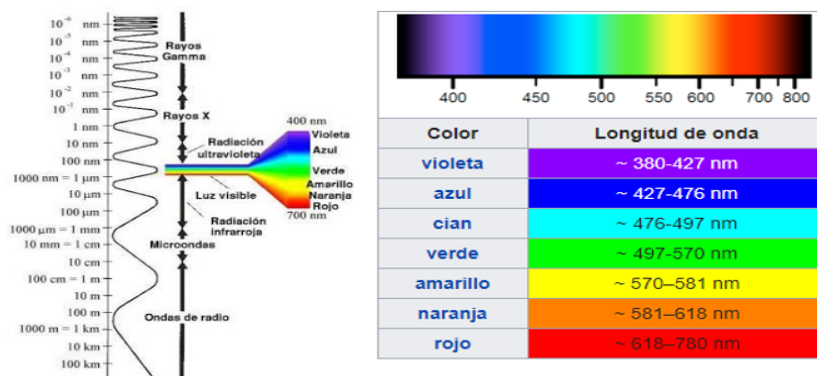
1. La distribución de energía espectral del iluminante, es decir, la clase de luz que ilumina el objeto: solar, luz de lámpara de tungsteno o mercurio, etc.
2. Las condiciones bajo las cuales el color es visto, el ángulo de la visión, el color del contorno, la extensión de la zona coloreada y el nivel de iluminación.
3. La sensibilidad del observador.
4. Las características espectrales del objeto con respecto a la absorción, reflexión y transmisión de la luz (que se llaman atributos geométricos), por los cuales se pueden clasificar los objetos como opacos, transparentes o translúcidos.

Para lograr una adecuada caracterización de los colores se desarrollaron sistemas de medida que emplean “espacios de color” y “coordenadas de color” y permiten la especificación completa en el espacio tridimensional. De los sistemas propuestos para la especificación del color el más difundido universalmente es el CIE (Comisión Internationale de l’Éclairage), en la cual el color es indicado por tres variables X, Y, Z, conocidas como los valores triestímulo y que representan a los tres colores primarios virtuales, donde el X se puede relacionar con el rojo, el Y con el verde y el Z con el azul. El valor de Y se tomó de tal forma que represente el valor de la luminosidad, es decir, vale el 100% para una muestra blanco o transparente incolora, y 0% para el negro.

Para obtener este sistema de medida, se definió el “Observador Patrón” como representativo de un observador visión normal, y se designó a cada color un conjunto de tres valores, índices de la contribución de cada uno de los primarios imaginarios. En la especificación de un color es necesario considerar: a) el factor de transmitancia o reflectancia espectral del objeto en función de la longitud de onda, el cual se obtiene mediante un espectrofotómetro, en el que se determina la luz transmitida o reflejada para cada λ , b) la distribución energética de la luz incidente o iluminante para cada longitud de onda, donde el iluminante C tiene una distribución energética similar a la luz blanca promedio. c) el

análisis por el sistema visual de acuerdo con los tres primarios elegidos, o curva de sensibilidad del observador patrón, también en función de la longitud de onda.

Figura 2.- Longitud de onda de la reflectancia de los objetos.



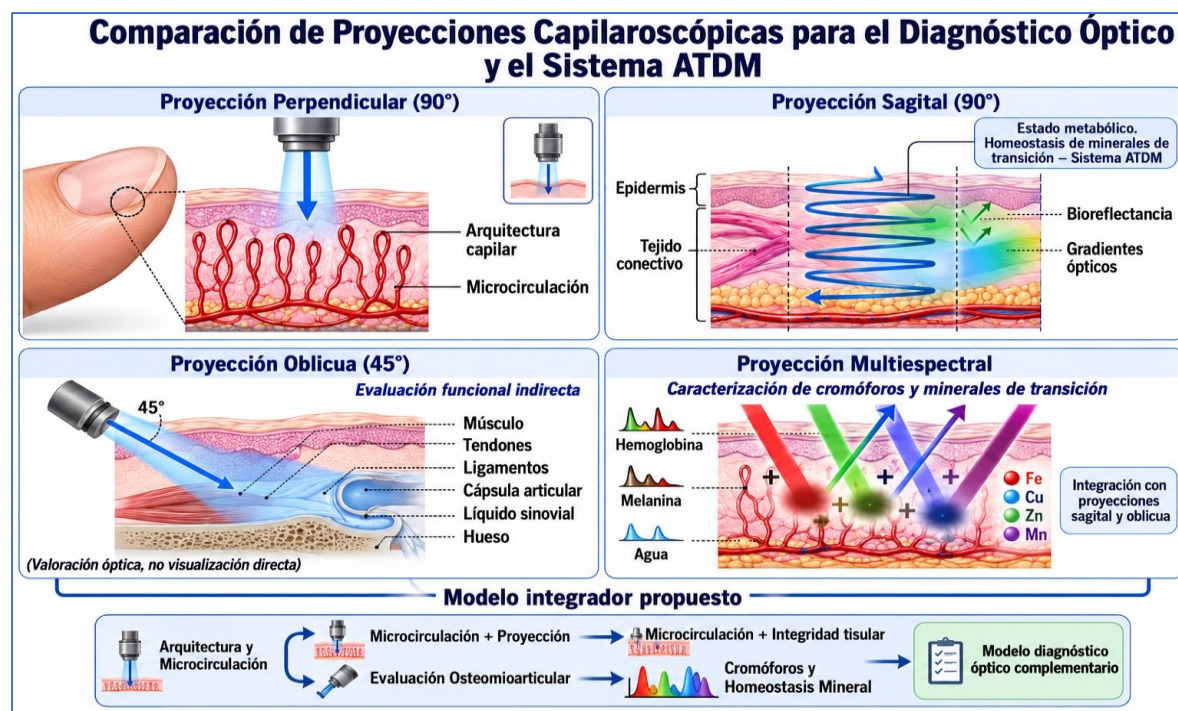
Fuente: Elaboración Propia.

Por lo tanto, el color queda determinado por un punto en un espacio tridimensional de coordenadas X, Y, Z, sin embargo, la forma habitual de representación es calcular las llamadas coordenadas cromáticas x, y, definidas; el color definido se representa en el diagrama cromático CIE 1931 donde sólo tiene lugar la cromaticidad del color en cuestión. (Matiacevich, S.B., 2008) Para el diagnóstico clínico por medio de Capilaroscopia implementa el modelo cromático CIE-1931 para la determinación de la longitud de onda de los colores del espectro de luz visible, lo cual nos permite identificar patrones de color, derivados de la bioreflectancia de cada componente, identificando su longitud de onda específico, y es así como cada reacción química, mineral de transición, agente químico exógeno o microorganismo del microbioma, al tener una longitud de onda específica, emitirá un color diferente.

De acuerdo con el observador patrón, por longitud de onda, cada estructura, tejido, reacción química, etc. tienen una longitud de onda específica que emite una reflectancia y por ende, nos da un color específico; lo que determina los diferentes diagnósticos que pueden resultar, en tiempo real con el uso de la Capilaroscopia.

Un último aspecto, para lograr realizar un Diagnóstico Capilaroscópico, es la proyección para hacer un análisis de la salud ósea; Capilaroscópicamente pueden utilizarse diversas proyecciones ópticas, como se puede apreciar en la Figura 3, existen diferentes tipos de proyecciones capilaroscópicas que para el caso que nos ocupa, deberá de utilizarse una técnica que mezcle la proyección oblicua (45°) con la proyección multispectral.

Figura 3.- Diferentes tipos de proyección en la Capilaroscopia.



Fuente: Abuadili Garza V.A., 2026b y 2026d

OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

General.

