

REVISIÓN

Arquitectura y organización interna del hueso ante la aplicación de diferentes estímulos mecánicos

J. Ríos-Díaz*, F.J. Linares Hevilla, J.J. Martínez-Payá,
M.Á. Palomino Cortés, M.E. del Baño Aledo

Grupo de Investigación Ecografía y Morfo-densitometría preventiva. Departamento de Ciencias de la Salud.
Universidad Católica San Antonio. Guadalupe. Murcia. España

Recibido el 6 de diciembre 2006; aceptado el 17 de mayo 2007

PALABRAS CLAVE

Ejercicio;
Osteoporosis;
Densidad ósea;
Arquitectura ósea;
Fisioterapia;
Prevención

Resumen

Objetivo: Ante la ausencia de una pauta clara en la prescripción del ejercicio para prevenir o reducir los efectos de la osteoporosis, el propósito de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica no sistemática sobre los estudios de los últimos 10 años que relacionan el comportamiento del hueso ante la aplicación de estímulos mecánicos. Nos interesa diferenciar los tipos de ejercicio usados con más frecuencia y verificar si los efectos se producen en las zonas en que más impacta la osteoporosis.

Material y método: Se consultaron monografías generales sobre biología, histología y anatomía óseas. La búsqueda de artículos científicos se realizó en la base de datos MEDLINE y en la plataforma digital EBSCO HOST. Los límites aplicados a la búsqueda fueron: artículos en inglés o español, publicados entre 1997 y 2006, con resumen y realizados con poblaciones humanas.

Resultados: Se han encontrado pocas referencias sobre la microarquitectura ósea, pero aportan datos importantes. La mayor parte de los artículos aplican programas de ejercicios específicos destinados favorecer la osteogénesis y nos dan cifras de densidad mineral ósea como factor de medición de osteoporosis. Los ejercicios más utilizados son los aeróbicos (resistencia, fuerza) y los de alto impacto (saltos). Los aeróbicos parecen tener mayor éxito en la columna lumbar y los de alto impacto podrían actuar más específicamente en el cuello femoral. Al cesar el entrenamiento, los efectos acumulados del ejercicio van desapareciendo.

Conclusiones: Son necesarios más trabajos con seres humanos que relacionen la estructura interna del hueso y la aplicación de estímulos mecánicos. Los métodos de predicción de osteoporosis basados en técnicas de análisis trabecular pueden tener importantes implicaciones clínicas. La concienciación desde la escuela como prevención primaria es una opción que puede dar buenos resultados y es fácil de aplicar. Una actuación

*Autor de correspondencia.

E-mail: jrios@pdi.ucam.edu (J. Ríos-Díaz).

KEYWORDS

Osteoporosis;
Exercise;
Bone density;
Physiotherapy;
Prevention

de calidad requiere personalizar los ejercicios y adecuar la práctica a quienes participan en los programas, además de promover hábitos saludables y tener continuidad.
© 2008 Publicado por Elsevier España, S.L.

Architecture and internal bone organization and different mechanical stimulus application**Abstract**

Objectives: Due to the lack of a clear guideline for the prescription of exercise to prevent or reduce the effects of osteoporosis, this work has aimed to make non-systematic bibliographic review on the studies of last the ten years that relate the behavior of the bone with the application of mechanical stimuli. We want to differentiate the types of exercise used most frequently and to verify if the effects are produced on the zones of greatest impact in the osteoporosis.

Material and method: General monographs on bone biology, histology and anatomy were consulted. The search for scientific articles was made through MEDLINE database and EBSCO HOST digital platform. The limits applied to the search were: articles in English or Spanish published between 1997 and 2006, with summary and conducted in human populations.

Results: Few references were found on bone microarchitecture, however they contributed important data. Most of the articles applied programs of specific exercises aimed at increasing osteogenesis and provided bone mineral density (BMD) as a factor of measurement of osteoporosis. Aerobic exercises (resistance, force) and high-impact exercise (jumps) are the most used. Aerobic exercises seem to be more successful on the lumbar column and those of high impact could act more specifically on the femoral neck. When the training is discontinued, the accumulated effects of the exercise begin to disappear.

Conclusions: More works are necessary on humans that relate the internal structure of the bone and the application of mechanical stimuli. The methods of predicting osteoporosis based on the analysis of bone trabeculae may have important clinical implications. Awareness from school as primary prevention appears to be an option that may provide good results and is easy to apply. The exercises must be personalized and the practice adapted to those who participate in the programs are necessary to obtain a quality action and it is also necessary to promote healthy habits that are continuous over time.

© 2008 Publicado por Elsevier España, S.L.

Introducción

Características del tejido óseo

El hueso es un tipo de tejido biológico de carácter conectivo y altamente especializado. Como ocurre en todos los tejidos vivos, su estructura y su organización no se establecen de forma aleatoria, sino que se ajustan a una determinada demanda orgánica y responden con una eficiencia sorprendente a las necesidades funcionales. El tejido óseo y las columnas y palancas que forma están exquisitamente adaptados para resistir todas las formas de carga con elasticidad adecuada. Se dice que el esqueleto proporciona forma y soporte al cuerpo, pero la forma es en sí misma una expresión de la actividad motriz, lo que resalta el papel del hueso en el movimiento¹.

Entre las funciones del sistema óseo, podemos señalar que constituye un soporte rígido donde se anclan y alojan las distintas estructuras orgánicas, sirve de protección para determinados órganos y vísceras vulnerables y determina los puntos fijos a partir de los cuales el aparato locomotor

genera el movimiento; además de lo anterior, los huesos sirven de receptáculo al tejido hemopoyético y son el lugar de predilección para almacenar minerales fundamentales como calcio, fósforo, magnesio y sodio²⁻⁵.

Sin duda, la característica que hace al hueso diferente del resto de los tejidos es su alto contenido en sustancias inorgánicas minerales combinadas íntimamente con una matriz orgánica rica en agua, colágeno y proteoglucanos. Las sustancias inorgánicas más importantes son el calcio y el fósforo, pero también podemos encontrar magnesio, sodio, carbonato y flúor. El hueso está construido según el mismo principio que el hormigón armado; el hormigón sólo posee gran resistencia a la compresión, pero carece de resistencia a la tracción. Para darle resistencia a la tracción, se insertan en el hormigón barras de acero. Del mismo modo, la resistencia a la compresión de la hidroxiapatita se ve reforzada por la resistencia a la tracción que proporciona el colágeno⁵.

