



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

**Del deporte de alto rendimiento a la comunidad.
Evaluación de una propuesta para mejorar
la densidad mineral ósea**

Montserrat Bellver Vives



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0. Spain License.**

TESIS DOCTORAL

DEL DEPORTE DE ALTO RENDIMIENTO A LA COMUNIDAD: EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA MEJORAR LA DENSIDAD MINERAL ÓSEA

Memoria de tesis doctoral presentada por Montserrat Bellver Vives para optar al grado de Doctor por la Universitat de Barcelona

Dirigida por:

Dr. Antoni Trilla García

Catedrático de Medicina Preventiva y Salud Pública de la Universidad de Barcelona. Jefe del Servicio de Medicina Preventiva y Epidemiología.
Hospital Clínico de Barcelona

Dr. Franchek Drobnic Martínez

Responsable del Departamento de Investigación en Ciencias del Deporte del CAR (hasta Enero 2020)
Jefe de los Servicios Médicos del Shanghai Shenhua FC (desde Enero 2020)

Programa de Doctorat Medicina i Recerca Translacional

Facultat de Medicina i Ciències de la Salut. Universitat de Barcelona

Septiembre 2021



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



CST • CONSORCI SANITARI DE TERRASSA

Informe director/s /tutor sobre l'autorització del dipòsit de la tesi

Dr./a. Antoni Trilla Garcia, com a director/tutor de la tesi doctoral titulada “ Del deporte de alto rendimiento a la comunidad: evaluación de una propuesta para mejorar la densidad mineral ósea ” i, d'acord amb el que s'estableix a l'article 35 Normativa reguladora del Doctorat a la Universitat de Barcelona, emeto el següent:

INFORME

(Informe detallat i motivat sobre el contingut de la tesi i sobre l'autorització de dipòsit de la tesi que s'ha demanat)

La Doctoranda, Montserrat Bellver, ha treballat de forma intensa i amb una gran dedicació, aconseguint publicar tres articles relacionats amb el tema objecte de la Tesi Doctoral i un quart en fase final d'acceptació.

Dos dels articles, especialment rellevants, s'han publicat en revistes d'alt impacte:

- 1.- Bellver M, Drobnic F, Jovell E, Ferrer-Roca V, Abalos X, Del Rio L, Trilla A. Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers. J Bone Miner Metab. 2021 Sep;39(5):858-867. doi: 10.1007/s00774-021-01224-3. Epub 2021 Apr 11. PMID: 33839950.
- 2.- Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. Bone. 2019 Oct;127:393-400. doi: 10.1016/j.bone.2019.06.030. Epub 2019 Jul 1. PMID: 31271933.

Aquests articles formen la base de la Tesi Doctoral, que aprofita la recerca feta en voluntàries que son dones atletes d'elit (nedadores de natació sincronitzada) olímpiques, i compara diferents paràmetres ossis amb altres atletes d'elit d'altres esports, aquatics i no aquatics. Alhora, la Tesi presenta un component pràctic, com és la possibilitat de complementar o suplementar l'entrenament d'aquestes esportistes amb un seguit d'exercicis encaminats a millorar la densitat òssia, i exposa la situació de les ex-nadadores d'elit (objecte del tercer article) i formula una possible alternativa per traslladar aquests resultats a la millora de la densitat ossia en dones d'edat mitjana.

La doctoranda ha complert tots i cadascun dels objectius establerts, i ha anat rerssolent els problemes que s'han presentat en el desenvolupament del projecte, amb una implicació directa i plena.

La presentació formal i la redacció de la Tesi compleixen abastament els requisits exigibles.



Barcelona, 22 d'/de setembre de 2021.



(signat)

Dr./a **Antoni Trilla Garcia**

Un cop s'hagi emplenat l'informe, s'ha d'adjuntar i s'ha de fer arribar al doctorand o al president de la Comissió Acadèmica del programa de doctorat responsable de la tesi.

Agradecimientos

Como médico especialista en Medicina de la Actividad Física y el Deporte, mi primera aproximación al deporte de alto nivel en mujeres y al estudio de su densidad ósea, fue hace 30 años gracias a una beca de la Secretaria General de l'Esport de la mano del Dr.Pere Pujol Amat, jefe médico del Departamento de Medicina del Deporte del CAR de Sant Cugat. Ya desde aquel inicio nos preocupó la fragilidad ósea en aquellas deportistas que practicaban deportes con menor efecto de la gravedad desde edades tempranas de la vida, durante muchas horas y años en previsión de una posible repercusión que pudiera tener a largo plazo en su salud ósea. Esta inquietud era también compartida con el Dr.Franchek Drobnic, en aquel momento jefe de la Unidad de Fisiología del Deporte del mismo Centro. Empezamos a trabajar en programas de ejercicio físico complementarios al entrenamiento habitual en las deportistas de élite y a valorar el efecto que estos programas podían tener en la densidad ósea. Nos ilusionó pensar que en un futuro podrían convertirse en programas útiles para mujeres post-menopaúsicas con baja densidad ósea. Así, uno de los objetivos del CAR daría fruto, la investigación en el deporte de alto nivel podría beneficiar y ser aplicada a la comunidad.

Desde mis inicios como médico del deporte en el CAR de Sant Cugat tuve la oportunidad de trabajar con la mayoría de selecciones olímpicas femeninas: la selección absoluta femenina de voleibol, la selección femenina de waterpolo, el equipo de natación artística y mujeres deportistas de élite de deportes individuales como la natación, la gimnasia rítmica, el taekwondo, el atletismo, el tenis de mesa o la halterofilia, entre otros. El trabajo multidisciplinar desde la medicina velando por la salud de los deportistas de alto nivel, me ha permitido crecer profesionalmente.

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han hecho posible la realización de esta tesis. En particular:

Al Dr. Franchek Drobnic, director de esta tesis. Es el verdadero responsable de que me animase en realizar un doctorado después de casi 30 años de trabajo en el deporte de alto rendimiento. Quiero agradecerle su orientación, conocimiento, rigor científico y el

haber estado presente en la distancia, desde su equipo de futbol, en China, siempre que le he necesitado.

Al Dr. Antoni Trilla por acogerme desde el primer momento que acudí para consultarle aspectos académicos y científicos en relación a la problemática de la investigación que deseaba estructurar y desarrollar. Su soporte académico, pero sobre todo la empatía sincera por compartir inquietudes y la decisión de desear entender un entorno profesional tan distinto al suyo como es la medicina del deporte aplicada al alto nivel de exigencia competitiva, condicionó que su manera de orientar la toma de decisiones en relación al proyecto me hayan servido, no solo para encauzarme en la investigación sino también para darme cuenta que ser Doctor en Medicina es mucho más que terminar un proyecto inédito.

Al Dr. Luis Del Rio, por su extraordinaria experiencia y disposición a colaborar desde el primer momento. Su ejemplo, dedicación y enseñanza en la densidad mineral ósea, inquietud que compartimos desde 1992, cuando me inicié en el ejercicio de la medicina del deporte, ha sido un estímulo para seguir investigando y aprender.

A la Dra. Esther Jovell, por socorrerme en temas estadísticos y por sus consejos metodológicos tan valiosos. Ha sido una amiga con la que siempre he podido contar, compartir y debatir cualquier cuestión científica y de la vida en general. Ella siempre ha creído en mis posibilidades y se lo agradezco muchísimo.

Al Dr. Ventura Ferrer, por compartir mi día a día en el CAR y asesorarme en la publicación científica de los artículos. Su colaboración en las pruebas con los deportistas, su dedicación al diseño de las pruebas de biomecánica idóneas a los intereses del estudio y los momentos incontables de discusión en el laboratorio de biomecánica me han facilitado el comprender el mundo de la biomecánica.

Al Dr. Ramón Olivé, por creer siempre en mi capacidad de trabajo y por su apoyo incondicional en todos los momentos profesionales que hemos compartido. Y a mis compañeros de Departamento en el CAR de Sant Cugat.

Al Dr. Ramón Canal, jefe de los Servicios Médicos del FCB, por facilitar la realización de los estudios de densitometría en los servicios médicos del club. Siempre creyó en el proyecto.

Al Dr. Lucas Gomez-Chereguini por su perseverancia y disposición en la recogida de datos y su dedicación en el seguimiento del proyecto con las nadadoras de artística ya retiradas. Una gran labor que merece una mención especial.

A la Sra. Carmen Pérez-Ventana, por su soporte constante en las búsquedas y citas bibliográficas, y las revistas dónde publicar.

Al Dr. José Ríos por su ayuda en los momentos complicados de los análisis estadísticos.

Al Sr. Manel Vela, por su inestimable ayuda y dedicación en la gestión de los datos, sobre todo con las bases de datos Excel. Siempre dispuesto a dar más de lo que él consideraba necesario.

Al Sr. Xavier Balius, por facilitarme las ayudas en la corrección lingüística de los artículos y por estar siempre dispuesto a escucharme.

Al Sr. Ramón Terrassa como Director del CAR por contar siempre conmigo en los temas relacionados con la salud de los deportistas y por su labor en el CAR velando por el bienestar y trabajo de los deportistas y los trabajadores.

Al todos los profesionales del CAR, que trabajamos en distintas lugares, tareas y responsabilidades, pero que compartimos las mismas inquietudes con los deportistas de alto nivel velando para que mejoren su rendimiento en un ambiente sano y saludable. Y en especial a mi amiga y compañera Montse Banquells, por su cálido apoyo y su predisposición a ayudar en todo momento.

Al CST, tanto a la dirección como a todos los profesionales que han participado en la elaboración de esta tesis.

Y a mi familia,

A mis padres, Francesc y Montse, que me inculcaron que el trabajo, la perseverancia y la ilusión son elementos esenciales para conseguir objetivos.

A mis hermanos, en especial a mi hermana Natalia, que ha fallecido este año, por su ánimo incondicional y por haberse interesado en mis publicaciones en revistas científicas durante nuestras tardes de charla. La echo mucho de menos. A mi hermano David, siempre a mi lado.

A Joan “Foncu”, mi pareja, porque me ha dado la estabilidad necesaria para retomar mi tesis con su cariñoso apoyo incondicional y animándome en todo momento. Es un ejemplo para mí de superación, valentía y capacidad de afrontar los obstáculos de la vida.

A mis hijos, Laura y Víctor, que han sido el motor de mi vida. Por su apoyo, por cuidarme tanto y preocuparse por mí. Siempre dispuestos a escucharme y animarme. Son un ejemplo de perseverancia, inquietud, honestidad, valentía, ilusión y un orgullo para mí.

Por último, quiero agradecer muy especialmente a todas las deportistas y a sus entrenadores/as, en especial a mis deportistas de natación artística que hayan aceptado participar en los estudios. Aunque este estudio es por y para ellas, sin su compromiso y disposición no se hubiera podido realizar. Son tan importantes que gracias a ellas esperamos ofrecer unos resultados útiles para muchas.

Todos vosotros sois responsables de que una parte del trabajo diario en el mundo del deporte de alto nivel haya sido recogido y haya podido estudiarse y proyectarse en esta tesis. He disfrutado al realizarla y al escribirla. ¡He aprendido!

Muchas gracias.

ÍNDICE

1. ABREVIATURAS	1
2. ARTÍCULOS QUE COMPONEN LA TESIS	3
2.1. Objetivo 1	3
2.2. Objetivo 2	3
2.3. Objetivo 3	4
2.4. Objetivo 4	4
3. RESUMEN DE LA TESIS	5
3.1. Summary.....	5
3.2. Resumen	8
3.3. Resum	12
4. INTRODUCCIÓN	15
4.1. Epidemiología	15
4.2. Definición.....	16
4.3. Fisiología del hueso	17
4.3.1. Factores no modificables que condicionan una pérdida de la DMO en el ser humano.....	18
4.3.1.1. Edad	18
4.3.1.2. Sexo	19
4.3.1.3. Raza	20
4.3.1.4. Genética.....	20
4.3.2. Factores modificables que condicionan la pérdida de la DMO en el ser humano.....	21
4.3.2.1. Alimentación.....	21
4.3.2.2. Tabaco y alcohol	22
4.3.2.3. Exposición solar	22
4.3.2.4. Bajo nivel estrogénico	24
4.4. Ejercicio físico	26
4.4.1. Influencia del estrés mecánico en el metabolismo óseo	27
4.4.2. Efectos de la inmovilización	32
4.4.3. Fuerzas de reacción del suelo (y su medición).....	33

4.4.3.1. Salto a la cuerda en deportistas	35
4.4.3.2. Programa de Salto en mujeres adultas	36
4.4.4. Plataforma vibratoria	37
4.5. Hueso y deporte	39
4.5.1. Natación artística (natación sincronizada).....	39
4.5.2. Natación	43
4.5.3. Waterpolo	46
4.5.4. Fútbol	48
4.5.5. Voleibol	50
4.5.6. Hockey hierba.....	52
4.6. Deporte femenino y alto nivel.....	53
4.6.1. Deporte de alto nivel.....	53
4.6.2. Tríada de la mujer deportista.....	54
4.7. Medidas de evaluación.....	59
4.7.1. Densitometría (DXA)	59
4.7.2. 3D-DXA	63
4.8. Justificación de los estudios	66
5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	69
5.1. Hipótesis	69
5.2. Objetivos.....	70
6. PARTICIPANTES, MÉTODOS Y RESULTADOS.....	71
6.1. Objetivo 1	71
6.2. Objetivo 2	81
6.3. Objetivo 3	93
6.4. Objetivo 4	103
7. DISCUSIÓN	127
7.1. Disciplinas deportivas de alto nivel y hueso.....	127
7.1.1. DMO total y por segmentos.....	129
7.1.2. DMO en columna lumbar y cuello femoral.....	131
7.1.3. Natación artística vs natación	134
7.2. Natación artística y hueso	135

7.3. Pico de masa ósea alcanzado	136
7.4. Hueso y composición corporal	139
7.5. Metabolismo óseo: calcio y vitamina D.....	140
7.6. Del entrenamiento y práctica de alto rendimiento a la comunidad.....	140
7.7. Tasa de pérdida ósea.....	141
7.8. Una nueva técnica de medida de la estructura del hueso.....	143
8. LIMITACIONES DE LOS ESTUDIOS	147
9. FORTALEZAS DE ESTA TESIS	151
10. APLICABILIDAD DE LOS RESULTADOS	153
11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	154
12. CONCLUSIONES	155
13. BIBLIOGRAFÍA.....	157

1. ABREVIATURAS

A: Aquatic sports, deportes de agua

ACSM: American College of Sports Medicine

AM: Masa apendicular

AS: Artistic swimming, natación artística

BR: Buckling ratio, índice de estabilidad ósea

CAR: Centre d'Alt Rendiment

CMJ: Counter Movement Jump, salto con rebote

CMO: Contenido Mineral Óseo

CSD: Consejo Superior de Deportes

CST: Consorci Sanitari de Terrassa

DAN: Deportista de alto nivel

DMO: Densidad Mineral Ósea

DXA: Densitometría Ósea, absorciometría de rayos X de energía dual

F: Fútbol

FCB: Fútbol Club Barcelona

FINA: Federación Internacional de Natación

FFM: Fat Free Mass, masa magra o masa libre de grasa

FM: Fat Mass, masa grasa

FRAX: Fracture risk assessment tool, índice de riesgo de fractura

GRF: Ground Reaction Forces, fuerzas de reacción del suelo

h.: horas, hours

Hz: Hercio o Hertz

HH: Hockey hierba

ILR: Carga de impacto

IMC: Índice de masa corporal

JR: Jumping Rope, salto a la cuerda

JJOO: Juegos Olímpicos

LH: Hormona Luteinizante

MES: Minimum effective strain, carga de tensión mínima

Min: minutos

N: Newton

NA: Non-Aquatic sports, deportes no acuáticos

NIH: National Institute Health, Instituto Nacional de Salud

OMS: Organización Mundial de la Salud

PMO: Pico de masa ósea

PTH: Paratohormona

PVRF: Pico o ápice de fuerza de reacción vertical

RED'S: Relative Energy Deficiency in Sport, síndrome de baja disponibilidad energética en el deporte

RM: Repetición Máxima

SC: Controles sedentarios (no deportistas)

SGE: Secretaria General de l'Esport

sDMO: Densidad mineral ósea de superficie

Seg: segundos

SW: Swimming, natación

TDAH: Transtorno por déficit de atención e hiperactividad

QCT: Tomografía cuantitativa computerizada

VB: Voleibol

vDMO: Densidad mineral ósea volumétrica

WP: Waterpolo

WBV: Whole Body Vibration, plataforma vibratoria

2. ARTICULOS QUE COMPONEN LA TESIS

La Tesis se presenta en formato compendio de artículos.

Consta de 4 objetivos y 2 artículos publicados, 1 artículo aceptado para publicar y 1 artículo actualmente en 2ª revisión.

2.1. OBJETIVO 1

Determinar el patrón de densidad mineral ósea (DMO), contenido mineral óseo (CMO) y segmentos corporales en nuestra población de deportistas de élite de diferentes disciplinas deportivas, así como en controles no deportistas.

Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. Bone, 2019, 127, 393–400

- Revista: BONE
Impact Factor 2019: 4.147 .
Endocrinology & Metabolism: Q2

2.2. OBJETIVO 2

Evaluar el impacto de un programa de ejercicio físico incrementando la carga gravitatoria, controlando la suplementación y la dieta en el patrón de mineralización ósea de nadadoras de natación artística de alto nivel.

Bellver M, Drobnic F, Jovell E, Ferrer-Roca V, Abalos X, Del Rio L, Trilla A. Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers. J Bone Miner Metab, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00774-021-01224-3>

- Revista: JOURNAL OF BONE AND MINERAL METABOLISM
Impact Factor 2020: 2.626
Medicine, Research & Experimental Q3

2.3. OBJETIVO 3

Analizar la DMO y CMO, en la edad adulta en los equipos de ex nadadoras de natación artística, en relación a una muestra de la misma edad de controles no deportistas. Evaluar el posible efecto positivo en el patrón de mineralización ósea de un programa de salto durante la pandemia por COVID-19.

Montse Bellver, Ventura Ferrer-Roca, Luis Del Rio, Esther Jovell, Lucas Gomez-Chereguini, Franchek Drobnic, Antoni Trilla. Bone variables and body composition in former artistic swimmers teams. Jump program effects during Covid-19 confinement: a randomized controlled study.

- Revista: APUNTS SPORTS MEDICINE. Original research.
Article reference: APUNSM_APUNTS-D-21-00026
To be published in: Apunts Sports Medicine. Aceptado en agosto 2021. Our reference: APUNSM 100370

2.4. OBJETIVO 4

Explorar la utilidad de pruebas de última generación por imagen en mineralización ósea “3D-DXA”, orientada al estudio de hueso cortical y trabecular, en deportistas de alto nivel en referencia a sujetos no deportistas.

Amineh Amani, **Montse Bellver**, Luis del Rio, Joan Ramon Torrella, Antonia Lizarraga, Ludovic Humbert, Franchek Drobnic. Comparison of cortical and trabecular bone mineral density assessed by 3D-DXA in female elite athletes involved in weight bearing and non-weight bearing sports.

- Revista: European Journal of Sports Science
Impact factor 2020: 4.050
Sports Medicine: Q1
Manuscript ID TEJS-2020-1716. Manuscript Type: Original Paper en 2ª revisión.

3. RESUMEN DE LA TESIS

3.1. SUMMARY

From high performance to the community: evaluation of a proposal to improve bone mineral density

Introduction: Osteoporosis affects millions of people around the world, mainly menopausal women. Prevention of osteoporosis at early ages of life is a key factor for reducing the risk of fracture in the elderly. Exercise is a protective factor for the appearance of osteoporosis, but not all physical activities have the same effect on bones. A low-impact sport, like swimming and artistic swimming, seems not to benefit bone development like other out-of-water physical activities do. Artistic swimmers can be a population at risk of developing osteopenia and osteoporosis in later life. To increase bone acquisition, artistic swimming should combine water training with weight-bearing impact or strength activities. Physical activity performed by high-level athletes generates different stress models on different components of the skeleton (cortical and trabecular). There is new device, DXA-derived 3D analysis, to assess cortical and trabecular bone mineral density, a key parameter for a better classification of the subjects based on their fracture risk.

Objective: (I) The aim of the first study was to evaluate bone mineral density (BMD, g/cm²) and bone mineral content (BMC, kg) among female high performance athletes from aquatic and non-aquatic sports and to assess possible differences with sedentary controls. (II) The aim of the second study was to evaluate the effects of a training program (jumping rope and whole body vibration) on bone mineral density (BMD), bone mineral content (BMC) and body composition in an Olympic artistic swimming team. (III) The aim of the third study was to determine the long-term effect of aquatic exercise on bone variables in a group of ex artistic swimmers and to evaluate the effect of a jump program in the same group during COVID-19 confinement. (IV) The aim of the fourth study was to evaluate cortical and trabecular bone mineral density by DXA-derived 3D analysis among high performance athletes from aquatic and non-aquatic sports and to assess possible differences with sedentary controls.

Methods: (I) Participants were elite female athletes over 18 years, from the Spanish

Olympic teams, with at least 12–15h. of weekly training on aquatic sports: swimming (n=19), artistic swimming (n=24) and water polo (n=14), and elite female athletes from non-aquatic sports: professional football players of Football Club Barcelona team (n=92), Spanish national volleyball (n=26) and field hockey teams (n=29) as well as sedentary controls (n=126). (II) Sixteen women Olympic artistic swimming team, aged 17–21 years, who train 30 h/week, at the Olympic Training Centre (Barcelona, Spain), were followed up over two seasons. The 1st season involved regular artistic swimming training without specific training to reduce the risk of osteopenia. The exercise intervention, jumping rope and whole-body vibration, was added in the 2nd season. The protocol included 20 min. of training 2 days per week, over a 22-week period. (III) Participants were 25 former artistic swimmers, aged 36-52 years, and 50 sedentary controls. Subjects were randomly assigned to one of two groups: jump group and non-intervention group. (IV) Participants were elite female athletes over 18 years from the Spanish artistic swimming Olympic team (n=25), professional football players of Football Club Barcelona team (n=60) and non-exercise group (n=40).

Dual energy X-ray absorptiometry measured the bone variables and body composition. Bone mineral density scans were performed using both dual-energy X-ray absorptiometry for proximal femur and DXA-derived 3D analysis to assess cortical and trabecular bone mineral density in the fourth study. The daily diet and medical history were evaluated. Bone turnover markers were evaluated in the second study.

Results: (I) Non-aquatic female athletes have total and segments BMC and BMD values higher than those of aquatic athletes that in turn show similar BMD values compared to controls. BMD in lumbar spine and proximal femur was higher in non-aquatic sports compared to aquatic sports athletes and both were higher than controls. (II) The intervention program (jumping rope and whole-body-vibration) increased BMD on lumbar spine (2.10%; p=0.002), total hip (2.07%; p=0.001) and femoral neck (2.39%; p=0.02). Lower limb's fat mass decreased (10.17%; p=0.038). No significant differences were found for any of the measured anthropometric characteristics between both time points in the 1st season. (III) Z-score and T-score of total BMD (ES=0.932; p=0.001 and ES=0.626; p=0.016, respectively), femoral neck BMD Z-score (ES=0.352; p=0.046) and lumbar spine BMD (ES=0.594; p=0.017) were significantly higher in ex artistic swimmers compared with sedentary controls. There was a significant decrease in

femur BMC' in the non-intervention group (ES=0.288; p=0.019) and a significant increase in Z-score lumbar spine BMD in the jump group (ES=0.422; p=0.003). (IV) Football players showed neck, trochanter and total areal bone mineral density (aBMD) values higher than those of artistic swimmers and non-exercise group. Football players showed significant differences in trabecular volumetric BMD (vBMD) and cortical thickness than artistic swimmers and non-exercise group.

Conclusion:

- Non-aquatic female athletes show a higher BMD than aquatic-athletes. However, BMD is not negatively compromised by the practice of aquatic sports at a highly competitive level. Since, time training out of the water improves BMD, our findings suggest that swimming and artistic swimming should be combined with weight-bearing, impact or strength activities, out of the water, as they do not seem to be osteogenic sports.
- Combined jump rope and vibration should be considered to reduce the risk of bone damage in artistic swimmers.
- Physical activity during youth has a beneficial effect on bone variables in later age, even in water sports. Short bouts of home exercise, like the jump, should be considered to reduce the risk of bone loss in retired aquatic athletes.
- Female football players showed the highest trabecular vBMD and cortical thickness. 3D-DXA could provide assessment of the bone structure and a better classification of the athletes based on their fracture risk. 3D-DXA could provide a potential basis for targeted physical activity-based intervention programs for improving hip strength.

3.2. RESUMEN

Del deporte de alto rendimiento a la comunidad: evaluación de una propuesta para mejorar la densidad mineral ósea

Introducción: La osteoporosis afecta a millones de personas en todo el mundo, principalmente mujeres menopáusicas. La prevención de la osteoporosis en edades tempranas de la vida es un factor clave para reducir el riesgo de fractura en la vejez. El ejercicio es un factor protector para la aparición de la osteoporosis, pero no todas las actividades físicas tienen el mismo efecto sobre el hueso. Deportes de bajo impacto, con poca carga, como la natación o la natación artística, no son tan beneficiosas para el desarrollo óseo como otras actividades físicas realizadas fuera del agua. Las nadadoras de natación artística pueden ser una población en riesgo para desarrollar osteopenia y osteoporosis en el futuro. Para poder aumentar la adquisición de masa ósea, la natación artística debe combinar el entrenamiento en el agua con actividades de fuerza o de impacto fuera del agua. El deporte de alto nivel de competición genera diferentes modelos de estrés sobre el esqueleto, cortical y trabecular. Actualmente, existe un nuevo dispositivo, el análisis 3D derivado del DXA, para evaluar la densidad mineral ósea cortical y trabecular, parámetros importantes para determinar el riesgo de fractura.

Objetivo: Los objetivos de esta tesis son: (I) Determinar los valores de densidad mineral ósea en distintas selecciones olímpicas de deportes acuáticos y no acuáticos, y su comparación con población no deportista. (II) Evaluar los efectos de un programa de entrenamiento de impacto (salto a la cuerda y plataforma vibratoria) en la DMO, CMO y composición corporal en las nadadoras de natación artística. (III) Determinar los valores de DMO en una población de ex deportistas de natación artística y evaluar los efectos de un programa de salto en la DMO, CMO y composición corporal durante la pandemia por Covid-19. (IV) Estudiar la estructura ósea cortical y trabecular en un deporte de impacto y un deporte sin impacto comparado con población no deportista.

Métodos: (I) Las participantes fueron deportistas de élite mayores de 18 años, integrantes de selecciones olímpicas españolas, con al menos un periodo mínimo de 12-15h. de entrenamiento semanal en deportes acuáticos: natación (n=19), natación

artística (n=24) y waterpolo (n=14) y deportistas de élite de deportes no acuáticos: futbolistas profesionales del primer equipo del Futbol Club Barcelona (n=92), jugadoras de la selección absoluta española de voleibol (n=26) y de la selección olímpica de hockey hierba (n=29), así como controles sedentarios (n=126). (II) Dieciséis nadadoras del equipo olímpico de natación artística, de 17 a 21 años de edad, que entrenan 30 h./ semana, en el Centro de Alto Rendimiento de Sant Cugat (Barcelona, España), fueron controladas durante dos temporadas consecutivas. Durante la 1ª temporada el entrenamiento consistió en el entrenamiento habitual de natación artística sin entrenamiento específico de impacto para reducir el riesgo de osteopenia. Durante la 2ª temporada se añadió, al entrenamiento habitual, un entrenamiento con salto a la cuerda y plataforma vibratoria. El protocolo consistió en 20 minutos de entrenamiento, 2 días a la semana, durante 22 semanas. (III) Las participantes fueron 25 ex nadadoras de natación artística, de 36 a 52 años, y 50 controles sedentarias. Los sujetos fueron asignados aleatoriamente a un grupo: grupo de salto y grupo de no intervención. (IV) Las participantes fueron deportistas de élite mayores de 18 años de la selección olímpica española de natación artística (n=25), futbolistas profesionales del equipo Futbol Club Barcelona (n=60) y controles no deportistas (n=40).

La absorciometría de rayos X de energía dual (DXA) midió las variables óseas y la composición corporal. El análisis 3D derivado de la DXA se utilizó en el estudio experimental (IV estudio), para evaluar la densidad mineral ósea cortical y trabecular de las participantes. Se valoró la dieta diaria y la historia clínica en todos los estudios realizados y en el II estudio se analizaron también, marcadores de recambio óseo.