Desarrollar una definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea y proponer una clasificación funcional basada en patrones capilaroscópicos derivados de la bioreflectancia tisular, que permitan evaluar la homeostasis metabólica del tejido óseo en tiempo real, de manera no invasiva y libre de radiación ionizante.

Específicos

1. Identificar y caracterizar los cuatro dominios fisiológicos fundamentales de la calidad ósea –densidad mineral ósea, microarquitectura trabecular y cortical, tasa de remodelado óseo y grado de mineralización de la matriz extracelular– mediante el análisis de patrones de bioreflectancia obtenidos por capilaroscopia digital.
2. Establecer una correlación entre las variaciones en la intensidad, distribución espacial y colorimetría de la bioreflectancia capilaroscópica y los estados funcionales de formación/resorción ósea, con base en los mecanismos fisiológicos del metabolismo mineral y la señalización endocrina (PTH, calcitonina, vitamina D).
3. Construir una matriz de correspondencia entre las longitudes de onda registradas por el modelo cromático CIE-1931 y los minerales de transición (Ca^{2+} , PO_4^{3-} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Se) implicados en la mineralización ósea, para sustentar la interpretación diagnóstica de los patrones capilaroscópicos.
4. Diseñar una clasificación progresiva de cinco fases que refleje el equilibrio dinámico entre la actividad osteoblástica y osteoclástica, integrando los cuatro patrones capilaroscópicos en un modelo evolutivo de la calidad ósea, desde la homeostasis fisiológica hasta el deterioro avanzado.

OBJETO DE ESTUDIO

El objeto de estudio es el desarrollo conceptual y metodológico de una definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea, así como la construcción de una clasificación funcional basada en patrones de bioreflectancia tisular obtenidos mediante capilaroscopia digital. Dicho objeto se aborda desde la perspectiva de la Biosemiómica Clínica Aplicada y la metodología iterativa del Sistema ATDM, integrando los determinantes fisiológicos del metabolismo óseo (densidad mineral, microarquitectura, remodelado y mineralización de la matriz) con las propiedades ópticas de

la microcirculación y los tejidos periféricos, para generar un modelo diagnóstico no invasivo que refleje en tiempo real el estado metabólico del hueso.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

Se realizó un estudio de desarrollo metodológico, analítico, transversal y observacional, orientado a establecer una definición capilaroscópica operativa y una clasificación de la calidad ósea mediante el análisis de patrones de bioreflectancia tisular. El estudio se enmarcó en los principios de la Biosemiómica Clínica Aplicada y la metodología iterativa del Sistema de Aplicación de Técnicas para el Diagnóstico Metabólico (Sistema ATDM), que combina el estudio de mecanismos funcionales de la microcirculación con los procesos fisiológicos del remodelado óseo, la densidad mineral, la microarquitectura trabecular y la mineralización de la matriz extracelular.

Población y muestra

La población estuvo constituida por participantes sometidos a una Valoración Metabólica dentro del Sistema ATDM, cuyas imágenes de capilaroscopia digital fueron almacenadas en la plataforma de Big Data del Sistema. Se incluyeron sujetos de ambos sexos, con edades comprendidas entre los 2 y 99 años, procedentes de México, Estados Unidos, Puerto Rico, Colombia, Guatemala y República Dominicana. Se seleccionaron únicamente aquellos registros que contaban con historia clínica completa, evaluación capilaroscópica digital estandarizada, evaluación metabólica integral y consentimiento informado para el uso de sus datos con fines científicos. Se excluyeron los estudios que presentaban imágenes de mala calidad, artefactos ópticos o registros incompletos que impidiesen una interpretación fiable de los patrones capilaroscópicos.

Procedimiento capilaroscópico

Las imágenes se obtuvieron mediante capilaroscopia digital de alta resolución, siguiendo el protocolo estandarizado del Sistema ATDM. Previamente al examen, los sujetos permanecieron en reposo durante 15 minutos en un ambiente con temperatura controlada (22-24 °C) para minimizar las variaciones fisiológicas de la microcirculación. Se emplearon aumentos ópticos calibrados e iluminación multiespectral, combinando una proyección oblicua a 45° con barrido espectral, para registrar la bioreflectancia tisular en condiciones de máxima resolución. Las imágenes se almacenaron sin compresión para preservar la integridad de la información cromática y morfológica.

Análisis de imágenes y correlación con dominios óseos

Cada imagen fue evaluada mediante inspección visual estructurada, identificando patrones de color, intensidad lumínica, distribución espacial y estructura de la bioreflectancia. Se construyó una matriz de correlación entre la longitud de onda registrada (según el modelo cromático CIE-1931) y los patrones cromáticos reportados para los minerales de transición (calcio, fósforo, magnesio, zinc y selenio), así como para las estructuras tisulares y celulares (osteoblastos, osteoclastos, osteocitos y matriz ósea). Dicha matriz permitió asignar a cada dominio de la calidad ósea (densidad mineral, microarquitectura, tasa de remodelado y mineralización) un perfil de bioreflectancia característico. La interpretación funcional se basó en la evidencia fisiológica del metabolismo óseo, integrando las vías de señalización RANK/RANKL/OPG, Wnt/ β -catenina y esclerostina, así como la regulación endocrina por PTH, calcitonina y vitamina D.

Construcción de la definición operativa y clasificación

Mediante un proceso iterativo propio del Sistema ATDM, se combinaron los hallazgos observacionales con el marco teórico de la calidad ósea para formular una definición capilaroscópica operativa. A partir de la correlación entre los cuatro dominios y sus correspondientes patrones de bioreflectancia, se delineó una clasificación funcional en cinco fases evolutivas, que reflejan el progresivo desequilibrio entre formación y resorción ósea. Cada fase se definió por la combinación de alteraciones en la intensidad, homogeneidad y distribución de la señal óptica, así como por la presencia o ausencia de patrones compatibles con hipermineralización, hipomineralización, actividad osteoclástica predominante o regeneración osteoblástica.

Consideraciones éticas

El estudio se condujo de acuerdo con los principios de la Declaración de Helsinki, las Buenas Prácticas Clínicas (ICH-GCP) y las normativas nacionales aplicables a la investigación con seres humanos. Todos los participantes otorgaron su consentimiento informado para el uso de sus datos en investigación científica. Los datos fueron anonimizados antes del análisis para garantizar la confidencialidad. Al tratarse de un estudio observacional con datos retrospectivos y sin intervención, se obtuvo la exención de revisión por parte del comité de ética institucional, conforme a la legislación vigente.

Consideración metodológica final

Dado que la identificación de minerales específicos mediante bioreflectancia capilaroscópica constituye un enfoque emergente, la presente investigación se concibe como un estudio de generación y validación conceptual de

biomarcadores funcionales. Por tanto, la clasificación propuesta y la definición operativa deben interpretarse como un modelo diagnóstico experimental, que requiere validación prospectiva frente a métodos de referencia (DXA, HR-pQCT, biomarcadores séricos y espectroscopía Raman) antes de su implementación en la práctica clínica habitual.

FASES DEL DESARROLLO

Este fue un estudio de desarrollo metodológico, analítico, transversal y observacional para establecer una determinación capilaroscópica de la calidad ósea utilizando patrones de bioreflectancia tisular de minerales del tejido óseo relacionados con la homeostasis metabólica. Los principios del estudio se enmarcaron en el contexto conceptual de la Biosemiótica Clínica Aplicada y el Sistema para la Aplicación de Técnicas para el Diagnóstico Metabólico (Sistema ATDM), que combinó el análisis de mecanismos funcionales de la microcirculación con mecanismos fisiológicos de remodelación ósea, densidad mineral ósea, microarquitectura trabecular y mineralización de la matriz extracelular.