De los componentes orgánicos del hueso, no podemos olvidar los distintos tipos celulares existentes y sus precursores. De forma resumida, las células que forman parte del tejido óseo son los osteoblastos, los osteocitos y



Figura 1 Corte coronal de la porción proximal del fémur. Se puede apreciar el hueso cortical y el hueso trabecular.

los osteoclastos. Los osteoblastos son las células esenciales en el proceso de la osteogénesis, puesto que son las únicas capaces de producir la matriz en la que más tarde se producirá la osificación; cuando el osteoblasto ha quedado completamente rodeado de matriz, se encuentra en lo que se denomina laguna, y entonces pasa a denominarse osteocito (célula ósea madura). Los osteoclastos son grandes células polinucleadas que se encuentran en las superficies óseas sin protección y pueden actuar en el hueso y originar su resorción. Los osteoclastos son las únicas células capaces de liberar el calcio del hueso^{2,4}.

Macroscópicamente, diferenciamos entre tejido óseo compacto y tejido óseo esponjoso (fig. 1). En el tejido óseo compacto (hueso cortical), las laminillas óseas se disponen de forma concéntrica constituyendo el sistema circunferencial interno y el sistema circunferencial externo, y entre ambos quedan los sistemas de Havers u osteonas (unidad estructural del tejido óseo) y los sistemas intermedios (restos de antiguas osteonas).

Las osteonas están centradas por los conductos de Havers, que quedan comunicados entre sí por los conductos de Volkmann, perpendiculares a ellos; la nutrición del hueso y su inervación quedan aseguradas mediante estos canales, por donde discurren los vasos y los nervios (fig. 2). Cada conducto de Havers está rodeado por laminillas óseas concéntricas entre las que se sitúan los osteocitos, en el interior de las lagunas de Howship, que a su vez están intercomunicadas por los canalículos^{2,4,6}.

El tejido óseo esponjoso (hueso trabecular) presenta una disposición diferente; en él hay muchas cavidades intercomunicadas formando un retículo tridimensional de espículas óseas ramificadas (trabéculas) que está ocupado por médula ósea. La arquitectura trabecular de la mayor parte de los huesos conduce a la ligereza sin pérdida de resistencia, respondiendo al principio de la economía de

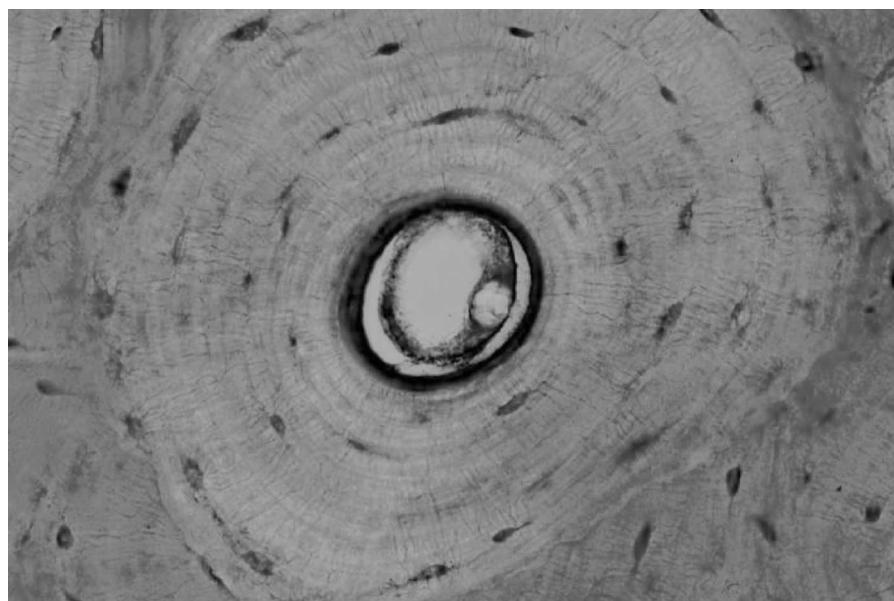


Figura 2 Corte histológico de hueso compacto. Se puede observar los osteocitos con sus prolongaciones a través de los canalículos calcíforos. En el centro un conducto de Havers por donde discurre un paquete vasculonervioso. Nótese los depósitos de minerales en forma de círculos concéntricos similares a los anillos de crecimiento de un árbol.

materiales^{1,4}. Ya Galileo, en el siglo XVII, reconoció el significado de la trabeculación ósea y propuso la idea de que los cilindros huecos resultan más fuertes que las barras macizas por unidad de peso¹.

La estructuración del hueso esponjoso le permite absorber la energía procedente de impactos en las articulaciones; por esta razón la malla tridimensional de trabéculas delimita cavidades que contienen elementos blandos y se comporta como una esponja. Miralles et al⁴ explican que "para una transmisión más homogénea de las presiones a través de las trabéculas óseas, existen en la superficie de éstas unas membranas o ténulas de colágeno y calcio (membranas de tensión), que dan paso a microcavidades o cámaras llenas de líquido que distribuyen las tensiones recibidas"; de este modo, el entramado trabecular se comporta como un sistema distribuidor de presiones desde el interior del hueso hacia la cortical ósea.

La capacidad de este tejido altamente especializado no se agota en funciones de absorción de impactos, sino que posee un alto nivel de adaptación a los estímulos recibidos y, como tejido vivo y dinámico, puede reorganizar sus elementos y adquirir una estructuración ajustada a la demanda de los factores mecánicos que actúan contra él de forma repetida o continua^{4,5}.

Por último, Miralles et al afirman que el origen de la pérdida de resistencia del tejido óseo hay que buscarlo en la pérdida de unión entre los diferentes elementos que lo componen.