Resultados: (I) Las deportistas no acuáticas presentaron valores de CMO y DMO totales y por segmentos mayores que los que presentaban las deportistas acuáticas. Éstas, a su vez mostraron valores de DMO similares a los controles. La DMO en columna lumbar y en fémur proximal fue mayor en las deportistas no acuáticas respecto a las deportistas acuáticas y ambos valores fueron mayores que los registrados en controles sedentarios. (II) El programa de intervención (salto a la cuerda y plataforma vibratoria) aumentó la DMO en columna lumbar (2.10%; p=0.002), cadera total (2.07%; p=0.001) y cuello femoral (2.39%; p=0.02) y disminuyó la masa grasa de las extremidades inferiores (10.17%; p=0.038). Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las características

antropométricas medidas entre inicio y final de la 1ª temporada. (III) El Z-score y T-score de la DMO total (ES=0.932; p=0.001 y ES=0.626; p=0.016, respectivamente), el Z-score de la DMO del cuello femoral (ES=0.352; p=0.046) y la DMO lumbar (ES=0.594; p=0.017) fueron significativamente mayores en nadadoras de natación artística respecto a los controles sedentarios. Se apreció una disminución significativa en la CMO en fémur en el grupo sin intervención (ES=0.288; p=0.019) y un aumento significativo en la DMO de columna lumbar Z-score en el grupo de salto (ES=0.422; p=0.003). (IV) Las jugadoras de fútbol mostraron valores de densidad mineral ósea total, en cuello y trocánter superiores a las nadadoras de natación artística y los controles no deportistas. Las jugadoras de fútbol mostraron los mayores valores en vDMO trabecular y grosor cortical respecto a las nadadoras de natación artística y los controles no deportistas.

Conclusión:

- Las deportistas femeninas que practican deportes no acuáticos muestran una DMO más alta que las que practican deportes acuáticos. Sin embargo, la DMO no se ve comprometida de una forma tan negativa por la práctica de deportes acuáticos en categoría correspondiente a los grupos de alta competición. Dado que el tiempo de entrenamiento fuera del agua mejora la DMO, nuestros hallazgos sugieren que la natación y la natación artística deben combinarse con actividades de impacto o de fuerza, fuera del agua, ya que no son deportes suficientemente osteogénicos.
- Se debe considerar como una opción interesante, la combinación del salto a la cuerda y la plataforma vibratoria para reducir el riesgo de pérdida o ausencia de ganancia ósea en las nadadoras de natación artística.
- La actividad física durante la juventud tiene un efecto beneficioso sobre las variables óseas en la vejez, incluso en los deportes acuáticos. Los ejercicios de carácter domiciliario, de corta duración e impacto, como el salto, pueden ser considerados para reducir el riesgo de pérdida ósea en deportistas acuáticas ya retiradas.
- Las jugadoras de fútbol presentan los mayores valores de grosor cortical y DMO trabecular respecto a las deportistas de natación artística y los controles no deportistas. El 3D-DXA es una técnica que proporciona asesoramiento en la

estructura ósea en los deportistas, así como sobre el riesgo de fractura. El 3D-DXA nos permitiría ser más eficaces en la prescripción de programas de ejercicio físico para prevenir la osteoporosis.

3.3. RESUM

De l'esport d'alt rendiment a la comunitat: avaluació d'una proposta per millorar la densitat mineral òssia

Introducció: L'osteoporosi afecta milions de persones a tot el món, principalment dones menopàusiques. La prevenció de l'osteoporosi en edats primerenques de la vida és un factor clau per reduir el risc de fractura a la vellesa. L'exercici físic és un factor protector per a l'aparició de l'osteoporosi, però no totes les activitats físiques tenen el mateix efecte sobre l'os. Esports de baix impacte, amb poca càrrega, com la natació o la natació artística, no són tan beneficioses per al desenvolupament ossi com altres activitats físiques fora de l'aigua. Les nedadores d'artística poden ser una població en risc per desenvolupar osteopènia i osteoporosi en el futur. Per augmentar l'adquisició de massa òssia, la natació artística ha de combinar l'entrenament a l'aigua amb activitats de força o d'impacte fora de l'aigua. L'esport d'alt nivell genera diferents models d'estrès sobre l'esquelet, cortical i trabecular. Actualment, hi ha un nou dispositiu, l'anàlisi 3D derivat de la DXA, per avaluar la densitat mineral òssia cortical i trabecular, paràmetres importants per determinar el risc de fractura.

Objectiu: L'objectiu d'aquesta tesi és: (I) Determinar els valors de densitat mineral òssia en diferents seleccions olímpiques d'esports aquàtics i no aquàtics, i la seva comparació amb població sedentària. (II) Avaluar els efectes d'un programa d'entrenament d'impacte (salt a la corda i plataforma vibratòria) en la DMO, CMO i composició corporal en les nedadores d'artística. (III) Determinar els valors de DMO en una població d'ex esportistes de natació artística i avaluar els efectes d'un programa de salt sobre la DMO, CMO i composició corporal durant la pandèmia per Covid-19. (IV) Estudiar l'estructura òssia cortical i trabecular en un esport aquàtic i un esport no aquàtic comparat amb població no esportista.

Mètodes: (I) Les participants van ser esportistes d'elit majors de 18 anys, de seleccions olímpiques espanyoles, amb al menys 12-15 h. d'entrenament setmanal en esports aquàtics: natació (n=19), natació artística (n=24) i waterpolo (n=14) i esportistes d'elit d'esports no aquàtics: futbolistes professionals del primer equip del Futbol Club Barcelona (n=92), selecció absoluta espanyola de voleibol (n=26) i selecció olímpica

d'hoquei herba (n=29), així com controls sedentaris (n=126). (II) Setze nedadores de l'equip olímpic de natació artística, de 17 a 21 anys, que entrenen 30 h./setmana, al Centre d'Alt Rendiment de Sant Cugat (Barcelona, Espanya), van ser controlades durant dues temporades consecutives. Durant la 1^a temporada l'entrenament va consistir en l'entrenament habitual de natació artística sense entrenament específic d'impacte per reduir el risc d'osteopènia. Durant la 2^a temporada es va afegir, a l'entrenament habitual, un entrenament amb salt a la corda i plataforma vibratòria. El protocol va consistir en 20 minuts d'entrenament, 2 dies a la setmana, durant 22 setmanes. (III) Les participants van ser 25 ex nedadores de natació artística, de 36 a 52 anys, i 50 controls sedentàries. Els subjectes van ser assignats aleatòriament a un grup: grup de salt i grup de no intervenció. (IV) Les participants van ser esportistes d'elit majors de 18 anys de la selecció olímpica espanyola de natació artística (n=25), futbolistes professionals del 1^{er} equip del Futbol Club Barcelona (n=60) i controls no esportistes (n=40). La absorciometria de raigs X d'energia dual (DXA) va mesurar les variables òssies i la composició corporal. L'anàlisi 3D derivat de la DXA es va utilitzar en l'estudi experimental, estudi IV, per avaluar la densitat mineral òssia cortical i trabecular de les participants. Es va valorar la dieta diària i la història clínica i en l'estudi II es van analitzar també, marcadors de recanvi ossi.

Resultats: (I) Les esportistes no aquàtiques van presentar valors de CMO i DMO totals i per segments més elevats que els de les esportistes aquàtiques, que al seu torn van mostrar valors de DMO similars als controls. La DMO a columna lumbar i a fèmur proximal va ser major en els esports no aquàtics pel que fa als esports aquàtics i tots dos van ser més grans que els controls sedentaris. (II) El programa d'intervenció (salt a la corda i plataforma vibratòria) va augmentar la DMO a columna lumbar (2.10%; p=0.002), maluc total (2.07%; p=0.001) i coll femoral (2.39%; p=0.02). Va disminuir la massa grassa de les extremitats inferiors (10.17%, p=0.038). No obstant això, no es van trobar diferències estadísticament significatives per a cap de les característiques antropomètriques mesures entre inici i final de la 1^a temporada. (III) El Z-score i T-score de la DMO total (ES=0.932; p=0.001 i ES=0.626; p=0.016, respectivament), el Z-score de la DMO de coll femoral (ES=0.352; p=0.046) i la DMO lumbar (ES=0.594; p=0.017) van ser significativament majors en nedadores d'artística pel que fa als controls sedentaris. Hi va haver una disminució significativa en la CMO en fèmur en el

grup sense intervenció ($ES=0.288$; $p=0.019$) i un augment significatiu en la DMO de columna lumbar Z-score en el grup de salt ($ES=0.422$; $p=0.003$) . (IV) Les jugadores de futbol van mostrar valors de densitat mineral òssia total, en coll femoral i trocànter superiors a les nedadores d'artística i als controls no esportistes. Les jugadores de futbol van mostrar els valors més alts en vDMO trabecular i grossor cortical respecte a les nadadores de artística i controls no esportistes.

Conclusió:

- La DMO no es veu compromesa tan negativament per la pràctica d'esports aquàtics a nivell de l'elit. No obstant això, les atletes femenines no aquàtiques mostren una DMO més alta que les aquàtiques. El temps d'entrenament fora de l'aigua millora la DMO. Les nostres troballes suggereixen que la natació i la natació artística han de combinar-se amb activitats d'impacte o de força, ja que no són esports suficientment osteogènics.
- S'ha de considerar la combinació de salt a la corda i plataforma vibratòria per reduir el risc de pèrdua o no guany ossi en les nedadores de natació artística.
- L'activitat física durant la joventut sembla tenir un efecte beneficiós sobre les variables òssies en la vellesa, fins i tot en els esports aquàtics. Exercicis de curta durada i impacte (salt) domiciliaris poden de ser considerats per reduir el risc de pèrdua òssia en esportistes aquàtiques retirades.
- Les jugadores de futbol van presentar una cortical de major gruix i una DMO trabecular més elevada que les esportistes de natació artística i els controls no esportistes. El 3D-DXA és una tècnica que proporciona assessorament en l'estructura òssia en els esportistes, així com en el risc de fractura. El 3D-DXA ens permetria ser més eficients en la prescripció de programes d'exercici per a prevenir l'osteoporosi.

4. INTRODUCCIÓN

4.1. EPIDEMIOLOGÍA

La osteoporosis es la enfermedad metabólica ósea más frecuente en países occidentales. La osteoporosis afecta a millones de individuos de todo el mundo, principalmente a las mujeres durante la menopausia. En Estados Unidos la osteoporosis afecta a 10 millones de personas y es responsable de más de 1.5 millones de fracturas al año, con un gasto estimado de 17.000-20.000 millones de dólares [1]. En Europa la osteoporosis afecta a 22 millones de mujeres y 5.5 millones de hombres. Se estima que el número de mujeres y hombres afectados de osteoporosis aumentará de 27.5 millones en 2010 a 33.9 millones en 2025, un incremento del 23%. El número de nuevas fracturas se estima en 3.5 millones, dos tercios ocurren en mujeres y el número de muertes debidas a una fractura osteoporótica se estima en 43 millones. El coste de la osteoporosis, incluyendo el tratamiento farmacológico en Europa en 2010 se estima en 37.000 millones de euros [2]. En España la afectación por osteoporosis en mujeres mayores de 50 años es de 12 millones de mujeres [3].

La osteoporosis constituye un importante problema de salud, tanto por su magnitud como por sus repercusiones socio-sanitarias, incluyendo la calidad de vida de las personas que la padecen. A consecuencia del aumento de la esperanza de vida, su prevalencia ha aumentado y se la considera la “epidemia silenciosa del siglo XXI”.

El número de artículos registrados en Pub Med con la palabra “osteoporosis” ha aumentado de 12.094 publicaciones en 1992 a 95.218 publicaciones en 2021.

4.2. DEFINICIÓN

En 1993 la OMS definió la osteoporosis como “una enfermedad sistémica, caracterizada por una disminución de la masa ósea y un deterioro de la microarquitectura del tejido óseo que incrementa la fragilidad del mismo, con el consecuente aumento del riesgo de fractura” y en el año 2001, el Panel de Consenso del Instituto Nacional de Salud de los EEUU (NIH) la definió como “una enfermedad esquelética, caracterizada por una disminución de la resistencia ósea que predispone al paciente a un mayor riesgo de fractura”[4].

Ambas parecen similares, pero la más reciente es más completa porque además de considerar la disminución de la masa ósea, introduce el concepto importante de “resistencia ósea”, que integra los dos componentes fundamentales para ofrecer una óptima función ósea, la cantidad y la calidad del hueso.

La densidad es la magnitud que cuantifica la cantidad de mineral óseo por unidad de volumen y se expresa como Densidad Mineral Ósea (DMO), que aumenta de forma progresiva durante el crecimiento y la juventud, hasta alcanzar un “pico máximo” hacia los 30 años. Este dato es muy importante pues el pico de masa ósea (PMO) es un factor determinante de la cantidad de masa ósea en etapas posteriores de la vida. Los factores más importantes relacionados con la adquisición de masa ósea son el sexo, la raza, la dieta adecuada (en especial el consumo de calcio, vitamina D, fósforo), la genética, el consumo de alcohol y el tabaco, la exposición solar (vitamina D), factores endocrinos y factores mecánicos, como el ejercicio físico [5], además de la posible presencia de patologías distorsionadoras de los factores enumerados como ciertos trastornos del metabolismo, de malabsorción, inflamatorios o terapias medicamentosas. Entre los factores formadores de hueso, el ejercicio físico se reconoce como un factor protector de gran potencia para limitar la aparición de una osteopenia que finalice en un proceso de osteoporosis en el adulto [6].

Las alteraciones en la calidad del hueso son más difíciles de medir que la disminución de la DMO, y son en definitiva los que provocan una reducción importante de la capacidad de resistencia mecánica del hueso, mayor fragilidad de éste y, por lo tanto, un efecto multiplicador en el aumento del riesgo de fractura. No en vano, la calidad del hueso depende en cierta manera de la cantidad de hueso además de su composición y estructura arquitectónica.

4.3. FISIOLÓGÍA DEL HUESO

El hueso es un “tejido vivo” que para conservar sus propiedades necesita renovarse de forma continuada mediante lo que se conoce como el remodelado óseo. Este es un proceso dinámico y coordinado, que consiste en la destrucción o resorción ósea por los *osteoclastos*, seguida de la formación de hueso nuevo por los *osteoblastos*. Todo ello se realiza en zonas que se llaman “*unidades básicas de remodelado*”, que son unidades multicelulares que se activan temporalmente en diferentes puntos del esqueleto cuando es necesaria la reparación del hueso, en un proceso continuo que se repite durante toda la vida.

Se calcula que la tasa anual normal de recambio óseo o “*turnover óseo*” es del 4% en el hueso cortical y del 11% en el trabecular [4] y está regulado por un complejo sistema de señales endocrinas y paracrinas del que se conocen nuevos datos de forma continua por los múltiples grupos de investigación comprometidos con el mismo. En él intervienen factores genéticos, biomecánicos, actividad física, gravedad, presión sobre el hueso; factores locales de la matriz ósea, como las citoquinas; factores de crecimiento, factor de necrosis tumoral alfa, osteoprotegerina, osteoclasto génesis inhibitory factor (OCIF), sistema RANK ligando, prostaglandinas, leucotrienos, óxido nítrico, sistema endocrino (fundamentalmente eje Vitamina D y PTH) y metabólico del organismo, y factores neurológicos y vasculares regionales.

En condiciones normales, la resorción y la formación ósea están equilibradas y la calidad y la DMO se mantienen estables, y el hueso es competente en su función biomecánica. Sólo a partir de la cuarta o quinta década de la vida la DMO inicia su descenso de forma lenta y progresiva, por un predominio cada vez mayor de la resorción ósea de manera fundamental, como se observa en el **Figura 1**.

En la velocidad de la pérdida de la DMO en el ser humano intervienen diversos factores diferenciadores de la pendiente, algunos que la condicionan y no son modificables y otros que sí pueden disminuir o ralentizar esta pérdida de la DMO.

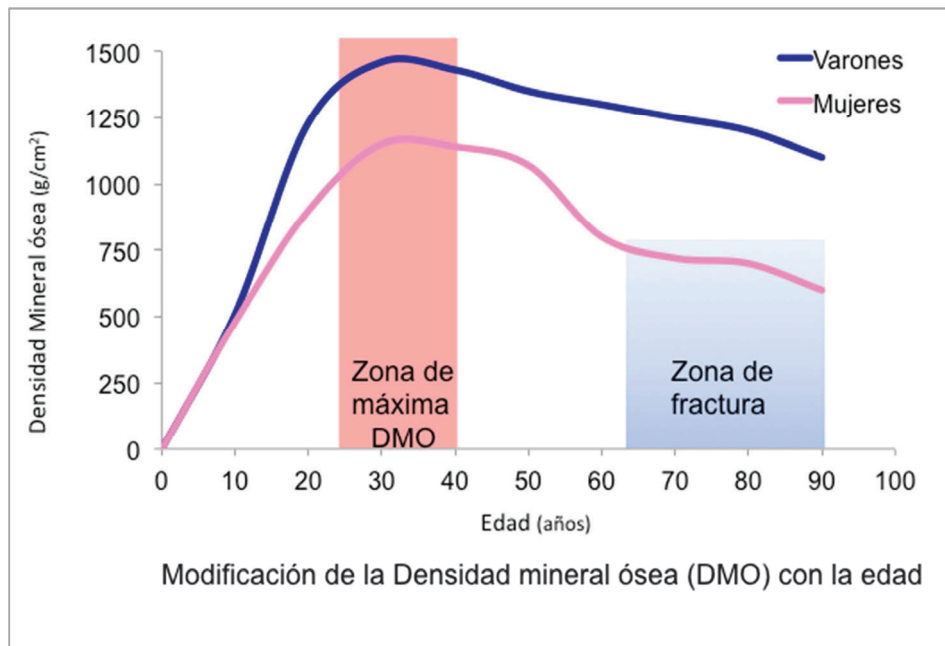


Figura 1. Modificación de la DMO con la edad.

Weaver CM, Gordon CM, Janz KF, Kalkwarf HJ, Lappe JM, Lewis R, et al. The National Osteoporosis Foundation's position statement on peak bone mass development and lifestyle factors: a systematic review and implementation recommendations. *Osteoporos Int.* 2016;27(4):1281-386. [7]

4.3.1. Factores no modificables que condicionan una pérdida de la DMO en el ser humano

4.3.1.1. Edad

La masa ósea aumenta durante las tres primeras décadas de la vida, alcanzando el denominado pico de masa ósea (PMO). El nivel máximo de masa ósea es un factor determinante de la cantidad de masa ósea que se va a alcanzar en etapas posteriores. El 90% del PMO se alcanza a los 16-19 años y el 100% sobre los 20 años [8].

Los principales factores que determinan la salud ósea adulta son el PMO alcanzado y la pérdida de masa ósea en edades avanzadas, por eso, maximizar el PMO es una estrategia crítica para prevenir la osteoporosis [9]. El 60% del riesgo de padecer osteoporosis se asocia con la cantidad de hueso alcanzado durante la etapa adolescente [10]. Un estudio realizado mediante una simulación por ordenador mostró que un 10% de aumento en el PMO en el adulto joven podría reducir el riesgo de

fractura en etapas posteriores en un 50% y retrasar el inicio de la osteoporosis hasta 13 años [11].

La pérdida progresiva de masa ósea se inicia en la edad adulta. Se pierde un 0.5 a un 1% anual de masa ósea. La aceleración de la pérdida ósea después de la menopausia puede ser de unos 5 a 10 años de duración, al principio de los que se puede llegar a perder un 5-8% de masa ósea anual. Después de los 65 años la pérdida ósea en la mujer se enlentece y se hace lineal, hasta alcanzar, al igual que en el varón, un ritmo de pérdida anual de aproximadamente el 0.7%. La involución que se produce con la edad se manifiesta por una marcada reducción de la cantidad de hueso esponjoso/trabecular y una disminución en el espesor del hueso cortical. Estos cambios disminuyen la resistencia y la rigidez ósea. Las pérdidas relacionadas con la edad se concentran más en el hueso trabecular que en el cortical. A lo largo de la vida la mujer puede llegar a perder el 50% de masa ósea trabecular y el 35% de la cortical. Es por esto que las fracturas relacionadas con la osteoporosis se producen en áreas anatómicas donde predomina el hueso trabecular: la cadera, la columna y la muñeca [12].

4.3.1.2. Sexo

En la mujer los huesos son de menor tamaño y el PMO es inferior al alcanzado por los varones. Antes de la pubertad no existen diferencias en la DMO (**Figura 1**), es después de la pubertad cuando se observan diferencias en la DMO por la mayor duración del periodo de crecimiento en el varón y por la ligera mayor velocidad de crecimiento. Así mismo, las diferencias en calidad ósea y resistencia ósea están bien descritas [13,14]. Los hombres tienen huesos más largos, más resistentes y con mayor DMO que las mujeres, así como diferencias en la micro arquitectura ósea como una mayor densidad trabecular y mayor grosor cortical [15]. Durante la etapa de crecimiento, los hombres tienen un mayor crecimiento perióstico que comporta un mayor grosor cortical, comportando un menor riesgo de fractura [16], mientras que la mujer aumenta el grosor cortical por la formación ósea endoóstica sin aumento del periostio. Estos patrones de crecimiento óseo se explican por la acción hormonal de los estrógenos en la mujer que limitan el crecimiento perióstico y, de los andrógenos y estrógenos en el hombre que incrementan el crecimiento perióstico. Los estudios realizados en

animales [17] han demostrado que el esqueleto femenino responde menos a la carga ósea que el masculino, en línea con estudios recientes realizados en tenistas que muestran diferencias en la DMO en el brazo de la raqueta entre mujeres y hombres [18] o los estudios realizados en jugadores de fútbol que muestran mayores valores de DMO en hombres respecto a las mujeres. Sin embargo al ajustar los valores de DMO por las variables de composición corporal, éstas variables y en particular la masa magra o FFM, son variables con mayor valor predictivo en la DMO que el sexo [19].

Si además consideramos que las mujeres tienen una mayor tasa de pérdida ósea, aumentada en la postmenopausia reciente; así como una mayor esperanza de vida, la relación entre actividad física y salud ósea es particularmente relevante en la mujer puesto que tienen mayor riesgo de padecer osteoporosis y fracturas en la vejez.

4.3.1.3. Raza

Existen diferencias raciales en el metabolismo óseo, en la adquisición de hueso y en la estructura ósea individual. La osteoporosis puede presentarse en todas las razas. En particular, las mujeres no hispanas blancas, las del norte de Europa y las asiáticas presentan un mayor riesgo de osteoporosis que las mujeres de raza negra, africanas. Las mujeres africanas tienen mayor DMO que las mujeres caucásicas, igual número de trabéculas pero más gruesas y de mayor área de sección transversal, lo que les confiere mayor resistencia mecánica y menor riesgo de fracturas, mientras que las mujeres asiáticas tienen menor incidencia de fracturas a pesar de la menor DMO. Las mujeres hispanas tienen menor ratio de fracturas que las de raza blanca con similar DMO.

Las variaciones se observan en el metabolismo mineral, homeostasis cálcica, concentraciones séricas de 25 (OH) vitamina D y PTH, así como en la adquisición de masa ósea y estructura ósea. Las mujeres de raza negra tienen menor excreción urinaria y mayor absorción cálcica, niveles menores de 25 (OH) vitamina D y niveles mayores de $1,25\text{ (OH)}_2\text{D}$ y PTH. El nivel de fósforo es mayor que en la raza blanca [20–22].

4.3.1.4. Genética

El PMO viene determinado en un 60-80% genéticamente y un 20-40% depende de factores ambientales como la nutrición y la actividad física. Aquellos hombres y

mujeres con historia familiar de osteoporosis presentan una DMO menor que la población de las mismas características sin el antecedente familiar. Las hijas de mujeres con fracturas osteoporóticas tienen una DMO inferior al valor medio de referencia poblacional [14]. Una reciente Tesis Doctoral que analiza la influencia de los factores genéticos y ambientales sobre la masa ósea, concluye que tanto los factores genéticos (genes WNT16, LRP5 y RSPO3) como los ambientales (nivel de actividad física, masa magra e ingesta de antioxidantes) juegan un papel clave en la adquisición de la masa ósea en la edad adulta temprana. De esta manera, la identificación y caracterización de los marcadores genéticos y factores ambientales involucrados puede facilitar el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas y actuaciones preventivas frente a la osteoporosis en esta etapa [23].

4.3.2. Factores modificables que condicionan la pérdida de la DMO en el ser humano

4.3.2.1. Alimentación

La dieta debe ser equilibrada, con aporte suficiente de todos los nutrientes, sin exceso de proteínas animales, y correcta en calcio y vitaminas D y K [24]. El calcio es fundamental para el correcto desarrollo y mantenimiento del esqueleto. El déficit de vitamina D representa una epidemia mundial que incluye también a los deportistas [25] y contribuye a la disminución de la DMO y al aumento del riesgo de fractura y efectos adversos en el músculo, como debilidad, disminución del rendimiento y aumento en la incidencia de lesiones [26].

La disponibilidad energética es el remanente de energía alimentaria para las funciones orgánicas después de la práctica de ejercicio y corresponde a la ingesta energética alimentaria menos el gasto energético del ejercicio, corregida según la masa libre de grasa (FFM). Cuando es muy baja, los mecanismos fisiológicos reducen la energía utilizada para el mantenimiento celular, termorregulación, crecimiento, y reproducción, repercutiendo en la salud. La disponibilidad energética óptima es de 45 kcal/Kg FFM por día en mujeres adultas pero puede ser mayor en adolescentes que están todavía en crecimiento. Se ha observado que algunas deportistas presentan comportamientos alimentarios patológicos. En ellas, los efectos adversos de una

disponibilidad energética <30 Kcal/Kg FFM por día son de carácter endocrinológico y metabólico, afectando a la menstruación y mineralización ósea.

En cuanto a la baja disponibilidad energética, un estudio en adolescentes deportistas mostró que las deportistas tienen más tendencia a la baja disponibilidad energética, pero que tanto las mujeres no activas como las deportistas limitan su ingesta energética, de un 4% a un 6% respectivamente [27], hecho más prevalente en deportistas de élite que precisan de un bajo peso corporal como ocurre en los deportes estéticos, por categorías de peso o en los de resistencia [28].

4.3.2.2. Tabaco y alcohol

El tabaco ejerce un efecto directo sobre el hueso, influye sobre los niveles hormonales estrogénicos que modulan el remodelado, sobre el eje vitamina D-PTH, interfiere en la absorción de calcio y disminuye la actividad osteoblástica principalmente en el fémur [29,30]. Por eso los sujetos fumadores tienen una menor DMO. Este efecto es dosis-dependiente pero reversible.

Por otro lado, el consumo leve o moderado de alcohol puede tener un efecto positivo sobre el hueso [31]. Sin embargo, el consumo elevado se asocia con menor DMO. Está demostrado que las mujeres con historias de dependencia alcohólica tienen mayor prevalencia de fracturas [32] por la asociación de trastornos de estabilidad y la osteoporosis. En el cálculo del riesgo de fractura (FRAX) se debe introducir un “sí” en caso de que el paciente beba tres o más dosis de alcohol por día. Una dosis de alcohol varía ligeramente entre países, de 8-10g de alcohol, que equivale a una caña de cerveza (285ml), una copa de licor (30ml), una copa de vino de tamaño mediano (120ml) ó una copa de aperitivo (60ml) [33].

4.3.2.3. Exposición solar

El déficit de vitamina D es frecuente en todo el mundo incluyendo los deportistas [25] y se sabe que contribuye a la disminución de DMO y a la mayor prevalencia de fracturas y efectos adversos músculo esqueléticos como debilidad muscular, disminución del rendimiento y aumento de lesiones en los deportistas [26], como se ha mencionado con anterioridad.

La vitamina D es el único nutriente que puede ser sintetizado de forma endógena. Con la exposición solar (radiación ultravioleta), el 7 dehidro-colesterol de las células

dérmicas y epidérmicas se convierte en pre-vitamina D3, ésta en vitamina D3 que pasará a la sangre y después de metabolizarse en hígado y riñón, se convertirá en la forma activa $1,25\text{ (OH)}_2$ vitamina D. La $1,25\text{ (OH)}_2$ vitamina D es estimulada por la PTH cuando el fósforo y el calcio sanguíneos disminuyen por debajo de su rango de normalidad. También otros órganos pueden producir $1,25\text{ (OH)}_2$ vitamina D de forma local. La producción de vitamina D es variable y dependiente de factores ambientales e individuales, que incluyen el momento del día, la estación del año, un día nublado, la niebla, la latitud, la pigmentación, la edad y la protección solar. Además, la vitamina D no puede ser sintetizada en invierno en latitudes mayores de 35° a 37° puesto que el ángulo solar no deja llegar la radiación UVB a la superficie de la tierra. Los ancianos que viven en residencias, sin exposición solar, presentan déficits de vitamina D mayores que los que viven en sus casas. Este déficit se podría prevenir con una mayor exposición solar en la gente mayor, especialmente en los que viven en residencias [34]. La vitamina D también puede obtenerse de la dieta (pescado, huevos, setas, leche, cereales, etc.). Se absorbe en el aparato digestivo con la grasa y es conducida hacia el hígado donde sigue un proceso similar al de la vitamina D endógena.

La vitamina D actúa sobre el hueso regulando los genes que aumentan la absorción intestinal de calcio, reabsorción renal y actividad osteoclástica. En estados de déficit de vitamina D, disminuye la absorción de calcio; sin embargo cuando los niveles de vitamina D son correctos, la absorción de calcio aumenta. También se correlaciona con la DMO y el CMO en jóvenes y mayores. Un estudio realizado en militares mostró que el riesgo de fracturas de estrés era superior cuando los niveles de vitamina D estaban por debajo de 30 ng/ml [35]. Otro estudio en mujeres militares observó una disminución de fracturas de estrés después de 8 meses de suplementación con 2000 mg de calcio y 800 IU de vitamina D [36].