La población incluyó participantes sometidos a una Valoración Metabólica donde mediante la metodología iterativa del sistema ATDM se revisaron los datos y en específico las imágenes de Capilaroscopia guardadas en la plataforma de Big Data del Sistema ATDM, los participantes fueron de ambos sexos con una edad entre los 2 a 99 años, revisando las Valoraciones Metabólicas de México, Estados Unidos, Puerto Rico, Colombia, Guatemala y República Dominicana. Solo se incluyeron historias clínicas completas, evaluación capilaroscópica digital estandarizada, evaluación metabólica completa y consentimiento para usar la información en un contexto científico. Se excluyeron estudios con imágenes de mala calidad, artefactos ópticos y registros incompletos que no permitieron una interpretación adecuada de los patrones capilaroscópicos.

Las imágenes se obtuvieron mediante capilaroscopia digital de alta resolución utilizando el protocolo de ese Sistema ATDM. Antes del examen, los sujetos descansaron aproximadamente 15 minutos en un medio controlado por temperatura (22–24 °C) para reducir las diferencias biológicas en la microcirculación. Se emplearon aumentos ópticos estandarizados e iluminación multiespectral para registrar la bioreflectancia tisular. Se tomaron imágenes sin comprimir para preservar la mayor resolución posible disponible y para el examen morfológico.

Cada imagen fue evaluada mediante una técnica estándar de inspección visual que identificó patrones de color, intensidad de luz, distribución espacial y estructura de la bioreflectancia. La presencia de señales ópticas consistentes con la distribución tisular de minerales esenciales así como de transición también se considera como un indicador de la homeostasis ósea en este análisis. Como parte de la evolución metodológica, se construyó una matriz de correlación entre la longitud de onda registrada y los patrones cromáticos reportados para hacer la distinción inicial de la bioreflectancia en relación con la función del tejido óseo. Así se establece que esta correlación es una propuesta metodológica cuya significancia diagnóstica debe ser verificada por estudios adicionales bajo análisis adicionales con procedimientos analíticos de referencia.

Para establecer propositivamente la definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea, se elaboró el marco conceptual que combinó signos fisiológicos de remodelación ósea e interpretación funcional a través de resultados de capilaroscopia digital en una metodología. Por primera vez, se realizó una evaluación de la literatura sobre los componentes determinantes de la calidad ósea y se identificaron los cuatro dominios fundamentales, densidad mineral ósea, microarquitectura trabecular y cortical, tasa de remodelación ósea y niveles de mineralización de la matriz ósea. Luego, los efectos combinados se correlacionaron con los patrones de bioreflectancia registrados durante el estudio capilaroscópico, aplicando metodologías de Biosemiótica Clínica Aplicada (Abuadili Garza V.A. 2026a) y el Sistema ATDM, para crear criterios morfológicos que pudieran ser validados para cada dominio evaluado.

Finalmente, se estableció el consenso del método de enfoque y el análisis comparativo de las estructuras ópticas para desarrollar una definición operativa de la calidad ósea, que se enmarcó como el estado funcional del tejido óseo deducido de la medición capilaroscópica de la bioreflectancia tisular basada en la asociación entre densidad mineral, organización microestructural, la relación de formación ósea versus resorción, y el grado de mineralización de la matriz extracelular, creando una que pudiera ser identificada en una secuencia de fases evolutivas alineadas con un modelo fisiopatológico de remodelación ósea.

El estudio se realizó con la guía de la Declaración de Helsinki, las Buenas Prácticas Clínicas (ICH-GCP) y las regulaciones nacionales pertinentes sobre la investigación con sujetos humanos. Se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes para el uso de información relevante con fines científicos. Los datos de los participantes fueron anonimizados antes del análisis para garantizar la confidencialidad.

Consideración metodológica clave: dado que se pueden identificar minerales específicos utilizando la bioreflectancia

capilaroscópica como un enfoque emergente, la investigación propuesta también es un estudio sobre la generación y validación de biomarcadores funcionales. Por lo tanto, la clasificación propuesta debe interpretarse como un modelo de diagnóstico experimental que requiere validación prospectiva frente a métodos de referencia antes de su implementación en la práctica clínica.

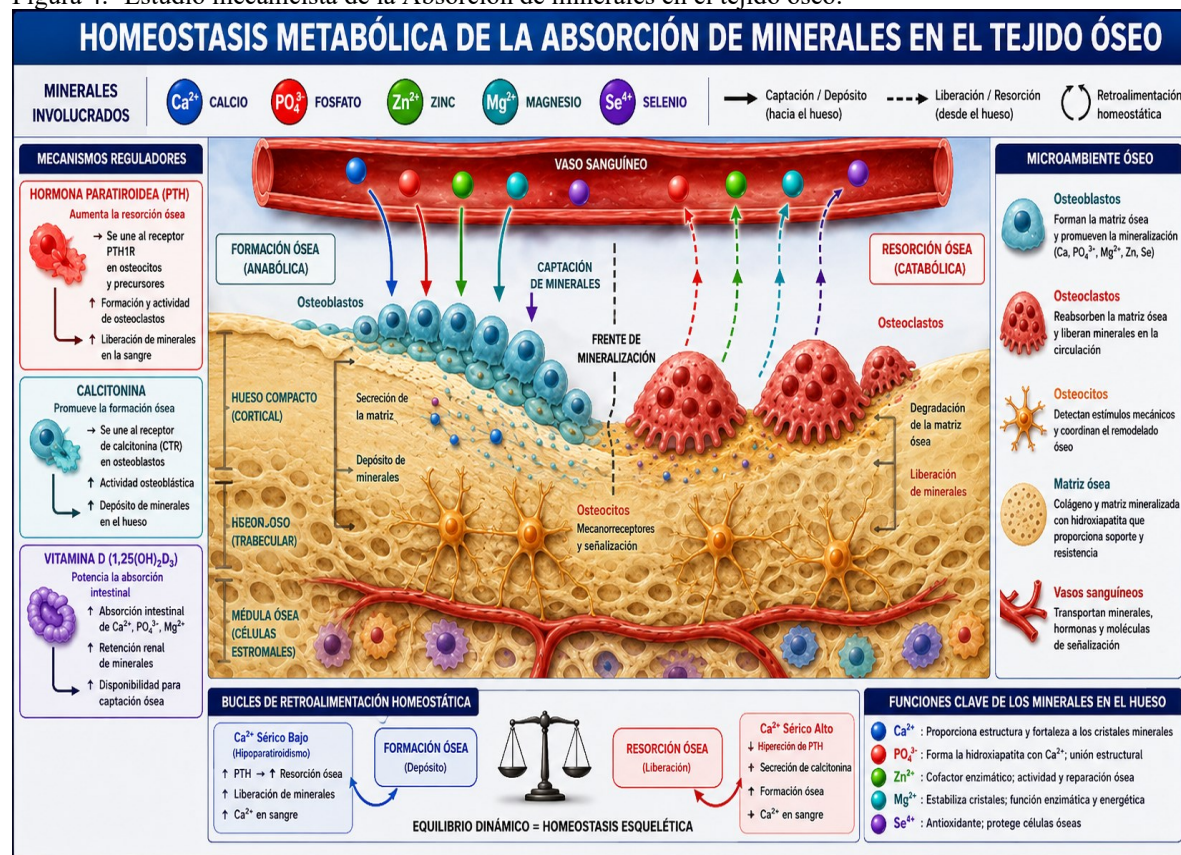
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La homeostasis metabólica del tejido óseo es un proceso dinámico, en el cual el equilibrio entre la absorción, deposición y resorción de minerales es regulado por las acciones coordinadas de osteoblastos, osteoclastos y osteocitos, y regulado por la hormona paratiroidea (PTH), la calcitonina y la vitamina D activa. Como se muestra en la figura 4:

- Calcio (Ca^{2+})
- Fósforo (PO_4^{3-})
- Zinc (Zn^{2+})
- Magnesio (Mg^{2+})
- Selenio (Se)

Todos estos minerales están involucrados integralmente en la mineralización ósea, la formación de hidroxiapatita, la actividad enzimática, la protección antioxidante y la remodelación ósea. La formación ósea ocurre cuando la captación de minerales supera su liberación; cuando la actividad metabólica lo dicta, estos minerales deben ser movilizados hacia la circulación. Es uno de los procesos clave que preservan la integridad estructural y funcional del esqueleto, así como el mantenimiento de la homeostasis mineral sistémica.