Actividad física frente a administración de fármacos

El aumento de la esperanza de vida en los países desarrollados, factores relacionados con el sedentarismo, determinadas conductas alimentarias deficientes, entre otras, son variables capaces de influir en la aparición y la incidencia de ciertas enfermedades. El trabajo que nos ocupa se encuentra especialmente relacionado con la osteoporosis (fig. 3), la llamada epidemia silenciosa del siglo XXI. El debate científico actual mantiene visiones muy contrapuestas, al tiempo que el impacto social de la osteoporosis y sus implicaciones en los sistemas sanitarios van en aumento. Es un tema de plena actualidad por su gran incidencia mundial y de forma mayoritaria en los países industrializados. Según datos aportados por la Sociedad Española de Investigación en Osteoporosis y Metabolismo Mineral (SEIOMM), en España se estima que 2 millones de mujeres y 0,75 millones varones sufren osteoporosis. Se producen cada año 33.000 fracturas osteoporóticas de fémur, con una incidencia a partir de los 65-70 años de hasta el 33%. Para la población de más de 70 años la fractura vertebral osteoporótica tiene una prevalencia del 44% de las mujeres y hasta el 23% de los varones.

En la industria farmacéutica, cada laboratorio pugna por obtener el remedio definitivo, mientras que numerosos grupos de investigación se centran en estudiar con rigor los beneficios obtenidos mediante diferentes tipos de actividad física aplicados a determinados grupos de población. La ventaja de aplicar programas de ejercicio físico es que, además de favorecer la actividad osteogénica, puede incidir positivamente en otros muchos sistemas orgánicos con la debida dosificación, y cuenta con escasos o nulos efectos secundarios si se lleva a cabo una práctica segura.



Figura 3 Proyección anteroposterior de la cadera con ligera rotación femoral. Se muestra una gran pérdida de densidad del tercio proximal del fémur por un proceso osteoporótico.

La importancia de realizar estudios de calidad en el campo de la actividad física como medio de tratamiento eficaz contra la osteoporosis y la necesidad de aportar datos objetivos sobre la situación actual de esta línea de investigación son algunas de las razones que han motivado la elección de este trabajo.

Si se lleva a cabo una práctica basada en la evidencia científica y se dan a conocer resultados satisfactorios y comprobables de la efectividad de la actividad física como medio de prevención de la osteoporosis, las actuaciones del sistema sociosanitario podrían inclinarse a favor de la implantación de programas de actividad física, frente al abuso cada vez mayor de los tratamientos farmacológicos.

La propuesta es ambiciosa, pero los beneficios que pueden obtenerse podrían suponer cuantiosos logros en calidad de vida de la población y recorte del presupuesto sanitario. Para conseguir esto sería necesario, en primer lugar, dotar de mayor calidad a los ensayos clínicos que se realicen sobre el tema, con la finalidad de arrojar luces clarificadoras acerca de la factibilidad de los programas de actividad física y sus repercusiones en la población.

Como objetivos para este trabajo nos proponemos: *a*) verificar si los trabajos consultados relacionan la aplicación de estímulos físicos con mejoras cualitativas en el hueso trabecular; *b*) constatar si los estudios tienen en cuenta el depósito mineral óseo regional, referido a índices de densidad mineral ósea de los huesos y las zonas diana; *c*) determinar las tendencias actuales en cuanto a la aplicación de programas de actividad física como medida de prevención de la osteoporosis, y *d*) poner de manifiesto la tipología de los ejercicios utilizados y los posibles efectos diferenciales que puedan ocasionar.

Material y método

Para la elaboración del trabajo se revisó la bibliografía clásica sobre la biología, la histología y la anatomía óseas.

La recuperación de artículos científicos se realizó a través de la base de datos MEDLINE y la plataforma electrónica EBSCO-HOST (con acceso a las bases de datos *Academic Search Premier*, *SPORTDiscus with full text*, *SPORTDiscus Select* y *Library, Information Science & Technology Abstract*).

Las estrategias de búsqueda se restringieron a los campos título o resumen (etiqueta [TIAB]); a continuación se detallan las estrategias utilizadas en MEDLINE y que se reprodujeron exactamente igual en EBSCO con los correspondientes ajustes a la interfaz de la plataforma digital:

#1: ("bone mineral density" OR "bone density") [TIAB]; #2: ("bone microarchitecture" OR "bone architecture") [TIAB]; #3: ("exercise" OR "exercise therapy") [TIAB]; #4: osteoporosis [TIAB]; #5: #1 AND #3; #6: #2 AND #3; #7: #1 AND #4; #8: #2 AND #4; #9: #3 AND #4; #10: #5 OR #6 AND #4.

Además, para cada artículo recuperado se utilizó el vínculo de relaciones cruzadas, con lo que también se efectuó una búsqueda en abanico.

Los límites establecidos para la recuperación de trabajos fueron: trabajos publicados entre los años 1997 y 2006; artículos con al menos resumen; publicados en idioma inglés o español; realizados solamente con seres humanos, y de alguno de los siguientes tipos: ensayo clínico, ensayo clínico controlado (con muestra seleccionada al azar o no), metaanálisis o revisión bibliográfica.

Fueron excluidos los artículos de estudios en que se administraban fármacos (excepto ingestión de calcio y provitamina D o derivados) para evitar el solapamiento de efectos entre la terapia física y la farmacológica. Asimismo se excluyeron los trabajos realizados sin grupo control y los que resultaron ambiguos en alguno de sus apartados.

Resultados

Fueron seleccionadas cuarenta referencias que cumplieron los criterios de inclusión propuestos y se rechazaron los artículos que carecieran de rigor en alguna de sus partes y los que resultaron tener menor relación con los objetivos propuestos.

Si clasificamos las referencias seleccionadas según el tipo de estudio, obtenemos que: 6 corresponden a metaanálisis; 27 artículos son ensayos clínicos; han sido utilizadas 6 monografías generales, y fue incluido 1 solo artículo de revisión bibliográfica.

Los temas tratados con más frecuencia en los artículos se relacionan directamente con la osteoporosis en la mujer, la menopausia y la influencia de la actividad física en la densidad mineral ósea. Llama la atención que muchos de los autores referidos pertenezcan a países muy septentrionales, donde la incidencia de los rayos solares es menor que en regiones más meridionales.

