

Deporte y masa ósea (II). Características del ejercicio físico que condicionan el modelado y remodelado óseo

CARITAT BAGUR CALAFAT

Departamento de Fisioterapia. Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad Internacional de Catalunya. Barcelona. España.

RESUMEN

El ejercicio físico es uno de los factores que condicionan el modelado y remodelado óseo. En el hueso, el estímulo más importante se produce cuando las cargas, inherentes al ejercicio físico, exceden las habituales y tienen una distribución inusual, siendo más importante la intensidad que la duración de las mismas. El ejercicio físico que parece tener un mayor potencial osteogénico es el que incluye saltos no estereotipados, en diferentes trayectorias. La actividad física de bajo impacto, que implica escasa sobrecarga mecánica, no parece tener ninguna ventaja. Así pues, las disciplinas deportivas que incluyen actividades de impacto vertical, en las que se ha de soportar el peso del propio cuerpo, son más favorables para la masa ósea que aquellas en las que no hay impacto, como la natación. Estos beneficios serán específicos de las áreas especialmente implicadas en el ejercicio, ya que la respuesta del hueso a la carga mecánica suele ser local y no generalizada.

PALABRAS CLAVE: Masa ósea. Ejercicio físico. Carga mecánica. Deporte. Salto.

ABSTRACT

Physical activity is one of the factors affecting bone formation and remodeling. The most important stimuli taking place in bone structure occurs when a mechanical load, inherent to physical activity, is heavier and has a different distribution than usual. The intensity of the load is more important than the duration. The type of physical activity with the greatest osteogenic potential seems to be activity that includes non-stereotyped jumps in different directions. Low impact physical activity, which involves little mechanic stress, seems not to benefit bone mass. Therefore, sports that include vertical impact activities in which body weight must be borne are more beneficial for bone mass than those in which there is no impact, such as swimming. These benefits are specific to the area most heavily involved in the activity, given that the response of bone structure to mechanical load tends to be local rather than general.

KEY WORDS: Bone mass. Physical activity. Mechanical load. Sports. Jump.

INTRODUCCIÓN

El modelado y remodelado óseo presentan unas características individuales en función de la raza y la herencia. Están condicionados por una serie de factores nutricionales, mecánicos y hormonales. La incidencia sobre estos factores condicionantes puede predisponer a la pérdida o a la mejora y/o al mantenimiento, en función de la etapa de la vida, de la calidad y cantidad de hueso.

La actividad física en relación al peso estimula el aumento óseo, mientras que la inmovilidad conduce a la pérdida acelerada^{1,2}. Se han de tener presentes las características del ejercicio

para poderlo correlacionar con la cantidad de los beneficios. La intensidad y el tipo de ejercicio tienen importantes repercusiones sobre la masa ósea, y éstas son específicas de la región anatómica principalmente implicada en el trabajo.

CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA MECÁNICA QUE INFLUYEN SOBRE LA MASA ÓSEA

La respuesta del esqueleto a una fuerza depende de la magnitud, la velocidad, la distribución y la repetición de la deformación en un determinado hueso.

– La *magnitud de la deformación* podría definirse como el cambio, en porcentaje, de la longitud del hueso que se somete a una fuerza mecánica. Las actividades que provocan fuerzas máximas elevadas, o gran magnitud de deformación, parecen influir más sobre la masa ósea que las actividades que aplican un número elevado de ciclos o repeticiones^{3,4}.

– La *velocidad de la deformación* es la rapidez en que ésta aparece y se libera. Las deformaciones rápidas son las más eficaces a la hora de obtener del hueso una respuesta de adaptación máxima⁵. En relación con esta afirmación, Umemura et al⁶, en un trabajo de laboratorio con ratas, compararon el entrenamiento de salto con el entrenamiento de carrera y vieron que el salto se asociaba a una mayor velocidad y magnitud de deformación, además de desencadenar una respuesta ósea positiva con una mayor eficacia que la carrera.

– La *distribución de la deformación* describe la forma en que ésta se ordena en una sección del hueso. Existe la teoría de que las deformaciones anómalas de distribución heterogénea tienen más posibilidades de estimular la osteogénesis que las deformaciones repetitivas producidas por las actividades cotidianas⁷.

– Los *ciclos de la deformación* expresan el número de repeticiones de la fuerza que cambian las dimensiones del hueso con una magnitud determinada. A pesar de que se necesita un número mínimo de ciclos de fuerza para obtener una respuesta positiva del hueso, la trascendencia del número de ciclos de deformación parece ser menor que la velocidad o la magnitud de la deformación⁸⁻¹⁰.