Figura 4.- Estudio mecanicista de la Absorción de minerales en el tejido óseo.



Fuente: Creación propia.

Un uso práctico de la representación mecanicista de la homeostasis metabólica de la absorción de minerales en el tejido óseo y el comportamiento capilaroscópico observado proporciona estas definiciones operativas capilaroscópicas de la salud ósea: la salud ósea se refiere a un estado operativo en el que la microcirculación capilar local de las células suministra eficazmente al tejido calcio, fósforo, magnesio, zinc y selenio, proporcionando un equilibrio dinámico entre la formación y la resorción ósea, al tiempo que predomina la actividad osteoblástica sobre la osteoclástica, el mantenimiento de la mineralización de la matriz extracelular y la ausencia de cambios microvasculares consistentes con una deficiencia gradual de asimilación mediada por minerales.

En términos de Capilaroscopia, la Calidad ósea se describe como un conjunto de patrones que identifican una perfusión tisular adecuada, mediante una bioreflectancia uniforme, que deberá estar en consonancia con la incorporación adecuada de minerales y la ausencia de patrones degenerativos debido a la desmineralización progresiva.

Esta definición entrelaza la regulación endocrina de la hormona paratiroidea (PTH), la calcitonina y la vitamina D y la co-localización fisiológica de osteoblastos, osteocitos y osteoclastos con su papel en la remodelación ósea moderna, donde la homeostasis mineral está ligada a un intercambio continuo con la comunicación celular y las modificaciones metabólicas.

En ese orden de ideas, para hacer un adecuado diagnóstico de la Calidad Ósea, mediante la Capilaroscopia, en la Figura 5 establecemos los 4 patrones capilaroscópicos que se deben de evaluar:

Figura 5.- Patrones capilaroscópicos e evaluar en la Calidad Ósea.

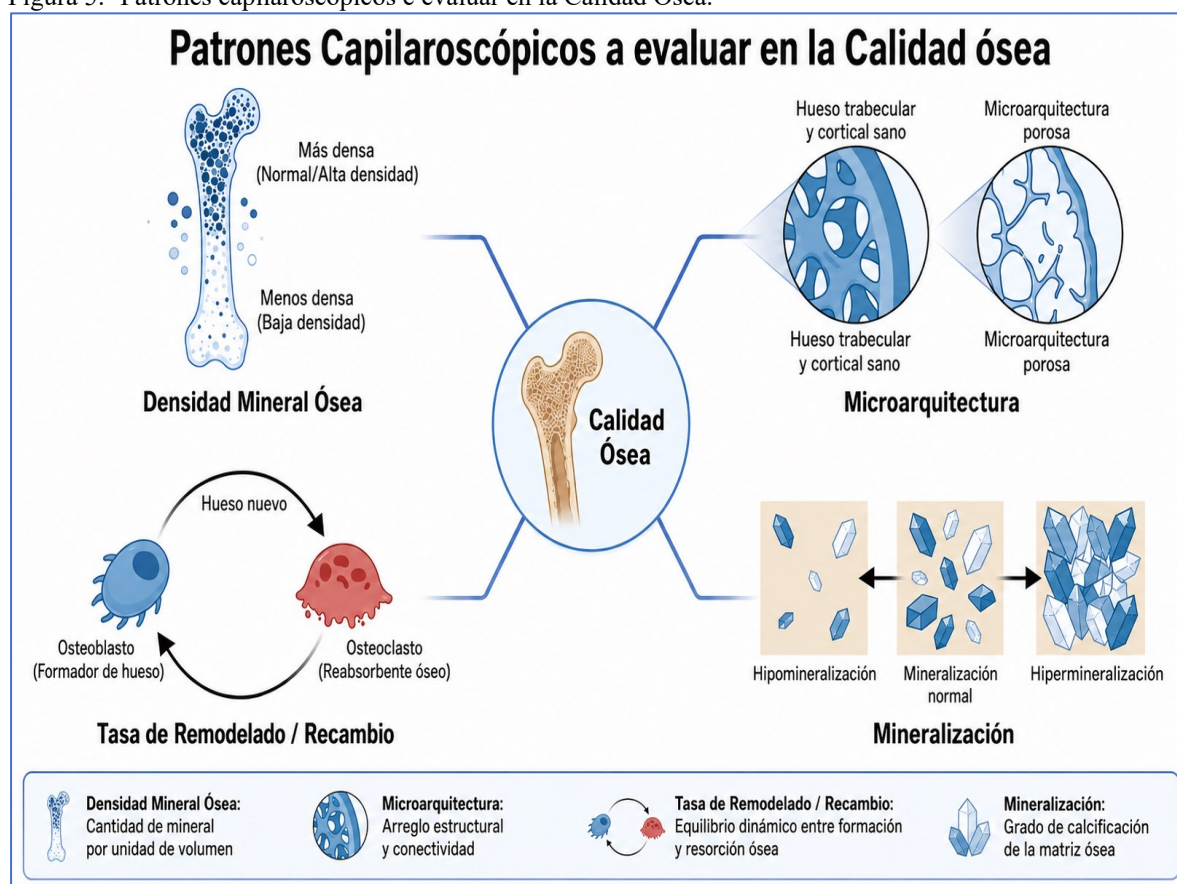


Figura propia

Bajo esta propuesta y siguiendo el orden de ideas establecidas en la figura anterior, es que ahora describiremos los cuatro patrones capilaroscópicos que conforman la definición capilaroscópica operativa de calidad ósea, al tenor de los siguientes considerandos:

1. Densidad Mineral Ósea:

Los hallazgos de este estudio indicaron que, la densidad mineral ósea es uno de los principales componentes que se pueden evaluar mediante el análisis capilaroscópico de la bioreflectancia del tejido. En la Figura 6 se identifica la densidad mineral ósea mediante una proyección oblicua (45°).

Figura 6.- Proyección Capilaroscópica oblicua (45°) para la observación de la densidad mineral ósea.

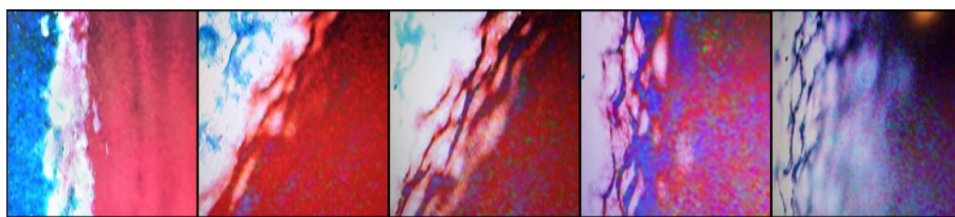


Imagen obtenida de la Plataforma Big Data del Sistema ATDM.