El principal inconveniente que ha surgido en la elaboración de este trabajo es que se ha hallado muy pocos estudios que hagan referencia a la respuesta del tejido óseo en

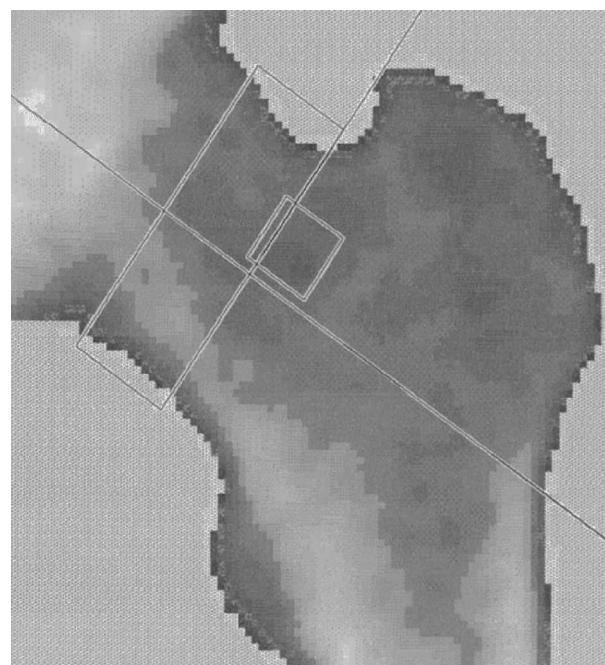


Figura 4 Cálculo de la densidad mineral ósea del cuello femoral a partir de densitometría radiológica por absorciometría dual con rayos X.

términos cualitativos, es decir, de organización interna y microarquitectura trabecular.

Casi toda la bibliografía menciona aspectos cuantitativos que nos dan una medida de la densidad mineral ósea (fig. 4), el depósito mineral regional, entre otras variables, pero nada nos dicen sobre la orientación de los haces trabeculares o la reorganización del tejido óseo en respuesta a estímulos mecánicos. No obstante, se han seleccionado los artículos que aportan información cuantitativa porque en todos ellos se aplicó estímulos mecánicos de diversa índole y se menciona su efecto en zonas diana del tejido óseo, ricas en hueso trabecular, directamente relacionadas con la osteoporosis.

Sí se encontraron artículos relacionados con la microarquitectura ósea llevados a cabo en animales, pero fueron excluidos de nuestra selección por no cumplir los criterios de inclusión (estudios realizados en seres humanos).

Como hemos reseñado anteriormente, el ensayo clínico ha sido el tipo de artículo que ha resultado más útil en nuestro estudio por diversas razones. La principal es que nos aporta datos concretos referidos al tipo de actividad física propuesta, la población en la que se efectúa el estudio y las zonas donde se concentran los posibles cambios que puedan derivarse de los estímulos aplicados. Así, sobre un total de 27 trabajos de ensayo clínico, obtenemos que: 9 fueron realizados con niños o adolescentes^{8,9,12-15}, 4 se refieren a sistemas de medición del hueso trabecular como método de predicción de osteoporosis^{7,16-18}, 1 se centra en ejercicios de resistencia en astronautas³⁹, 2 estudian los efectos del desentrenamiento en antiguos futbolistas^{19,20} y los 12 restantes son estudios relacionados con la menopausia y el efecto de la actividad física²¹⁻³²; 6 artículos correspondientes a metaanálisis³³⁻³⁷ y revisión bibliográfica⁴⁰ versan sobre aspectos

relacionados con la menopausia y la aplicación de distintos programas de ejercicios. Un solo metaanálisis estudia, de forma aislada, el efecto de la marcha en la densidad mineral ósea³⁸.

Los tipos de ejercicio llevados a la práctica en los distintos artículos consultados son bastante variados, pero podemos establecer una clara diferencia entre actividades de tipo aeróbico (trabajo de la resistencia aeróbica y de la fuerza)^{22,23,29,33-35,38,39} y actividades que implican fase aérea (pliométricos), rapidez de ejecución o alta intensidad^{8,10,13,27,40}.

Varios grupos de autores indican la posibilidad de combinar ejercicios de diversa índole para ampliar el posible espectro de actuación de los estímulos en el aparato locomotor, en lugar de centrarse en un único tipo de actividad, aunque estas sugerencias parecen responder más a la falta de datos objetivos que a resultados contrastados debidamente^{21,26,28}.

Por otra parte, es preciso destacar que los estudios que aplican ejercicios de saltos (pliométricos) corresponden en su mayoría a ensayos clínicos llevados a cabo con niños^{8,10,13} y prestan mucha atención a la posible ganancia en el pico de masa ósea que pueda derivarse de este tipo de entrenamientos. Además, resulta evidente que esta modalidad de ejercicio será mejor tolerada por poblaciones infantiles, que tienen menos riesgo de sufrir lesiones en esa práctica.

Stengel et al³⁰ han determinado que los movimientos realizados a velocidades altas son más efectivos que los realizados a baja velocidad en entrenamientos similares si se pretende reducir la pérdida de densidad mineral ósea en mujeres premenopáusicas.

La mayor parte de los trabajos muestran datos de densidad mineral ósea regional en zonas diana en la osteoporosis, como la columna lumbar (fig. 5), las regiones proximales del fémur y, en menor medida, huesos del antebrazo; posiblemente los estudios se centran en estas regiones porque las repercusiones sociosanitarias son mayores en los huesos de carga que otras zonas del cuerpo. En general, los datos obtenidos de los estudios proyectan cifras de densidad mineral ósea mayores en grupos activos que en los grupos control, pero no se observan diferencias especialmente significativas, aunque estadísticamente sí se pueda considerarlas válidas.

Si consideramos las ganancias de densidad mineral ósea regional según los diferentes ejercicios puestos en práctica, observamos que los trabajos de resistencia y fuerza tienen más incidencia en la columna lumbar, según diversos autores^{26,29,33,34}. En cambio, las actividades consideradas como de alto impacto parecen tener mayor eficacia en las regiones relacionadas con el cuello femoral^{27,40}, aunque con la excepción de algún autor que apunta un mayor efecto en la columna lumbar¹⁰.