TIPO DE EJERCICIO REALIZADO Y SU INFLUENCIA SOBRE LA MASA ÓSEA

Por lo que se desprende de lo expuesto anteriormente, las características de la carga mecánica que tienen una mayor influencia sobre la densidad ósea son la magnitud, la velocidad y la distribución heterogénea de la deformación. El estímulo más importante en el hueso se produce cuando las cargas exceden las habituales, y es más importante la intensidad que la duración^{11,12}. Principalmente las cargas de distribución inusual (en relación a la versatilidad de los movimientos), en alta proporción y magnitud, parecen ser particularmente estimulantes de la osteogénesis si se comparan con cargas más ligeras, aunque estas últimas se apliquen de forma repetida¹³. Así pues, el ejercicio acíclico que suponga una carga mecánica y/o un impacto musculoesquelético importante tiene un efecto especialmente osteotrófico, como se ha podido constatar en trabajos en los diferentes grupos de edad, que se referenciarán a lo largo de este artículo. El ejercicio físico que parece tener un mayor potencial

osteogénico es el que incluye saltos no estereotipados, en diferentes trayectorias.

La actividad física de bajo impacto, que implica escasa sobrecarga mecánica, no parece tener ninguna ventaja en la consecución de una mayor masa ósea en relación a los grupos de sujetos que no realizan ningún tipo de actividad. La acumulación en el tiempo de actividad física de bajo impacto no parece, tampoco, tener repercusiones favorables en la masa ósea. Así lo demuestran estudios que comparan la masa ósea de deportistas de disciplinas acuáticas en relación a la de controles inactivos¹⁴⁻¹⁶. En contrapartida, algunos autores, como Bailey et al¹⁷, han encontrado que los valores de masa ósea de nadadores, en zonas de carga, es incluso inferior de la de los controles inactivos.

Cabe mencionar que Matkin et al¹⁸ encontraron diferencias de sexo en la asociación entre diversos tipos de actividades físicas y la masa ósea en diferentes localizaciones en una población con un rango de edad entre los 9 y los 25 años. En las niñas y mujeres jóvenes, sólo la actividad con carga del peso corporal se correlacionó de forma positiva con la densidad mineral ósea (DMO), mientras que en los varones esta correlación se manifestó también en las actividades físicas en las que no había carga del peso corporal.

Se puede aceptar, según la literatura que se revisará en el apartado de deporte y masa ósea, que el entrenamiento de alto impacto proporciona un mayor estímulo para aumentar el contenido mineral óseo que deportes aeróbicos como la natación y el atletismo. De todas formas, tal y como apuntan Alfredson et al¹⁹, el entrenamiento aeróbico se puede contemplar como una alternativa al ejercicio físico de alto impacto (normalmente de predominio anaeróbico), ya que, a pesar de que las consecuencias de este tipo de trabajo son inferiores para la DMO, se pueden encontrar beneficios en zonas que tienen un valor clínico importante como son la cadera y la columna lumbar, especialmente si el entrenamiento aeróbico se realiza a través de una actividad como es la carrera, que implica una carga vertical sobre la extremidad inferior, al soportar el peso del propio cuerpo. Por tanto, dentro de la amplia gama de actividades y/o ejercicios que se realizan movilizand la carga del propio cuerpo y que son beneficiosos para la adquisición ósea, los de alto impacto son los que repercuten en un mayor beneficio para la masa ósea y la geometría del hueso²⁰.

Además, se ha de tener presente que el entrenamiento aeróbico se realiza habitualmente mediante diferentes tipos de desplazamiento que representan una actividad cíclica y que, por tanto, no implica una distribución anómala y heterogénea de la deformación que supondría un mayor efecto osteogénico.

Por lo que respecta al tipo de contracción muscular, está bien establecido que son necesarias cargas dinámicas con el fin

de influir sobre la masa ósea²¹; así pues, el trabajo muscular de predominio dinámico será el que tendrá una mayor repercusión sobre el hueso delante del trabajo muscular de predominio isométrico. En el estudio de Woitge²² se encontró, además, que la contracción muscular dinámica excéntrica producía un mayor beneficio para la masa ósea que la contracción muscular concéntrica, seguramente en relación a la capacidad de generar más fuerza y, por tanto, al imprimir una mayor deformación en la zona de inserción muscular.