En individuos con mejor calidad ósea, se exhibieron patrones de bioreflectancia homogéneos donde el componente mineral está distribuido homogéneamente y la señal óptica está organizada uniformemente, pero en el caso donde el hueso era de menor calidad, la intensidad de la bioreflectancia disminuía gradualmente y manifestaba una mayor heterogeneidad estructural del tejido. Como se observa en la Figura 7, estas alteraciones serán progresivas y degenerativas correspondientes con una mineralización reducida de la matriz ósea y la pérdida gradual de minerales, un proceso reportado consistentemente en el inicio de la osteopenia y la osteoporosis. (Compston, J. E., McClung, M. R., & Leslie, W. D., 2019)

Figura 7.- Progresión de la densidad ósea desde una homogeneidad hacia una heterogeneidad.

ALTERACIÓN DE LA DENSIDAD ÓSEA



HOMOGENEIDAD ÓSEA

HETEROGENEIDAD ÓSEA



La representación esquemática de esta tendencia mostró una transición de un hueso rico en minerales a uno pobre en minerales, indicando que la Capilaroscopia puede detectar cambios funcionales antes de un cambio estructural aumentado.

Aunque la densidad mineral ósea todavía se evalúa mediante absorciometría de rayos X de energía dual (DXA), (NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy., 2001) los hallazgos revelan que el análisis de la bioreflectancia podría representar un biomarcador adicional del metabolismo óseo y es un posible candidato para una validación adicional con densitometría y tomografía de alta resolución.

2. Microarquitectura ósea.

El segundo patrón corresponde a la disposición de la microarquitectura trabecular y cortical. Con la inspección visual, se podían identificar patrones compatibles con una red trabecular ordenada y continua en los pacientes con mejor calidad ósea, mientras que en etapas posteriores se observaban modificaciones compatibles con una disminución de la conectividad trabecular, adelgazamiento cortical y aumento de los espacios intertrabeculares. (Bouxsein, M. L., 2003)

Estas modificaciones se asociaban con una mayor heterogeneidad en la distribución de la bioreflectancia, indicando el remodelado continuo del microambiente tisular. La pérdida de microarquitectura es uno de los factores más fundamentales que influyen en el riesgo de fractura, independientemente de la densidad mineral ósea. (Seeman, E., & Delmas, P. D., 2006)

Figura 8.- Imagen capilaroscópica de la microarquitectura ósea, donde se observan las estructuras trabecular y cortical.

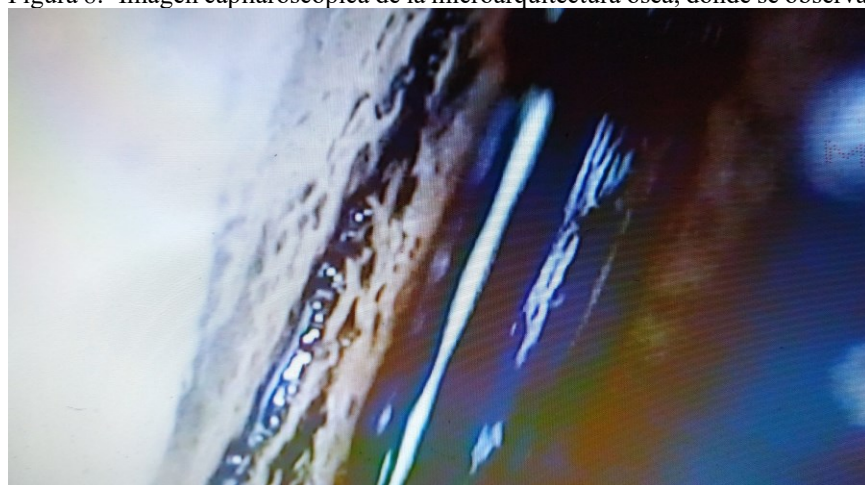


Imagen obtenida de la Plataforma Big Data del Sistema ATDM.

Este estudio reveló una progresión de perfiles ópticos compatibles con la degradación estructural que describió el HR-pQCT, indicando que la capilaroscopia puede ofrecer información funcional sobre el estado del tejido óseo. Sin embargo, necesita ser validada en estudios comparativos con técnicas de imagen tridimensionales. (Sims, N. A., & Martin, T. J., 2010)

3. Tasa de remodelación ósea:

El análisis Capilaroscópico permitió identificar un tercer patrón relacionado con la dinámica del remodelado óseo. La representación imagenológica evidenció el equilibrio fisiológico entre la actividad osteoblástica y osteoclástica, condición indispensable para mantener la homeostasis del tejido óseo. (Sims, N. A., & Martin, T. J., 2010)

Como podrá observarse en la Figura 9 en donde se magnifica la imagen de Capilaroscopia a 1200x en una proyección oblicua a 45° multiespectral, conforme avanza el deterioro óseo se observaron modificaciones compatibles con un predominio de los procesos de resorción sobre la formación ósea, reflejándose en cambios progresivos de la bioreflectancia tisular, así mismo se logró como hallazgo adicional identificar los osteoclastos y el proceso de resorción activo.

Figura 9.- Imagen de Capilaroscopia que determina el proceso de resorción ósea y la actividad osteoclástica.

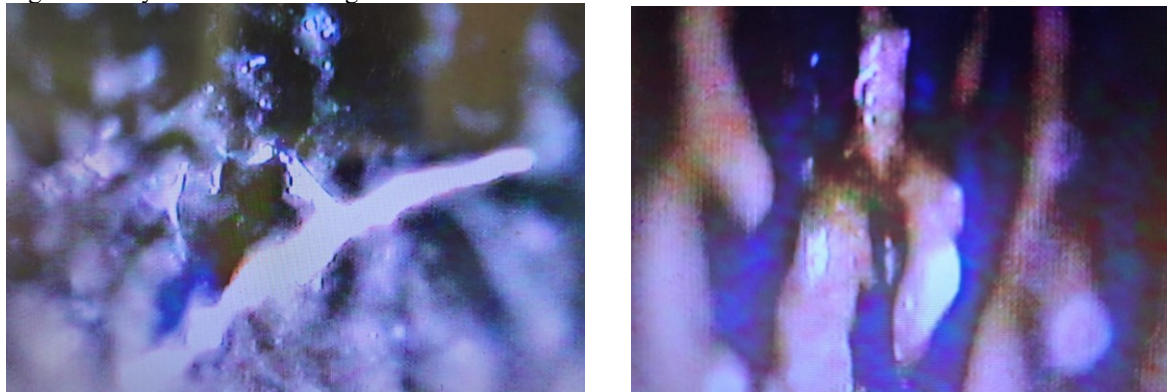


Imagen obtenida de la Plataforma Big Data del Sistema ATDM.

Así mismo, es posible identificar también la actividad osteoblástica y la regeneración ósea modulada por osteoblastos, como podemos observar en la Figura 10 en la que se identifica la actividad osteoblástica para la regeneración de los

procesos de remodelación ósea, donde en la imagen A se observa la imagen magnificada de Capilaroscopia a 1200x en proyección oblicua a 45° en donde se determina la acción de osteoblastos para regeneración ósea, y en la imagen B a 500x donde se observa el proceso de regeneración ósea en las trabéculas óseas.

Figura 10 A y B.- Proceso de regeneración de la trabécula ósea.