A pesar de que muchos estudios han demostrado el déficit frecuente de vitamina D en la población general, pocos estudios se han centrado en los deportistas. Estos estudios han observado niveles mayores de vitamina D en verano que en invierno; y los menores niveles se encontraron en países con baja exposición solar como Finlandia [37]. A pesar de que la ingesta diaria de vitamina D no suele llegar a las dosis recomendadas, la razón más probable de déficit de vitamina D es la poca síntesis endógena debido a la baja exposición solar. Los factores que dificultan su síntesis en

los deportistas son la pigmentación de la piel, entrenar temprano o al anochecer, entrenamiento *indoor*, localización geográfica y uso de protección solar [38]. Se ha observado que los niveles de vitamina D de los deportistas depende de si entrenan en instalaciones cerradas o abiertas "*indoor/outdoor training*" y durante el pico de máxima radiación solar [25]. La correcta concentración de vitamina D se halla en 75mmol/l (30ng/ml) y la óptima entre 90 y 100 mmol/l (36-40ng/l) [39]. Se aconsejan 5 minutos de exposición solar (en personas de piel muy blanca) y 30 minutos en personas morenas en piernas, brazos y espalda varias veces a la semana.

Se recomienda realizar un cribado de vitamina D en las revisiones médico-deportivas, al menos de forma bianual. Si no es posible, se recomienda su determinación en aquellos deportistas con una historia de fracturas de estrés, enfermedades frecuentes, lesiones óseas o musculares, debilidad muscular o dolor, o signos de sobreentrenamiento. Especial atención merecen los deportistas con dietas restrictivas que entrenan la mayor parte del tiempo *indoor* (gimnastas, bailarinas, patinadoras y luchadoras), puesto que tienen mayor riesgo de déficit de vitamina D. Así mismo, se deben estudiar los deportistas veganos.

Los parámetros más importantes que se deben determinar son la concentración sanguínea de vitamina D, PTH, fosfatasa alcalina, concentraciones de calcio y fósforo que nos proporcionarán información adicional especialmente cuando la DMO es baja, el deportista presenta fracturas de estrés o la ingesta de calcio y/o vitamina D están disminuidas. Los parámetros sanguíneos tienen una estrecha relación con los parámetros óseos [26], por lo que la combinación en el estudio de parámetros óseos (DXA) y marcadores bioquímicos ofrece una mejor comprensión de los cambios óseos [40].

4.3.2.4. Bajo nivel estrogénico

Las situaciones de déficit estrogénico se asocian a mayor tasa de pérdida de masa ósea. Esto acontece en la menopausia precoz, menopausia quirúrgica o periodos de amenorrea prolongados frecuentes, como ocurre en situaciones de estrés físico continuado, donde el ejemplo actual es en el deporte de alto nivel (Tríada de la mujer deportista) [41,42]. Después de excluir otras causas de amenorrea, la amenorrea en el contexto de baja disponibilidad energética se diagnostica como amenorrea

hipotalámica funcional. La palabra "funcional" indica supresión, atribuible a la falta de energía, de un eje endocrino reproductivo intacto, es decir que la función endocrina podría funcionar con normalidad si se recupera la disponibilidad energética.

Las irregularidades menstruales son frecuentes en adolescentes sedentarias (21%), y en deportistas (54%) [27]. La incidencia de amenorrea primaria es inferior al 1% en población sedentaria mientras que es superior al 22% en gimnastas y *cheerleaders* (animadoras). Por otra parte la amenorrea secundaria es también más frecuente en bailarinas (69%) y maratonianas (65%), respecto al 2-5% de la población general [41,42].

4.4. EJERCICIO FÍSICO

La actividad física se reconoce como un factor protector de gran potencia para limitar la aparición de una osteopenia que finalice en un proceso de osteoporosis [6]. A pesar de que las fracturas osteoporóticas ocurren en edades seniles, la osteoporosis se considera que tiene su origen en la edad pediátrica [5,14], pues su prevención desde edades tempranas de la vida, aumentando el pico de masa ósea, es un factor clave para reducir el riesgo de fractura en la senectud [43–45]. Se considera que un 10% de aumento en el pico de masa ósea durante la adolescencia podría reducir un 50% el riesgo de fractura en etapas tardías y retrasar la aparición de osteoporosis unos 13 años [5]. Dado que la masa ósea aumenta durante las tres primeras décadas de la vida, alcanzando el denominado PMO y el 90% de este PMO se alcanza a los 16-19 años y el 100% sobre los 20 años como se comentó previamente, el PMO es un factor determinante de la cantidad de masa ósea que se va a alcanzar en etapas posteriores. Los adultos que practicaron deporte no profesional en la infancia presentan una mayor DMO que sus homólogos no activos físicamente [46]. En un estudio en futbolistas retirados, su DMO fue 0.5 veces mayor que sus homólogos sedentarios y presentaron menor riesgo de fractura [47]. En ese sentido, los adolescentes que practicaban deporte al menos 3 días por semana, más de 60 minutos al día mostraron una menor incidencia de fracturas [48]. El entrenamiento iniciado en la fase pre-puberal y peri-puberal parece ser más efectivo cuando intentamos aumentar la DMO que el mismo entrenamiento después de la pubertad [43], pues la respuesta osteogénica es edad dependiente. El hueso joven, en desarrollo, tiene una mayor respuesta a la carga mecánica que el hueso ya maduro. Es interesante dar a conocer que existen diversos grupos de trabajo nacionales que han explorado este aspecto con éxito, aportando evidencias sobre la importancia del ejercicio físico en la ganancia de mineral en el hueso en las edades pediátricas, en los diferentes estados evolutivos, y en los niños que hacen deporte. De estos trabajos destaca que los deportes sin impacto, como la natación, pueden no proporcionar el efecto positivo del ejercicio en la salud de los huesos. La repercusión que esta situación puede tener en el futuro desarrollo de osteoporosis aún no está bien definida [49–51].

Como se ha indicado, el ejercicio físico es positivo en el desarrollo y funcionalidad ósea, pero no todas las actividades físicas tienen el mismo efecto sobre el hueso. Las

actividades de carga son beneficiosas en la ganancia mineral en función de la actividad practicada. Los procesos osteogénicos dependen de el tipo, cantidad, dirección, frecuencia y magnitud del estrés sobre la arquitectura ósea [52,53]. Tampoco hay evidencia suficiente al respecto sobre la duración mínima y la intensidad que se requiere para que este estímulo osteogénico se produzca [54,55]. Sin embargo, las deportistas practican ejercicio desde la infancia, con objetivos personales orientados a la diversión, el rendimiento, con una temporalidad orientada a un relativo corto plazo, y, con toda probabilidad, sin prestar demasiada atención a la inversión que significa el deporte bien hecho para su salud e incluso para la edad adulta.

Los efectos positivos de la actividad física y el ejercicio físico sobre la DMO y resistencia ósea han sido clasificados recientemente con nivel de evidencia científica A o B por la National Osteoporosis Foundation [7]. Los efectos positivos se cree que son debidos a las fuerzas mecánicas que están generadas por el impacto contra el suelo (fuerzas gravitacionales o GRF) y/o por las contracciones musculares (fuerzas musculares) realizadas mientras se practican distintas actividades deportivas. Hoy en día, es evidente que los deportes sin fuerzas gravitacionales como la natación o el ciclismo tienen un efecto menor sobre el hueso (DMO, CMO) que otros deportes que, si gozan de ellas, como el fútbol o el voleibol.

4.4.1. Influencia del estrés mecánico en el metabolismo óseo

En 1982, Julius Wolff (1836–1902), publicó la Ley de la transformación del hueso, que se conoce como la ley de Wolff, “cada cambio en el entorno es seguido por un cambio en la arquitectura interna”. En realidad, lo que ocurre es que el hueso adapta su forma a las demandas mecánicas que percibe. El proceso fue desarrollado con posterioridad como la teoría del mecanostato por Harold Frost (1921-2004) en 1987, que describe el mecanismo de adaptación del hueso como un sistema de control de la carga mecánica y la resistencia del hueso modificando la masa y la arquitectura. El efecto osteogénico del ejercicio se produce de forma principal por el impacto y la carga mecánica aplicada al hueso: efecto “*mechanostat*” o “mecanostato”. El proceso de formación y remodelación ósea se adapta a la nueva demanda y, como consecuencia, el CMO, la DMO y el entramado arquitectónico se modifican [56].

El hueso posee un punto de tensión mínima o “*minimum effective strain*” (MES), donde si la carga mecánica excede el MES (al que el hueso está acostumbrado), la formación/resorción de hueso se desequilibra para formar hueso y existe una adaptación funcional. Por el contrario, si la tensión está por debajo del umbral de la tensión mínima (MES), hay una pérdida rápida de DMO, llegando a disminuir un 1% por mes (inmovilización, reposo en cama, ingravidez), si lo comparamos con la pérdida normal, menor de un 1% por año, que se observa en mujeres mayores postmenopáusicas (**Figura 2**).

Existen varios aspectos muy interesantes en relación con la exposición del hueso a cargas de trabajo y su adaptación (**Tabla 1**). En primer lugar, se considera que existe un valor de MES para ganar hueso, que se halla sobre los 2000-3000 $\mu\epsilon$ de micro tensión, pero si nos excedemos, entramos en la zona de daño óseo. En segundo lugar, una carga mayor en un periodo más corto de tiempo proporciona un mayor estímulo osteogénico que el mismo estímulo alcanzado más lentamente. En tercer lugar, la mejor adaptación ósea se produce con cargas multidireccionales. Y, por último, el número de ciclos de carga parece no ser importante cuando se llega a un umbral. Por otro lado, parece que períodos prolongados de carga saturan la respuesta adaptativa del hueso a la carga mecánica y períodos de reposo entre las series, mantienen la mecano-sensibilidad del hueso, así como unas horas de descanso entre sesiones de ejercicio. La evidencia científica demuestra que un ejercicio corto, de gran magnitud, multidireccional produce una respuesta más osteogénica [9,43,57]; el salto podría ser un ejercicio idóneo, por ejemplo, un salto genera dos impactos con el suelo, el despegue y el aterrizaje, el ejercicio puede ser de muy corta duración (5 saltos en menos de 2 minutos) y puede encajar en cualquier momento del día. El salto produce una fuerza de reacción del suelo o *ground reaction force* (GRF) y reacciones musculares que estimulan al hueso. Un salto de modesta altura produce una fuerza de 2-5 veces el peso del cuerpo [58].

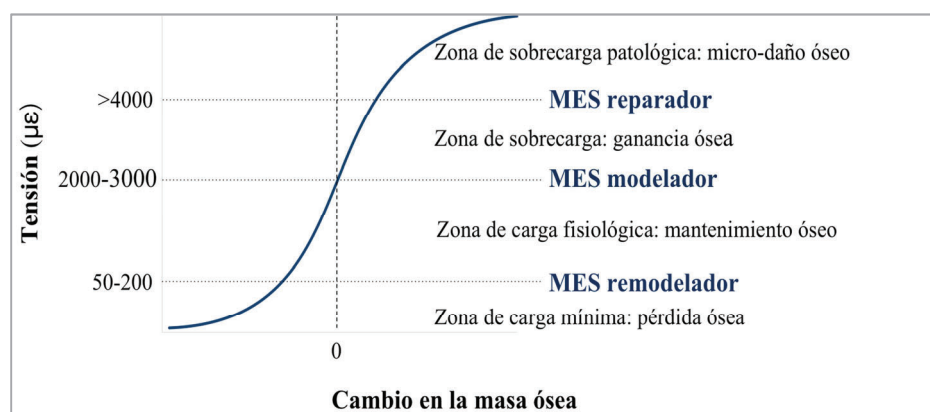


Figura 2. Influencia del estrés mecánico sobre el hueso.

Bailey CA, Brooke-Wavell K. Exercise for optimising peak bone mass in women. Proceedings of the Nutrition Society, 2008 ;67(01):9-18 [9]

Óptimo	Subóptimo
1.Impacto 2000-3000 µε	1.Impacto <2000 o >4000 µε
2.Cargas elevadas en periodos cortos	2.Cargas bajas continuas
3.Cargas multidireccionales	3.Cargas unidireccionales
4.Periodos de descanso entre estímulos	4.Sin descanso o descanso insuficiente entre estímulos.

Tabla 1. Cargas de trabajo y adaptación ósea

Un estudio muy interesante valora el efecto de distintas modalidades de carga en la zona proximal del fémur observando que, al aumentar el tiempo de ejercicio físico, la masa ósea aumenta en cuello femoral, pero con diferentes ganancias en las distintas regiones anatómicas dependiendo de la magnitud y la dirección de las fuerzas (alto impacto, impacto moderado multidireccional, vida cotidiana: andar, subir escaleras, estar de pie). La zona inferior de cuello femoral es la zona de mayor masa ósea en las modalidades diarias (andar, subir escaleras, estar de pie) por el mayor estrés óseo ejercido en estas acciones y menor en la modalidad elevado impacto e impacto multidireccional. La zona superior de cuello femoral presenta los mayores valores óseos en la modalidad de elevado impacto y multidireccional, así como los menores valores en la actividad ordinaria. La modalidad de elevado impacto y la multidireccional presentan mayor masa ósea en ambas localizaciones anatómicas pero mayor en zona superior de cuello femoral, además de presentar una mayor masa ósea anteroposterior, presentando una distribución espacial más uniforme de la masa ósea

y mejor DMO en triángulo de Ward's, zona donde confluyen fuerzas tensionales y de compresión. Además, la modalidad multidireccional presenta una carga moderada lo que le confiere una mejor capacidad osteogénica con menor demanda ósea [59].

El proceso fisiológico que describe los mecanismos por los que el hueso detecta las tensiones y las cargas mecánicas, respondiendo con cambios en su metabolismo para adaptar su estructura y propiedades mecánicas a las cargas detectadas, se denomina mecano-transducción. Este proceso se materializa en 4 fases: *1ª Acoplamiento mecánico*, *2ª Acoplamiento bioquímico*, *3ª Transmisión de señales bioquímicas* y *4ª Respuesta de ejecución* [60].

En el acoplamiento mecánico, los osteocitos/osteoblastos de superficie detectan la carga/deformación del hueso. No todo estímulo es suficiente para generar la respuesta celular, lo que se conoce como umbral. Si el estímulo sobrepasa este umbral los osteocitos y los osteoblastos de superficie lo detectan. Se produce entonces el acoplamiento bioquímico, se transmite la tensión al núcleo celular y los osteocitos pasan a ser osteoblastos. Finalmente se produce la respuesta de ejecución, determinada por la acción de osteoblastos/osteoclastos en el proceso de producir nuevo hueso o de repararlo, modelado/remodelado óseo.

Existe una relación importante entre la resistencia mecánica del hueso y la DMO donde el 75-90% de la resistencia mecánica depende de la DMO [58].

La evidencia de la importancia de la carga mecánica aparece en diferentes estudios que comparan la DMO de deportistas de distintas disciplinas deportivas, aquellos que practican deportes con elevado impacto mecánico, GRF, y los que participan en deportes con bajo impacto o sin impacto. Se aprecia una gran diferencia entre gimnastas con valores de DMO en cadera y columna lumbar un 30-40% superiores a la DMO de corredoras de larga distancia [61], que podría explicarse por una mayor magnitud de las fuerzas de impacto contra el suelo en los movimientos gimnásticos, 10-12 veces superiores a su peso corporal comparado con el impacto de las corredoras, 3-5 veces su peso corporal. Además, las deportistas que practican deportes de alto impacto tienen mayor área de sección, como se aprecia en la **Figura 3**, a diferencia de las nadadoras, que no experimentan carga alguna, y que no son muy distintas a los controles sedentarios. Si se analiza el concepto de distribución de cargas, los deportes como el squash, voleibol, gimnasia, que estresan mecánicamente

al hueso en diferentes direcciones, se asocian con una mayor DMO que los deportes que lo estresan en una única dirección, como la carrera [62].

Otros estudios defienden la teoría de que la magnitud del estímulo es más importante que su duración para generar hueso, así como periodos de descanso entre series [63,64].

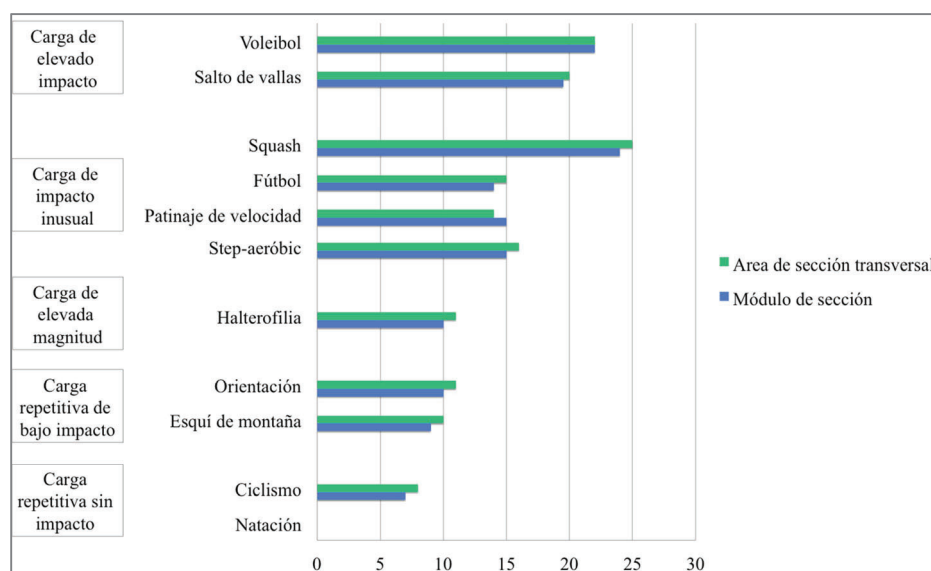


Figura 3. Influencia del estrés mecánico sobre el hueso. Diferencias en el área de sección transversal y en el módulo de sección (predictor de fuerza en la torsión) entre diferentes modalidades deportivas.

Modificado de Bailey CA, Brooke-Wavell K. Exercise for optimising peak bone mass in women. Proceedings of the Nutrition Society, 2008 ;67(01):9-18 [9]

De acuerdo con la teoría del mecanostato, propuesta por Frost [60], el esqueleto se adapta a estas cargas aumentando su fuerza. Existen numerosos estudios que informan de una asociación entre la masa ósea y la masa magra, y esta asociación se usa a menudo como evidencia que respalda la teoría del mecanostato [65,66]: la unidad hueso-músculo “*muscle-bone unit*”. Se debe considerar que los factores genéticos también pueden explicar parte de la asociación entre el hueso y la masa magra, así como entre el hueso y el peso corporal, con individuos más delgados o más grandes “programados” para tener esqueletos más grandes. Los hallazgos de Frank Rauch y sus colaboradores muestran que el aumento del crecimiento muscular precede al aumento de la acumulación de masa ósea y sugieren que estos datos

respaldan la teoría del mecanostato de que el hueso es impulsado por el desarrollo muscular [67].

La respuesta ósea al salto puede ser un efecto directo sobre el hueso y/o un efecto indirecto a través de un aumento de masa magra [68] y algunos autores han encontrado que la masa magra tiene un elevado valor predictivo sobre los resultados óseos en deportistas adolescentes [44]. Así, la masa magra juega un papel importante en el desarrollo de la DMO y eso puede observarse en la geometría y desarrollo de la cadera, según la teoría del mecanostato [69], ya que el desarrollo muscular produce una mayor tensión sobre el hueso, aspecto importante en el crecimiento y desarrollo humano y sobre todo del sexo femenino. Un estudio reciente muestra que el entrenamiento de fuerza de elevada intensidad, estilo olímpico de halterofilia, que incluye carga de elevado impacto y con aceleración y desaceleración; es un método efectivo para preservar la DMO en cuello femoral y columna lumbar, además de mejorar la masa magra [70]. Sin embargo, en los deportes practicados en el agua, la masa muscular parece atenuar el efecto negativo de la falta de gravedad en el hueso. Un estudio que analiza las diferencias en DMO en los diferentes deportes y la influencia sobre la DMO de diferentes mediadores como la FFM o el IMC observa que la FFM y el IMC son las variables con mayor impacto sobre el hueso [71].

4.4.2. Efectos de la inmovilización

Para entender los efectos del desuso debido a una inmovilización, cirugía, parálisis espinal, embarazo o en los astronautas es muy importante caracterizar la microestructura ósea. Las alteraciones del compartimento trabecular están asociadas con un mayor riesgo de fractura, independientemente de la DMO. El compartimento cortical, especialmente su porosidad, es un gran determinante de la resistencia, dureza y riesgo de fractura, y puede contribuir de forma independiente a la aDMO en el riesgo de fractura y fragilidad ósea. En un estudio realizado en pacientes postcirugía que fueron inmovilizados durante 6 semanas, los autores observaron un aumento de porosidad cortical (más número de poros y de mayor tamaño) que permaneció elevada durante 13 semanas. En el compartimento trabecular, las trabéculas disminuyeron su grosor y aumentó la separación entre ellas, cambios menos evidentes que en el compartimento cortical, y que revirtieron a las 6 semanas de carga [72].

La falta de carga durante los vuelos espaciales es una causa conocida de disminución de DMO en el esqueleto. Esto ocurre a pesar de los programas de entrenamiento prescritos para los astronautas en el espacio. El objetivo es predecir el riesgo de osteoporosis prematura y fracturas, parecido a nuestro objetivo en los deportes sin gravedad. En los astronautas, los exámenes con DXA muestran disminuciones de 1% y 1.5% en columna lumbar y cadera respectivamente, superiores a los observados en la osteoporosis primaria en la Tierra (0.5% y -1%) por año. En un estudio realizado en astronautas que estuvieron 4 meses en el espacio, además de una disminución de 1.5% y 2% en la DMO de tibia distal en los compartimentos cortical (vDMO) y trabecular (vDMO) respectivamente, se apreció una disminución del 4% en el grosor cortical y un aumento del 15% en la porosidad cortical. El grosor cortical y la DMO (vDMO cortical) se recuperan al año del aterrizaje, sin embargo la porosidad cortical y el hueso trabecular (vDMO trabecular) no recuperaron, comprometiendo la fuerza ósea [73]. El esqueleto se adapta a las condiciones espaciales y a diferencia de los cambios sistémicos que se producen en la osteoporosis, las modificaciones óseas en los vuelos espaciales tienen localizaciones y compartimentos específicos y se afectan más los huesos de carga.

4.4.3. Fuerzas de reacción del suelo (y su medición)

Durante la actividad física, las fuerzas mecánicas que actúan sobre el hueso se generan principalmente a partir de las fuerzas de reacción del suelo y la fuerza muscular. Las fuerzas que aplicadas en el contacto con el suelo producen unas fuerzas de reacción que actúan sobre el cuerpo, con un mismo módulo y de sentido contrario (Tercera ley de Newton). Mientras que las cargas musculares son el resultado de las contracciones musculares que crean una fuerza que se transmite al hueso a través de los tendones.

La GRF se determina para caracterizar la magnitud de la fuerza y la tasa de fuerza aplicada que afecta al esqueleto humano durante el ejercicio físico. La medición de estas GRF se realiza habitualmente con plataformas de fuerzas que suelen tener una forma rectangular y miden la fuerza aplicada dentro de un rango elevado, de 10N. a 10.000N. Estas plataformas miden las fuerzas aplicadas en sus tres ejes (vertical, anteroposterior y medio-lateral) a través de 4 células de carga (piezoeléctricas o extensiométricas) ubicadas en cada una de sus esquinas. A partir de las fuerzas

medidas en cada uno sus ejes (F_x, F_y, F_z) se computa la fuerza resultante de reacción del suelo. A partir de las GRF, se determina diversos indicadores en relación con las fuerzas mecánicas que actúan sobre el hueso. La magnitud del pico de fuerza vertical (PVRF) se suele utilizar para expresar la magnitud del potencial osteogénico del ejercicio físico. De hecho, en estudios dónde se ha medido “in vivo” las fuerzas de deformación en hueso o en implantes demostraron una correlación significativa entre esta deformación y el PVRF en diferentes ejercicios como caminar, correr o saltar [74]. En relación con estos hallazgos, otros estudios consideran que para proporcionar una ganancia de densidad mineral ósea femoral en mujeres premenopáusicas, las actividades deben conseguir picos de fuerza vertical por encima de 3 veces el peso corporal [75]. Tradicionalmente se ha mostrado como el PVRF caminando es de unos 1.5 veces el peso corporal (3-10 km/h) y durante la carrera de 2-3 veces el peso corporal (5-21 km/h). Durante el salto estas magnitudes pueden ser mayores, duplicando o triplicando estos valores, llegando a más de 4-6 veces el peso corporal, como se confirmará en el presente trabajo (**Figura 4**) en el que se observa el gráfico correspondiente a la medición de las GRF del salto a la cuerda en el grupo de nadadoras de natación artística.

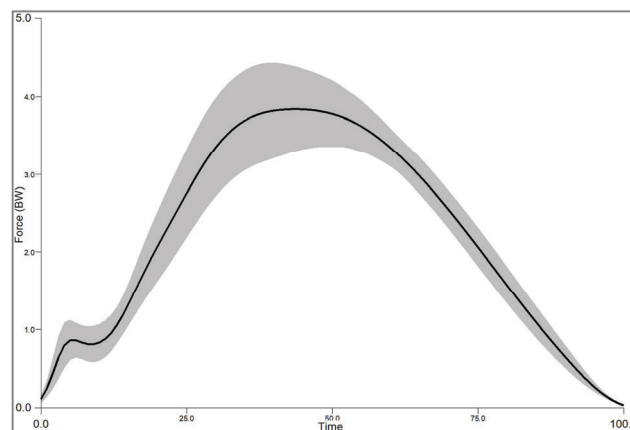


Figura 4. Medición de las GRF (media $\pm$ SD) del grupo de nadadoras de natación artística.

Otro de los mecanismos que tiene gran influencia en estimular la formación de hueso es la tasa de carga de impacto (ILR), es decir, el incremento de la fuerza (pendiente de la fuerza) en un tiempo determinado (i.e. 10 mseg) durante el impacto contra el suelo.

De esta forma, en la literatura se sugiere que con una ILR suficiente alta podría llegar a estimularse la adaptación del hueso sin utilizar valores de PVRF tan elevados. Quizás uno de los problemas principales para identificar un umbral osteogénico a partir de esta variable y compararla entre estudios, es la cantidad de métodos diferentes utilizados para calcularla ya que depende directamente de la frecuencia de registro de la plataforma de fuerzas utilizada para la captura de las GRF.

A los sujetos de estudio se les indica que realicen el mismo salto que después realizarán en el programa de intervención. En resumen, los valores que obtenemos son la fuerza de reacción vertical que se mide unidades de peso corporal, el pico de fuerza de reacción vertical (PVRF) y la tasa de carga de impacto (ILR) de cada salto. En el caso de saltos múltiples (salto a la cuerda) se mide la frecuencia de salto y el número de saltos por segundo.

En la **Figura 5** se observa la técnica de salto y el salto multidireccional en las ex nadadoras de natación artística analizado en el laboratorio de biomecánica y que después realizarán en el programa de intervención de saltos prescrito.

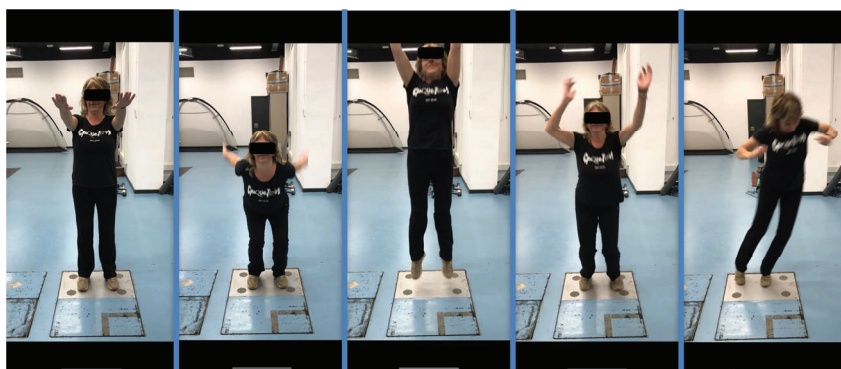


Figura 5: Medición de las GRF en las ex nadadoras de natación artística

4.4.3.1. Salto a la cuerda en deportistas

Los estudios científicos demuestran que un programa de salto aplicado en distintas poblaciones es beneficioso para mejorar la masa ósea; en escolares [76], en adolescentes practicantes de deportes sin impacto como la natación o el ciclismo [77] y en mujeres adultas jóvenes [78].

El salto a la cuerda es una forma de ejercicio pliométrico utilizado de forma recreacional, en programas educacionales y deportivos, que es apropiado para mejorar

la salud ósea principalmente en extremidades inferiores en chicas puberales [79], así como en chicas postpuberales [80] con solo 5 o 10 min de salto 4 veces/semana. Las GRF del salto a la cuerda han sido estudiadas con una pierna o con dos piernas [81]. Constituye un entretenimiento que ha sido practicado por distintas generaciones y es aceptado como una actividad con una demanda aeróbica importante. En los últimos años, ha nacido un interés en convertirlo en un deporte de competición, en distintas modalidades, velocidad o estilo libre .

El salto a la cuerda puede mejorar la coordinación de múltiples grupos musculares, por ello se utiliza en programas de ejercicio para deportistas y para evaluar la coordinación motora [82]. Este autor muestra que el déficit de percepción temporal conduce a un rendimiento menos preciso durante el salto de cuerda para los niños con TDAH. Los hallazgos también revelan que la mala coordinación mano-pie da como resultado un control deficiente de los movimientos simultáneos de las extremidades superiores e inferiores durante el salto a la cuerda, considerando el mismo como un método eficaz para evaluar la coordinación motora.