Influencia de las actividades de salto sobre la masa ósea

Las actividades que incluyen saltos parecen tener un mayor potencial osteogénico, que se manifestará principalmente en las etapas en que el organismo es más receptivo a los beneficios del ejercicio físico.

Diversas pruebas controladas han mostrado que diferentes períodos de actividad de salto aumentan la masa y el área ósea en la edad prepuberal o peripuberal. Sujetos que saltaban tan sólo algunos minutos (entre 10 y 25 min, según los estudios) 3 veces a la semana durante 7-8 meses ganaban más masa ósea en la cadera y en la columna lumbar que otros en el grupo control²³⁻²⁶. Las ganancias observadas en este período corto de estudio se mantienen o aumentan si la intervención se alarga en el tiempo (hasta 2 cursos escolares) con la misma pauta de trabajo²⁷. En esta etapa, especialmente sensible, la inclusión de programas de salto de corta duración, fácilmente incorporables en el currículum de educación física en la escuela, puede contribuir a incrementar las ganancias óseas.

En la etapa pospuberal también se observan los beneficios de programas de ejercicio físico en los que se realizan diferentes actividades de salto con pautas comparables a las expuestas anteriormente²⁸ y con la utilización de cargas adicionales en la ejecución de los ejercicios²⁹.

Los beneficios para el hueso de los ejercicios de salto vertical se han podido constatar, también, aunque en menor cuantía, en mujeres premenopáusicas, con un incremento de la DMO femoral del 2,8%. Sin embargo, un programa equivalente de ejercicios breves de alto impacto se observó que no producía beneficios en el período posmenopáusico³⁰.

Magnitud de la carga de trabajo y duración de la exposición

Al determinar la influencia de los componentes de la carga de entrenamiento sobre el hueso, queda patente que la inten-

sidad del ejercicio tiene una mayor relación con la masa ósea que el volumen del trabajo. Aun así, es necesario plantearse cuál es el volumen de trabajo semanal necesario para que se produzcan adaptaciones en la masa ósea, teniendo presente que siempre estarán en relación con la intensidad de la carga aplicada. Estudios controlados en los que se quería constatar la eficacia de la aplicación de un programa de fuerza-resistencia encontraron que 3 sesiones semanales de unos 45 min, si se aplicaban durante un año, eran suficientes para estimular la adaptación del hueso³¹. En cambio, programas similares seguidos durante menos tiempo (entre 20 y 26 semanas)^{32,33} no eran suficientes para incrementar la masa ósea. Estudios de intervención con diferentes actividades de salto²³⁻²⁶ encuentran beneficios con la aplicación de un programa con un volumen de trabajo sensiblemente inferior, 3 sesiones semanales de entre 10 y 25 min de duración, pero con una actividad de muy alta intensidad.

Karlsson et al³⁴, en un estudio con jugadores de fútbol vieron que los beneficios más grandes para la masa ósea se encontraban cuando la carga semanal estaba por debajo de las 6 h de entrenamiento. En el rango de 0-6 h de entrenamiento semanal encontraron que las ganancias de DMO en el cuello femoral eran del 3,3% por hora de entrenamiento; en cambio, por encima de las 6 h las ganancias sólo eran del 0,7% por hora de entrenamiento.

Cuando el ejercicio se vuelve muy extenuante, los beneficios para el hueso se pueden ver minimizados o incluso anulados^{35,36}. Demasiado ejercicio, especialmente en las chicas, puede tener efectos negativos sobre el crecimiento óseo, especialmente cuando la actividad física se acompaña de pérdida de peso corporal y reducción de las hormonas sexuales que llevan a la interrupción de la menstruación.

Por otro lado, queda por determinar con firmeza cuál puede ser el efecto acumulativo sobre el hueso del ejercicio de alto impacto, ya que los estudios controlados en la mayoría de casos no superan el año. En este sentido cabe mencionar los trabajos de Nurmi-Lawton³⁷, Laing³⁸ y Gustavsson³⁹, que en diferentes estudios prospectivos, todos de 3 años de seguimiento, vieron que se mantenían (o incluso mejoraban) los beneficios del entrenamiento intenso en disciplinas de impacto (gimnasia deportiva, hockey hielo y bádminton).

Se puede llegar a intuir, además, un beneficio a largo plazo al valorar los resultados de estudios transversales que comparan los valores de masa ósea de deportistas de diferentes disciplinas, y con diferentes niveles de impacto, con una historia previa de exposición a este tipo de trabajo^{15,20,40}.