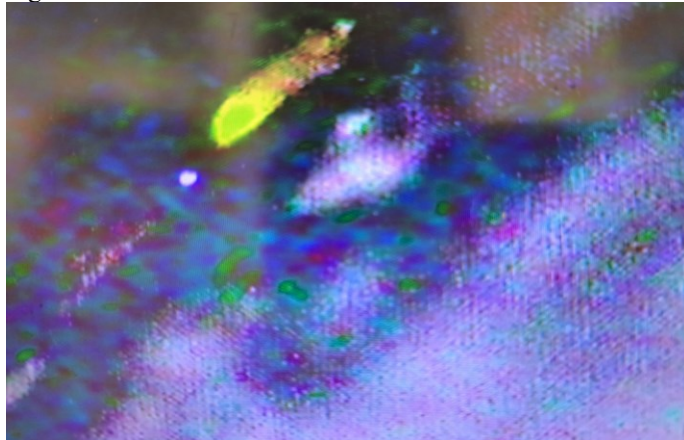
Imágenes obtenidas de la Plataforma Big Data del Sistema ATDM.

Los resultados obtenidos son consistentes con el conocimiento actual del remodelado óseo, donde un incremento sostenido de la actividad osteoclástica genera pérdida de masa ósea y deterioro estructural, mientras que el aumento en la actividad osteoblástica genera aumento de la masa ósea y remodelación estructural. (Kenkre, J. S., & Bassett, J. H. D., 2018) La evaluación capilaroscópica podría representar una aproximación funcional para estudiar indirectamente este proceso dinámico, aunque su utilidad diagnóstica deberá establecerse mediante correlación con biomarcadores séricos como CTX, PINP, osteocalcina y fosfatasa alcalina ósea.

4. Mineralización de la matriz ósea

El cuarto patrón evaluado correspondió al grado de mineralización de la matriz ósea. La figura 11 nos demuestra los procesos de estados compatibles con hipomineralización hacia mineralización fisiológica y posteriormente hacia patrones compatibles con hipermineralización, conforme a una bioreflectancia de conformidad con la longitud de onda de cada mineral de transición. (Abuadili Garza V.A., 2026b)

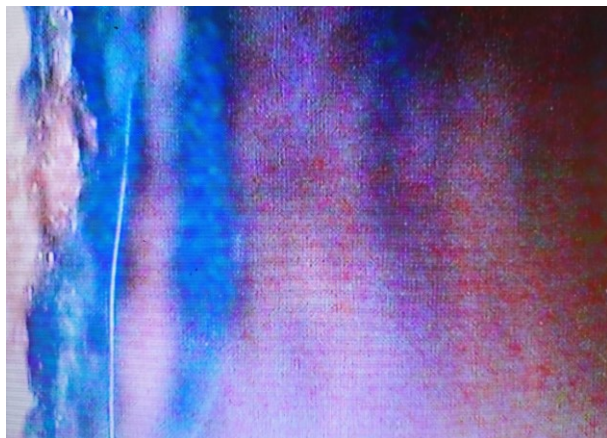
Figura 11.- Identificación de la mineralización de la matriz ósea por minerales de transición.



Así mismo, con este patrón capilaroscópico podemos identificar las variaciones que se asocian con cambios en la intensidad y distribución espacial de la bioreflectancia del hueso compacto y trabéculas óseas, sugiriendo que las propiedades ópticas del tejido podrían modificarse a medida que cambia la composición mineral de la matriz extracelular. La mineralización representa un componente fundamental de la resistencia mecánica del hueso y depende de la adecuada incorporación de calcio, fósforo y otros minerales esenciales en la matriz de colágeno.

Como podrá observarse en la Figura 12 al realizar una proyección oblicua (45°) de tipo multispectral, en la imagen A podemos ver la bioreflectancia en las zonas de osteopenia/osteoporosis, donde existen los cambios en la mineralización ósea, y en la Imagen B podemos identificar aquellos patrones de bioreflectancia de los minerales tanto en la trabécula como en los espacios de degeneración ósea.

Figura 12 A y B.- Bioreflectancia de incorporación de minerales de transición en el hueso compacto.



Imágenes obtenidas de la plataforma Big Data del Sistema AIDM.

Los resultados obtenidos apoyan la hipótesis de que la bioreflectancia capilaroscópica podría reflejar modificaciones en el proceso de mineralización; sin embargo, esta relación debe confirmarse mediante técnicas de referencia como la espectroscopía Raman, micro-CT y la histomorfometría ósea cuantitativa antes de establecer su aplicación clínica.

DISCUSIÓN:

La calidad ósea ha pasado de ser un concepto abarcador basado únicamente en la densidad mineral ósea (DMO) a ser una construcción multifactorial que tiene en cuenta la composición mineral, la microarquitectura trabecular y cortical, la remodelación ósea y las propiedades biomecánicas de la matriz extracelular. Actualmente, se ha establecido que la densidad mineral ósea (DMO) contribuye solo entre el 60-70% de su resistencia mecánica, mientras que el resto depende de la organización estructural, el recambio tisular y el grado de mineralización de la matriz. (Seeman & Delmas, 2006) En este contexto, la definición capilaroscópica operativa descrita en este estudio es un modelo funcional, ya que intentamos aplicar estos principios como construcciones metabólicas in vivo, a través de la microcirculación, y puede ser una medida del estado metabólico del tejido óseo. Aunque se ha demostrado que la capilaroscopia es aplicable a la patología microvascular y del tejido conectivo, su uso para la evaluación del metabolismo óseo es incipiente y merece un apoyo experimental intenso (Bouxsein, 2003; Compston et al., 2019).

El primer patrón es parte de la definición operativa y representa la densidad mineral ósea, el primer marcador conocido para cuantificar el riesgo de fractura. La densidad mineral denota la cantidad de hidroxapatita en el volumen, pero no permite estimar las tres dimensiones/magnitud del tejido ni los cambios inducidos por la remodelación. Los hallazgos indicaron que los cambios en la bioreflectancia pueden ocurrir en asociación con cambios funcionales asociados con la adición o pérdida de minerales en la remodelación ósea. (Kanis, J.A., Cooper, C., Rizzoli, R., & Reginster, J.Y., 2019) Esto es fisiológicamente posible ya que las características ópticas del tejido son sensibles a la composición molecular y al índice de refracción de la matriz extracelular, pero actualmente no hay hallazgos que demuestren que la capilaroscopia pueda cuantificar directamente la densidad mineral ósea. Por lo tanto, el potencial diagnóstico del patrón debe confirmarse mediante correlación con la absorciometría dual de rayos X (DXA), que actualmente representa el estándar de oro para la evaluación de la masa ósea (Compston, J.E., McClung, M.R., & Leslie, W.D., 2019).

La segunda parte de la definición operativa representa la microarquitectura ósea, que ahora se considera ampliamente como uno de los principales determinantes de la resistencia mecánica ósea. Varios estudios sugieren que individuos con valores de DMO similares tienen tasas de fractura muy diferentes debido a diferencias en la conectividad trabecular, el grosor cortical y la organización espacial del tejido óseo. (Bouxsein, M.L., 2003) En nuestro modelo, cambios modestos en la bioreflectancia podrían representar diferentes indicadores funcionales de daño microestructural, particularmente en períodos de transición entre osteopenia y osteoporosis. Fisiológicamente, esta hipótesis se alinea estrechamente con las interacciones de la microcirculación, la angiogénesis y la remodelación ósea y dependen del acoplamiento funcional de osteoblastos, osteoclastos, osteocitos y endotelio vascular. Sin embargo, la relación entre los patrones ópticos descritos y la microarquitectura necesita establecerse a través de estudios comparativos con tomografía computarizada cuantitativa periférica de alta resolución (HR-pQCT) y análisis histomorfométricos. (Seeman, E., & Delmas, P. D., 2006)