Como norma, según los documentos revisados, parece que la densidad mineral ósea de la columna lumbar es más susceptible de aumento que las regiones femorales y, además, es capaz de responder a los estímulos recibidos con mayor rapidez. Posiblemente los efectos acumulados puedan perdurar más en las regiones lumbares que en la zona femoral.

Las consecuencias de abandonar la práctica física y la duración de los efectos beneficiosos acumulados durante los períodos de ejercitación son otros puntos de interés hallados

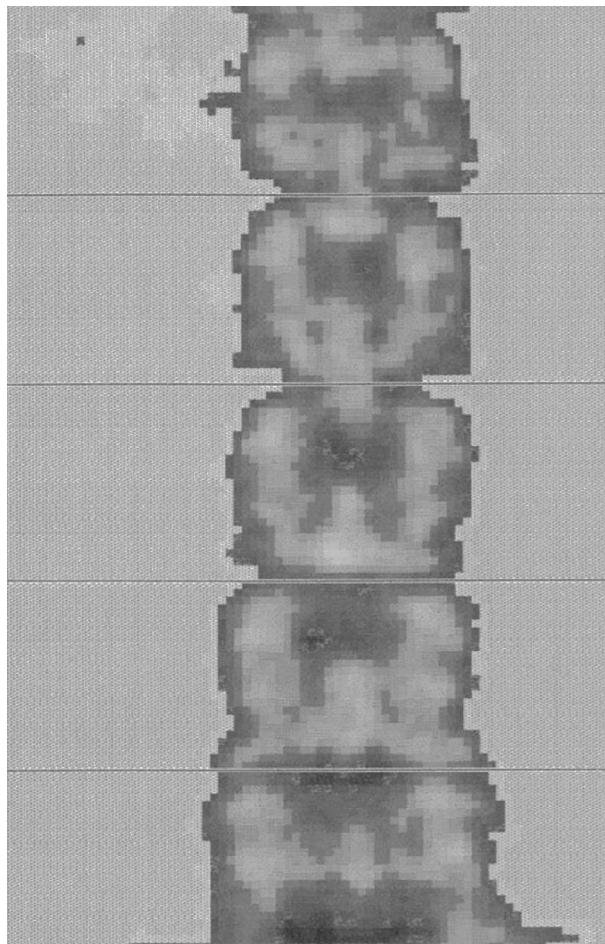


Figura 5 Cálculo de la densidad mineral ósea de las vértebras lumbares a partir de densitometría radiológica por absorciometría dual con rayos X.

en las referencias consultadas. Son varios los trabajos que abogan por una práctica regular durante toda la vida y ponen de manifiesto que los beneficios obtenidos durante los períodos activos se pierden tras lapsos más o menos cortos de cesar la actividad^{9,11,14,24,32}. Este dato, aunque no esté reflejado en los objetivos de nuestro trabajo, resulta de especial importancia a la hora de establecer programas de actividad física en cualquier ámbito. Por esta razón, en el siguiente apartado se le dedica un espacio y se hace mención en las conclusiones del trabajo.

Los artículos que tratan específicamente sobre microarquitectura trabecular indican que la densidad mineral ósea y la organización interna del hueso esponjoso serían dos factores complementarios para determinar el riesgo de padecer fracturas osteoporóticas^{7,16-18}. Además, el análisis de la ultraestructura ósea mediante técnicas específicas puede aportar determinada información adicional que no es deducible de los valores de densidad mineral ósea y puede ser determinante en la prevención de las fracturas¹⁷. Sin embargo, estas técnicas no se consideran aún como sistemas convencionales de valoración, posiblemente debido a la complejidad que entraña su puesta en práctica y a la necesidad de aportar mayor cantidad de resultados satisfactorios que respalden y justifiquen su utilización.

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar, como primera apreciación, que los hallazgos de trabajos que abordan el tema de la microarquitectura trabecular en respuesta a estímulos mecánicos en poblaciones humanas han sido nulos. Los 4 ensayos clínicos que se refieren a la organización del tejido trabecular versan sobre sistemas de predicción de osteoporosis y riesgo de fractura^{7,16-18}, pero nada aportan sobre la respuesta y la adecuación funcional ante la aplicación de estímulos mecánicos. Posiblemente, la forma de obtener información válida sobre esta cuestión sea incluir en un estudio posterior los trabajos realizados con muestras animales. Sin embargo, resulta muy interesante conocer que existen líneas de investigación estudiando la posibilidad de ofrecer diagnósticos precoces de osteoporosis basados no tanto en factores cuantitativos (densidad mineral ósea), sino en las cualidades del sistema trabecular óseo. Esta apreciación hace pensar que el problema de la osteoporosis podría no radicar únicamente en la pérdida de material, sino que la organización interna del hueso y su estructura microscópica pueden tener mucho que ver con la evolución de la enfermedad y sus consecuencias.

Legrand et al¹⁷ afirman que la microarquitectura del hueso trabecular (fig. 6) es el mayor determinante de fracturas vertebrales, independientemente de la densidad mineral ósea, en un ensayo realizado con varones de mediana edad y osteopenia.

Los estudios revisados que fueron realizados con poblaciones infantiles o en torno a la adolescencia, a pesar de ser muy inferiores en número a los relacionados con premenopáusicas o posmenopáusicas, han supuesto una contribución importante para este trabajo. Bastantes de estos estudios se justifican en la capacidad que tiene el hueso, a estas edades, para responder con rapidez a los estímulos recibidos y aumentar el pico de masa ósea regional en zonas de carga y en general todo el cuerpo^{12-15,22}. Los grupos de Fuchs⁸,

Mackelvie¹² y McKay¹³ consideraron los ejercicios de salto como los más adecuados para lograr sus objetivos y pusieron en práctica programas protocolizados semejantes para realizar durante la permanencia en el centro escolar. Algunos de los resultados obtenidos por Mackelvie et al¹² indican que una intervención de este tipo mantenida aproximadamente 20 meses puede acumular un pico de masa ósea equivalente a una pérdida de material óseo que oscila entre 3 y 5 años durante la menopausia. Además, los tres grupos de investigación coinciden en apuntar que los métodos utilizados son muy fáciles de aplicar en el marco de la educación escolar integrados en las clases de educación física. A este respecto, mencionamos el trabajo realizado por Valdimarsson et al¹⁵, que apuestan por 40 min de educación física diaria durante el período escolar como medio de aumentar el pico de masa ósea en niñas de entre 7 y 9 años.