El salto a la cuerda se puede introducir en los programas de ejercicio puesto que se considera un ejercicio de elevado impacto, elevada frecuencia y corta duración que puede ser introducido en la vida cotidiana, como se muestra en esta tesis.

4.4.3.2. Programa de Salto en mujeres adultas

Varias investigaciones relacionadas con diferentes deportes han evaluado el efecto positivo de un programa de entrenamiento de salto pliométrico en el hueso de mujeres premenopáusicas [83], incluso cuando la osteopenia ya está establecida [84]. Así mismo, se ha comprobado que un programa de salto multidireccional de corta duración, alta intensidad y baja repetición que pueda introducirse en la vida diaria también es muy efectivo en la producción de una respuesta osteogénica positiva [9]. Consideramos que es importante encontrar programas de salto que puedan contrarrestar las posibles consecuencias negativas del deporte no osteogénico sobre la salud ósea. El programa de salto diseñado para las ex nadadoras de natación artística consistió en una sesión de 4 series de 4 CMJ combinadas con un salto reactivo con 10 segundos de descanso entre cada serie. Este tipo de salto superó los umbrales

osteogénicos para aumentar la masa ósea en mujeres premenopáusicas considerados en un estudio previo [85].

La intervención de salto se diseñó en base a datos de estudios en mujeres adultas [86] y animales [87] que muestran que una prescripción de ejercicio "ideal" para la salud ósea debe incluir los siguientes elementos: cargar los sitios esqueléticos de interés, actividad de alto impacto, tensión dinámica, que sea "inusual" e incluir descanso entre los ciclos de carga (10-15 segundos), sesiones (8 horas) y bloques (varios días).

4.4.4. Plataforma vibratoria

La vibración es un estímulo mecánico caracterizado por un movimiento oscilatorio. Las variables biomecánicas que determinan su intensidad son la frecuencia (tasa de repetición de los ciclos de oscilación, Hz.) y la amplitud (desplazamiento de pico a pico, mm.). Las frecuencias tienen un rango de 15 a 60 Hz. y amplitudes desde 1 mm. hasta 10 mm. Considerando las numerosas combinaciones de amplitudes y frecuencias posibles, está claro que existe una amplia variedad de protocolos de WBV que pueden ser utilizados en humanos [88]. Las vibraciones sinusoidales pueden ser sincrónicas (uniformes) o asincrónicas (de lado a lado). Muchos gimnasios y centros de rehabilitación utilizan la plataforma vibratoria en sus programas de ejercicio.

La plataforma vibratoria ejerce un efecto osteogénico como resultado de la vibración que provoca la estimulación ósea directa a través de los osteocitos o mediante la estimulación ósea indirecta a través de la activación del músculo esquelético [89]. Igual que en otras actividades físicas, la plataforma vibratoria precisa de músculos y hueso que trabajen contra la gravedad.

La plataforma vibratoria se propuso originalmente como un medio para aumentar DMO en astronautas en el espacio que, como los nadadores, operan en un medio hipogravitacional. Ha sido utilizada para mejorar la masa ósea en sujetos con discapacidades [90], así como en sujetos sanos [91,92] y debe ser considerada para mejorar las estructuras músculo esqueléticas en la vejez, ingravidez y inmovilización/desuso [88]. Debido al efecto positivo que ejerce sobre el hueso en deportes de bajo impacto [93] y el poco tiempo necesario para completar una sesión de entrenamiento, podría ser un buen tipo de entrenamiento para que deportes de bajo impacto (natación, natación artística) mejoren la masa magra, así como la masa

ósea. Las vibraciones mecánicas producidas en modo oscilante/vibratorio se pueden transmitir al cuerpo del deportista. Existe evidencia científica de sus efectos beneficiosos sobre los huesos [90–93]. La amplitud de vibración de pico a pico es de 2 mm., a baja amplitud, y 4 mm., a alta amplitud con una frecuencia de vibración entre 35 y 40 Hz. Los sujetos pueden realizar ejercicios isométricos en la plataforma, así como reducir la estabilidad de la plataforma para exponer al cuerpo a vibraciones multidireccionales. Durante las sesiones de entrenamiento de vibración, los sujetos deben llevar zapatillas de deporte para amortiguar la vibración.

Así mismo, puede mejorar el rendimiento deportivo al aumentar la fuerza muscular y las adaptaciones neuromusculares [92]. Los deportistas de alto rendimiento suelen encontrar los entrenamientos monótonos y aburridos, y las plataformas vibratorias podrían ser nuevos dispositivos atractivos para los deportistas y así mejorar su adherencia y motivación al entrenamiento.



Ejercicio isométrico en la plataforma vibratoria

4.5. HUESO Y DEPORTE

En el presente trabajo los deportes se han clasificado según su capacidad osteogénica en deportes no acuáticos, como el fútbol, el voleibol y el hockey hierba, y deportes acuáticos, como la natación, la natación artística o el waterpolo. El efecto osteogénico puede producirse de forma directa por las fuerzas mecánicas que inciden sobre la matriz ósea (ground reaction forces) o de forma indirecta a través de la contracción muscular [94]. Los deportes se pueden clasificar en deportes de impacto o sin impacto según la revisión realizada por Tenforde y Fredericson [95], que caracteriza como modalidades de impacto aquellos deportes que implican GRF, y como deportes sin impacto aquellos que se practican en un medio con hipogravedad, sin GRF.

4.5.1. Natación artística (natación sincronizada)

La natación sincronizada [96], conocida como natación artística desde 2017, forma parte del programa olímpico desde 1984.

Las nadadoras de “artística”, como se utiliza el nombre del deporte cuando se habla de nadadoras para diferenciarlas de las waterpolistas o las nadadoras de velocidad o fondo que compiten en “carreras”, participan en los Campeonatos Internacionales y Mundiales que están regulados por la Federación Internacional de Natación (FINA), el organismo rector internacional para los deportes acuáticos.

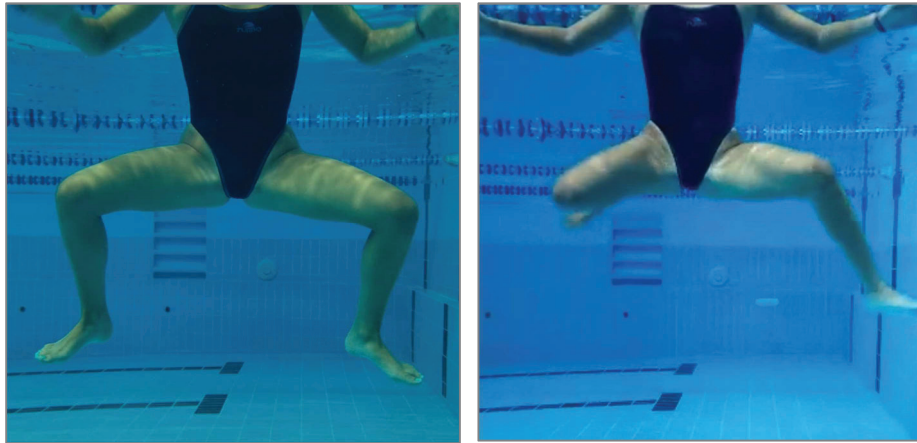
La natación artística requiere de una variedad de habilidades físicas, que incluyen resistencia, potencia, agilidad, acrobacias y flexibilidad, entre las más importantes. Las nadadoras deben sincronizar con precisión la coreografía con sus compañeras y la música. El resultado de rendimiento deseado requiere que las nadadoras de natación artística practiquen durante largas sesiones de entrenamiento en una extensa variedad de modalidades de ejercicios. El complejo sistema de puntuación en competición evalúa componentes de la habilidad técnica, la dificultad del contenido, la sincronización y la impresión artística. La forma del cuerpo no es un componente juzgado, sin embargo, hay un énfasis considerable en la composición corporal para lograr la armonía y la estética deseadas [97].

La natación artística exige un alto nivel de condición física general y habilidad técnica. El dúo y el equipo pueden ser rutinas libres o técnicas. La rutina técnica tiene una duración de 2 min. 20seg. para el dúo y de 2min. 50seg. para el equipo. La rutina libre

permite una mayor flexibilidad en los elementos para demostrar interpretación con la música y las figuras, tiene una duración de 3min. para el dúo y de 4min. para el equipo. La natación artística combina resistencia aeróbica con acciones explosivas intermitentes que solicitan unos elevados niveles de potencia anaeróbica. Los movimientos complejos de alta intensidad precisan de una sincronización exacta, en un entorno que simula para el cuerpo humano una gravedad cero y que deben realizarse con perfección [97]. Un 45-50% del tiempo las nadadoras están bajo el agua en apnea. Las rutinas modernas incorporan en la actualidad más maniobras acrobáticas, que implican movimientos de riesgo y explosividad.

En la élite, un programa de entrenamiento típico de natación artística consta de ocho a diez sesiones de piscina por semana, que incluyen natación, habilidades específicas de natación artística y trabajo de la condición física con el fin de poder realizar con éxito los ejercicios solicitados, y prevenir lesiones. Así mismo, las nadadoras realizan sesiones específicas fuera del agua, dedicadas a mejorar la flexibilidad y la fuerza muscular. En general, en el alto rendimiento deportivo, esta especialidad requiere de una dedicación muy elevada debido a que además de los entrenamientos aplicados a mejorar las habilidades técnicas y la condición física necesaria, se debe dedicar tiempo a crear y perfeccionar la coreografía, así como la sincronización entre las nadadoras. Su entrenamiento regular implica la ejecución de ejercicios muy repetitivos que utilizan una gran variedad de acciones de brazos y piernas para acelerar, desacelerar, rotar, impulsar y levantar el cuerpo fuera del agua.

En este deporte, la mayor parte de los desplazamientos se realizan a partir de la patada "*eggbeater*" y de diferentes tipos de remadas, implicando por lo tanto a las articulaciones de la cadera y del hombro. La patada "*eggbeater*" se utiliza para mantener una posición vertical y desplazarlo en cualquier dirección con la mayor parte posible del cuerpo fuera del agua. Para que esta patada sea efectiva, se realiza un trabajo importante de la musculatura de la cadera, manteniendo una buena flexión y abducción de cadera, asegurando un buen apoyo cercano a la superficie del agua y realizando un correcto batido circular utilizando la articulación de la rodilla y del pie.



Entrenamiento de natación artística. Patada “Eggbeater”

Por otro lado, una de las remadas más utilizadas para mantener una posición equilibrada invertida en vertical es la remada “americana” que consiste en una rotación externa-interna de hombro, acompañada de una supinación/pronación del antebrazo con las palmas orientadas hacia la superficie, manteniendo una flexión de aproximadamente 90º de codo y una leve abducción de hombro.

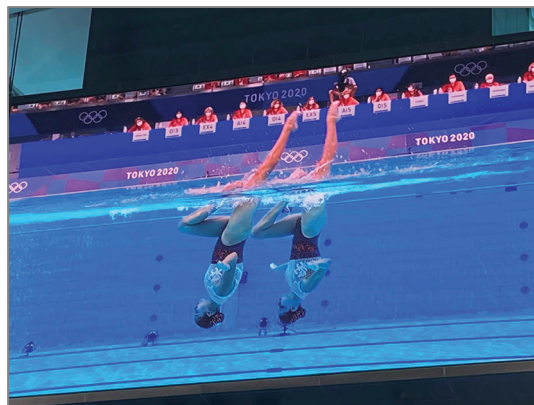


Remada americana

Es importante el trabajo muscular de core, de la musculatura lumbo-pélvica formada por la musculatura de columna lumbar, pelvis y cadera para una ejecución eficiente de los movimientos técnicos en natación artística [98].

Pocos estudios han investigado los efectos de la natación artística en el hueso, particularmente en deportistas jóvenes [99–101]. Dado que la participación en la natación artística comienza a una edad temprana y requiere de muchas horas de entrenamiento en un entorno con menos efecto gravitatorio, en un momento en que es fundamental alcanzar el máximo pico de masa ósea, los estudios realizados para

prevenir la osteoporosis en esta población de mujeres son de suma importancia. La acumulación máxima de hueso ocurre durante la adolescencia, y requiere de un estímulo que no proporciona la natación artística, en estas edades en las que el entrenamiento en la natación artística es intenso. La masa ósea máxima en mujeres ocurre alrededor de los 19 años, y alrededor de 20.5 años en hombres [8]. Este es un período de tiempo crítico. Se ha demostrado una DMO más baja en la muñeca de las nadadoras artísticas (0.414 g/cm^2) en comparación con las gimnastas (0.540 g/cm^2) y en sujetos control sin esta carga de entrenamiento (0.474 g/cm^2) [102]. Estos hallazgos pueden atribuirse al hecho de que la natación artística es un deporte en el que la mayoría de las horas de entrenamiento se producen en el medio acuático, donde las condiciones de flotación reducen la carga de la fuerza de la gravedad sobre el sistema esquelético. Parece ser que la participación en natación artística no aporta efectos positivos en el hueso, pero tampoco posee efectos negativos [99].



Remada americana. Posición vertical rodilla doblada arqueada.
Dúo libre España. JJOO Tokio 2020.

4.5.2. Natación

La natación es una de las actividades de ocio más populares en todo el mundo. Sus beneficios cardiovasculares se recomiendan para mejorar la salud y la condición física. De hecho, es un recurso para mantener en activo personas lesionadas, a las que conviene tratar en situaciones de descarga [103].

Los primeros JJOO de la Era Moderna, celebrados en Atenas 1896, incluyeron la natación dentro de su programa olímpico. La natación es un deporte aeróbico sin impacto (sin *ground reaction forces*), que se caracteriza por el desplazamiento a través del medio acuático, “hipogravedad”, mediante la propulsión a partir de la coordinación de las extremidades corporales manteniendo a su vez una posición corporal que reduzca la resistencia al avance. Las extremidades inferiores cada vez ayudan más a la propulsión y principalmente ayudan al nadador a permanecer horizontal y estable mientras nada, reduciendo la resistencia al avance. Las extremidades superiores son más propulsivas y están sujetas a mayor trabajo muscular. A pesar de la contracción muscular en extremidades inferiores y superiores, la natación no es capaz de generar el suficiente estrés en el hueso. Un estudio muestra una mayor DMO en brazos en nadadoras respecto a controles sedentarios [49]. Este hecho podría ser debido a que la fuerza aplicada al hueso por la acción propulsiva de los brazos podría ser

Beneficios de la práctica de la natación

Beneficios en el desarrollo orgánico
Participación de grandes grupos musculares
Tonificación muscular
Mejora de la condición física en general, resistencia, fuerza, flexibilidad.
Mejora en la movilidad articular
Mejora de la composición corporal

Beneficios en el desarrollo de la coordinación motriz
Coordinación de movimientos
Relajación
Adquisición de nuevas experiencias de movimientos
Mejora y desarrollo de la capacidades coordinativas como son el ritmo, la lateralidad.

Beneficios en la mejora de la postura
Fortalecimiento muscular paravertebral
Descarga de la columna vertebral

Beneficios en la esfera social
En relación a la mejora de la movilidad posterior al trabajo en la piscina

Beneficios en ciertas enfermedades y condiciones agudas o crónicas
Agudas: lesiones, agudizaciones de enfermedades reumáticas y neurológicas
Crónicas: enfermedad reumática, neurológica, degenerativa, respiratoria
Obesidad

Modificado de Drobnic F y cols. Impacto sobre la salud de los compuestos utilizados en el tratamiento del agua en las piscinas. Estado de la cuestión. Apunts Med Esport. 2009; 161:42-7)

suficiente para mejorar la DMO, sin necesidad de impacto, especialmente en una parte del cuerpo que habitualmente no se utiliza y no es sometida a carga durante las actividades cotidianas. Existen cuatro estilos reconocidos en natación: crol, braza, espalda y mariposa. En cada estilo se reconocen cuatro fases: entrada, agarre, impulsión y recobro. Se considera que las extremidades superiores participan en un

95% en la propulsión del crol, mariposa y la espalda. Sin embargo, en el estilo de braza las extremidades superiores e inferiores participan por igual. Los nadadores de élite realizan un total de 16.000, o incluso, 25.000 rotaciones de hombro en una rutina semanal, donde exista un 80% de crol. Estos deportistas están una gran parte del día y durante años, sin el estímulo de la fuerza de la gravedad, generando valores de fuerza muscular de baja intensidad, con pocos impactos (impulsión en los virajes) con bajo efecto sobre el hueso.

Existe poca diferencia en cuanto a DMO en los nadadores respecto a los no deportistas, en la infancia, pero estas diferencias aumentan a medida que lo hace la edad, en la adolescencia y en la etapa adulta debido al efecto acumulativo de la carga baja sobre el hueso. El PMO, considerado como la mejor protección contra la pérdida ósea con la edad, está determinada genéticamente en un 60-80%, pero un 20-40% depende de factores ambientales como la nutrición y la actividad física, como se ha mencionado en el apartado de condicionantes genéticos. Si comparamos dos deportistas adolescentes (nadadores y jugadores de voleibol) con los mismos condicionantes genéticos, pero con factores ambientales distintos, es posible que no lleguen al mismo PMO, obteniendo el nadador un menor PMO, debido a los condicionantes ambientales y probablemente con un mayor riesgo de osteoporosis a la larga.

Una revisión sistemática que analizó los efectos de la natación en el hueso, en edades pediátricas (niños y adolescentes), mostró que la natación no tiene efecto en la DMO, con valores similares a la población sedentaria, y menores en columna lumbar y fémur que los deportes con impacto. Por eso los autores concluyen que la práctica regular de natación no tiene efecto en el hueso y que no es un deporte osteogénico [49]. Los bajos niveles de DMO nos preocupan, especialmente si se mantienen durante la etapa adulta. El mismo grupo de autores, realizó una nueva revisión sistemática con adultos (18-30 años) mostrando que los nadadores tenían valores de DMO similares a los controles sedentarios y menores que otros deportes más osteogénicos en DMO total, columna lumbar y fémur. Estos hallazgos sugieren que la falta de estímulo osteogénico en la natación durante la adolescencia se mantiene en la edad adulta y probablemente los nadadores no alcanzarán su PMO [104]. Estos resultados no deberían desanimarnos y si animarnos a proponer una prevención con ejercicios de impacto

fuera del agua combinado con la natación. La natación es un buen deporte a nivel de salud cardiorrespiratoria y niveles de lípidos en sangre, y se ha descrito como un deporte con baja incidencia lesional.

En relación con la estructura ósea, los nadadores presentan un menor grosor cortical y menor vDMO trabecular respecto a otros deportes de impacto [105]. Otros autores han comparado la geometría ósea de nadadores y jugadores de fútbol, y observan que los nadadores no incrementan el grosor subperióstico, como lo hacen los jugadores de fútbol. El índice de estabilidad ósea (BR, buckling ratio) que es la distancia entre el centro hasta la superficie ósea dividido por el grosor cortical, es el único valor mayor en nadadores, lo que significa que tienen unos huesos más débiles [106]. La mayoría de estudios [50] muestran valores de DMO similares en nadadores y sedentarios, independientemente de la edad, excepto para la etapa adulta tardía en que los nadadores presentan menor pérdida ósea que los sedentarios, aunque no está claro si estas diferencias son debidas al deporte o debidas a que los nadadores presentan un estilo de vida más activo, puesto que estudios longitudinales valorando los efectos de la natación en el hueso no muestran aumentos de DMO, después de una temporada de entrenamiento en natación [107]. Por el contrario, los nadadores muestran mayores niveles de turnover óseo respecto a los sedentarios, que no se ve reflejado en una mayor DMO. Este mayor turnover óseo está asociado a una estructura ósea más eficiente del nadador que parece débil cuando la comparamos con deportes de impacto, pero fuerte cuando la comparamos con sedentarios [50]. Muchos factores interfieren en el efecto de la natación en el hueso que deberán ser estudiados en el futuro.



Movimiento de brazada propulsiva. 400 m estilos.
JJOO Tokyo 2020.

4.5.3. Waterpolo

El waterpolo se originó en Gran Bretaña entre 1869 y 1870 y se llamó polo porque los primeros jugadores iban montados en barriles que parecían caballos y golpeaban la pelota con mazos. Después se le llamó waterpolo y también fútbol en el agua. Se incluyó por primera vez en los JJOO del 1900. La primera competición internacional femenina no se celebró hasta 1978. El waterpolo es un deporte de equipo que se juega dentro del agua, manteniéndose a flote en todo momento, sin tocar el fondo. Los equipos que compiten intentan colocar un balón flotante dentro de la portería del adversario.

Para mantenerse a flote, el jugador debe tener una postura semi sentada dentro del agua con rodillas separadas y realizar un movimiento coordinado circular con ambas piernas (posición de patada de bicicleta). Otro gesto destacado es el lanzamiento a puerta o chut, en el que el jugador desde la posición de patada de bicicleta lanza el balón por encima de la cabeza.

Desde el punto de vista mecánico, una de las articulaciones más demandadas en el waterpolo es el hombro, debido a su implicación durante el nado y principalmente en pases y disparos. Por otro lado, destaca el trabajo de la cadera, debido a que los/las jugadores de waterpolo salen del agua o mantienen una posición vertical para pasar la pelota o disparar a portería, mediante un movimiento coordinado circular con ambas piernas llamado “eggbeater”. Esta patada alternativa es importante ya que los/las waterpolistas pasan de media un 63% del tiempo de partido en posición vertical. Tal y como se ha expresado anteriormente, para que esta patada sea efectiva, se debe mantener una buena flexión y abducción de cadera y realizar un correcto batido circular utilizando la articulación de la rodilla y del pie. De echo, un estudio [108] compara la DMO en mujeres corredores, gimnastas y jugadoras de waterpolo de élite, sin apreciar beneficios en la DMO de las extremidades inferiores y sí en las extremidades superiores de las waterpolistas comparado con los controles sedentarios. Sin embargo, los valores más elevados de DMO en extremidades superiores se observaron en la gimnasia puesto que combina fuerza muscular e impacto en el hueso, ambos requisitos necesarios para la formación ósea. La ausencia de fuerzas de gravedad en las extremidades inferiores en las jugadoras de waterpolo impide el efecto positivo de la fuerza muscular. Los practicantes de waterpolo

necesitan un dominio de la natación, además de las habilidades y de los movimientos específicos del waterpolo. Es importante practicar como desplazarse con el balón, como dominarlo y pasarlo, chutar y como mantener el equilibrio del cuerpo. Existe poca literatura que estudie los efectos del waterpolo sobre el hueso.



Lanzamiento a portería.
Partido España-USA. JJOO Tokyo 2020.

4.5.4. Fútbol

El fútbol es un deporte con unas características biomecánicas propias, con cambios de dirección, velocidad, saltos y chuts que confieren al hueso un estrés mecánico adicional en extremidades inferiores debido a las fuerzas de reacción contra el suelo durante estas acciones que favorecen la mineralización ósea, desde la cortical a la trabecular en toda su dimensión dependiendo de la intensidad y duración [109]. Desde el punto de vista energético se considera un deporte mixto: aeróbico-anaeróbico. Además, las jugadoras necesitan tener cierto grado de flexibilidad, agilidad y fuerza. La distancia recorrida durante un partido puede ser de 8-12 Km, siendo los centrocampistas los que recorren una mayor distancia. El jugador está andando o a marcha lenta durante el 50-70% del tiempo, mientras que el 10-20% restante realiza trabajo submáximo o máximo. La jugada se construye en función de la alternancia de esfuerzos y acciones de intensidad y duración variables. Las secuencias de trabajo son de 0 a 30 seg. de duración en la mayoría de los casos y los tiempos de reposo se encuentran la mayor parte por debajo de los 40 seg. Estos tiempos revelan que el contacto del jugador con el balón es de 2.7 min. de forma aproximada en un partido pero hay que pasarlo de uno a otro para cambiar de posesión. Se calcula que un jugador no posee la pelota en un partido más de 90 segs. Es importante a nivel óseo tener en cuenta que, en cada partido, el futbolista de élite realiza unas 1000-1200 acciones, 350 pases con un toque, 150 con dos toques, y el resto con varios toques, que incorporan cambios rápidos y frecuentes de ritmo y dirección, así como de ejecución de juego.

Se han realizado numerosos estudios sobre el efecto positivo del fútbol en el hueso [110–113]. Una revisión sistemática y un metaanálisis [112] recogieron datos sobre el efecto biomecánico del fútbol sobre el hueso y concluyeron que el fútbol es un deporte que debe ser considerado como un deporte positivo a practicar durante el crecimiento. Los jugadores de fútbol de ambos sexos en fase puberal presentaron mayores valores de DMO corporal comparado con otros deportistas y controles sedentarios. Estos cambios se detectan en la etapa pre-puberal y parece que aumentan en la etapa puberal. Las acciones de alto impacto en las extremidades inferiores durante la práctica del fútbol pueden explicar la influencia positiva de este deporte sobre el hueso en las distintas localizaciones de carga como pelvis,

extremidades inferiores, columna lumbar y fémur proximal, comparado con los controles [111,112]. Otro dato a tener presente es la superficie de juego: superficie dura vs superficie de hierba. Un estudio de Plaza Carmona en etapa pre-puberal mostró valores de DMO mayores en futbolistas que en controles, independiente a la superficie practicada [114]. Algunos estudios longitudinales han evaluado los efectos del fútbol durante el crecimiento mostrando un incremento en la DMO total, de extremidades inferiores, columna lumbar, cuello femoral y trocánter [115,116] después de 3 años de entrenamiento de fútbol.

Las jugadoras de fútbol presentan mayores valores de DMO en cuello femoral que los controles sedentarios [117], que las nadadoras [106], practicantes de halterofilia [118], y que jugadoras de baloncesto y balonmano [117]. Las diferencias en los distintos deportes de impacto (deportistas de baloncesto, fútbol y salto a la cuerda) a veces no están claros. Todos estos deportes se caracterizan por acciones de elevado impacto, pero con patrones distintos a nivel de dirección de la carga de impacto. Las fuerzas compresivas son más frecuentes en el salto a la cuerda y las fuerzas de tensión son más abundantes durante los cambios de dirección. Parece ser que los deportes que se caracterizan por movimientos multidireccionales y dinámicos son más osteogénicos que los deportes que se caracterizan por fuerzas compresivas (salto a la cuerda), aunque éstos últimos también son muy osteogénicos. Así mismo se ha comparado el fútbol con el ejercicio de trabajo muscular en el gimnasio, observando que éste último no es un determinante importante en la DMO ni en la microestructura del hueso [119].



Chut y cambio de dirección.
FCB-Granadilla. Liga 2021/22.

4.5.5. Voleibol

El voleibol es un deporte intermitente explosivo que combina fases de juego activas y pasivas. El salto vertical es un movimiento fundamental para sacar, bloquear y para múltiples jugadas. La habilidad para saltar alto, rápido y de forma explosiva es esencial para la mayoría de las acciones técnicas del voleibol, que incluyen el golpeo del balón, el bloqueo, el saque y los ajustes. Por ello, los entrenadores procuran un énfasis especial en el entreno al salto, tanto en su fase excéntrica como concéntrica. En un partido a 5 sets se pueden llegar a realizar unos 65 a 136 saltos. Además, se considera que se realizan esfuerzos cortos e intensos (10-12 seg.) que requieren rendimiento máximo.

La fuerza, el control y la reacción son también cualidades importantes en este deporte. Los desplazamientos rápidos, tanto laterales como antero-posteriores, también son necesarios tanto para defender y atacar, como para ajustar el cuerpo a la trayectoria del balón en un corto período de tiempo ya que el balón tarda 1.2 a 1.4 segundos de ir de una parte de la pista a la otra. En conclusión, el voleibol se caracteriza por desplazamientos cortos, rápidos y por saltos verticales, tanto en las acciones defensivas como en las ofensivas, precisando los jugadores fuerza explosiva y potencia [120].

La DMO en el voleibol varía en función de la posición de juego. Las posiciones cercanas a la red presentan una mayor DMO que las posiciones más lejanas, principalmente en extremidades inferiores y columna lumbar. Sin embargo, no se aprecian diferencias en DMO en extremidades superiores en función de la posición en la pista, según un estudio reciente realizado por Bisch [121]. Estas diferencias según la posición en la pista, se podrían explicar por los impactos repetidos de salto durante las acciones de ataque y bloqueo de los jugadores cercanos a la red. Como ya hemos mencionado previamente, la mayor DMO en extremidades inferiores y columna lumbar se explican por el impacto de las acciones cortas y de elevada intensidad, con una gran fuerza de reacción del suelo. Además son deportistas con una gran área de sección muscular, que desarrollan gran fuerza muscular, que practican un deporte de elevado impacto y que están expuestos a una gran tracción que favorece la osteogénesis [122].

En el voleibol, podemos apreciar que las jugadas son de aproximadamente 6 seg. seguidas de 14 seg. de reposo, con movimientos muy concretos y sin demasiado

desplazamiento. Si lo comparamos con los jugadores de baloncesto, éstos se desplazan a lo largo de la pista cada 1-3 seg., es decir son más activos, más dinámicos, con menos tiempo de reposo entre las acciones y con movimientos multidireccionales. A pesar de que el impacto vertical en el jugador de voleibol es mayor (4.3-8.9 veces el peso corporal), la demanda multidireccional con 0.1-2.6 veces el peso corporal, en el baloncesto, hace que éstos jugadores presenten una DMO total y pélvica mayor que los jugadores de voleibol [123]. No es necesario comentar que al comparar jugadoras de voleibol y nadadoras adolescentes, las jugadoras de voleibol presentaron una mayor DMO en extremidades inferiores que las nadadoras [124].