El tercer patrón es el segundo patrón, que se relaciona con la tasa a la que se remodela el hueso, mostrando un patrón dinámicamente recíproco de formación osteoblástica y resorción osteoclástica. Múltiples mecanismos endocrinos y moleculares regulan este equilibrio, sobre todo a través de las vías RANK/RANKL/OPG, Wnt/ β -catenina, hormona paratiroidea, calcitonina y vitamina D. Desde el punto de vista fisiológico, la actividad osteoclástica a lo largo del

tiempo es uno de los mecanismos impulsores detrás del surgimiento de la osteoporosis. (Sims, N.A., & Martin, T.J., 2010) El cambio en la bioreflectancia en la clasificación propuesta se percibió como una manifestación indirecta potencial de este desequilibrio metabólico. Está en línea con biomarcadores funcionales, pero la aplicación de la metodología en la práctica clínica se basará en la interacción reproducible de biomarcadores de remodelación sérica como CTX, PINP, osteocalcina y fosfatasa alcalina específica del hueso. Por lo tanto, este estudio está destinado a ser una propuesta de prueba metodológica para la generación de hipótesis más que una verificación diagnóstica real. (Kenkre, J.S., & Bassett, J. H.D., 2018)

Finalmente, el cuarto patrón incorpora el nivel de mineralización de la matriz ósea, una parte esencial de las propiedades biomecánicas relacionadas con el esqueleto. El proceso de mineralización adecuado depende de la deposición bien organizada de cristales de hidroxiapatita sobre la matriz de colágeno tipo I, así como de calcio, fósforo, magnesio, zinc y otros oligoelementos pertinentes para el desarrollo del tejido óseo. (Abuadili Garza V.A., 2026) En el estudio actual, los cambios observados en la intensidad y la distribución de la bioreflectancia se interpretaron como congruentes con estados de hipomineralización, mineralización fisiológica e hipermineralización. (Boskey A.L., 2013) Biofisiológicamente, podemos inferir que los cambios en la composición mineral modulan las propiedades ópticas del tejido, pero aún no se ha realizado ninguna medición de estas alteraciones utilizando capilaroscopia. Esta proposición está, por lo tanto, precluida a menos que la evidencia de espectroscopía Raman, micro-CT, espectroscopía infrarroja y finalmente análisis histológicos cuantitativos puedan utilizarse para legitimarla en el diagnóstico del metabolismo mineral óseo. (Faibish, D., Gomes, A., Boivin, G., Binderman, I., & Boskey, A.L., 2005)

En general, la definición capilaroscópica operativa de la integridad ósea introducida en la presente revisión ofrece un nuevo concepto para fusionar información dependiente biomecánicamente de la microcirculación con los procesos fisiológicos responsables de las propiedades mecánicas del tejido óseo. (Cruz Monrroy V., Castellanos Gordillo L.R: García Suchil M. & Abuadili Garza V.A., 2026) Su contribución radica principalmente en mover el análisis de la calidad ósea de una consideración puramente estructural a una perspectiva metabólica y dinámica, en línea con la biología metabólica y biológica humana para la remodelación ósea. (Abuadili Garza V.A., 2026b) Sin embargo, la correlación entre los patrones de bioreflectancia y la calidad ósea aún no se ha demostrado a partir de ensayos de validación clínica, por lo que nuestros hallazgos pueden considerarse exploratorios también. La siguiente fase de la investigación debería investigar la reproducibilidad de la clasificación, su relación con los criterios diagnósticos establecidos, así como qué tan bien la clasificación predice resultados clínicamente relevantes, incluida la pérdida acelerada del tamaño óseo o la susceptibilidad a fracturas.

CONCLUSIÓN

Al utilizar este análisis en el presente estudio, logramos proporcionar una definición capilaroscópica operativa de la calidad ósea derivada de los cuatro elementos fisiológicos fundamentales del tejido óseo, que incluyen la densidad mineral ósea, la microarquitectura trabecular y cortical; la tasa de remodelación ósea y el grado de mineralización de la matriz extracelular. La incorporación de estos cuatro patrones en un modelo funcional permitió una clasificación capilaroscópica de la calidad ósea en cinco etapas evolutivas con el fin de conceptualizar el metabolismo óseo como un proceso fluido y dinámico que va más allá del estudio de la estructura hacia una visión holística de la homeostasis mineral y la remodelación tisular.

Esta hipótesis puede representar un enfoque novedoso para la comprensión fisiopatológica del tejido óseo basado en biomarcadores funcionales derivados de la capilaroscopia. La capilaroscopia digital con datos de bioreflectancia tisular puede ser capaz de detectar patrones que son consistentes a lo largo del tiempo y dentro del cuerpo humano en las diversas fases de la calidad ósea y podría representar un método alternativo y efectivo para el estudio del metabolismo óseo.

A diferencia de las técnicas tradicionales que dependen de la radiación ionizante, incluyendo la absorciometría dual de rayos X (DXA) o la tomografía computarizada cuantitativa, la capilaroscopia es un proceso no invasivo que tiene la ventaja de la reproducibilidad y la limitación de la radiación, y por lo tanto puede actuar como un enfoque de apoyo adicional para el monitoreo a largo plazo de los pacientes y la detección temprana de cambios en su remodelación ósea.

Sin embargo, dado que la relación de los patrones de bioreflectancia capilaroscópica con las alteraciones estructurales en el tejido óseo es un tema de investigación emergente, la consideración de la clasificación propuesta y la definición operativa debe hacerse en el contexto de un modelo diagnóstico experimental, para ser validado a través de estudios prospectivos, multicéntricos y comparativos con técnicas de referencia, incluyendo DXA, HR-pQCT, biomarcadores de remodelación ósea y enfoques espectroscópicos para la caracterización mineral.

Si se confirma, el mecanismo para este enfoque podría expandir las perspectivas para la evaluación funcional del tejido óseo al proporcionar datos metabólicos en tiempo real, in vivo, sin procedimientos invasivos y sin exposición a radiación ionizante, ayudando así en el desarrollo de estrategias diagnósticas más tempranas, seguras y orientadas a la medicina de precisión.

REFERENCIAS

1. Abuadili Garza V.A. (2025)a. Entendiendo las Diez Causas que Originan Todas las Enfermedades. (2025). *IECCMEXICO*, 3(1). <https://doi.org/10.64784/080>
2. Abuadili Garza, V. A. (2025)b. Capilaroscopia, una nueva manera de entender la Salud humana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(4), 11474-11517. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19752
3. Abuadili Garza, V. A. (2025)c. Capilaroscopia, La Herramienta Diagnóstica De Una Nueva Medicina Individualizada Basada En Evidencias. *Sapiens in Medicine Journal*, 3(3), 1-28. <https://doi.org/10.71068/gp4gja29>
4. Abuadili Garza, V.A. (2025)d. Metodología Iterativa del Sistema de Aplicación de Técnicas para el Diagnóstico Metabólico (Sistema ATDM). *Atlas Research Journal*, 3(1), 67-96. <https://doi.org/10.65305/arj.v3n1.2025.32>
5. Abuadili Garza, V.A. (2025)e. Indicadores de diagnóstico clínico del sistema de aplicación de técnicas para el diagnóstico metabólico (Sistema ATDM). *Arcana Scientific Journal*, 3(1), 46-74. <https://doi.org/10.65305/asj.v3n1.2025.30>
6. Abuadili Garza, V. A. (2026)a. Biosemiótica clínica aplicada, propuesta conceptual de los componentes pre-efecto utilizando el sistema de aplicación de técnicas para el diagnóstico metabólico (sistema ATDM). *Emergentes - Revista Científica*, 6(1), 716-763. <https://doi.org/10.60112/erc.v6.i1.707>
7. Abuadili Garza, V. A. (2026)b. Determinación capilaroscópica de minerales de transición en los tejidos. *Impact Research Journal*, 4(2), 53-76. <https://doi.org/10.63380/irj.v4n2.2026.395>
8. Abuadili Garza, V. A. (2026)c. Estudio del Hambre Oculta Desde la Perspectiva Causa Efecto; Cuando el Exceso, Esconde la Escasez. *Ibero Ciencias - Revista Científica Y Académica - ISSN 3072-7197*, 5(1), 148-171. <https://doi.org/10.63371/ic.v5.n1.a641>
9. Abuadili Garza, V.A.; Sánchez Olivera, F. & Escalante Mendoza, D. (2026). Construcción heurística en la salud digital de la plataforma del sistema de aplicación de técnicas para el diagnóstico metabólico (Sistema ATDM). (2026). *Revista Ingenio Global*, 5(1), 51-80. <https://doi.org/10.62943/rig.v5n1.2026.449>
10. Amarnath, S. S., Kumar, V., & Das, S. L. (2023). Classification of Osteoporosis. *Indian journal of orthopaedics*, 57(Suppl 1), 49-54. <https://doi.org/10.1007/s43465-023-01058-3>
11. Boskey, A. L. (2013). Bone composition: Relationship to bone fragility and antiosteoporotic drug effects. *BoneKey Reports*, 2, 447. <https://doi.org/10.1038/bonekey.2013.181>
12. Buxsein, M. L. (2003). Bone quality: Where do we go from here? *Osteoporosis International*, 14(Suppl. 5), S118-S127. <https://doi.org/10.1007/s00198-003-1489-x>
13. Canjura Guzmán, R.A. (2014). Determinación de compuestos de glicación avanzada (AGE) en tejido humano por método no invasivo de espectroscopia óptica. TESIS DE LICENCIATURA. Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Escuela de Física. Universidad de El Salvador. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/11905>