Hay bastante controversia entre los diversos autores consultados acerca del tipo de programas que poner en práctica con mujeres en torno a la menopausia. El ensayo de Kohrt et al²⁷ y la revisión de Wallace et al⁴⁰ ponen de manifiesto que la aplicación de actividades de alto impacto proporciona cuantiosos beneficios en las regiones femorales, comparadas con actividades de resistencia o fuerza. Sin embargo, son varios los autores que prefieren otro tipo de ejercicios por el elevado riesgo de lesiones con las actividades de alto impacto. El reciente metaanálisis de Kelley et al³⁶ destaca que, aunque el National Institutes of Health de Estados Unidos se inclina por la práctica de ejercicios de alto impacto y entrenamiento de la resistencia como medio de prevenir la osteoporosis, la mayoría de los trabajos consultados en su estudio usaban ejercicios de bajo impacto (como caminar) y otros relacionados con el fortalecimiento de la musculatura femoral; además, los resultados de su estudio indican que el ejercicio no es capaz

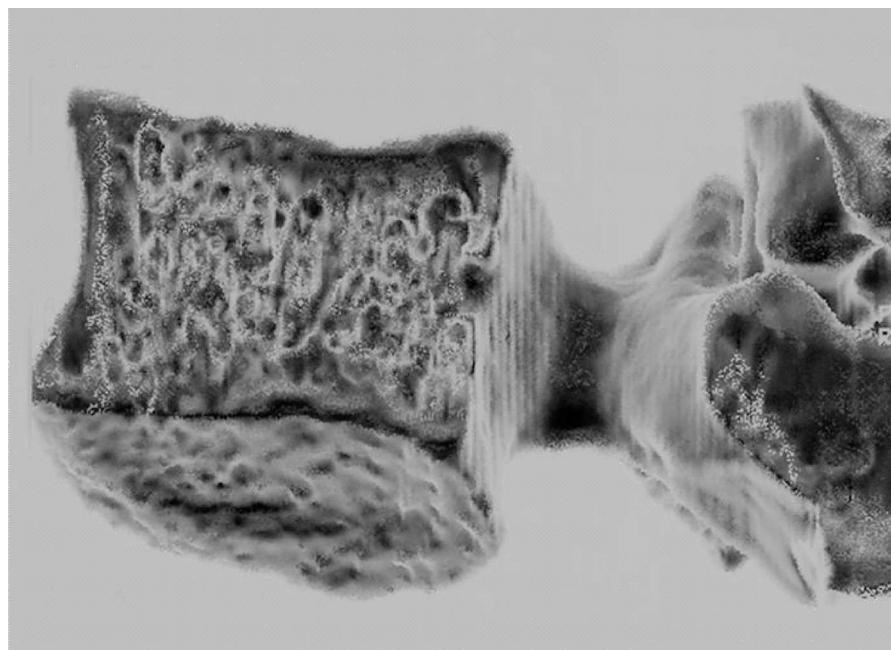


Figura 6 Reconstrucción tridimensional a partir de tomografía computarizada helicoidal. Corte sagital de una vértebra lumbar en el que se muestra la disposición de sus trabéculas verticales.

de mejorar la densidad mineral ósea del cuello femoral en mujeres posmenopáusicas y que el efecto en la pérdida de masa ósea probablemente sea muy modesto.

En nuestra revisión, coincidiendo con Kelley et al, también hemos encontrado que los estudios en poblaciones adultas utilizan mayoritariamente ejercicios aeróbicos, de resistencia y fuerza o actividades de bajo impacto para confeccionar sus programas de intervención^{23,29,33,34,36,38}; algunos autores nos indican que, así como la ganancia en las regiones lumbares resulta más o menos evidente, puede que este tipo de actividades que no implican alto impacto no posean ningún efecto osteogénico en la región femoral o que su efecto sea insignificante^{1,29,33,35}.

En referencia a lo anteriormente expuesto y según apuntan varios autores, probablemente lo más acertado sea combinar distintos tipos de ejercicio, ya que es difícil determinar la conveniencia de unos u otros según las personas a las que se aplique el estudio^{21,26,28}. El trabajo de Liu-Ambrose et al²⁸, sobre la aplicación de entrenamientos de agilidad y entrenamientos de resistencia en mujeres mayores (75-85 años) durante 6 meses, muestra que ambos tipos de actividad, por separado, contribuyen a la ganancia de densidad mineral ósea en parecidas proporciones.

Si optamos por la combinación de actividades, durante la ejecución de ejercicios de alto impacto habrá que cuidar especialmente las variables que puedan entrañar peligro de lesiones y minimizar los riesgos mediante una técnica adecuada.

El ensayo de Shackelford et al³⁹, sobre la aplicación de ejercicios de resistencia para prevenir los efectos de una inmovilización prolongada, resulta muy esclarecedor en cuanto a la disminución de la pérdida de densidad mineral. Ese trabajo está orientado a prevenir los efectos de viajes espaciales prolongados, pero los programas de ejercicios podrían ser igual de válidos para personas que deban permanecer encamadas durante largo tiempo y tengan la capacidad de realizar actividad física.

Como hemos apuntado en los resultados, las consecuencias de abandonar la práctica física regular preocupan bastante a los autores de los trabajos revisados. Los tiempos de permanencia de los beneficios acumulados varían de unos estudios a otros, pero la mayoría admite que a la interrupción prolongada de la práctica sigue la pérdida de las ganancias acumuladas durante la fase activa. Los trabajos más interesantes sobre este aspecto informan de la necesidad de mantener la actividad si se pretende conservar los beneficios^{24,32}. Winters et al³² indican que quizá pueda resultar suficiente mantener la actividad pero disminuyendo la frecuencia y la intensidad del ejercicio. Sería necesario efectuar estudios fiables, respaldados por la evidencia, antes de aventurarse a disminuir los parámetros originales de los ejercicios que se demostraron útiles para aumentar la densidad mineral ósea. Otros dos estudios, uno realizado con varones jóvenes jugadores de *hockey*⁹ y el segundo aplicado a antiguas gimnastas ya retiradas¹¹, señalan que la práctica deportiva en edades de crecimiento puede servir como factor de prevención de la osteoporosis, pero ambos insisten en la importancia de mantener la actividad si se quiere conservar las ganancias totales.