DEPORTE Y MASA ÓSEA

En un estudio de revisión⁴¹ de diferentes trabajos hechos con deportistas de elite y personas que realizaban mucho ejercicio que incluyera el entrenamiento de fuerza, y en ausencia de amenorrea o de escasa nutrición, se ha podido constatar que se llegaba a obtener hasta un 10-30% más de densidad ósea en las zonas de carga que en los sujetos inactivos. Asimismo, deportistas de disciplinas en las que son frecuentes los saltos en diferentes trayectorias, como es el caso del voleibol, baloncesto, bádminton, gimnasia deportiva, etc., son los que obtienen un mayor beneficio en el incremento de la masa ósea, especialmente en las zonas de carga⁴²⁻⁴⁴.

Dentro de los deportes competitivos son diversos los estudios que apoyan la tesis de que las disciplinas que incluyen actividades de impacto vertical, en las que se ha de soportar el peso del propio cuerpo, son más beneficiosas para la masa ósea que aquellas en las que no hay impacto, como la natación. En la mayoría de estos estudios se valoran en un momento determinado las consecuencias, para el hueso, de la exposición previa a un programa de entrenamiento de disciplinas deportivas de diferente impacto^{15,43,45-48}. Ya en 1990, Risser et al⁴⁴, al comparar la DMO de deportistas de diferentes especialidades (jugadoras de voleibol, baloncesto y nadadoras) y controles inactivos, pudieron relacionar unos mayores registros de DMO con la práctica de actividades deportivas que suponían impacto vertical (baloncesto y voleibol), mientras que la DMO de las nadadoras no era mayor que la de las componentes del grupo control, inactivo físicamente. De la misma manera, se ha podido constatar que deportistas de elite de disciplinas acuáticas no tienen una masa ósea mayor en las zonas de carga que otras personas no atletas del grupo control^{15,16,45}. Estas observaciones recalcan la importancia del alto impacto de la actividad como estímulo para la formación ósea.

Hay un gran número de trabajos publicados que estudian las repercusiones sobre la masa ósea de la práctica de la gimnasia deportiva^{36,38,49-53}. Esta disciplina reporta beneficios para el esqueleto axial y apendicular, tanto en el tren superior⁵² como en el inferior. Sin embargo, a veces los beneficios están modulados por la influencia negativa de programas de entrenamiento muy intensivos³⁶ y por las alteraciones hormonales y menstruales que ocasionalmente padecen estas deportistas.

EFFECTOS DEL EJERCICIO EN RELACIÓN A LA REGIÓN ÓSEA

La respuesta del hueso a la carga mecánica suele ser local y no generalizada en todo el esqueleto, y en este sentido hay un

cierto paralelismo con las adaptaciones musculares derivadas del entrenamiento de la fuerza que también se manifiestan a nivel local. Las actividades con soporte del propio peso corporal, que suponen una mayor implicación del tren inferior, tienen una repercusión más importante en la columna lumbar y en la cadera. En contrapartida, las actividades que solicitan de forma específica el tren superior o la extremidad y/o lado dominante obtienen beneficios sólo en estas localizaciones.

En un estudio transversal con una muestra de deportistas de diferentes disciplinas⁵⁴ se comparó la DMO de la extremidad inferior y superior (la dominante y la contralateral), y se pudieron observar diferencias en la DMO de la extremidad dominante y la contralateral de forma generalizada. Estas diferencias se hacían más ostensibles en las disciplinas que implicaban una práctica unilateral (tenis, béisbol, fútbol) frente a las que la actividad era más simétrica (carrera, baloncesto, voleibol). Las diferencias en la adaptación ósea entre uno y otro lado, en relación a la especificidad deportiva, aumentan en función del nivel de entrenamiento del deportista⁵⁵.

En estudios en los que se valoran las diferencias entre la masa ósea de una extremidad y su contralateral, en disciplinas deportivas unilaterales, como pueden ser los deportes de raqueta, se ha podido contrastar que los beneficios para la masa ósea son también unilaterales, confirmando las adaptaciones específicas según el área mayormente implicada en el ejercicio⁵⁶. Haapasalo et al⁵⁷ encontraron que estos beneficios, además de ser unilaterales, no se hacían claramente evidentes hasta el pico de crecimiento de la adolescencia o el estadio III de Tanner, y siempre condicionados por la duración de la carrera deportiva y la frecuencia de los entrenamientos.