Acción de remate en el voleibol.
Partido España-República Checa. Eurovolley 2021.

4.5.6. Hockey hierba

Es un deporte que consiste en conducir y trasladar la pelota de un lugar a otro del campo de juego con el objeto de colocar la pelota en la portería del rival para marcar los tantos. En general, se realiza llevando la pelota arrastrada pegada al palo o *stick*, en el equivalente a lo que hace un jugador de fútbol con los pies. Es un deporte de equipo en el que se realizan pases cortos, largos y recepción de éstos.

El hockey hierba es un deporte de elevada intensidad en el que se alternan el metabolismo aeróbico y el anaeróbico, consecuencia de desplazamientos rápidos y cortos a lo largo de todo un partido, que se corresponde a dos periodos de 35 min. cada uno. Los jugadores suelen estar activos 20 min. aproximadamente (30% del tiempo de juego) y realizan unos 5.6 Km. Los movimientos intensos requieren de gran esfuerzo muscular para golpear la pelota, mientras que los movimientos de baja intensidad incluyen pases de precisión y regates. De todas las acciones con la pelota, el 61% duran entre 0.5 y 2 seg. Gran parte de la intensidad de esfuerzo de los jugadores se refiere a los movimientos sin pelota. El hockey hierba es un deporte intermitente con aceleraciones, desaceleraciones y cambios de dirección de movimiento. Las características físicas como la talla y la composición corporal son algunos de los factores que influyen en el rendimiento en este deporte, para el que se requieren niveles elevados de fuerza, agilidad, velocidad y resistencia. Parece ser que existe una relación inversa entre los niveles de masa grasa y el rendimiento en aquellos deportes con elevado componente de resistencia o en aquellos deportes que combinan ambas cualidades, velocidad y resistencia, como ocurre en el hockey hierba o en el fútbol [125].



Conducción de balón elevado. España-Gran Bretaña. JJOO Tokyo 2020

4.6. DEPORTE FEMENINO Y ALTO NIVEL

4.6.1. Deporte de alto nivel

Existen varias definiciones de deporte de alto nivel o de élite:

- Cualquier ejercicio físico organizado reglamentariamente, en el que el entrenamiento y la competición ocupan la mayor parte del tiempo y en el que el nivel de exigencia es máximo.
- Para alcanzar y mantener el máximo rendimiento, el deportista emplea casi todo su tiempo entrenando, lo que requiere dedicación física, mental y social completa [126].
- La vida está organizada alrededor del entrenamiento, la competición y los viajes.

Las posibles secuelas del deporte de élite sobre la salud del deportista dividen a los especialistas. Para unos es “incompatible con la salud” y tiene consecuencias para la misma, pero otros opinan que siendo “un deporte controlado, aunque al límite de las posibilidades fisiológicas”, cuando se deja la alta competición y se practica de forma regular y moderada, aporta beneficios a la salud del ex -deportista.

En el desarrollo de la Ley del Deporte de 1990, el Real Decreto 1467/1997, de 19 de septiembre, y, posteriormente, la Orden de 14 de abril de 1998, que modifica los anexos del anterior, regularon los criterios en torno a los cuales se adquiere la condición de deportista de alto nivel. No obstante, al hilo de los cambios sociales y legislativos que se han ido produciendo en estos últimos años, ha sido necesario revisar y actualizar los criterios, para facilitar aún más la preparación técnica de los deportistas de alto nivel y su plena integración en el sistema educativo, y en la vida social y laboral, tanto durante su práctica deportiva, así como después de ella. Así mismo se establece que la alta competición constituye un elemento de interés para el Estado, en tanto que es un factor esencial en el desarrollo deportivo por el estímulo que supone para el deporte y por su función representativa de España en las pruebas o competiciones deportivas oficiales de carácter internacional [127]. El deportista de alto nivel (DAN) es aquel obtiene resultados deportivos de interés para el Equipo Nacional en su deporte y que ha sido acreditado como tal, por resolución del

Presidente del Consejo Superior de Deportes (CSD). El listado de deportistas de alto nivel es publicado en el BOE.

De acuerdo con la Secretaria General de l'Esport (SGE), el Decret 337/2002, de 3 de diciembre, en el artículo 17, capítulo 3, define deporte de alto nivel y deportista de alto nivel.

- Deporte de alto nivel: la práctica deportiva reglada y reglamentada que exige unas condiciones específicas a los y las deportistas, y a los medios materiales de que han de disponer, según la modalidad o disciplina deportiva de la que se trate, y que supone el nivel de competición más alto organizado por las federaciones deportivas internacionales.
- Deportista de alto nivel: la persona que figura en los listados que aprueba semestralmente la presidencia del Consell Català de l'Esport, y que participa o tiene opciones de participar en las competiciones de máximo nivel organizadas por las federaciones internacionales.

4.6.2. Tríada de la mujer deportista

La asociación de amenorrea, trastornos alimentarios y osteoporosis que se observaba en mujeres físicamente activas con bajo porcentaje de grasa corporal fue reconocida como la “Tríada de la mujer deportista” (Drinkwater, 1993, ACSM 1997). Con posterioridad, en 2007, se redefinió como un espectro que va desde la normalidad/salud óptima hasta la patología/enfermedad, para cada componente de la Tríada. Actualmente se ha redefinido por el Comité Olímpico Internacional como RED's síndrome [128], síndrome que se caracteriza por un déficit energético debido a un aumento del gasto energético y una disminución de la ingesta necesario para la homeostasis, salud, actividades de la vida diaria, crecimiento y deporte; con consecuencias para la salud de la deportista y su rendimiento.

La Tríada de la mujer deportista es una condición médica que incluye: baja disponibilidad energética con o sin trastorno de la conducta alimentaria, alteración de la función menstrual y baja densidad mineral ósea (DMO). La deportista no necesita mostrar de forma simultánea manifestaciones clínicas de los tres componentes de la Tríada, puede presentar cualquiera de ellos o todos.

La baja disponibilidad energética (con o sin trastornos alimentarios), la amenorrea y la

osteoporosis, solas o combinadas, son factores de riesgo para la salud de las mujeres físicamente activas. Las consecuencias, potencialmente irreversibles, de estas condiciones clínicas hacen necesaria una prevención, diagnóstico precoz y tratamiento.

Todas las atletas están en riesgo, no importa la complexión corporal o el deporte. Todas las mujeres activas deben ser evaluadas y debe ser una parte integral de las revisiones médicas previas a la participación deportiva.

Según la **Figura 6** las mujeres deportistas deben encontrarse en el ángulo superior izquierdo de la figura, que representa a la atleta sana que ajusta su ingesta energética alimentaria para compensar el gasto energético durante el ejercicio. Las flechas anchas de este triángulo indican que la disponibilidad energética proporciona una buena salud ósea y desarrollo, indirectamente preservando una correcta función menstrual (eumenorrea) y producción estrogénica que evita la reabsorción ósea (destrucción del hueso) y, directamente estimulando la producción de hormonas que promueven la formación ósea, que proporciona una la Densidad Mineral Ósea (DMO) en la media de la edad de la deportista.

El triángulo en la parte inferior derecha de la figura representa las condiciones no saludables de las deportistas que entrenan muchas horas, sin un aporte energético adecuado, con dietas restrictivas o con alteraciones de la conducta alimentaria. Las flechas anchas en este triángulo indican que la baja disponibilidad energética afecta a la salud ósea y al desarrollo, indirectamente produciendo amenorrea y favoreciendo la reabsorción ósea por la disminución estrogénica y, directamente inhibiendo las hormonas que favorecen la calcificación ósea. La densidad mineral ósea se ha enlentecido durante tanto tiempo que la DMO está por debajo de la media de las deportistas de esta edad, y pueden aparecer una o más fracturas de estrés.

Las flechas delgadas indican el amplio espectro de condiciones subclínicas de DMO, disponibilidad energética y función menstrual. Estas condiciones subclínicas pueden avanzar en una u otra dirección. La disponibilidad energética puede variar en un día, pero las alteraciones en la función menstrual no serán evidentes hasta un mes o varios, y los efectos en la DMO pueden no ser detectables hasta al cabo de un año.

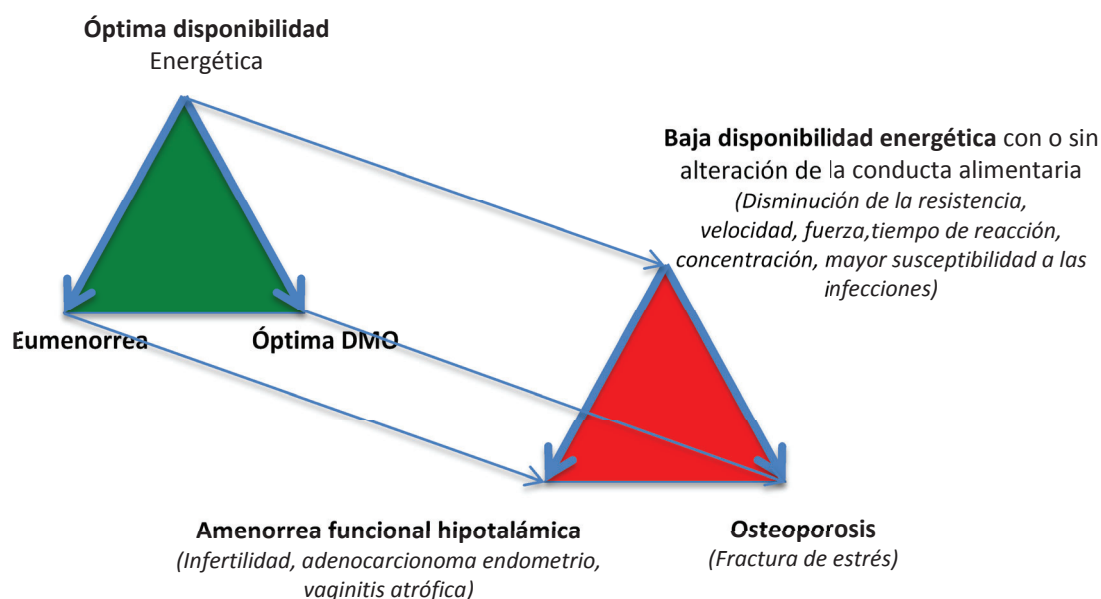


Figura 6. Tríada de la mujer deportista (ACSM, 2007) [129]

La “Tríada” puede tener mayor repercusión en la salud de la mujer deportista adolescente que en la adulta puesto que la adolescencia es un periodo crítico para la adquisición de caudal óseo para el futuro [42]. La DMO decrece a medida que se acumulan ciclos amenorreicos y la DMO no es del todo reversible [130]. Las fracturas de estrés suceden más frecuentemente en mujeres físicamente activas con irregularidades menstruales y/o baja DMO con un riesgo relativo de fracturas de estrés 2-4 veces mayor en mujeres amenorreicas que en las eumenorreicas. Las fracturas también ocurren cuando existen déficits nutricionales y baja DMO.

Los factores asociados con mayor riesgo de baja DMO en mujeres atletas adolescentes son los siguientes:

- Menarquia tardía, oligomenorrea, amenorrea, bajos niveles estrogénicos
- Restricción dietética, déficit energético
- Mayor tiempo de participación en deportes de resistencia
- Menor peso corporal y menor índice de masa corporal (IMC)

Existen unos factores de riesgo para desarrollar la tríada de la mujer deportista. Las deportistas con mayor riesgo de baja disponibilidad energética son aquellas con baja

ingesta alimentaria, exceso de ejercicio físico, vegetarianas y las que limitan el tipo de comida a ingerir. Algunos factores contribuyen a los trastornos de conducta alimentaria. Las dietas hipocalóricas constituyen el punto de partida, pero también existen factores sociológicos, psicológicos y ambientales, como baja autoestima, familias desestructuradas o factores biológicos y genéticos. En las deportistas también existen otros factores adicionales como el inicio precoz en un deporte específico, el elevado volumen de horas de entrenamiento, las lesiones y el sobre entrenamiento. También se observan peores actitudes en la alimentación en deportes que requieren una mayor delgadez [42]. Thralls, (2016) [131] observa que los marcadores antropométricos de peso ideal y IMC (índice de masa corporal) se relacionan con el mayor riesgo de alteraciones menstruales y baja DMO, y podrían ser buenos indicadores de predicción.

Si nos centramos en las alteraciones menstruales, se observa como factor de riesgo la amenorrea, pero no los niveles hormonales. Muchos de los factores de riesgo no son factores causales en la disrupción del ciclo menstrual en deportistas. El porcentaje de grasa y el peso corporal son en general bajos en atletas amenorreicas, pero en las atletas eumenorreicas y en las amenorreicas los valores de porcentaje grasa y peso siempre son menores que en la población no deportista. El entrenamiento no tiene efecto supresivo de la liberación de LH, cuando la ingesta energética se incrementa para compensar el gasto energético.

Los factores de riesgo para las fracturas de estrés incluyen baja DMO, alteraciones menstruales, menarquia tardía, insuficiencia alimentaria, predisposición genética, alteraciones biomecánicas, errores en el entrenamiento y alteración de la geometría ósea.

Los factores de riesgo más importantes son [27,41] los que se mencionan en la siguiente tabla (**Tabla 2**).

Factores de riesgo para las fracturas de estrés
Historia de irregularidad menstrual y amenorrea
Historia de fracturas de estrés
Historia de comentarios críticos sobre comidas o peso de los padres, entrenadores
Historia de depresión
Historia de dietas restrictivas
Personalidad perfeccionista, obsesiva
Presión por perder peso y/o yo-yo con el peso Inicio precoz en la práctica deportiva
Sobre entrenamiento
Lesiones recidivantes y con lenta recuperación
Comportamiento inadecuado de entrenadores

Tabla 2. Factores de riesgo para sufrir fracturas de estrés

Es difícil realizar un cribaje ya que la mayoría de los síntomas y signos son poco aparentes al principio. El mejor momento para realizar un cribaje es durante la revisión médica previa a la práctica deportiva o durante los controles anuales.

La *Female Athlete Triad Coalition* ha desarrollado 12 preguntas para el “screening” [41,97]. Si una atleta responde “sí” a cualquiera de las preguntas de la Tríada en el formulario de “screening” hay que realizar una evaluación adicional.

4.7. MEDIDAS DE EVALUACIÓN

4.7.1. Densitometría (DXA)

La DXA es el método más utilizado para medir densidad mineral ósea (DMO; g/cm²) y contenido mineral óseo (CMO; g) gracias a su velocidad, precisión, baja radiación y disponibilidad de datos de referencia. Es la técnica recomendada por la OMS para la valoración de la masa ósea y el diagnóstico de osteoporosis. Las regiones de interés en las que se aplican los umbrales diagnósticos son las clínicamente más importantes por su morbilidad como la columna lumbar y el tercio superior de fémur, como se aprecia en la **Figura 7**.

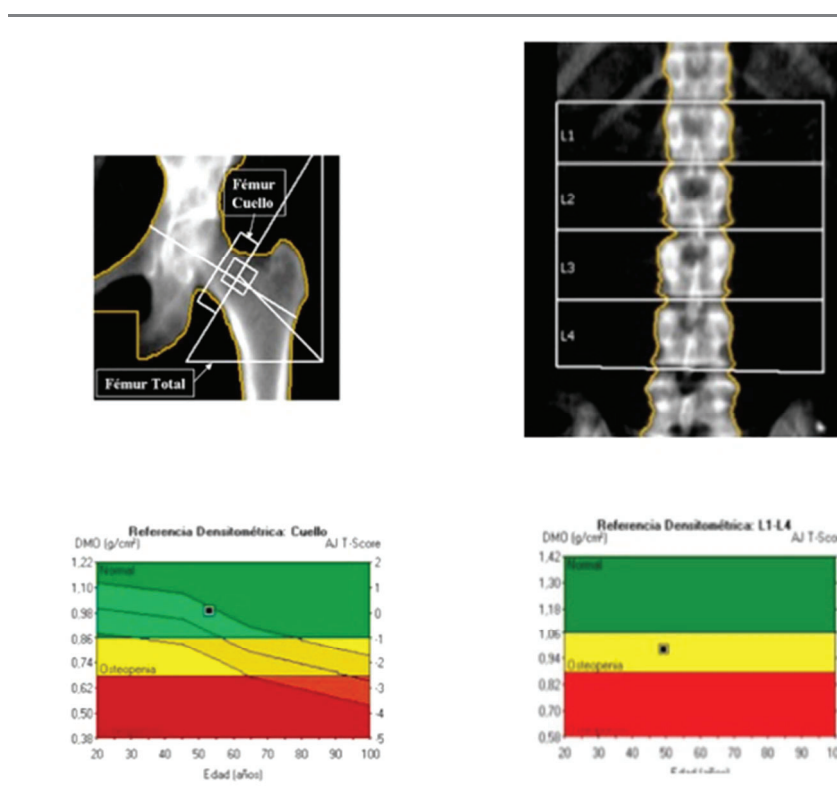


Figura 7. DXA en cuello femoral y columna lumbar (*T-score*). Valores normales de DMO en fémur; Valores de osteopenia en zona lumbar.

Este procedimiento diagnóstico proporciona una estimación del riesgo de fractura basándose en el valor de la puntuación T (*T-score*) y ha permitido la clasificación de la población en categorías según su riesgo riesgo de fractura (OMS) (**Tabla 3**).

DMO	T-score
Normal	DMO > -1 DE
Osteopenia	DMO entre -1 y -2.5 DE
Osteoporosis	DMO < -2.5 DE

Tabla 3. Criterios para el diagnóstico cuantitativo de osteoporosis según la OMS mediante DXA [132,133]. DMO: densidad mineral ósea, DE: Desviación Estándar

Poder medir la DMO mediante DXA aporta algunas ventajas: 1) permite valorar el riesgo de fractura antes de que ésta se produzca, para iniciar con el paciente las medidas preventivas necesarias, 2) ayuda a confirmar el diagnóstico de fragilidad ósea ante la presencia de una fractura y 3) es útil para monitorizar la respuesta al tratamiento.

La relación entre el riesgo de fractura y la DMO baja ha sido confirmada y el riesgo relativo aumenta entre 1.5 y 3 por cada desviación estándar (DE) de disminución de la densidad ósea (DMO), cuando es comparada con el valor promedio alcanzado en la población joven del mismo sexo (T-score).

Sin embargo, la DXA presenta también limitaciones: 1) los criterios de la OMS están definidos sólo para mujeres postmenopáusicas de raza blanca y varones de edad superior a 50 años, 2) se establecieron considerando la medición de la DMO mediante absorciometría radiológica de doble energía, en columna lumbar y fémur, no son aplicables a otras técnicas (Tomografía computarizada cuantitativa [QCT], tomografía periférica [pQCT], ultrasonidos cuantitativos [QUS], etc.), ni en otras localizaciones (falanges, calcáneo, etc.), 3) mide “cantidad” de hueso, pero no puede valorar en su formato convencional “calidad”, 4) es poco específica, porque existen falsos positivos, como por ejemplo la osteomalacia y 5) existen casos de fracturas por fragilidad con DMO disminuida pero que alcanzan el umbral de -2.5 DE.

En los últimos años se han desarrollado aplicaciones informáticas que utilizan las imágenes o datos en bruto de la absorción radiológica para aportar información sobre la calidad estructural del hueso trabecular, como es el Trabecular Bone Score (TBS) o sobre la geometría y distribución espacial del tejido óseo, permitiendo distinguir el componente trabecular del hueso cortical en tres dimensiones (3D-DXA) [134].

A pesar de las limitaciones mencionadas, la DXA sigue siendo la mejor herramienta de la que se dispone en la actualidad para realizar el diagnóstico de osteoporosis antes de que se produzca la fractura.

La Sociedad Internacional de Densitometría Clínica, recomienda para mujeres premenopáusicas y hombres menores de 50 años, utilizar la puntuación Z (*Z-score*) que comparan DMO con referencias de la misma edad y sexo. Un *Z-score* <-1 se considera osteopenia y un valor <-2 osteoporosis.

La *American College of Sports Medicine* (ACSM) (**Tabla 4**) valora deportistas que suelen tener DMO 10-20% superiores a los no atletas y define osteoporosis como *Z-score* <-2.0 SD con alteraciones nutricionales, hipoestrogenismo, fracturas de estrés y osteopenia como *Z score* entre -1 y -2 SD.

DMO	Z-score
Normal	DMO > -1 DE
Osteopenia	DMO entre -1 y -2.0 DE
Osteoporosis	DMO < -2.0 DE

Tabla 4. Valores de DMO según el ACSM

En este estudio todas las DXA fueron realizados por el mismo técnico experimentado siguiendo las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Densitometría Clínica [135].

La DXA también es una técnica indirecta de análisis de la composición corporal, basada en la absorciometría, a través de la cual detecta la diferencia de absorción radiológica de acuerdo con las proporciones en cada celdilla en las que se localiza hueso del contenido mineral óseo y los tejidos blandos. En las celdillas en las que no se identifica hueso (sólo tejidos blandos) aporta la proporción de masa grasa y la proporción de tejido no-graso o masa magra. En el caso del cuerpo humano, el haz de rayos X atraviesa diferentes tejidos orgánicos que difieren en composición, y por tanto en densidad específica. Es decir, que en función de la composición del tejido que la energía atraviesa, ésta sufrirá atenuaciones de diferente intensidad. Una vez detectada la atenuación y conociendo los diferentes coeficientes de atenuación de masa de cada tejido, se pueden estimar los porcentajes de cada uno de los componentes en un

modelo tricompartimental (masa grasa, masa magra, masa ósea) del cuerpo en su totalidad o de regiones específicas.

En nuestros estudios se ha realizado la densitometría ósea según el protocolo estándar de la composición corporal. Se han evaluado los cortes y las referencias según los modelos publicados por consenso, y de este modo, el sistema nos ha permitido cuantificar de forma segmentaria cabeza-cuello, tronco, brazos, piernas, área androide y ginoide, en deportistas como se establece en un modo estandarizado [136] y se aprecia en la **Figura 8**.

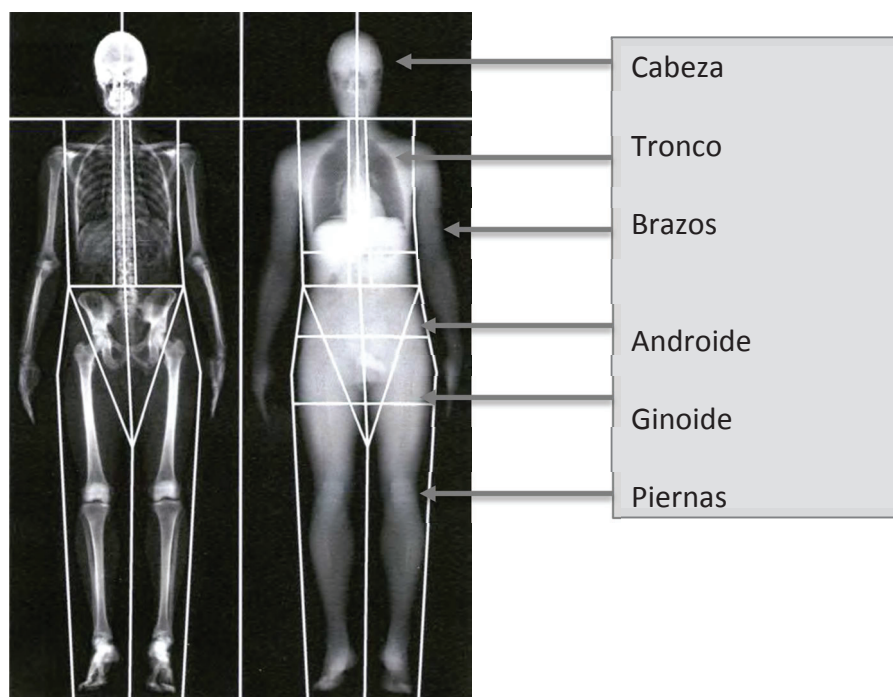


Figura 8. Imagen de DXA y de composición corporal. Cuantificación segmentaria.

4.7.2. 3D-DXA

La distribución espacial (3D) de la masa ósea cortical y trabecular es un componente crítico que determina la resistencia de un hueso a la fractura [137], que soporta cambios adaptativos al aumento de cargas y tensiones derivadas de la actividad mecánica del mismo.

La distribución en 3D del hueso cortical y trabecular es fundamental para poder determinar la resistencia del hueso a la fractura, información que es parcialmente aportada por la cuantificación de la DMO (DXA) mediante el T-score, u otros métodos que han sido utilizados para la estimación del riesgo de fractura (**Tabla 5**).

Categoría	Instrumento
Técnicas no invasivas (en su mayoría aplican tecnologías de imagen)	DXA
	QCT
	HR-pQCT
	QUS
Calculadoras de riesgo (mediante factores de riesgo clínico)	FRAX®
	QFracture®
	Garvan®
Exámenes laboratorio	Marcadores turnover
	Polimorfismos nucleótido único (SNPs)
	Micro ARN (miRNA)
Otras	Microindentación

Tabla 5. Métodos aplicados para la valoración del riesgo de fractura

La tomografía computarizada cuantitativa (QCT) y sus variantes de alta resolución son las técnicas radiológicas convencionales que permiten el análisis de hueso cortical y trabecular por separado y la reconstrucción volumétrica en modelos 3D. Sin embargo, la dosis de radiación recibida es significativamente mayor que la exposición recibida en una exploración DXA. Su uso de forma rutinaria para el diagnóstico de la osteoporosis es poco frecuente. Para obtener mediciones óseas en modelos 3D de huesos reconstruidos a partir de exploraciones DXA convencionales, se ha utilizado

recientemente una alternativa a la QCT, el Software 3D-Shaper (v2.4, Galgo Medical, Barcelona, España). Esta técnica reciente se ha utilizado en el presente trabajo. Este enfoque tecnológico registra un modelo estadístico 3D a partir de exploraciones DXA estándar y genera un modelo específico del fémur proximal, proporcionando mediciones volumétricas de hueso trabecular y cortical, por separado o integrado. La reconstrucción volumétrica también permite la medición de parámetros estructurales en 3D como la longitud del eje del cuello del fémur y la sección transversal (área de sección, momento de inercia, módulo de sección y relación de deformidad), el grosor de la cortical ósea y la densidad de la superficie cortical. El método se basa en un modelo estadístico de forma y densidad del fémur proximal construido a partir de una base de datos de imágenes de tomografía computerizada cuantitativa (QCT), que es una modalidad de técnica de imagen para analizar la cortical ósea en 3D [137]. Con el fin de maximizar la similitud entre la reconstrucción volumétrica en 3D y las imágenes 2D-DXA, se realiza una reconstrucción en un proceso de registro personalizado 3D-2D basado en intensidad. El modelo estadístico 3D se registra en la exploración DXA, para obtener un modelo 3D específico del paciente de la forma del fémur proximal y la distribución de la DMO. El grosor y la densidad cortical se calculan ajustando una función matemática al perfil de densidad calculado a lo largo del vector normal en cada nodo de la malla de la superficie proximal del fémur [138]. Las principales medidas de salida de 3D-SHAPER son la densidad superficial del hueso cortical (en mg/cm^2), la densidad mineral ósea volumétrica del hueso trabecular, cortical e integral (cortical+trabecular) (en mg/cm^3) y el grosor cortical medio. Todas las mediciones de 3D-DXA se realizan en el fémur. Se evaluaron los modelos y medidas proporcionados por el algoritmo del software “3D-DXA”, comparando los análisis 3D-DXA con las medidas realizadas por tomografía axial computerizada. Los coeficientes de correlación (R) entre las mediciones de 3D-DXA y QCT fueron 0,86, 0,93 y 0,95 para el vBMD en los compartimentos trabecular, cortical e integral, respectivamente, y 0,91 para el grosor cortical medio [137].

El método es totalmente automatizado, y el tiempo promedio de cálculo es de 1 min. 30 seg.

Este método emergente tiene varios aspectos atractivos para la evaluación de los cambios óseos relacionados con la actividad física, la influencia de patologías o incluso

como respuesta a tratamientos, puesto que realiza mediciones aisladas de hueso cortical y trabecular, manteniendo un error de precisión como DXA 2D [139]. El aspecto que puede ofrecer una mayor aplicabilidad clínica a la DXA en 3D es su capacidad para evaluar la fuerza ósea mediante la simulación virtual del comportamiento biomecánico de las regiones esqueléticas de interés [140]. Con esta capacidad, es posible conocer el umbral de fractura específico del sujeto para una estructura ósea determinada y mejorar la clasificación de los pacientes en función de su resistencia ósea.

El 3D-DXA podría ser considerado como una técnica para mejorar potencialmente el manejo de la osteoporosis, mientras se mantiene la DXA como modalidad de rutina estándar.

La **Figura 9** muestra una escala de colores en función de la distribución de las diferencias de DMO superficial de hueso cortical entre los diferentes grupos de deportes estudiados en esta tesis. Panel A, futbolistas vs nadadoras de natación artística; B, nadadoras de natación artística vs controles sedentarias; C, futbolistas vs controles sedentarias. El color verde y azul intenso expresan diferencias significativas en la sDMO del hueso cortical entre ambos grupos. Panel derecho: vista anterior (Panel A) y vista posterior (Panel B y C); Panel izquierdo: vista anterior (Panel B y C) y vista posterior (Panel A).