Como contrapunto a las aseveraciones anteriores, el estudio realizado por Uzunca et al²⁰ con deportistas retirados (jugadores de fútbol) tras largos períodos de

inactividad afirma que la densidad mineral ósea de esta población es significativamente mayor que la de grupos semejantes, también inactivos, que no hayan desarrollado una carrera deportiva. Sin embargo, ese estudio fue llevado a cabo con una población muy pequeña y sus autores reconocen que no se debe sacar conclusiones determinantes sin realizar otras mediciones en poblaciones más significativas.

Conclusiones

Los estudios centrados en humanos que relacionan la reorganización del hueso trabecular con la aplicación de estímulos mecánicos son escasos, pero existen bastantes trabajos de investigación llevados a cabo con animales.

Sin embargo, resultan de gran interés los sistemas de predicción de osteoporosis/riesgo de fractura basados en la determinación del entramado trabecular del hueso mediante sistemas específicos, por la importante aplicación que pueden tener en el terreno clínico contribuyendo a mejorar las valoraciones y los diagnósticos. Entonces, no se trataría de determinar solamente la cantidad de tejido óseo existente; podría someterse a análisis la calidad de los tabiques óseos trabeculares y su capacidad para soportar cargas sin sufrir deformaciones o alteraciones estructurales.

Si se pretende una actuación de calidad, es preciso aplicar pautas personalizadas de frecuencia e intensidad a las actividades que se programen. Adaptar los ejercicios a las necesidades particulares de cada persona sería la medida de calidad por excelencia. Para ello habría que conocer con exactitud los puntos débiles de su sistema óseo y diferenciar entre carencia cuantitativa (desmineralización ósea) y cualitativa (inapropiada orientación de haces trabeculares en el espacio) como factores de riesgo de fracturas osteoporóticas; por esta razón consideramos la importancia de potenciar los estudios de predicción de osteoporosis anteriormente mencionados.

Son necesarios más estudios para determinar la especificidad de los distintos tipos de actividad para unas zonas u otras. Como norma general, parece que la columna lumbar responde mejor a los estímulos mecánicos del tipo resistencia y fuerza y que la densidad mineral ósea de las regiones del extremo proximal del fémur es más susceptible de aumento mediante ejercicios de alto impacto.

Por el momento, la controversia existente entre la elección más acertada de unos ejercicios u otros podría tener solución adoptando combinaciones de diversas actividades que, de un modo u otro, terminarán incidiendo de forma positiva en el aparato locomotor y la calidad de vida de quienes se benefician de los programas; otra ventaja de variar las actividades es que el programa resultará menos monótono para los participantes. Este dato es importante si consideramos que la motivación personal es un elemento esencial para establecer rutinas diarias en la vida de las personas, ya se trate de niños escolarizados o de personas adultas.

La concienciación desde la escuela y la promoción de hábitos de actividad física saludable durante la infancia podrían ser una de las medidas más eficaces de prevención; pero esa labor requiere de las instituciones educativas, las asociaciones de padres y los poderes políticos un esfuerzo

importante, además de la implicación seria y responsable de todos los profesionales y educadores que están en contacto con los niños. Esta medida representa una auténtica revolución social y también política según los valores que actualmente imperan en nuestra sociedad.

Según lo expuesto y tras los resultados obtenidos en este trabajo, es importante indicar que el éxito de los programas de ejercicios que puedan ponerse en práctica está estrechamente relacionado con la regularidad de la actividad y el mantenimiento de actitudes adecuadas que no perjudiquen o disminuyan la efectividad de las actuaciones propuestas.