Estas adaptaciones óseas diferenciadas entre un lado y el otro se hacen más evidentes si el inicio de la práctica deportiva asimétrica es precoz⁵⁸. Las adaptaciones específicas en relación al ejercicio dependen del estado de maduración ósea de la región⁵⁹.

En diferentes estudios con deportistas con disfunciones menstruales que pueden repercutir de forma negativa en la masa ósea, la mayoría de autores encuentran que el contenido mineral óseo es normal en las zonas de carga (columna lumbar y cadera). Se puede intuir, pues, que la carga mecánica de alguna manera compensaría, a nivel local, el efecto deletéreo sobre el hueso de las alteraciones menstruales y hormonales⁶⁰⁻⁶².

Fuerza y masa ósea

La respuesta ósea local no sólo está en relación con la carga mecánica de cada región específica, sino que también se relaciona con la fuerza muscular. La asociación entre fuerza mus-

cular y masa ósea es un punto controvertido, ya que los resultados de trabajos que han intentado establecer esta asociación son muy dispares.

Diversos estudios en relación a la práctica de diferentes disciplinas deportivas no encuentran que las ganancias en fuerza muscular vayan parejas a los incrementos de la masa ósea local^{42,63-66}. Heinonen et al⁶⁷ concluyeron que un programa de entrenamiento de fuerza unilateral de un año de duración no proporcionaba un efecto osteogénico suficiente, a pesar de los incrementos significativos de fuerza experimentados.

De otro lado, hay trabajos que encuentran asociación entre la fuerza muscular y las adaptaciones locales de la masa ósea⁶⁸⁻⁷¹ y con la composición corporal regional y la DMO del área^{72,73}. Sería una forma indirecta de relacionar las áreas mayormente solicitadas en las diferentes disciplinas deportivas y la fuerza muscular y la DMO de la misma área.

Nichols et al³¹, en un estudio controlado, llegaron a la conclusión de que el entrenamiento de la fuerza se puede contem-

plar como un potencial método para incrementar la masa ósea de los adolescentes, al encontrar que la aplicación de un programa de fuerza-resistencia de 30 a 45 min de duración, 3 veces a la semana durante 15 meses, incrementaba de forma significativa la fuerza en el tren inferior y la DMO en el cuello femoral. Blimkie et al³², en un trabajo también con chicas adolescentes (14-18 años), con una intervención de similares características al anterior pero de una duración de sólo 26 semanas, encontraron que a pesar de las ganancias significativas de fuerza no había incrementos significativos de masa ósea. Similares resultados encontró Chilibeck³³, que al aplicar un programa de fuerza de 2 sesiones semanales durante 20 semanas, observó mejoras en los registros de fuerza y de porcentaje muscular, pero no fue suficiente para mejorar la DMO y el contenido mineral óseo. De la valoración de estos estudios se podría intuir que se necesitan intervenciones con programas de entrenamiento de larga duración para poder establecer relación entre las ganancias de fuerza y de masa ósea.

Bibliografía

1. Bailey DA, McKay HA, Mirwald RL, Crocker PR, Faulkner RA. A six-year longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual in growing children: the university of Saskatchewan bone mineral accrual study. *J Bone Miner Res.* 1999;14:1672-9.
2. Ferretti JL, Schiessl H, Frost HM. On new opportunities for absorptiometry. *J Clin Densitom.* 1998;1:41-53.
3. Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif Tissue Int.* 1985;37:411-7.
4. Whalen RT, Carter DR, Steele CR. Influence of physical activity on the regulation of bone density. *J Biomech.* 1988;21:825-37.
5. Turner CH, Owan I, Takano Y. Mechanotransduction in bone: role of strain rate. *Am J Physiol.* 1995;269:E438-42.
6. Umemura Y, Ishiko T, Tsujimoto H, Miura H, Mokushi N, Suzuki H. Effects of jump training on bone hypertrophy in young and old rats. *Int J Sports Med.* 1995;16:364-7.
7. Lanyon LE. Functional strain as a determinant for bone remodeling. *Calcif Tissue Int.* 1984;36 Suppl 1:S56-61.
8. Lanyon LE. Functional strain in bone tissue as an objective, and controlling stimulus for adaptive bone remodelling. *J Biomech.* 1987;20:1083-93.
9. Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J Bone Joint Surg Am.* 1984;66:397-402.
10. Umemura Y, Ishiko T, Yamauchi T, Kurono M, Mashiko S. Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. *J Bone Miner Res.* 1997;12:1480-5.
11. Honda A, Umemura Y, Nagasawa S. Effect of high-impact and low-repetition training on bones in ovariectomized rats. *J Bone Miner Res.* 2001;16:1688-93.
12. Robling AG, Hinant FM, Burr DB, Turner CH. Shorter, more frequent mechanical loading sessions enhance bone mass. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34:196-202.
13. Heinonen A, Oja P, Kannus P, Sievanen H, Haapasalo H, Manttari A, et al. Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone.* 1995;17:197-203.
14. Courteix D, Lespessailles E, Peres SL, Obert P, Germain P, Benhamou CL. Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: a comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports. *Osteoporos Int.* 1998;8: 152-8.
15. Lima F, Falco V, Baima J, Carazzato JG, Pereira RMR. Effect of impact load and active load on bone metabolism and body composition of adolescent athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33: 1318-23.
16. Taaffe DR, Snow-Harter C, Connolly DA, Robinson TL, Brown MD, Marcus R. Differential effects of swimming versus weight-