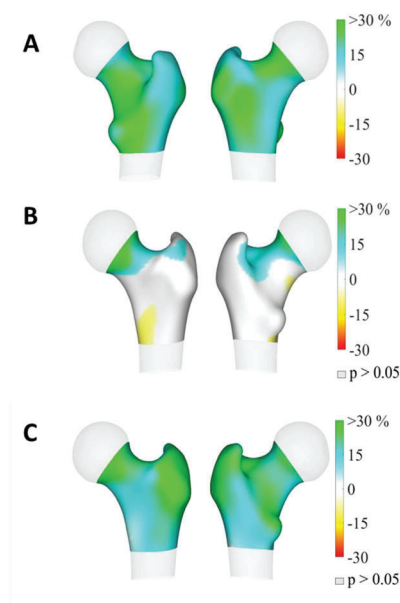


Figura 9. DMO superficial en los distintos deportistas

4.8. JUSTIFICACIÓN DE LOS ESTUDIOS

La literatura científica nos muestra de forma extensa los efectos beneficiosos de la actividad física y el ejercicio físico sobre el hueso [7]. La actividad física se reconoce como un factor protector de gran potencia para limitar la aparición de una osteopenia que finalice en un proceso de osteoporosis [6]. A pesar de que las fracturas osteoporóticas ocurren en edades seniles, la osteoporosis tiene un origen pediátrico [5,14] y su prevención en edades tempranas de la vida es un factor clave para reducir el riesgo de fractura en la vejez [43–45].

En la actualidad, las deportistas de élite practican deporte desde la infancia, con un objetivo personal primero de diversión, pero también de rendimiento a corto plazo, probablemente sin tener en cuenta las consecuencias del mismo sobre la salud ósea. Se conoce que el ejercicio físico es un factor de protección para la salud ósea y para la prevención de la osteoporosis, pero no todas las actividades deportivas tienen el mismo efecto sobre el hueso. Algunos deportes sin impacto, como la natación y la natación artística, pueden no ser tan positivas como se espera. Nos preocupa la salud ósea en un futuro de nuestras deportistas de alto nivel, principalmente aquellas que practicaron de deportes de agua.

En el primer estudio publicado y recogido en esta tesis doctoral se analizó el estado actual del hueso de nuestras deportistas de élite. Deportistas de élite de alto nivel de diferentes disciplinas olímpicas, selecciones nacionales, que entrenan de forma regular con una elevada intensidad, volumen y frecuencia de sesiones, y que compiten a nivel nacional e internacional. De acuerdo con los resultados de este primer estudio se consideró la necesidad de introducir un programa de salto y plataforma vibratoria para mejorar el estado óseo de nuestras deportistas de natación artística y valorar sus resultados en el hueso.

Posteriormente se analizó el estado óseo de las deportistas ex nadadoras de natación artística de élite, que habían practicado natación artística en su juventud, durante muchos años y se las comparó con población no deportista. Así mismo se les propuso iniciar un programa de impacto (salto) domiciliario, que coincidió con el estado de alarma durante la pandemia, con el fin de valorar el efecto del mismo en las variables óseas y de composición corporal.

Para finalizar esta tesis doctoral, nos pareció interesante realizar un estudio experimental utilizando una nueva técnica, 3D-DXA, para valorar la estructura ósea, a nivel trabecular y cortical, de deportistas de élite de distintas disciplinas deportivas con impacto (jugadoras de fútbol) y sin impacto (nadadoras de artística), así como controles no deportistas.

Esta tesis puede incentivar a los médicos del deporte/entrenadores de distintas disciplinas deportivas a identificar y promover deportes que favorezcan el efecto osteogénico y a establecer guías de ejercicios, entrenamientos complementarios que garanticen un deporte óseo saludable, como se puede apreciar en esta tesis; así como animar a mujeres durante la menopausia a practicar ejercicios osteogénicos que les permitan mantener o incluso retrasar la pérdida ósea. El 3D-DXA puede ser una nueva técnica complementaria para estudiar la estructura ósea, trabecular y cortical, y poder clasificar mejor a los deportistas según su riesgo de fractura, permitiéndonos desarrollar programas más eficaces en la prevención de la osteoporosis.

5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

5.1. HIPÓTESIS:

- **Hipótesis 1:**

Las deportistas de alto nivel de deportes acuáticos (natación artística y natación) presentan menores valores de DMO total que otras deportistas de alto nivel de deportes no acuáticos. Las nadadoras de natación artística presentan menores valores de DMO en extremidades inferiores que las deportistas no acuáticas.

- **Hipótesis 2:**

La práctica estructurada de un ejercicio de impacto suplementario durante un año fomenta un aumento de mineralización ósea en las nadadoras de natación artística de alto nivel.

- **Hipótesis 3:**

1. Las ex nadadoras de natación artística de alto nivel presentan valores similares de DMO que sus homólogas (edad, sexo) no deportistas.
2. La práctica estructurada de un ejercicio de impacto suplementario durante 8 meses fomenta un aumento de mineralización ósea en las ex -nadadoras de natación artística.

- **Hipótesis 4:**

Existen pruebas de última generación complementarias a la DXA para estudiar el hueso cortical y trabecular en deportistas.

5.2. OBJETIVOS

Objetivo 1:

Determinar el patrón de densidad mineral ósea (DMO) y contenido mineral óseo (CMO) y de los segmentos corporales en una población de deportistas de élite de diferentes disciplinas deportivas que iniciaron su práctica deportiva en edades tempranas. El objetivo principal es evaluar el efecto del deporte de alto nivel en deportistas de deportes acuáticos (natación artística, natación y waterpolo) en la DMO total, segmentos, columna lumbar y fémur comparado con las deportistas no acuáticas (fútbol, voleibol, hockey hierba), así como controles no deportistas.

Objetivo 2:

Evaluar el impacto de un programa de ejercicio físico incrementando la carga gravitatoria, controlando la suplementación y la dieta en el patrón de mineralización ósea en nadadoras de natación artística de alto nivel.

Objetivo 3:

Analizar la densidad mineral ósea (DMO) y contenido mineral óseo (CMO), en la edad adulta en ex nadadoras de natación artística, comparado con controles sedentarios. Evaluar el impacto de un programa de ejercicio físico incrementando la carga gravitatoria, controlando la suplementación y la dieta en el patrón de mineralización ósea en ex nadadoras de natación artística.

Objetivo 4:

Explorar la utilidad de una prueba de última generación por imagen en mineralización ósea “3D-DXA”, orientada al estudio de hueso trabecular y cortical, que en nuestro caso se evalúa en deportistas en referencia a sujetos no deportistas.

6. PARTICIPANTES, MÉTODOS Y RESULTADOS

6.1. Objetivo 1:

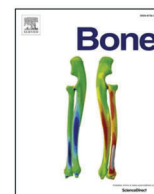
Determinar el patrón de densidad mineral ósea (DMO) y contenido mineral óseo (CMO) y de los segmentos corporales en una población de deportistas de élite de diferentes disciplinas deportivas que iniciaron su práctica deportiva en edades tempranas. El objetivo principal es evaluar el efecto del deporte de alto nivel en deportistas de deportes acuáticos (natación artística, natación y waterpolo) en la DMO total, segmentos, columna lumbar y fémur comparado con las deportistas no acuáticas (fútbol, voleibol, hockey hierba), así como controles no deportistas.

Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. *Bone*, 2019, 127, 393–400

<https://doi.org/10.1016/j.bone.2019.06.030>

Resumen

Introducción: El ejercicio es un factor protector para la aparición de osteoporosis, pero no todas las actividades físicas tienen el mismo efecto sobre el hueso. Los deportes de bajo impacto, como la natación, pueden tener un efecto negativo o nulo. *Objetivo:* Evaluar la densidad mineral ósea (DMO, g / cm²) y el contenido mineral óseo (CMO, kg) en las deportistas femeninas de alto rendimiento de deportes acuáticos y no acuáticos, y evaluar posibles diferencias con controles sedentarios. *Métodos:* Las participantes son deportistas de élite mayores de 18 años, de las selecciones olímpicas españolas, con al menos 12-15 h. de entrenamiento semanal en deportes acuáticos: natación (n=19), natación sincronizada (n=24) y waterpolo (n=14), y en deportes no acuáticos: futbolistas profesionales del 1er equipo del Futbol Club Barcelona (n=92), equipos nacionales de voleibol (n=26) y hockey hierba (n=29), así como controles sedentarios (n=126). Las variables óseas (DMO, CMO) y de composición corporal se midieron mediante densitometría ósea (DXA) para cuerpo total, segmentos corporales, fémur proximal y columna lumbar. *Resultados:* Las deportistas femeninas no acuáticas presentan valores de BMC y BMD de cuerpo total y por segmentos más elevados que los de las deportistas acuáticas, y éstas a su vez muestran valores de DMO similares a los controles. La DMO en columna lumbar y fémur proximal fue mayor en los deportes no acuáticos en comparación con los deportes acuáticos, y ambos fueron mayores que los controles. *Conclusión:* La DMO no se ve comprometida negativamente por la práctica de deportes acuáticos a un nivel altamente competitivo. Sin embargo, las atletas femeninas no acuáticas muestran una DMO más alta. La masa magra y el tipo de deporte explican los valores de DMO y de CMO en deportes acuáticos y no acuáticos. El tiempo de entrenamiento fuera del agua mejora la DMO. Nuestros hallazgos sugieren que la natación y la natación sincronizada deben combinarse con entrenamiento complementario de impacto o actividades de fuerza, ya que no parecen deportes, por sí mismos, osteogénicos.



Full Length Article

Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes

Montse Bellver^{a,b,*}, Luis Del Rio^c, Esther Jovell^b, Franchek Drobnic^{a,d}, Antoni Trilla^e^a Centro de Alto Rendimiento (CAR), Av. Alcalde Barnils s/n, 08173 Sant Cugat del Valles, Barcelona, Spain^b Consorcio Sanitario de Terrassa, Carretera de Torrebonica s/n, 08227 Terrassa, Spain^c CETIR Centre Medic, c/Londres, 6, 08029 Barcelona, Spain^d Futbol Club Barcelona (FCB), Av. Onze de Setembre, s/n, 08970 Sant Joan Despí, Barcelona, Spain^e Hospital Clínic, University of Barcelona, c/Villarroel 170, 08036 Barcelona, (Spain)

ARTICLE INFO

Keywords:

DEXA

Synchronized swimming

Aquatic sports

Female athletes

Bone mineral density

ABSTRACT

Introduction: Exercise is a protective factor for the appearance of osteoporosis, but not all physical activities have the same effect on bones. Low-impact sports, like swimming, may have a negative or no effect. The aim of the present study is to evaluate bone mineral density (BMD, g/cm²) and bone mineral content (BMC, kg) among female high performance athletes from aquatic and non-aquatic sports and to assess possible differences with sedentary controls.

Methods: Participants are elite female athletes over 18 years, from the Spanish Olympic teams, with at least 12–15 h of weekly training on aquatic sports: swimming (n = 19), synchronized swimming (n = 24) and water polo (n = 14), and elite female athletes from non-aquatic sports: professional football players of Futbol Club Barcelona team (n = 92), Spanish national volleyball (n = 26) and field hockey teams (n = 29) as well as sedentary controls (n = 126). Bone mineral density scans were performed using dual-energy X-ray absorptiometry for whole body, segmental analysis, proximal femur and lumbar spine.

Results: Non-aquatic female athletes have total and segments BMC and BMD values higher than those of aquatic athletes, that in turn show similar BMD values compared to controls. BMD in lumbar spine and proximal femur was higher in non-aquatic sports compared to aquatic sports athletes and both were higher than controls.

Conclusion: BMD is not negatively compromised by the practice of aquatic sports at a highly competitive level. However, non-aquatic female athletes show a higher BMD. Time training out of the water improves BMD. Our findings suggest that swimming and synchronized swimming should be combined with weight-bearing, impact or strength activities, as they do not seem to be osteogenic sports.

1. Introduction

Osteoporosis affects millions of people around the world, mainly menopausal women [1]. The disease is characterized by a deterioration of bone micro architecture, low bone mass and increased risk of fractures [2]. According to the diagnostic criteria established by the World Health Organization (WHO) (T-score ≤ −2.5 SD), the number of people with osteoporosis will increase from 27.5 million in 2010 to 33.9 million in 2025 (23% increase). The number of new cases of fractures in 2010 in the European Union was 3.5 million and two thirds of these fractures occurred in women [3]. Although osteoporotic fractures occur in older ages, senile osteoporosis is a disease with paediatric origins [4,5]. Prevention of osteoporosis at early ages of life is a key factor for reducing the risk of fracture in the elderly [6–8]. The most important factors related to bone mass acquisition are endocrine and mechanical

factors, such as maintaining an active life [9], a healthy diet (with high calcium intake), good vitamin D levels [10], as well as the genetic condition, ethnic [4] and gender of the individual. Physical exercise is highly beneficial to increase bone mineral density (BMD) and bone mineral content (BMC) as a powerful protective factor to limit the emergence of osteopaenia that ends in osteoporosis development [11]. However, there is not enough evidence regarding the exercise's intensity and length required for this osteogenic stimulation to occur [12–14]. The intensity of the stimulus seems more important than its length [15]. This is the main reason that explains why not all physical activities have the same effect on bone.

Several studies assessed the osteogenic effect of physical exercise. Adolescents engaged in sports for at least 3 days per week and > 60 min per day showed lower incidence of traumatic fractures [16]. The results emphasize that non-weight bearing activities, such as swimming,

* Corresponding author at: c/Estevé Pila 15-17, Sant Cugat del Valles, Barcelona, Spain.
E-mail address: mbellver@car.edu (M. Bellver).

<https://doi.org/10.1016/j.bone.2019.06.030>

Received 25 February 2019; Received in revised form 29 June 2019; Accepted 29 June 2019

Available online 01 July 2019

8756-3282/ © 2019 Elsevier Inc. All rights reserved.

cannot provide a positive effect on bones' health. The potential effect this may have on the future development of osteoporosis is not well defined [17–19]. Even adults engaged in non-professional sport in early life have higher BMD than their inactive peers, especially women [20]. Athletes train and exercise since their childhood, with their personal goals aimed at having fun and a good performance in the short term, probably without being aware of the investment that a well-practised sport means for their future health. The stimulus of exercise in the formation of bone and the absence of it in several non-impact sports may not be as positive as accepted. We conduct a cross-sectional study to describe and evaluate the state of bone mineralization of adult high performance female elite athletes from different sports and physical activities that started at an early age. Our main goal is to evaluate the effect of high performance swimming and synchronized swimming on BMD in the whole body, lumbar spine and femoral region among female Olympic athletes over 18 years of age, compared with athletes from non-aquatic sports as well as with sedentary controls.

2. Materials and methods

This is a cross-sectional observational study.

2.1. Subjects

Female high performance (“elite”) athletes practicing aquatic sports (A): Spanish Olympic swimming team ($n = 19$), Spanish Olympic synchronized swimming team ($n = 24$) and Spanish Olympic water polo team ($n = 14$); and non-aquatic sports (NA): first and second professional football teams of the Futbol Club Barcelona (FCB) ($n = 92$), Spanish volleyball team ($n = 26$) and Spanish field hockey team ($n = 29$) as well as sedentary controls (C) ($n = 126$). Aquatic sports are those played or practiced on or in water and non-aquatic sports are those practiced outside water.

National coaches among the best Spanish players, who compete at high-level national and international championships, selected the water polo, volleyball and field hockey players. Details of training frequency, volume, intensity and playing experience were obtained by means of a structured interview with coaches.

High competition sport means competing in World Championships (WC) and Olympic Games (OG). The Olympic swimmers were Olympic medallists (OG London 2012, OG Rio 2016) and world championship medallists (WC Barcelona 2013, WC Budapest 2017). The Spanish synchronized swimming team was silver medallist in OG London 2012 (duet free and team free routine). The Spanish water polo team won the silver medal in OG London 2012, the WC in Barcelona 2013 and grabs the 2nd place again in Budapest 2017. The Spanish volleyball team is ranks 33rd among European women's national teams. The Spanish field hockey team was 8th in the OG London 2012 and OG Rio 2016, and won the bronze medal in the 2018 WC in London. The football (soccer) players belong to the first and second Futbol Club Barcelona teams, play regularly in the Spanish Liga Iberdrola and the UEFA Champions League since 2014–15 and won the Spanish Copa de la Reina 2016 and again in 2017.

Inclusion criteria: Female athletes over 18 years of age, with > 8 years practice in their sport specialty, at least 3 years experience in high-level competition sport and at least 12–15 h of weekly training, competing at national or international championships and games. Written informed consent was obtained from all athletes prior to participation.

The sedentary controls had no formal training in any sport and did not reach the minimum physical activity recommended by WHO, i.e. they practice < 150 min/week of moderate physical activity or < 75 min/week of vigorous physical activity. They were recruited from the CETIR (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes) normality registers. An epidemiological questionnaire was carried out prior to densitometry for all young women without pathology and with

normal sedentary activity typical of non-energy work or sports activity for 1–2 h week. The questionnaire gathers information about sedentary lifestyle, regular walking, sports practice and intensity degree (0: occasional or 1 h/week, 1: < 5 h/week, 2: > 5 h/week). We add comments on physical activity during life. We select sedentary or activity 0–1 individuals and we exclude those that during their youth practiced competitive sport (holders of a practising license from the Spanish Federation).

Exclusion criteria: for both athletes and non-athletes, the exclusion criteria were: 1) the diagnosis of any medical condition, 2) the use of any medication known to affect bone metabolism (corticosteroids, oral contraceptives, supplementation or other drugs), 3) any contraindication for sports practice, 4) any type of menstrual dysfunction and/or 5) abnormal (non recommended) regular food intake.

All athletes underwent regular medical examinations. To control for possible confounding variables, we administered an ad-hoc questionnaire to collect data on their physical training and sports' history, clinical history, stress fractures history, gynaecological history (menstrual cycle), average calories and calcium intake, including a detailed 5-day nutritional intake records. The athletes are controlled by the nutrition department assuring a balanced diet and the intake of all basic nutrients during the training and competitions season and were evaluated monthly.

The athletes train at the High Performance Centre (CAR), Sant Cugat del Vallés, and at the Futbol Club Barcelona facilities (Sant Joan Despí). Medical check-ups were conducted at the CAR-CST medical department and bone densitometries were performed at the FCB Medical Unit.

The Ethics and Clinical Research Committee of the Consorci Sanitari de Terrassa (CST) approved the study protocol.

2.2. Measurement of Bone Mineral Density (BMD) and body composition

BMD (g/cm^2) and BMC (kg) were assessed using dual X-ray absorptiometry (Lunar iDXATM GE Medical Systems, version 12.30). Whole body, lumbar spine and proximal femur bone mineral density were measured according to standard operating procedures.

Specific age and sex reference tables were used to calculate BMD Z-scores. Assessment by dual X-ray absorptiometry (DXA) is the reference method for measuring total BMD and diagnosing osteopaenia according to the WHO classification, specifically assessing the most susceptible sites of osteoporotic fractures, such as the lumbar spine and the head of the femur.

We assess body composition in all participants using whole body DXA. Body composition variables selected for this study are total mass (TM), fat mass (FM), percentage of fat (% FM), fat-free mass (FFM) and appendicular mass (AM). The appendicular mass corresponds to the sum of the fat-free mass of the lower and upper extremities.

Participants were measured in light clothing, barefoot and without jewellery or metal buttons. All subjects went to the toilet before test. The same technician performed all measurements. Athletes were evaluated in supine position, with their feet in slight internal rotation to have good visibility of the femoral neck.

2.3. Statistical analysis

The descriptive factors are presented as absolute and relative frequencies for the qualitative and average variables and with their mean and standard deviation for the quantitative variables. Student t has been used to compare sports in two categories of the variable (aquatic and non-aquatic). In the comparison with all sports (swimming, synchronized, water polo, soccer, field hockey, volleyball) and sedentary controls the analysis of variance has been used. In both cases the homogeneity of variances has been proven with the Levene test. In the case of non-compliance with homogeneity, the Mann-Whitney U test (for aquatic and non-aquatic) and the Kruskal-Wallis test were carried

Table 1

Elite female athletes main descriptive data (mean $\pm$ SD) grouped by aquatic, non-aquatic sports as well as for the sedentary (control) group.

	Aquatic sports (n = 57)	Non-aquatic sports (n = 147)	Sedentary controls (n = 126)
Age (years)	20.7 $\pm$ 4.3	22.4 $\pm$ 4.8 ^a	21.5 $\pm$ 4.6
Height (cm)	171.6 $\pm$ 6.9 ^{b,c}	167.7 $\pm$ 7.9 ^c	163.1 $\pm$ 7.9
Weight (DEXA, kg)	61.3 $\pm$ 10.2	62.2 $\pm$ 8.5 ^c	58.5 $\pm$ 11.4
BMC (kg)	2.5 $\pm$ 0.4 ^c	2.7 $\pm$ 0.4 ^{a,c}	2.3 $\pm$ 0.4
Total BMD (g/cm ²)	1.109 $\pm$ 0.1 ^c	1.257 $\pm$ 0.10 ^{a,c}	0.943 $\pm$ 0.2
FM (kg)	15.0 $\pm$ 5.0	15.5 $\pm$ 5.1	19.5 $\pm$ 8.7 ^{a,b}
FFM (kg)	44.1 $\pm$ 5.9 ^c	44.0 $\pm$ 5.5 ^c	37.4 $\pm$ 4.2
AM (kg)	19.7 $\pm$ 3.3 ^c	21.2 $\pm$ 3.3 ^{a,c}	16.4 $\pm$ 1.5
% FM	24.0 $\pm$ 4.1	24.6 $\pm$ 5.6	32.3 $\pm$ 8.1 ^{a,b}

BMC: bone mineral content, BMD: bone mineral density, FM: fat mass, FFM: fat free mass, AM: appendicular mass.

^a Significantly greater than aquatic sports, $p < 0.05$.

^b Significantly greater than non aquatic sports, $p < 0.05$.

^c Significantly greater than control group, $p < 0.05$.

out to compare all sports. In the case of statistical significance in the ANOVA, Tukey test was performed to localize the difference for multiple comparisons. Bone density variables were further analysed using ANCOVA, with adjustments for FFM (lean mass), age and height and Bonferroni's test for multiple comparisons.

The level of statistical significance was set at 5%. The software program SPSS, version 24, was used for the statistical analysis.

3. Results

Group means for anthropometric and training data are summarised in [Tables 1 and 2](#). Non-aquatic athletes (NA) are older than aquatic ones (A). Water polo athletes are the oldest and swimmers the youngest, without statistically significant differences with respect to the control group (C). Height and weight are higher in the water polo and volleyball groups compared to other sports. Swimmers, and especially synchronized swimmers, show the lowest BMD values.

NA athletes have greater BMC and BMD than A athletes and both groups show higher values than C. FM, is lower in athletes (A and NA) with respect to controls. FFM and AM are higher in athletes than in controls. Synchronized swimmers underwent a greater amount of water training per week than did players in other aquatic sports.

Table 2

Elite female athletes main descriptive data (mean $\pm$ SD) grouped by sport and sedentary (control) group.

	Swimmers (n=19)	Synchronized (n=24)	Water polo (n=14)	Football (n=92)	Field Hockey (n=29)	Volleyball (n=26)	Controls (n=126)
Age (years)	18.4 $\pm$ 3.6	20.5 $\pm$ 3.9	24.0 $\pm$ 3.7 ^{a,e}	22.0 $\pm$ 5.2 ^a	23.8 $\pm$ 3.7 ^{a,e}	22.5 $\pm$ 4.5 ^a	21.5 $\pm$ 4.6
Height (cm)	169.4 $\pm$ 6.7 ^e	170.4 $\pm$ 6.4 ^{c,d,e}	176.5 $\pm$ 6.2 ^{a,c,d,e}	165.9 $\pm$ 6.3 ^e	164.1 $\pm$ 5.4	178.5 $\pm$ 7.2 ^{a,b,c,d,e}	163.1 $\pm$ 7.9
Weight(Kg)	59.1 $\pm$ 6.6	57.3 $\pm$ 6.0	71.2 $\pm$ 1.4 ^{a,b,c,d,e}	59.9 $\pm$ 6.4	61.1 $\pm$ 9.0	71.9 $\pm$ 7.8 ^{a,b,c,d,e}	58.5 $\pm$ 11.4
BMC (Kg)	2.4 $\pm$ 0.3	2.3 $\pm$ 0.3	2.9 $\pm$ 0.4 ^{a,b,c,d,e}	2.7 $\pm$ 0.3 ^{a,b,e}	2.6 $\pm$ 0.3 ^e	3.1 $\pm$ 0.5 ^{a,b,c,d,e}	2.3 $\pm$ 0.4
BMD (g/cm ²)	1.090 $\pm$ 0.1 ^e	1.068 $\pm$ 0.1 ^e	1.206 $\pm$ 0.1 ^{a,b,e}	1.262 $\pm$ 0.1 ^{a,b,e}	1.222 $\pm$ 0.1 ^{a,b,e}	1.279 $\pm$ 0.1 ^{a,b,e}	0.943 $\pm$ 0.2
FM (kg)	13.5 $\pm$ 2.9	13.8 $\pm$ 2.6	19.0 $\pm$ 7.9 ^{a,b,c,d}	14.6 $\pm$ 3.9	15.8 $\pm$ 7.5	18.2 $\pm$ 4.7 ^{a,b,c}	19.5 $\pm$ 8.7 ^{a,b,c}
FFM (kg)	44.3 $\pm$ 5.1 ^e	41.1 $\pm$ 4.3 ^e	49.1 $\pm$ 6.2 ^{a,b,c,d,e}	42.5 $\pm$ 4.5 ^e	42.7 $\pm$ 4.3 ^e	50.6 $\pm$ 5.2 ^{a,b,c,d,e}	37.4 $\pm$ 4.2
AM (kg)	19.8 $\pm$ 2.7 ^e	18.0 $\pm$ 2.1 ^e	22.5 $\pm$ 3.8 ^{a,b,c,d,e}	19.6 $\pm$ 2.1 ^{b,e}	19.8 $\pm$ 2.4 ^e	24.1 $\pm$ 3.1 ^{a,b,c,d,e}	16.4 $\pm$ 1.5
FFM arms (kg)	4.9 $\pm$ 0.7 ^{c,d}	4.5 $\pm$ 0.5	5.6 $\pm$ 1.1 ^{a,b,c,d}	4.2 $\pm$ 0.6	4.1 $\pm$ 0.5	5.1 $\pm$ 0.8 ^{b,c,d}	-
FFM legs (kg)	14.8 $\pm$ 2.1	13.5 $\pm$ 1.7	16.8 $\pm$ 2.7 ^{a,b}	15.5 $\pm$ 1.6 ^b	15.7 $\pm$ 1.9 ^b	19.0 $\pm$ 2.4 ^{a,b,c,d}	-
Water training (hours/week)	10	36	12-15	0	0	0	-
Non water training (hours/week)	8	3	10	10-12	8-10	25	-

BMC: Bone Mineral Content, BMD: Bone Mineral Density, FM: Fat Mass, FFM: Fat Free Mass, AM: Appendicular Mass.

^a Significantly greater than swimming, $p < 0.05$

^b Significantly greater than synchronized swimming, $p < 0.05$

^c Significantly greater than football, $p < 0.05$

^d Significantly greater than field hockey, $p < 0.05$

^e Significantly greater than control group, $p < 0.05$

BMC is higher in all high performance athletes compared to controls, except for swimmers and synchronized swimmers who show similar values to the control group. The same happens with BMD, but in this case swimmers and synchronized swimmers have higher BMD than controls.

FM percentage is higher in the control group than in all the athletes. FFM and AM are higher in the volleyball and water polo groups, and all of them are higher than those of the C group.

Bone mineral density results are shown in [Fig. 1](#). Whole BMD values follow a decreasing order for volleyball, football, field hockey, water polo, swimming, synchronized swimming and controls.

BMD results by segments for A and NA sports as well as for C group are shown in [Tables 3 and 4](#).

Legs, trunk, ribs, pelvis, total and Z score BMD is higher in NA than in A sports. Both groups show higher values than C group, except for legs, where A athletes and controls show similar values, mainly for swimmers and synchronized swimmers.

Water polo players show higher values than the rest of the athletes in the arms, trunk and ribs, followed by volleyball players, and have similar BMD values in legs to football players and volleyball players, while football players have higher pelvic BMD values when compared to other sports.

BMD results of the lumbar spine and proximal femur region are presented in [Tables 5 and 6](#). BMD in the lumbar spine is higher in NA sports with respect to A and both groups, as well as all types of sports, show higher values than those of C group.

Volleyball players show superior values to the rest of the athletes in the lumbar spine. Synchronized swimmers are the athletes with the lowest BMD values. Water polo players have the highest BMD in lumbar spine among A athletes and field hockey players have the lowest BMD among NA athletes.

NA sports have a higher BMD in femur in all segments compared to A sports, and both groups show higher values in all segments compared to C group for all types of sports.

Swimmers show a lower BMD value than the rest of the athletes. NA sports have higher BMD values in the proximal area of the femur, mainly in the trochanter and diaphysis; and among them, volleyball and football have higher BMD values in the femur than field hockey. Football players had a higher BMD in the diaphysis and volleyball players in the femoral neck and trochanter. There are no statistically significant differences among A sports.