14. Colmenares Roldán, Lina María, Velásquez Franco, Carlos Jaime, & Mesa Navas, Miguel Antonio. (2016). Capilaroscopia en esclerosis sistémica: una revisión narrativa de la literatura. *Revista Colombiana de Reumatología*, 23(4), 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.rcreu.2016.06.005>
15. Compston, J. E., McClung, M. R., & Leslie, W. D. (2019). Osteoporosis. *The Lancet*, 393(10169), 364–376. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32112-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32112-3)
16. Cruz Monrroy, V. ., García Súchil, M. ., Castellanos Gordillo, L. D. R. ., & Abuadili Garza, V. A. . (2026). Estudio biosemiómico de la alteración de la homeostasis de los minerales de transición, basado en la metodología iterativa del SISTEMA ATDM.(Parte 1.- La Homeostasis de los minerales de transición). *Prosperus*, 3(3), 100-126. <https://doi.org/10.63535/jw2q7k11>
17. Faibish, D., Gomes, A., Boivin, G., Binderman, I., & Boskey, A. L. (2005). Infrared imaging of calcified tissue in bone biopsies from adults with osteomalacia. *Bone*, 36(1), 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.08.019>
18. García Súchil, M., Cruz Monrroy, V., & Castellanos Gordillo, L. D. R. (2026). Evolución Cronológica del Sistema ATDM y su Consolidación Científica en el Diagnóstico Preventivo - Predictivo: Análisis Integral 2008–2025. *Emergentes - Revista Científica*, 5(4), 1078–1112. <https://doi.org/10.60112/erc.v5.i4.649>
19. Gómez, M., Urquijo, P., Mela, M. y Pittana, P. (2011). Capilaroscopia periungueal. Método de estudio e indicaciones. En *Archivo Argentino en Dermatología*. 1(61):197-202. (Versión impresa)
20. Hadjidakis, D. J., & Androulakis, I. I. (2006). Bone remodeling. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1092(1), 385–396. <https://doi.org/10.1196/annals.1365.035>
21. Kanis, J. A., Cooper, C., Rizzoli, R., & Reginster, J. Y. (2019). European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women. *Osteoporosis International*, 30(1), 3–44. <https://doi.org/10.1007/s00198-018-4704-5>
22. Keen MU, Barnett MJ, Anastasopoulou C. Osteoporosis in Females. [Updated 2025 Jun 29]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559156/>
23. Kenkre, J. S., & Bassett, J. H. D. (2018). The bone remodelling cycle. *Annals of Clinical Biochemistry*, 55(3), 308–327. <https://doi.org/10.1177/0004563218759371>
24. Li, M., Yu, B., Yang, H., He, H., Li, N., Lv, A., Zhou, X., & Gao, R. (2024). Trends and hotspots in research on osteoporosis and nutrition from 2004 to 2024: a bibliometric analysis. *Journal of health, population, and nutrition*, 43(1), 204. <https://doi.org/10.1186/s41043-024-00690-5>
25. Martin, T. J., & Sims, N. A. (2008). Bone remodeling: Multiple cellular interactions required for coupling of bone formation and resorption. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 19(5), 444–451. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2008.07.016>
26. Matiacevich, S.B. (2008). Caracterización y fotoestabilidad de los compuestos Fluorescentes y pardos generados en reacciones enzimáticas y no enzimáticas. Implicadas en la conservación de materiales orgánicos. TESIS DOCTORAL. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
27. Mellibovsky Saidler L & Díez Pérez A. (2006). Qué significa la calidad ósea. *Semin Fund Esp Reumatol*.;7:165-76. [https://doi.org/10.1016/S1577-3566\(06\)75096-5](https://doi.org/10.1016/S1577-3566(06)75096-5)
28. NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy. (2001). *Osteoporosis prevention, diagnosis, and therapy*. *JAMA*, 285(6), 785–795. <https://doi.org/10.1001/jama.285.6.785>

29. Real-Peña, E. (2012). Identificación de la composición de tejidos biológicos a partir de medidas de reflectancia difusa. TESIS DE LICENCIATURA. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria.
30. Santos, L., Elliott-Sale, K. J., & Sale, C. (2017). Exercise and bone health across the lifespan. *Biogerontology*, 18(6), 931–946. <https://doi.org/10.1007/s10522-017-9732-6>
31. Seeman, E., & Delmas, P. D. (2006). Bone quality—the material and structural basis of bone strength and fragility. *New England Journal of Medicine*, 354(21), 2250–2261. <https://doi.org/10.1056/NEJMr053077>
32. Sims, N. A., & Martin, T. J. (2010). Cellular and molecular mechanisms of bone remodeling. *Journal of Biological Chemistry*, 285(33), 25103–25108. <https://doi.org/10.1074/jbc.R109.041087>
33. Siddiqui, J. A., & Partridge, N. C. (2016). Physiological bone remodeling: Systemic regulation and growth factor involvement. *Physiology*, 31(3), 233–245. <https://doi.org/10.1152/physiol.00061.2014>
34. Xie, Y., Chen, C., Stevenson, D. A., Aghajanian, P., & Ritchie, R. O. (2020). Osteoclasts provide coupling signals to osteoblast lineage cells through multiple mechanisms. *Annual Review of Physiology*, 82, 507–529. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-021119-034425>
35. Wang, L., You, X., Zhang, L., Zhang, C., & Zou, W. (2022). Mechanical regulation of bone remodeling. *Bone Research*, 10, 16. <https://doi.org/10.1038/s41413-022-00190-4>
36. World Health Organization (1994). Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. Geneva.

CONFLICTO DE INTERÉS:

El autor reporta que no hay ningún conflicto de interés en el presente artículo.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR:

Médico Cirujano egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Licenciado en Derecho por la Universidad Mexicana, Master in Health and Business Administration, Doctorado Honoris Causa por su investigación sobre las 10 causas de las enfermedades y nuevas técnicas para el diagnóstico metabólico.