- bearing activity on bone mineral status of eumenorrheic athletes. *J Bone Miner Res.* 1995;10:586-93.
17. Bailey DA, Faulkner RA, McKay HA. Growth, physical activity, and bone mineral acquisition. *Exerc Sport Sci Rev.* 1996;24:233-66.
18. Matkin CC, Bachrach L, Wang MC, Kelsey J. Two measures of physical activity as predictors of bone mass in a young cohort. *Clin J Sport Med.* 1998;8:201-8.
19. Alfredson H, Nordström P, Lorentzon R. Aerobic workout and bone mass in females. *Scand J Med Sci Sports.* 1997;7:336-41.
20. Pettersson U, Nordström P, Alfredson H, Henriksson-Larsén K, Lorentzon R. Effect of high impact activity on bone mass and size in adolescent females: A comparative study between two different types of sports. *Calcif Tissue Int.* 2000;67:207-14.
21. Skerry TM. Mechanical loading and bone: what sort of exercise is beneficial to the skeleton? *Bone.* 1997;20:179-81.
22. Woitge HW, Friedmann B, Suttner S, Farahmand I, Muller M, Schmidt-Gayk H, et al. Changes in bone turnover induced by aerobic and anaerobic exercise in young males. *J Bone Miner Res.* 1998;13:1797-804.
23. 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.
24. MacKelvie KJ, McKay HA, Khan KM, Crocker PR. A school-based exercise intervention augments bone mineral accrual in early pubertal girls. *J Pediatr.* 2001;139:501-8.
25. McKay HA, Petit MA, Schutz RW, Prior JC, Barr SI, Khan KM. Augmented trochanteric bone mineral density after modified physical education classes: a randomized school-based exercise intervention study in prepubescent and early pubescent children. *J Pediatr.* 2000;136:156-62.
26. Petit MA, McKay HA, MacKelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ. A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. *J Bone Miner Res.* 2002;17:363-72.
27. 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.
28. Witzke KA, Snow CM. Effects of plyometric jump training on bone mass in adolescent girls. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1051-7.
29. Arnett MG, Lutz B. Effects of rope-jump training on the os calcis stiffness index of postpubescent girls. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34:1913-9.
30. Bassey EJ, Rothwell MC, Littlewood JJ, Pye DW. Pre- and post-menopausal women have different bone mineral density responses to the same high-impact exercise. *J Bone Miner Res.* 1998;13:1805-13.
31. Nichols DL, Sanborn CF, Love AM. Resistance training and bone mineral density in adolescent females. *J Pediatr.* 2001;139:494-500.
32. Blimkie CJ, Rice S, Webber CE, Martin J, Levy D, Gordon CL. Effects of resistance training on bone mineral content and density in adolescent females. *Can J Physiol Pharmacol.* 1996;74:1025-33.
33. Chilibeck PD, Calder A, Sale DG, Webber CE. Twenty weeks of weight training increases lean tissue mass but not bone mineral mass or density in healthy, active young women. *Can J Physiol Pharmacol.* 1996;74:1180-5.
34. Karlsson MK, Magnusson H, Karlsson C, Seeman E. The duration of exercise as a regulator of bone mass. *Bone.* 2001;28:128-32.
35. Klesges RC, Ward KD, Shelton ML, Applegate WB, Cantler ED, Palmieri GM, et al. Changes in bone mineral content in male athletes. Mechanisms of action and intervention effects. *JAMA.* 1996;276:226-30.
36. Markou KB, Mylonas P, Theodoropoulou A, Kontogiannis A, Leglise M, Vagenakis AG, et al. The influence of intensive physical exercise on bone acquisition in adolescent elite female and male artistic gymnasts. *J Clin Endocrinol Metab.* 2004;89:4383-7.
37. Nurmi-Lawton JA, Baxter-Jones AD, Mirwald RL, Bishop JA, Taylor P, Cooper C, et al. Evidence of sustained skeletal benefits from impact-loading exercise in young females: a 3-year longitudinal study. *J Bone Miner Res.* 2004;19:314-22.
38. Laing EM, Massoni JA, Nickols-Richardson SM, Modlesky CM, O'Connor PJ, Lewis RD. A prospective study of bone mass and body composition in female adolescent gymnasts. *J Pediatr.* 2002;141:211-6.
39. Gustavsson A, Thorsen K, Nordström P. A 3-year longitudinal study of the effect of physical activity on the accrual of bone mineral density in healthy adolescent males. *Calcif Tissue Int.* 2003;73:108-14.
40. Hamdy RC, Anderson JS, Whalen KE, Harvill LM. Regional differences in bone density of young men involved in different exercises. *Med Sci Sports Exerc.* 1994;26:884-8.
41. Chilibeck PD, Sale DG, Webber CE. Exercise and bone mineral density. *Sports Med.* 1995;19:103-22.
42. Alfredson H, Nordström P, Lorentzon R. Bone mass in female volleyball players: a comparison of total and regional bone mass in female volleyball players and nonactive females. *Calcif Tissue Int.* 1997;60:338-42.
43. Fehling PC, Alekel L, Clasey J, Rector A, Stillman RJ. A comparison of bone mineral densities among female athletes in impact loading and active loading sports. *Bone.* 1995;17:205-10.
44. Risser WL, Lee EJ, LeBlanc A, Poindexter HB, Risser JM, Schneider V. Bone density in eumenorrheic female college athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 1990;22:570-4.
45. Andreoli A, Monteleone M, van Loan M, Promenzio L, Tarantino U, de Lorenzo A. Effects of different sports on bone density and muscle mass in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:507-11.