After adjusting by FFM, age and height, the statistically significant

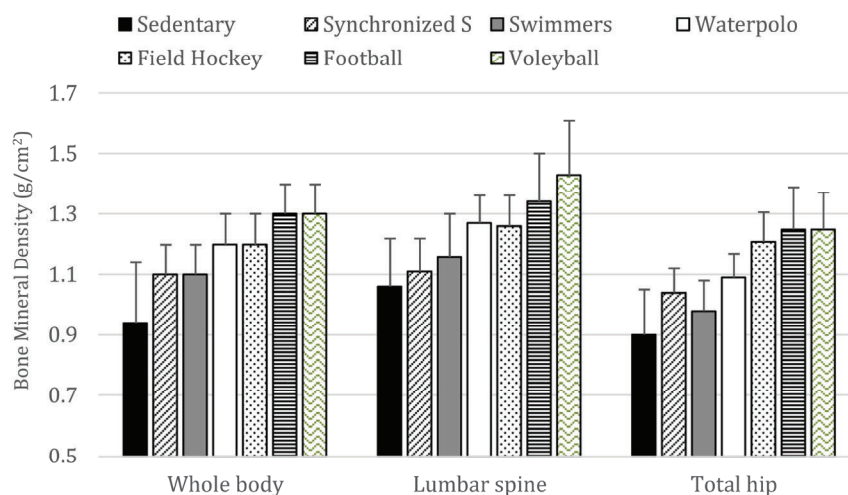


Fig. 1. Total body, spine and total-hip bone mineral density for elite female sports groups as well as for sedentary controls.

Table 3

Mean and SD BMD (g/cm²) values grouped by elite female athletes' aquatic and non-aquatic sports as well as for the sedentary controls.

g/cm ²	Aquatic sports (n = 57)	Non-aquatic sports (n = 147)	Sedentary controls (n = 38)
Arms	0.714 ± 0.07 ^b	0.705 ± 0.07 ^b	0.659 ± 0.07
Legs	1.113 ± 0.12	1.337 ± 0.11 ^{a,b}	1.108 ± 0.12
Trunk	0.957 ± 0.11 ^b	1.091 ± 0.10 ^{a,b}	0.891 ± 0.10
Ribs	0.867 ± 0.11 ^b	0.921 ± 0.09 ^{a,b}	0.784 ± 0.09
Pelvis	1.015 ± 0.11 ^b	1.219 ± 0.12 ^{a,b}	0.924 ± 0.10
Total	1.109 ± 0.10 ^b	1.257 ± 0.10 ^{a,b}	0.943 ± 0.16
Z-score	0.586 ± 0.63	2.120 ± 0.85 ^{a,b}	0.571 ± 0.2

^a Significantly greater than aquatic sports, $p < 0.05$

^b Significantly greater than control group, $p < 0.05$

differences remain for FFM and sport type. FFM explains 18.2% of the total BMD, and the type of sport explains 46.0% of the BMD ($R = 0.589$). FFM explains 24.5% of the total BMC and type of sport explains 33.8% ($R = 0.773$).

When the model is adjusted by FFM, age and height, football players show higher total BMD values than the rest of sports and sedentary controls. Statistically significant differences between swimmers, synchronized swimmers, water polo athletes and sedentary controls disappeared at total and segments BMD (Tables 7 and 8).

BMD values were still greater in the water polo group than in the rest of sports and C group at arms and ribs. However, significant differences disappeared. Football players BMD were significantly greater ($p < 0.05$) than BMD of swimmers, synchronized swimmers and

Table 5

Mean ± SD BMD (g/cm²) lumbar spine and proximal femur values for elite female aquatic and non-aquatic sports athletes as well as for sedentary controls. (*) $p < 0.05$.

g/cm ²	Aquatic sports (n = 54)	Non-aquatic sports (n = 79)	Sedentary controls (n = 126)
"L1-L4"	1.166 ± 0.13 ^b	1.364 ± 0.17 ^{a,b}	1.057 ± 0.16
Femoral neck	1.085 ± 0.12 ^b	1.243 ± 0.14 ^{a,b}	0.903 ± 0.14
Trochanter	0.854 ± 0.09 ^b	1.041 ± 0.12 ^{a,b}	0.677 ± 0.13
Diaphysis	1.178 ± 0.12 ^b	1.439 ± 0.16 ^{a,b}	1.082 ± 0.19
Total-hip	1.034 ± 0.09 ^b	1.246 ± 0.13 ^{a,b}	0.901 ± 0.15

^a Significantly greater than aquatic sports, $p < 0.05$

^b Significantly greater than control group, $p < 0.05$

controls at legs and pelvis. Legs' BMD were still higher in the volleyball group than in swimmers, synchronized swimmers and controls. However, significant differences disappeared but for synchronized swimmers (Table 7).

Lumbar spine and femur in all regions BMD did not differ according to adjusted means by age, height and FFM, however significant differences disappeared between swimmers and sedentary controls.

In the comparison between A and NA and once adjusted for the covariates training time in water and training time out of water, statistically significant differences were observed in relation to BMD by training time out of water ($p < 0.046$). If we separate A sports in two groups: 1) swimmers plus synchronized swimmers and 2) water polo players, and compare them with NA sports adjusting for the variables training time in water and training time out of water, no statistically

Table 4

Mean and SD BMD (g/cm²) values grouped by elite female athletes sport and sedentary (control) group.

g/cm ²	Swimmers (n = 19)	Synchronized Swimmers (n = 24)	Water polo (n = 14)	Football (n = 92)	Field Hockey (n = 29)	Volleyball (n = 26)	Controls (n = 38)
Arms	0.704 ± 0.05 ^c	0.697 ± 0.05 ^c	0.894 ± 0.13 ^c	0.697 ± 0.05 ^c	0.701 ± 0.04 ^c	0.743 ± 0.14 ^c	0.659 ± 0.07
Legs	1.109 ± 0.08	1.081 ± 0.10	1.346 ± 0.25 ^{b,c}	1.346 ± 0.10 ^{a,b,c}	1.230 ± 0.09 ^c	1.345 ± 0.14 ^{a,b,c}	1.108 ± 0.12
Trunk	0.961 ± 0.10 ^c	0.926 ± 0.09	1.132 ± 0.16 ^c	1.094 ± 0.10 ^{a,b,c}	1.067 ± 0.08 ^c	1.095 ± 0.12 ^{a,b,c}	0.891 ± 0.10
Ribs	0.875 ± 0.09 ^c	0.830 ± 0.08 ^c	1.052 ± 0.21 ^{b,c}	0.921 ± 0.09 ^{b,c}	0.893 ± 0.04 ^c	0.934 ± 0.12 ^c	0.784 ± 0.09
Pelvis	1.019 ± 0.11 ^c	0.991 ± 0.10 ^c	1.149 ± 0.06 ^c	1.231 ± 0.13 ^{a,b,c}	1.185 ± 0.16 ^c	1.184 ± 0.12 ^{a,b,c}	0.924 ± 0.10
Total	1.090 ± 0.09 ^c	1.068 ± 0.07 ^c	1.206 ± 0.08 ^{a,b,c}	1.262 ± 0.1 ^{a,b,c}	1.222 ± 0.08 ^{a,b,c}	1.279 ± 0.13 ^{a,b,c}	0.943 ± 0.16
Z-score	0.333 ± 0.52	0.455 ± 0.52	0.833 ± 0.72	2.408 ± 0.8 ^{a,b,d,e}	1.640 ± 0.70 ^{a,b,d}	2.000 ± 0.94 ^{a,b,d}	0.571 ± 0.2

^a Significantly greater than swimming, $p < 0.05$

^b Significantly greater than synchronized swimming, $p < 0.05$

^c Significantly greater than the control group, $p < 0.05$

^d Significantly greater than water polo, $p < 0.05$

^e Significantly greater than field hockey, $p < 0.05$

Table 6Mean $\pm$ SD BMD (g/cm²) lumbar spine and proximal femur values for elite female athletes grouped by sport.

	Swimmers (n=18)	Synchronized swimmers (n=22)	Water polo (n=14)	Football (n=46)	Field Hockey (n=7)	Volleyball (n=26)	Controls (n=126)
“L1-L4”	1.161 $\pm$ 0.14 ^c	1.107 $\pm$ 0.11	1.265 $\pm$ 0.09 ^{b,c}	1.341 $\pm$ 0.16 ^{a,b,c}	1.258 $\pm$ 0.10 ^c	1.431 $\pm$ 0.18 ^{a,b,c,d}	1.057 $\pm$ 0.16
Femoral neck	0.994 $\pm$ 0.10 ^c	1.103 $\pm$ 0.09 ^c	1.172 $\pm$ 0.12 ^{a,c}	1.240 $\pm$ 0.14 ^{a,b,c}	1.155 $\pm$ 0.11 ^{a,c}	1.272 $\pm$ 0.14 ^{a,b,c}	0.903 $\pm$ 0.14
Trochanter	0.811 $\pm$ 0.08 ^c	0.865 $\pm$ 0.11 ^c	0.889 $\pm$ 0.08 ^c	1.039 $\pm$ 0.14 ^{a,b,c,d}	1.030 $\pm$ 0.09 ^{a,b,c}	1.048 $\pm$ 0.11 ^{a,b,c,d}	0.677 $\pm$ 0.13
Diaphysis	1.125 $\pm$ 0.15 ^c	1.164 $\pm$ 0.10 ^c	1.269 $\pm$ 0.08 ^c	1.453 $\pm$ 0.18 ^{a,b,c,d}	1.397 $\pm$ 0.10 ^{a,b,c}	1.425 $\pm$ 0.15 ^{a,b,c,d}	1.082 $\pm$ 0.19
Total-hip	0.983 $\pm$ 0.10 ^c	1.036 $\pm$ 0.08 ^c	1.095 $\pm$ 0.08 ^c	1.251 $\pm$ 0.14 ^{a,b,c,d}	1.215 $\pm$ 0.095 ^{a,b,c}	1.247 $\pm$ 0.12 ^{a,b,c,d}	0.901 $\pm$ 0.15

^a Significantly greater than swimming. $p < 0.05$ ^b Significantly greater than synchronized swimming. $p < 0.05$ ^c Significantly greater than the control group. $p < 0.05$ ^d Significantly greater than water polo. $p < 0.05$

significant differences were recorded. In the multiple comparison analysis, statistically significant differences were found between NA sports with respect to swimmers plus synchronized swimmers ($p < 0.01$) and swimmers plus synchronized swimmers with respect to water polo players ($p < 0.005$). No statistically significant differences were found between NA and water polo players.

4. Discussion

Physical exercise improves BMD [6,7,9,12,15]. The present study indicates that participation in NA high-level sports (football, field hockey and volleyball) is associated with higher BMD measurements than in A sports and in sedentary controls. All aquatic Spanish Olympic teams (swimmers, synchronized swimmers, water polo players) presented similar values than those of sedentary controls at total BMD and segments measurements. All athletes had higher values than sedentary controls in lumbar spine and femur measurements, which are the two assessment measures according to the WHO classification for diagnosing osteopaenia and, specifically, the most susceptible sites for osteoporotic fracture. Water polo players had the highest BMD in lumbar spine and femur in all segments among A athletes. Field hockey has the lowest BMD in lumbar spine and femur in all segments among NA athletes. In the present study, high-level athletes practice sports from childhood.

The present study shows higher BMD values among high-level female athletes who practice NA and A sports, being these values higher than those of sedentary controls. However, when we adjust by FFM, age and height, swimmers and synchronized swimmers have lower BMD than other groups of impact sports, and also analogous than those of sedentary controls, in agreement with the literature [22]. Swimmers and synchronized swimmers present higher FFM values than sedentary controls. Several authors [18,21] and a systematic review [17] show a neutral or non-effect of swimming in BMD and BMC, similar to sedentary controls and lower than impact or antigravitational sports. Thus, swimming do not affect negatively bone mass, although it may not be one of the sports to practise in order to improve this parameter, due to the hydrostatic forces against gravity (false hypogravity) and lack of

impact characteristics of this sport.

The osteogenic effect of exercise is mainly due to the impact and the mechanical load applied to the bone: the so-called mechanostat effect. The process of bone formation and remodelling is adapted to the new demand and, consequently, BMC, BMD and the architectural framework are modified [23]. According to the mechanostat theory proposed by Frost [24], the skeleton adapts to these loads, increasing its quality and strength. Several studies report an association between BMC and FFM [25–27]. It is stated that FFM and AM greatly influence BMD and BMC in adolescent women. Muscle strength applied to bone could be an important predictor of BMD [21]. In the present study, FFM and type of sport explains BMD and BMC, in both A and NA sports athletes, in agreement with the literature [21,28].

Some studies show higher arm BMD values in swimmers assumed to the combination of propulsive strokes and resistance against water [17]. It seems that muscular activity in upper extremities when swimming helps to protect the bone structure in this segment [29] with a greater FFM in the arms due to the long training swimming routines. However, this higher FFM do not correspond to a higher BMD, as it does in the present study. Elite swimmers perform a total of 16,000 to 25,000 shoulder rotations in a 1-week routine, 80% in crawl style. Other authors [29] argue that training load affects BMD negatively mainly in lower limbs among swimmers, independently of the positive effects of muscle mass on it, in agreement with our study.

In the present study, the water polo and volleyball players present the highest FFM values in arms and legs compared to the rest of the athletes and controls and have the highest BMD in arms and legs. Total FFM and AM is superior in the volleyball and water polo group with respect to the rest of the sports and controls. The volleyball and water polo groups show the greater body size with genetically determined physical characteristics that contribute to an individual's predisposition to play a particular sport (height, body shape, body composition). When the BMD is adjusted by other variables (age, height and FFM), statistical differences between volleyball and water polo players in arms and legs compared to the rest of sports and sedentary controls disappeared. Water polo players had greater BMD values that benefits overall BMD in the aquatic group than would be explained by their FFM and time

Table 7Age, height, FFM adjusted mean $\pm$ SEM of total and segments BMD (g/cm²) for elite female sports groups as well as for sedentary controls.

g/cm ²	Swimmers (n=19)	Synchronized (n=24)	Water polo (n=14)	Football (n=92)	Field Hockey (n=29)	Volleyball (n=26)	Controls (n=38)
Total BMD	0.942 $\pm$ 0.04	1.089 $\pm$ 0.02	1.131 $\pm$ 0.03	1.274 $\pm$ 0.01 ^{a,b,c,d,e}	1.232 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c,d}	1.216 $\pm$ 0.03 ^{a,b,c}	1.090 $\pm$ 0.03
Arms	0.691 $\pm$ 0.03	0.677 $\pm$ 0.03	0.872 $\pm$ 0.08	0.702 $\pm$ 0.02	0.747 $\pm$ 0.05	0.689 $\pm$ 0.04	0.760 $\pm$ 0.03
Legs	1.095 $\pm$ 0.03	1.064 $\pm$ 0.03	1.257 $\pm$ 0.08	1.359 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c}	1.280 $\pm$ 0.05 ^b	1.236 $\pm$ 0.04 ^b	1.121 $\pm$ 0.03
Trunk	0.944 $\pm$ 0.03	0.909 $\pm$ 0.03	1.083 $\pm$ 0.08	1.098 $\pm$ 0.02 ^{a,b}	1.117 $\pm$ 0.05 ^b	1.017 $\pm$ 0.04	0.971 $\pm$ 0.03
Ribs	0.865 $\pm$ 0.03	0.826 $\pm$ 0.03	0.995 $\pm$ 0.07	0.921 $\pm$ 0.02 ^b	0.920 $\pm$ 0.05	0.869 $\pm$ 0.03	0.829 $\pm$ 0.03
Pelvis	1.000 $\pm$ 0.03	0.982 $\pm$ 0.03	1.065 $\pm$ 0.08	1.238 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c,e}	1.235 $\pm$ 0.06 ^{a,b,c}	1.081 $\pm$ 0.04	0.983 $\pm$ 0.04

^a Significantly greater than swimming, $p < 0.05$ ^b Significantly greater than synchronized swimming, $p < 0.05$ ^c Significantly greater than control group, $p < 0.05$ ^d Significantly greater than water polo, $p < 0.05$ ^e Significantly greater than volleyball, $p < 0.05$

Table 8Age, height, FFM adjusted mean $\pm$ SEM of lumbar spine and femur BMD (g/cm²) for elite female sports groups as well as for sedentary controls.

g/cm ²	Swimmers (n = 18)	Synchronized (n = 22)	Water polo (n = 14)	Football (n = 46)	Field Hockey (n = 7)	Volleyball (n = 26)	Controls (n = 126)
“L1–L4”	1.154 $\pm$ 0.04	1.083 $\pm$ 0.03	1.254 $\pm$ 0.4 ^c	1.365 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c}	1.287 $\pm$ 0.06 ^c	1.412 $\pm$ 0.04 ^{a,b,c,d}	1.068 $\pm$ 0.03
Femoral neck	0.997 $\pm$ 0.03	1.105 $\pm$ 0.03 ^c	1.161 $\pm$ 0.04 ^c	1.245 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c}	1.158 $\pm$ 0.05 ^c	1.260 $\pm$ 0.03 ^{a,b,c}	0.854 $\pm$ 0.04
Trochanter	0.808 $\pm$ 0.03 ^c	0.868 $\pm$ 0.03 ^c	0.873 $\pm$ 0.03 ^c	1.046 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c,d}	1.035 $\pm$ 0.05 ^{a,b,c}	1.026 $\pm$ 0.03 ^{a,b,c,d}	0.664 $\pm$ 0.03
Diaphysis	1.135 $\pm$ 0.04	1.160 $\pm$ 0.04	1.262 $\pm$ 0.05 ^c	1.458 $\pm$ 0.03 ^{a,b,c,d}	1.402 $\pm$ 0.06 ^{a,b,c}	1.420 $\pm$ 0.04 ^{a,b,c}	1.028 $\pm$ 0.05
Total-hip	0.985 $\pm$ 0.03	1.035 $\pm$ 0.03 ^c	1.086 $\pm$ 0.04 ^c	1.256 $\pm$ 0.02 ^{a,b,c,d}	1.219 $\pm$ 0.05 ^{a,b,c}	1.236 $\pm$ 0.03 ^{a,b,c}	0.867 $\pm$ 0.04

^a Significantly greater than swimming, $p < 0.05$ ^b Significantly greater than synchronized swimming, $p < 0.05$ ^c Significantly greater than control group, $p < 0.05$ ^d Significantly greater than water polo, $p < 0.05$

training out of water. FFM contains its skeletal muscle that generates force for the situations in the game where high impacts are transmitted and received. When we compare A and NA athletes and adjust for the covariates training time in water and training time out of water statistically significant differences were found between NA sports with respect to swimmers plus synchronized swimmers and those with respect to water polo players. No statistically significant differences were found between NA and water polo players. Thus, water polo players behave more like NA athletes with regard to her training and their BMD is higher than those of swimmers and synchronized swimmers.

BMD values in femur and lumbar spine are higher in NA sports. The intensity of impact (high impact loading) in sports such as volleyball and the distribution of the impact load in various directions in sports such as football (odd impact loading) increase BMD [15]. Volleyball and football players show the highest values in femur and volleyball has the highest values in lumbar spine. Football players show the highest values in legs, femur (diaphysis) and pelvis, as previously shown [30]. Football is a sport with special biomechanical characteristics: changes of direction, speed, jumps and kicks that offers additional mechanical stress in lower extremities due to the force of reaction against the ground during these actions [31] that facilitates mineral accretion, from the cortical to the trabeculae in its entire functional dimension, depending on length and intensity. Volleyball is a sport with long, fast short movements, both in defensive and offensive actions to adjust the position of the body to the position of the ball in a short period of time since the ball takes 1.2–1.4 s to go from one side of the court to the other [32], jumping, change of direction, speed and power work seems beneficial for the formation of an adequate bone from childhood and in adulthood, as happens with artistic gymnastics, volleyball or handball [33–35]. Some authors conclude that variable sports loads, like in basketball, are more effective to increasing BMD and BMC than other activities more stressful as parachuting with constant loads at specific sites [36]. Other authors [37] show that brief jumping and daily exercise increase BMD in the femoral neck, as occurs in the volleyball players included this study.

In a recent systematic review [17], children and adolescents swimmers (males and females) presented similar values of total BMD in the femur and lumbar spine than controls and lower values than other impact sports. In our study, lumbar spine and femur in all regions BMD between swimmers and controls did not differ according to adjusted means by age, height and FFM, however statistically significant differences disappeared respect to sedentary group. The authors [17] conclude that swimming practiced on a regular basis has a neutral effect on BMD in children and adolescents, and that these differences increase with age since impact sports athletes continue their practice, a situation which favours improvement in BMD. By contrast, water sports athletes continue training in a medium that does not have a positive mechanical effect on bone, and this difference is more apparent at the beginning of adulthood. The athletes included in the present study are adults training an average of 12–15 h/week at a high level of intensity and their biological age is not affected by hormonal or maturational factors, since they are adults without hormonal or menstrual disorders

(inclusion criteria).

A further study [38] carried out with university level athletes, an intermediate population between the present study and that conducted by Gomez Bruton [17], concludes that impact sports have higher BMD and BMC values than non-impact sports. Likewise, the authors observe that the only difference between controls and swimmers is that the latter present higher BMD in the arms but lower BMD values in the lumbar spine and total body than sedentary controls, unlike the findings of the present study.

Synchronized swimmers are the group that present the lowest total BMD by segments and lumbar spine, except in the femur at all sites that is slightly superior to swimmers. This discrepancy between speed swimmers and synchronized swimmers could be attributed to training differences related to the greater mechanical loading from repetitive pushing against the pool wall in speed swimming [22] and may be also the related to training work out of the water. Synchronized swimming training, which involves the execution of repeated exercises with a variety of movements of arms and legs to accelerate, decelerate, rotate, turn to pull the body out of the water and even jump, may have a positive bone effect on spine. Thus, synchronized swimmers should develop a large muscle mass in extremities that could increase bone mass, a situation that does not occur in our synchronized swimmers. Three hours per week of training out of the water seems enough for synchronized swimmers to maintain their BMD. WHO recommends at least 150 min of moderate to vigorous intensity physical activity per week to improve the health of the population. Like other studies [39], physical activity duration, frequency and load are associated with bone parameters, and length is the strongest predictor. Nevertheless, the total physical past year activity score which accounts for length, frequency and load appears to be a stronger predictor of bone parameters than any individual component of physical activity [39]. The WHO recommendations don't apply in those groups when bone health is the purpose.

The present study has several limitations. The first limitation is the relatively small sample size, determined by the small number of elite and Olympic athletes.

Secondly, the cross-sectional design of the study is a limitation because it only speculates and limits the possibility to prove causality, generating the need for follow-up measurements in the future. The design used is the main reason regarding the absence of information about time of the season training: training loads change according to the season timing and progress, and this might affect bone that is constantly adapting.

Finally, the athletes are controlled by the nutrition department in terms of their balanced diet and intake of all nutrients during the competitions and training season and monthly re-evaluated to ensure that the nutritional intake was correct. However, we do not perform statistical studies with nutritional and laboratory data variables.

The present study has also several strengths. The participants included are all high performance female athletes of different Olympic, national and international teams who train regularly at a high intensity, volume and frequency. Our participants include Olympic female

athletes from a broad sample of different sports disciplines not studied before in the literature. FFM is included in this study as it has a positive effect on bone, but few studies had presented FFM values before. The study subjects had years of practice and long weekly hours of training, emphasizing complementary training out of the water. Many swimmers, synchronized swimmers and water polo players perform complementary training out of the water in order to improve their performance, not reported in most of the studies.

5. Conclusion

In summary, mean BMD values were highest in NA athletes at all measured sites, regions and segments compared to A athletes. All sports participants, A and NA, had higher values than sedentary controls in lumbar spine and femur measures. Swimmers and synchronized swimmers had similar values to sedentary control in whole body BMD and segments. FFM and sport's type explains BMD and BMC values, in both A and NA athletes.

Time training out of the water improves BMD. Our findings suggest that swimming and synchronized swimming in female athletes should be combined with weight-bearing, impact or strength activities, as it do not seem to be osteogenic sports enough.

Acknowledgements

We thank all the elite female athletes who voluntarily accepted to be our study subjects, their trainers and coaches as well as all the technical and support staff of all athletes at the Centre d'Alt Rendiment. We also thank Futbol Club Barcelona, Consorci Sanitari de Terrassa and CETIR (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes) for their help and support.

We thank specially Jose Rios (PhD, MSc) for their help in the statistical analysis as well as the reviewers for their comments and suggestions.

Declaration of Competing Interest

None declared.

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial and/or not-for-profit sectors.

References

- J.E. Compston, S.E. Papapoulos, F. Blanchard, Report on osteoporosis in the European Community: current status and recommendations for the future. Working Party from European Union Member States, *Osteoporos Int* 8 (1998) 531–534.
- Office of the Surgeon General (US), Bone Health and Osteoporosis: A Report of the Surgeon General, Office of the Surgeon General (US), Rockville (MD), 2004 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK45513/>, Accessed date: 10 May 2019.
- E. Hernlund, A. Svedbom, M. Ivergård, J. Compston, C. Cooper, J. Stenmark, E.V. McCloskey, B. Jönsson, J.A. Kanis, Osteoporosis in the European Union: medical management, epidemiology and economic burden: a report prepared in collaboration with the International Osteoporosis Foundation (IOF) and the European Federation of Pharmaceutical Industry Associations (EFPIA), *Arch. Osteoporos.* 8 (2013), <https://doi.org/10.1007/s11657-013-0136-1>.
- E. Seeman, An exercise in geometry, *J. Bone Miner. Res.* 17 (2002) 373–380, <https://doi.org/10.1359/jbmr.2002.17.3.373>.
- R. Rizzoli, M.L. Bianchi, M. Garabédian, H.A. McKay, L.A. Moreno, Maximizing bone mineral mass gain during growth for the prevention of fractures in the adolescents and the elderly, *Bone* 46 (2010) 294–305, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2009.10.005>.
- M.K. Karlsson, A. Nordqvist, C. Karlsson, Physical activity increases bone mass during growth, *Food Nutr. Res.* 52 (2008) 1871, <https://doi.org/10.3402/fnr.v52i0.1871>.
- D. Vlachopoulos, E. Ubago-Guisado, A.R. Barker, B.S. Metcalf, I.G. Fatouros, A. Avloniti, K.M. Knapp, L.A. Moreno, C.A. Williams, L. Gracia-Marco, Determinants of bone outcomes in adolescent athletes at baseline: the PRO-BONE study, *Med. Sci. Sports Exerc.* 49 (2017) 1389–1396, <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001233>.
- D. Vlachopoulos, A.R. Barker, C.A. Williams, K.M. Knapp, B.S. Metcalf, L. Gracia-Marco, Effect of a program of short bouts of exercise on bone health in adolescents involved in different sports: the PRO-BONE study protocol, *BMC Public Health* 15 (2015) 361, <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1633-5>.
- L. Maïmoun, O. Coste, P. Philibert, K. Briot, T. Mura, F. Galtier, D. Mariano-Goulart, F. Paris, C. Sultan, Peripubertal female athletes in high-impact sports show improved bone mass acquisition and bone geometry, *Metabolism* 62 (2013) 1088–1098, <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2012.11.010>.
- R.M. Lewis, M. Redzic, D.T. Thomas, The effects of season-long vitamin D supplementation on collegiate swimmers and divers, *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 23 (2013) 431–440.
- L. Maïmoun, O. Coste, T. Mura, P. Philibert, F. Galtier, D. Mariano-Goulart, F. Paris, C. Sultan, Specific bone mass acquisition in elite female athletes, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 98 (2013) 2844–2853, <https://doi.org/10.1210/jc.2013-1070>.
- B. Ferry, E. Lespessailles, P. Rochcongar, M. Duclos, D. Courteix, Bone health during late adolescence: effects of an 8-month training program on bone geometry in female athletes, *Joint Bone Spine* 80 (2013) 57–63, <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2012.01.006>.
- K. Hind, L. Gannon, E. Whatley, C. Cooke, J. Truscott, Bone cross-sectional geometry in male runners, gymnasts, swimmers and non-athletic controls: a hip-structural analysis study, *Eur. J. Appl. Physiol.* 112 (2012) 535–541, <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2008-y>.
- K.L. Scofield, Bone Health in Endurance Athletes: Runners, Cyclists, and Swimmers, 11 (2012), p. 7.
- C.A. Bailey, K. Brooke-Wavell, Exercise for optimising peak bone mass in women, *Proc. Nutr. Soc.* 67 (2008) 9–18, <https://doi.org/10.1017/S0029665108005971>.
- K.R. Lynch, M. Fredericson, B. Turi-Lynch, R.R. Agostineti, I.H. Ito, R. Luiz-de-Marco, M.A. Rodrigues-Junior, R.A. Fernandes, Sports participation decreases the incidence of traumatic, nonsports-related fractures among adolescents, *Pediatr. Exerc. Sci.* 31 (2019) 47–51, <https://doi.org/10.1123/pes.2018-0053>.
- A. Gomez-Bruton, J. Montero-Marín, A. González-Agüero, J. García-Campayo, L.A. Moreno, J.A. Casajús, G. Vicente-Rodríguez, The effect of swimming during childhood and adolescence on bone mineral density: a systematic review and meta-analysis, *Sports Med.* 46 (2016) 365–379, <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0427-3>.
- A. Gómez-Bruton, A. González-Agüero, A. Gómez-Cabello, J.A. Casajús, G. Vicente-Rodríguez, Is bone tissue really affected by swimming? A systematic review, *PLoS One* 8 (2013) e70119, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070119>.
- A. Gómez-Bruton, A. González-Agüero, A. Gómez-Cabello, A. Matute-Llorente, J.A. Casajús, G. Vicente-Rodríguez, The effects of swimming training on bone tissue in adolescence: bone tissue in adolescent swimmers, *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25 (2015) e589–e602, <https://doi.org/10.1111/sms.12378>.
- A.M. Mantovani, M.C.S. de Lima, L.A. Gobbo, E.R.V. Ronque, M. Romanzini, B.C. Turi-Lynch, J.S. Codogno, R.A. Fernandes, Adults engaged in sports in early life have higher bone mass than their inactive peers, *J. Phys. Act. Health* 15 (2018) 516–522, <https://doi.org/10.1123/jpah.2017-0366>.
- Ş. Koşar, Associations of lean and fat mass measures with whole body bone mineral content and bone mineral density in female adolescent weightlifters and swimmers, *Turk. J. Pediatr.* 58 (2016) 79, <https://doi.org/10.24953/turkjped.2016.01.011>.
- I.A. Ludwa, B. Falk, M. Yao, L. Corbett, P. Klentrou, Bone speed of sound, bone turnover and IGF-I in adolescent synchronized swimmers, *Pediatr. Exerc. Sci.* 22 (2010) 421–430.
- P. Bergmann, J.J. Body, S. Boonen, Y. Boutsens, J.P. Devogelaer, S. Goemaere, J. Kaufman, J.Y. Reginster, S. Rozenberg, Loading and skeletal development and maintenance, *J. Osteoporos.* 2011 (2010) 786752, <https://doi.org/10.4061/2011/786752>.
- H.M. Frost, Bone “mass” and the “mechanostat”: a proposal, *Anat. Rec.* 219 (1987) 1–9, <https://doi.org/10.1002/ar.1092190104>.
- P. Manzoni, P. Brambilla, A. Pietrobello, L. Beccaria, A. Bianchessi, S. Mora, G. Chiumello, Influence of body composition on bone mineral content in children and adolescents, *Am. J. Clin. Nutr.* 64 (1996) 603–607, <https://doi.org/10.1093/ajcn/64.4.603>.
- J.L. Ferretti, R.F. Capozza, G.R. Cointy, S.L. García, H. Plotkin, M.L. Alvarez Filgueira, J.R. Zanchetta, Gender-related differences in the relationship between densitometric values of whole-body bone mineral content and lean body mass in humans between 2 and 87 years of age, *Bone* 22 (1998) 683–690.
- F. Rauch, D.A. Bailey, A. Baxter-Jones, R. Mirwald, R. Faulkner, The “muscle-bone unit” during the pubertal growth spurt, *Bone* 34 (2004) 771–775, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.01.022>.
- E. Egan, T. Reilly, M. Giacomoni, L. Redmond, C. Turner, Bone mineral density among female sports participants, *Bone* 38 (2006) 227–233, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.08.024>.
- R.R. Agostineti, S. Maillane-Vanegas, K.R. Lynch, B. Turi-Lynch, M.J. Coelho-e-Silva, E.Z. Campos, S.U. Cayres, R. Araújo Fernandes, The impact of training load on bone mineral density of adolescent swimmers: a structural equation modeling approach, *Pediatr. Exerc. Sci.* 29 (2017) 520–528, <https://doi.org/10.1123/pes.2017-0008>.
- M. Plaza-Carmona, G. Vicente-Rodríguez, A. Gómez-Cabello, M. Martín-García, J. Sánchez-Sánchez, L. Gallardo, I. Ara, Higher bone mass in prepubertal and peripubertal female footballers, *Eur. J. Sport Sci.* 16 (2016) 877–883, <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1144794>.
- J.A. Calbet, C. Dorado, P. Díaz-Herrera, L.P. Rodríguez-Rodríguez, High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players, *Med. Sci. Sports Exerc.* 33 (2001) 1682–1687.
- X. Borrás, X. Balus, F. Drobnic, P. Galilea, Vertical jump assessment on volleyball: a follow-up of three seasons of a high-level volleyball team, *J Strength Cond Res* 25 (2011) 1686–1694, <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181db9f2e>.
- E.J. Lee, K.A. Long, W.L. Risser, H.B. Poindexter, W.E. Gibbons, J. Goldzieher, Variations in bone status of contralateral and regional sites in young athletic women, *Med. Sci. Sports Exerc.* 27 (1995) 1354–1361.
- G. Vicente-Rodríguez, C. Dorado, I. Ara, J. Perez-Gomez, H. Olmedillas, S. Delgado-