Bibliografía

1. Williams PL, editor. *Anatomía de Gray*. Madrid: Harcourt Brace; 1998.
2. Fawcett DW. *Tratado de Histología*. 2.ª ed. Madrid: McGraw-Hill Interamericana; 1995.
3. Junqueira LC, Carneiro J. *Histología básica. Texto y Atlas*. 4.ª ed. Barcelona: Masson; 1996.
4. Miralles Marrero RC, Puig Cunillera M. *Biomecánica clínica del aparato locomotor*. Barcelona: Masson; 1998.
5. Nordin M, Frankel VH. *Biomecánica básica del sistema musculosquelético*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana; 2004.
6. Gartner LP, Hiatt JL. *Histología. Texto y Atlas*. México: McGraw-Hill; 1997.
7. Benhamou CL, Poupon S, Lespessailles E, Loiseau S, Jennane R, Sirop V, et al. Fractal analysis of radiographic trabecular bone texture and bone mineral density: two complementary parameters related to osteoporotic fractures. *J Bone Miner Res* 2001;16:697-704.
8. Fuchs RK, Bauer JJ, Snow CM. Jumping improves hip and lumbar spine bone mass in prepubescent children: a randomized controlled trial. *J Bone Miner Res* 2001;16:148-56.
9. Gustavsson A, Olsson T, Nordstrom P. Rapid loss of bone mineral density of the femoral neck after cessation of ice hockey training: a 6-year longitudinal study in males. *J Bone Miner Res* 2003;18:1964-9.
10. Kontulainen SA, Kannus PA, Pasanen ME, Sievanen HT, Heinonen AO, Oja P, et al. Does previous participation in high-impact training result in residual bone gain in growing girls? One year follow-up of a 9-month intervention. *Int J Sports Med* 2002;23:575-81.
11. Kudlac J, Nichols DL, Sanborn CF, DiMarco NM. Impact of detraining on bone loss in former collegiate female gymnasts. *Calcif Tissue Int* 2004;75:482-7.
12. Mackelvie KJ, Khan KM, Petit MA, Janssen PA, McKay HA. A school-based exercise intervention elicits substantial bone health benefits: a 2-year randomized controlled trial in girls. *Pediatrics* 2003;112:e447.
13. McKay H, Tsang G, Heionen A, Mackelvie K, Sanderson D, Khan KM. Ground reaction forces associated with an effective elementary school based jumping intervention. *Br J Sports Med* 2005;39:10-4.
14. Nordstrom A, Olsson T, Nordstrom P. Bone gained from physical activity and lost through detraining: a longitudinal study in young males. *Osteoporos Int* 2005;16:835-41.
15. Valdimarsson O, Linden C, Johnell O, Gardsell P, Karlsson MK. Daily physical education in the school curriculum in prepubertal girl during 1 year is followed by an increase in bone mineral accrual and bone width-data from the prospective controlled Malmö pediatric osteoporosis prevention study. *Calcif Tissue Int* 2006;78:65-71.
16. Kinney JH, Ladd AJC. The relationship between three-dimensional connectivity and the elastic properties of trabecular bone. *J Bone Miner Res* 1998;13:839-45.
17. Legrand E, Chappard D, Pasaretti C, Duquenne M, Krebs S, Rohmer V, et al. Trabecular bone microarchitecture, bone mineral density, and vertebral fractures in male osteoporosis. *J Bone Miner Res* 2000;15:13-9.
18. Wehrli FW, Gomberg BR, Saha PK, Song HK, Hwang SN, Snyder PJ. Digital topological analysis of in vivo magnetic resonance microimages of trabecular bone reveals structural implications of osteoporosis. *J Bone Miner Res* 2001;16:1520-31.
19. Calbet JA, Dorado C, Diaz-Herrera P, Rodriguez-Rodriguez LP. High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:1682-7.
20. Uzunca K, Birtane M, Durmus-Altun G, Ustun F. High bone mineral density in loaded skeletal regions of former professional football (soccer) players: what is the effect of time after active career? *Br J Sports Med* 2005;39:154-7.
21. Chien MY, Wu YT, Hsu AT, Yang RS, Lai JS. Efficacy of a 24-week aerobic exercise program for osteopenic postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 2000;67:443-8.
22. Douchi T, Matsuo T, Uto H, Kuwahata T, Oki T, Nagata Y. Lean body mass and bone mineral density in physically exercising postmenopausal women. *Maturitas* 2003;45:185-90.
23. Englund U, Littbrand H, Sondell A, Pettersson U, Bucht G. A 1-year combined weight-bearing training program is beneficial for bone mineral density and neuromuscular function in older women. *Osteoporos Int* 2005;16:1117-23.
24. Iwamoto J, Takeda T, Ichimura S. Effect of exercise training and detraining on bone mineral density in postmenopausal women with osteoporosis. *J Orthop Sci* 2001;6:128-32.
25. Jamsa T, Vainionpaa A, Korpelainen R, Vihriala E, Leppaluoto J. Effect of daily physical activity on proximal femur. *Clin Biomech* 2006;21:1-7.
26. Kemmler W, Engelke K, Weineck J, Hensen J, Kalender WA. The Erlangen Fitness Osteoporosis Prevention Study: a controlled exercise trial in early postmenopausal women with low bone density first year results. *Arch Phys Med Rehabil* 2003;84:673-82.
27. Kohrt WM, Ehsani AA, Birge Jr SJ. Effects of exercise involving predominantly either joint-reaction or ground-reaction forces on bone mineral density in older women. *J Bone Miner Res* 1997;12:1253-61.
28. Liu-Ambrose TY, Khan KM, Eng JJ, Heinonen A, McKay HA. Both resistance and agility training increase cortical bone density in 75- to 85-year-old women with low bone mass: a 6-month randomized controlled trial. *J Clin Densitom* 2004;7:390-8.
29. Punttila E, Kroger H, Lakka T, Tuppurainen M, Jurvelin J, Honkanen R. Leisure-time physical activity and rate of bone loss among peri- and postmenopausal women: a longitudinal study. *Bone* 2001;29:442-6.
30. Stengel SV, Kemmler W, Pintag R, Beeskow C, Weineck J, Lauber D, et al. Power training is more effective than strength training for maintaining bone mineral density in postmenopausal women. *J Appl Physiol* 2005;99:181-8.
31. Vainionpaa A, Korpelainen R, Leppaluoto J, Jamsa T. Effects of high-impact exercise on bone mineral density: a randomized controlled trial in premenopausal women. *Osteoporos Int* 2005;16:191-7.
32. Winters KM, Snow CM. Detraining reverses positive effects of exercise on the musculoskeletal system in premenopausal women. *J Bone Miner Res* 2000;15:2495-503.
33. Berard A, Bravo G, Gauthier P. Meta-analysis of the effectiveness of physical activity for the prevention of bone loss in postmenopausal women. *Osteoporos Int* 1997;7:331-7.
34. Bonaiuti D, Shea B, Iovine R, Negrini S, Robinson V, Kemper HC, et al. Exercise for preventing and treating osteoporosis in postmenopausal women. *Evid Based Nurs* 2003;6:50-1.
35. Kelley GA, Kelley KS. Efficacy of resistance exercise on lumbar spine and femoral neck bone mineral density in premenopausal

women: a meta-analysis of individual patient data. *J Womens Health* 2004;13:293–300.

36. Kelley GA, Kelley KS. Exercise and bone mineral density at the femoral neck in postmenopausal women: a meta-analysis of controlled clinical trials with individual patient data. *Am J Obstet Gynecol* 2006;194:760–7.

37. Wolff I, Van Croonenborg JJ, Kemper HC, Kostense PJ, Twisk JW. The effect of exercise training programs on bone mass: a meta-analysis of published controlled trials in pre- and postmenopausal women. *Osteoporos Int* 1999;9:1–12.

38. Palombaro KM. Effects of walking-only interventions on bone mineral density at various skeletal sites: a meta-analysis. *J Geriatr Phys Ther* 2005;28:102–7.

39. Shackelford LC, LeBlanc AD, Driscoll TB, Evans HJ, Rianon NJ, Smith SM, et al. Resistance exercise as a countermeasure to disuse-induced bone loss. *J Appl Physiol* 2004;97:119–29.

40. Wallace BA, Cumming RG. Systematic review of randomized trials of the effect of exercise on bone mass in pre- and postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 2000;67:10–8.