46. Creighton DL, Morgan AL, Boardley D, Brolinson PG. Weight-bearing exercise and markers of bone turnover in female athletes. *J Appl Physiol*. 2001;90:565-70.
47. Nordström P, Pettersson U, Lorentzon R. Type of physical activity, muscle strength, and pubertal stage as determinants of bone mineral density and bone area in adolescent boys. *J Bone Miner Res*. 1998;13:1141-8.
48. Taaffe DR, Robinson TL, Snow CM, Marcus R. High-impact exercise promotes bone gain in well-trained female athletes. *J Bone Miner Res*. 1997;12:255-60.
49. Bass S, Pearce G, Bradney M, Hendrich E, Delmas PD, Harding A, et al. Exercise before puberty may confer residual benefits in bone density in adulthood: studies in active prepubertal and retired female gymnasts. *J Bone Miner Res*. 1998;13:500-7.
50. Jaffre C, Courteix D, Dine G, Lac G, Delamarche P, Benhamou L. High-impact loading training induces bone hyperresorption activity in young elite female gymnasts. *J Pediatr Endocrinol Metab*. 2001;14:75-83.
51. Laing EM, Wilson AR, Modlesky CM, O'Connor PJ, Hall DB, Lewis RD. Initial years of recreational artistic gymnastics training improves lumbar spine bone mineral accrual in 4- to 8-year-old females. *J Bone Miner Res*. 2005;20:509-19.
52. Proctor KL, Adams WC, Shaffrath JD, van Loan MD. Upper-limb bone mineral density of female collegiate gymnasts versus controls. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1830-5.
53. Zanker CL, Gannon L, Cooke CB, Gee KL, Oldroyd B, Truscott JG. Differences in bone density, body composition, physical activity, and diet between child gymnasts and untrained children 7-8 years of age. *J Bone Miner Res*. 2003;18:1043-50.
54. McClanahan BS, Harmon-Clayton K, Ward KD, Klesges RC, Vukadinovich CM, Cantler ED. Side-to-side comparisons of bone mineral density in upper and lower limbs of collegiate athletes. *J Strength Cond Res*. 2002;16:586-90.
55. Wu J, Ishizaki S, Kato Y, Kuroda Y, Fukushima S. The side-to-side differences of bone mass at proximal femur in female rhythmic sports gymnasts. *J Bone Miner Res*. 1998;13:900-6.
56. Balias R, Bonet N, Pacheco L, Parra J, Estruch A, Ruiz A, et al. Valoració regional del contingut i la densitat òssia en tennistes professionals. *Apunts Medicina de l'Esport*. 2002;37(140):25-38.
57. Haapasalo H, Kannus P, Sievanen H, Pasanen M, Uusi-Rasi K, Heinonen A, et al. Effect of long-term unilateral activity on bone mineral density of female junior tennis players. *J Bone Miner Res*. 1998;13:310-9.
58. Kontulainen S, Sievanen H, Kannus P, Pasanen M, Vuori I. Effect of long-term impact-loading on mass, size, and estimated strength of humerus and radius of female racquet-sports players: a peripheral quantitative computed tomography study between young and old starters and controls. *J Bone Miner Res*. 2002;17:2281-9.
59. Bass SL, Saxon L, Daly RM, Turner CH, Robling AG, Seeman E, et al. The effect of mechanical loading on the size and shape of bone in pre-, peri-, and postpubertal girls: a study in tennis players. *J Bone Miner Res*. 2002;17:2274-80.
60. Khan KM, Bennell KL, Hopper JL, Flicker L, Nowson CA, Sherwin AJ, et al. Self-reported ballet classes undertaken at age 10-12 years and hip bone mineral density in later life. *Osteoporos Int*. 1998;8:165-73.
61. Muñoz MT, Barrios V, Garrido G, Argente J. Ejercicio físico y masa ósea en adolescentes deportistas. *Rev Esp Pediatr*. 2003;59:61-9.
62. Warren MP, Brooks-Gunn J, Fox RP, Holderness CC, Hyle EP, Hamilton WG. Osteopenia in exercise-associated amenorrhea using ballet dancers as a model: a longitudinal study. *J Clin Endocrinol Metab*. 2002;87:3162-8.
63. Alfredson H, Nordström P, Lorentzon R. Total and regional bone mass in female soccer players. *Calcif Tissue Int*. 1996;59:438-42.
64. Duppe H, Gardsell P, Johnell O, Nilsson BE, Ringsberg K. Bone mineral density, muscle strength and physical activity. A population-based study of 332 subjects aged 15-42 years. *Acta Orthop Scand*. 1997;68:97-103.
65. Nordström P, Lorentzon R. Site-specific bone mass differences of the lower extremities in 17-year-old ice hockey players. *Calcif Tissue Int*. 1996;59:443-8.
66. Söderman K, Bergström E, Lorentzon R, Alfredson H. Bone mass and muscle strength in young female soccer players. *Calcif Tissue Int*. 2000;67:297-303.
67. Heinonen A, Sievanen H, Kannus P, Oja P, Vuori I. Effects of unilateral strength training and detraining on bone mineral mass and estimated mechanical characteristics of the upper limb bones in young women. *J Bone Miner Res*. 1996;11:490-501.
68. Conroy BP, Kraemer WJ, Maresh CM, Fleck SJ, Stone MH, Fry AC, et al. Bone mineral density in elite junior Olympic weightlifters. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:1103-9.
69. Duncan CS, Blimkie CJ, Kemp A, Higgs W, Cowell CT, Woodhead H, et al. Mid-femur geometry and biomechanical properties in 15- to 18-yr-old female athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:673-81.
70. Duncan CS, Blimkie CJ, Cowell CT, Burke ST, Briody JN, Howman-Giles R. Bone mineral density in adolescent female athletes: relationship to exercise type and muscle strength. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:286-94.
71. Tsuji S, Tsunoda N, Yata H, Katsukawa F, Onishi S, Yamazaki H. Relation between grip strength and radial bone mineral density in young athletes. *Arch Phys Med Rehabil*. 1995;76:234-8.
72. Nichols DL, Sanborn CF, Bonnick SL, Gench B, DiMarco N. Relationship of regional body composition to bone mineral density in college females. *Med Sci Sports Exerc*. 1995;27:178-82.
73. Vicente-Rodríguez G, Ara I, Pérez-Gómez J, Dorado C, Calbet JA. Muscular development and physical activity as major determinants of femoral bone mass acquisition during growth. *Br J Sports Med*. 2005;39:611-6.