- Guerra, J. Calbet, Artistic versus rhythmic gymnastics: effects on bone and muscle mass in young girls, *Int. J. Sports Med.* 28 (2007) 386–393, <https://doi.org/10.1055/s-2006-924397>.
- [35] G. Vicente-Rodriguez, C. Dorado, J. Perez-Gomez, J.J. Gonzalez-Henriquez, J. Calbet, Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players, *Bone* 35 (2004) 1208–1215, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.06.012>.
- [36] Y. Luo, C. Luo, Y. Cai, T. Jiang, T. Chen, W. Xiao, J. Guo, Y. Fan, Analysis of bone mineral density/content of paratroopers and hoopsters, *J. Healthc. Eng.* 2018 (2018) 1–8, <https://doi.org/10.1155/2018/6030624>.
- [37] C.A. Bailey, K. Brooke-Wavell, Optimum frequency of exercise for bone health: randomised controlled trial of a high-impact unilateral intervention, *Bone* 46 (2010) 1043–1049, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2009.12.001>.
- [38] D. Stanforth, T. Lu, M.A. Stults-Kolehmainen, B.N. Crim, P.R. Stanforth, Bone mineral content and density among female NCAA division I athletes across the competitive season and over a multi-year time frame, *Journal of Strength and Conditioning Research* 30 (2016) 2828–2838, <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000785>.
- [39] J.N. Farr, R.M. Blew, V.R. Lee, T.G. Lohman, S.B. Going, Associations of physical activity duration, frequency, and load with volumetric BMD, geometry, and bone strength in young girls, *Osteoporos. Int.* 22 (2011) 1419–1430, <https://doi.org/10.1007/s00198-010-1361-8>.

6.2. Objetivo 2:

Evaluar el impacto de un programa de ejercicio físico incrementando la carga gravitatoria, controlando la suplementación y la dieta en el patrón de mineralización ósea en nadadoras de natación artística de alto nivel.

Bellver M, Drobnic F, Jovell E, Ferrer-Roca V, Abalos X, Del Rio L, Trilla A. Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers. J Bone Miner Metab, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00774-021-01224-3>

Resumen

Introducción: La natación artística parece no beneficiar el desarrollo óseo como otras actividades físicas fuera del agua. Para aumentar la adquisición de masa ósea, la natación artística debe combinar el entrenamiento en el agua con actividades de fuerza o de impacto fuera del agua. Las nadadoras de artística en la élite son una población en riesgo de desarrollar osteopenia y osteoporosis en el futuro, debido a la gran cantidad de horas que entrenan en el agua. *Objetivo:* Evaluar los efectos de un programa de entrenamiento sobre la densidad mineral ósea (DMO), el contenido mineral óseo (CMO) y la composición corporal en un equipo olímpico de natación artística. *Métodos:* Dieciséis mujeres de 17 a 21 años, que entrenan 30 h. / semana, en el Centro de Alto Rendimiento de Sant Cugat (Barcelona, España), fueron estudiadas durante dos temporadas consecutivas. Durante la 1ª temporada se realizó el entrenamiento regular de natación artística sin entrenamiento específico para reducir el riesgo de osteopenia. El programa complementario de ejercicio, salto a la cuerda y plataforma vibratoria, se añadió en la 2ª temporada, y consistió en 20 minutos de entrenamiento 2 días a la semana, durante un período de 22 semanas. Las variables óseas y la composición corporal se midieron con densitometría ósea (DXA). Se evaluaron la dieta diaria, la historia clínica y los marcadores de recambio óseo. *Resultados:* El programa de intervención aumentó la DMO en columna lumbar (2.10%; $p=0.002$), cadera total (2.07%; $p=0.001$) y cuello femoral (2.39%; $p=0.02$). Disminuyó la masa grasa de las extremidades inferiores (10.17%; $p=0.038$). No se encontraron diferencias significativas para ninguna de las características antropométricas medidas entre inicio y final de la 1ª temporada. *Conclusión:* Se debe considerar la combinación del salto a la cuerda y la plataforma vibratoria para reducir el riesgo de daño óseo en las deportistas de natación artística.



Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers

Montse Bellver^{1,2,7} · Franciek Drobic^{1,3} · Esther Jovell² · Ventura Ferrer-Roca¹ · Xavier Abalos⁴ · Luis Del Rio⁵ · Antoni Trilla⁶

Received: 19 December 2020 / Accepted: 18 March 2021
© The Japanese Society Bone and Mineral Research 2021

Abstract

Introduction Artistic swimming seems not to benefit bone development like other out-of-water physical activities. To increase bone acquisition, artistic swimming should combine water training with weight-bearing impact or strength activities. Artistic swimmers can be a population at risk of developing osteopenia and osteoporosis in later life. The aim of the present study was to evaluate the effects of a training program on bone mineral density (BMD), bone mineral content (BMC) and body composition in an Olympic artistic swimming team.

Methods Sixteen women aged 17–21 years, who train 30 h/week, at the Olympic Training Centre (Barcelona, Spain), were followed up over two seasons. The 1st season involved regular artistic swimming training without specific training to reduce the risk of osteopenia. The exercise intervention, jumping rope and whole-body vibration, was added in the 2nd season. The protocol included 20 min of training 2 days per week, over a 22-week period. Dual energy x-ray absorptiometry measured the bone variables and body composition. The daily diet, medical history and bone turnover markers were evaluated.

Results The intervention program increased BMD on lumbar spine (2.10%, $p=0.002$), total hip (2.07%, $p=0.001$), and femoral neck (2.39%, $p=0.02$). Lower limb's fat mass decreased (10.17%, $p=0.038$). No significant differences were found for any of the measured anthropometric characteristics between both time points in the 1st season.

In conclusions, combined jump rope and vibration should be considered to reduce the risk of bone damage in artistic swimmers.

Keywords Osteoporosis · Aquatic female high-level athletes · Whole body vibration · Jump training

Introduction

Primary prevention of osteoporosis remains one of the most important public health interventions. The most important non-genetic factors related to bone mass acquisition are endocrine and mechanical factors, such as maintaining an active life [1] and a healthy diet. Vitamin D deficiency remains a worldwide epidemic affecting every demographic, including athletes [2], and is known to contribute to decreased BMD and increased fracture prevalence and adverse non-skeletal outcomes that include muscle weakness, decreased physical performance and increased incidence of injuries [3].

Physical exercise is highly beneficial to increase bone mineral density (BMD) and bone mineral content (BMC) [4], to reduce the risk of osteopenia that leads to osteoporosis and to reduce the burden of frailty fractures [5]. Sports involving high level impact from ground reaction forces are

✉ Montse Bellver
mbellver@car.edu

¹ Centro de Alto Rendimiento (CAR), Av. Alcalde Barnils s/n Sant Cugat del Valles, 08173 Barcelona, Spain

² Consorci Sanitari de Terrassa (CST), Carretera de Torrebónica s/n, 08227 Terrassa, Barcelona, Spain

³ Shenhua Greenland FC, Hunan Highway 2600, Shanghai, China

⁴ LCAFE School of Physical Education and Sports Sciences, Sc Wiesbaden 1911 e.v, Wiesbaden, Germany

⁵ CETIR Centre Medic, c/Londres, 6, 08029 Barcelona, Spain

⁶ Hospital Clinic, University of Barcelona, c/Villarroel, 170, 08036 Barcelona, Spain

⁷ c/Via Augusta 114, 7^a 08006 Barcelona, Spain

more osteogenic than non-weight bearing activities such as cycling and swimming [6–9].

Synchronized swimming [10], recently renamed as artistic swimming, is part of the Olympic Games program since 1984. At the elite competition level, a regular swimming training program may include a large number of pool sessions compared to few hours of training out of the water [11]. Few studies have assessed the effects of artistic swimming on bone, particularly in youth athletes [12, 13]. A recent study showed that swimmers and artistic swimmers had similar values to a sedentary population in whole BMD and segments [11]. This could lead to a risk of acute stress fracture and osteoporosis in adulthood. Further, as the practice of artistic swimming starts at a younger age and requires many hours of training in a weightless environment, at a time when attainment of peak bone mass is critical, studies probing the effectiveness of methods to prevent osteoporosis in this population of young women are of paramount importance. Not improving bone acquisition could be a negative condition associated to artistic swimming.

To improve bone mass acquisition, short interventions should be performed before or after artistic swimming training. Research related to different populations has tested the positive effect of a jump training program on bone [14–16]. Jumping rope (JR) is a form of plyometric exercise used in recreation, sports and physical education programs, which may be appropriate to improve the bone health and cardiovascular fitness of pubertal girls [17, 18] and children [19]. JR can enhance the precise coordination of multiple muscle groups, which is why it is used widely in athletic training programs and to evaluate motor coordination [20]. Although the physiological pathway of whole-body vibration (WBV) is still unclear, it is hypothesized to exert osteogenic effects as a result of direct bone stimulation, which may occur through the osteocytes or via indirect bone stimulation through skeletal muscle activation [21]. Like other weight-bearing physical activities, WBV requires muscles and bones to work against gravity and has been used to improve bone mass in both disabled [22] and healthy populations [23, 24]. Due to previous positive findings in other non-weight bearing sports [25] and the short time needed to complete a WBV training session, it could be a good type of training for Olympic artistic swimmers to improve their lean mass and bone variables. It could enhance athletic performance by increasing muscle strength and neuromuscular adaptations [24]. Although Olympic artistic swimmers may find these types of intervention boring, WBV platforms appear to be new devices that might appeal to athletes and thus improve adherence to the program. In combination, (JR and WBV) increase the working time, avoiding the adverse effects of each one separately [14, 26]. To our knowledge, the specific effect of JR with WBV in athletes has not been fully explored to date.

The hypothesis of the study is to assess whether a 22-week JR and WBV intervention program, in addition to training, would lead to an increase in BMD in a team of female Olympic AS compared to data from the same athletes without intervention.

Materials and methods

Study design, protocol and informed consent forms were reviewed and approved by the Institutional Review Board of the Sports Council of Catalonia and met the requirements of the Declaration of Helsinki for research on human beings.

This is a quasi-experimental repeated measures study that presents a longitudinal analysis of two artistic swimmer's seasons. The investigation period was the start of the training season (September/October) in two consecutive seasons 2013/2014 (first and second season) while the third evaluation was performed during the second season (2014), after 22 week's use of the specific training protocol (May/June), before the competition period (second season post-intervention). The examinations started at the same time for all subjects.

The timeline of the study can be seen in Fig. 1.

Subjects

Inclusion criteria: sample size is determined by the members of the Olympic artistic swimming female team ($n=16$) who train at the Olympic Training Centre Barcelona, Spain, aged above 19, with more than 5 years practice, a minimum of 3 year's experience in high level competition (at national or international level) and at least 30 h of weekly training. Details of training frequency, volume, intensity, and competition experience were obtained through a structured interview with their coaches that was individualized for every swimmer. The athletes were followed-up over two successive seasons (first and second season), without any dropouts during the study period.

The participants were an Olympic AS team who have trained regularly for more than 10 years at a high intensity, volume and frequency, generating a very stable and consolidated physical work routine. As this type of subject and condition makes it difficult to conduct a matched study with control subjects of the same characteristics, the first season values of the AS act as an internal control group without intervention, as they were all the same subjects in the second season.

Written informed consent was obtained from all athletes prior to their participation. High competition sport means competing in world championships (WC) and Olympic Games (OG). The artistic swimming team followed-up was silver medallist in OG London 2012 (duet-free and

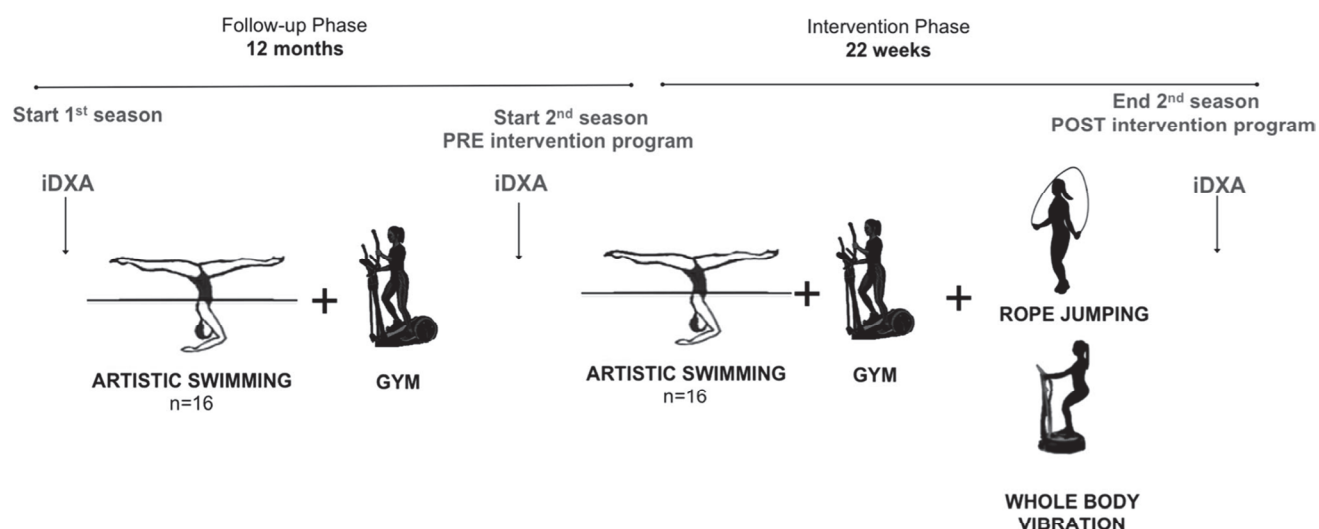


Fig. 1 Exercise intervention time. The 1st season consisted of regular training: artistic swimming training with supplemental physical exercises at the gymnasium. The exercise intervention, rope jumping and

WBV, was conducted during the 2nd season, in conjunction with the regular training. *DXA* dual energy X-Ray, *GYM* gymnasium

team-free routine) and medallist in WCs in Barcelona 2013, Kazan 2015 and Gwanju 2019.

Exclusion criteria: (1) diagnosis of any medical condition, (2) use of any medication known to influence bone metabolism (corticosteroids, oral contraceptives, supplementation or other drugs), (3) any contraindication for sports practice, (4) any type of menstrual dysfunction, (5) abnormal (non-recommended) regular food intake, (6) any condition precluding the use of WBV [27].

All athletes underwent a full medical examination to identify any contraindications for sports practice every year before the start of the sports season. To control for possible confounding variables, we administered an ad-hoc questionnaire to all participants to collect data on their clinical history, stress fractures and gynecological history (menstrual cycle).

Nutrition

All the athletes were controlled and evaluated monthly by the nutritionist of the Olympic training center, who determined a balanced diet and the intake of all basic nutrients during the training and competition seasons. The nutritionist evaluates the average energy output and calorie and calcium input, including a detailed 5-day nutritional intake record. None of the 16 participants needed nor received any dietary supplementation related to bone formation during the study period.

Measurement of bone mineral density (BMD), bone mineral content (BMC) and body composition

The BMD (g/cm^2) and BMC (g) were assessed using dual energy X-Ray absorptiometry (DXA) “Lunar DXA TM GE Medical Systems, version 12.30”. Whole body, lumbar spine (L1–L4) and proximal femur BMD were measured according to standard operating procedures, with a coefficient of variation of 0.91%, 0.608% and 0.87%, respectively.

Whole body DXA also assessed body composition and the variables selected are upper, lower and whole-body fat mass (FM) and upper, lower and whole-body fat-free mass (FFM).

Participants were measured using DXA on three occasions: start of first season (T0), start of second season (T1) and after 22 weeks use of the specific training protocol (T2). The measurements were taken in two consecutive seasons (first and second season). Participants were measured in light clothing, barefoot and without any jewellery or metal buttons. All subjects went to the toilet before the test. The same technician performs all measurements. Athletes were evaluated in supine position, with their feet in slight internal rotation to have good visibility of the femoral neck.

Biochemical markers and blood test analysis

We measured blood 25-hydroxyvitamin D₃, calcium, phosphorus and parathormone levels in the pre- and post-intervention group during the 2nd season. Blood samples were

collected by venepuncture at 08:00 am after a 12-hour fasting period.

Exercise intervention

The 1st season consisted of artistic swimming training with supplemental physical exercises outside the water at the gymnasium as a regular structured training season, without JR and WBV. The exercise intervention, JR and WBV (vibration platform VIBALANCE®), was conducted during the 2nd season, from November to April, for 22 weeks before the competition period, in conjunction with their usual training. The technical staff ensured that the swimmers understood and correctly executed the program, and a professional physical trainer controlled its execution throughout the training period. The program was always conducted during gym training before the water technical training.

Jumping rope (JR): previous to the training intervention, vertical ground reaction forces (GRF) were determined to provide a measure of the impact loading during exercise. GRF were collected using a “model 9281EA, Kistler Instruments Ltd., Winterthur, Swiss” force platform, sampling at 1500 Hz. Participants were instructed to “jump rope for 1 min at a freely chosen jump frequency”. GRF were scaled to units of body weight. The jump frequency was measured as number of jumps per second. The peak of the vertical reaction forces (PVRF) and the impact load rate (ILR) of every jump was calculated and presented as the mean $\pm$ SD of the group. ILR was considered as the slope of the vertical reaction force between the initial floor contact and the peak of the force. The intervention program included two jump sessions per week for 22 weeks (Table 1). To minimize risk of injury and maximize the efficacy of the intervention, the jump training progressively increased in intensity and increasing jumping time slowly increased the exercise

impact over the 22-week period. Work started with four short series of 30–45 s and breaks of 60–90 s during the first weeks until one series of 7 min with the minimum pauses possible was reached, as in the Arnett protocol [18] on post pubescent girls.

Whole-body vibration (WBV): mechanical vibrations produced in oscillating/vibratory mode can be transmitted to the body of the athlete carrying out WBV exercises. There is scientific evidence of its beneficial effects on bone [22–25]. The peak-to-peak vibration amplitude was 2 mm, at low amplitude, and 4 mm, at high amplitude with a frequency vibration between 35 and 40 Hz. The WBV protocol involved performing four sets $\times$ 45 s⁻¹ min with 1 min recovery between series, similar to Torvinen’s protocol [28], twice a week for 22 weeks, in young and healthy adults. Over the first 9 weeks, the duration was 4 min, and over the next 13 weeks the duration was extended to 6 min. Specific amplitudes and frequencies are detailed in Table 2. While standing on the platform, subjects performed a maximal voluntary isometric contraction of the knee extensors twice. The knee joint angle was 90°. The isometric contractions lasted 3 s. each. Some weeks later, the stability of the platform was reduced and an elastic band added to the knees to apply hip stabilizers. The purpose of the exercise program was to apply multidirectional vibration exposure to the body and to make standing on the platform less monotonous. During the vibration training sessions, the subjects wore similar gymnastic shoes to standardize the damping of the vibration caused by footwear.

Artistic swimming program: at the elite competition level, a regular swimming training program may include eight to ten pool sessions per week, with speed swimming, synchronized swimming-specific skills and fitness routines. Overall, it is a high-intensity training program that includes time devoted to choreography. Additional hours of water

Table 1 Jumping rope intervention loads applied to artistic swimmers during the 22 weeks intervention

Weeks	Session/week	Series	Duration	Pauses (seconds)	Jumping rope (min/session)	Training total time (min/week)
1–4	2	5	30–45 s	60–90	2.5–3.45	5–7.5
5–13	2	6	1 min	45	6	12
14–22	2	1	7 min	0	7	14

Table 2 Whole-body vibration protocol during the 22 weeks intervention

Weeks	Times/week	Series	Duration (seconds)	Pauses (seconds)	Frequency (Hz)	Peak-to-peak displacement (mm)	Vibration total time (min)	Training total time (min/week)
1–9	2	4	45–60	60–90	35–40	2	4	8
10–22	2	6	60	45	35–40	4	6	12

training may be required to reach perfect synchronization. Their water training was 36 h/week.

Gymnasium (Gym): the fitness routines included three sessions per week for 1 h 30 min. First they had a 30-min warm-up with core exercises and hip and shoulder prevention exercises. In the second part, they did a free-weight routine for 1 h: five lower body and five upper body exercises, four sets of ten repetitions at 75% of their 1-repetition maximum (1RM), which represents a regular training load, and four flexibility work sessions. The non-water training was about 4–5 h/week.

Statistical analysis

Statistical analyses were performed using SPSS ver25 (Armonk, NY: IBM Corp.).

Data were presented as mean and standard deviation distributed in three different moments: at the start of the 1st season (T0), the start of the 2nd season (T1) and the end of the 2nd season, after a 22-week intervention program (T2). The Shapiro–Wilk test was used to assess normality. The Shapiro–Wilk test showed that the sample was normally distributed. All the variables obtained p values > 0.05 . One-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to analyze the effect of the intervention program (JR and WBV) on BMD whole-body, femur and lumbar spine. Post-hoc pairwise comparisons were computed using Bonferroni correction. Effect sizes (ES) of the differences (Cohen's d) were also calculated. The magnitude of the differences was considered to be trivial ($ES < 0.2$), small ($0.2 \leq ES < 0.5$), moderate ($0.5 \leq ES < 0.8$), and large ($ES \geq 0.8$). Values of $p < 0.05$ were considered statistically significant. Bivariate Pearson correlation analysis was used to assess the relationship between pre–post-intervention changes in FFM, FM and blood tests.

Results

A total of 16 female Olympic artistic swimmers were eligible for the study. The mean age was 19 ± 3 (17–21), height (cm) 170.3 ± 6.1 (160–182), weight (kg) 56.3 ± 5.8 (45.9–64.4) and BMI (kg/cm^2) 19.4 ± 1.3 (17.2–21.9). The average JR + WBV training compliance was 100%. Of all the included participants followed the jumping rope and WBV protocol, one reported one episode of tibia periostitis due to self-limited WBV training and continued the study. No other adverse effects were reported.

During the jump rope assessment, participants of the present study obtained an average of peak vertical reaction forces of 3.97 body weight (BW) with an impact load rate of 41 BW/s and a frequency of 1.82 jumps/s.

Results from the ANOVA with repeated measures are presented in Table 3. Statistically significant differences between the three time points were found in whole-body BMD ($F = 4.37$, $p = 0.03$), lumbar Spine BMD ($F = 6.29$, $p = 0.001$), total hip BMD ($F = 12.76$, $p = 0.001$), femoral neck BMD ($F = 4.77$, $p = 0.03$), Z score lumbar spine ($F = 16.02$, $p = 0.001$), Z score femoral neck ($F = 4.56$, $p = 0.03$), lower limb's FM ($F = 4.55$, $p = 0.02$) and calcium ($F = 6.99$; $p = 0.025$). Bonferroni post-hoc pairwise comparisons demonstrated that the intervention program (start 2nd season Vs. end 2nd season, after intervention program) increased BMD on lumbar spine (2.10%, $ES = 1.046$, $p = 0.002$), total hip (2.07%, $ES = 1.18$, $p = 0.001$), and femoral neck (2.39%, $ES = 0.77$, $p = 0.02$), Z score lumbar spine (0.21, $ES = 0.29$, $p = 0.001$) and Z score Femoral Neck (0.21, $ES = 0.28$, $p = 0.02$). Furthermore, a certain trend toward significance was found in whole BMD (1.02%, $ES = 0.65$, $p = 0.08$) and vitamin D₃ (32.71%, $ES = 0.85$, $p = 0.084$). In addition, the lower limb's FM decreased from start 2nd season to the end of it (10.17%, $ES = 0.72$, $p = 0.038$). No significant differences were found for any of the measured anthropometric characteristics between both time points in the 1st season.

Changes in bone parameters are described in Fig. 2. Whole BMD, lumbar spine and femoral neck values follow an increasing order from start 2nd season vs. end 2nd season, after the intervention program.

The average detailed 5-day nutritional intake record was 2034 kcal/day and 943 mg/day of calcium. This intake was homogeneous throughout the season, for the 22 weeks.

Concerning the blood analysis, the values of calcium, phosphorus, PTH and vitamin D₃ were all within normal limits.

There is a moderate positive significant correlation between pre–post-intervention changes in whole BMD and vitamin D₃ ($r = 0.60$; $p = 0.049$). Furthermore, a moderate significant negative correlation was found between pre–post-intervention changes in whole BMD and FM ($r = -0.56$; $p = 0.038$). Finally, a low positive correlation without significant difference was found between whole BMD and calcium pre–post-intervention changes ($r = 0.40$; $p = 0.22$) and between whole BMD and FFM changes ($r = 0.26$; $p = 0.35$).

Discussion

The main finding of the present study was that after 22 weeks of a jumping rope and whole-body vibration program, artistic swimmers had significantly higher lumbar spine BMD and femoral neck BMD and decreases in lower limb's FM compared to the same group of athletes during the 1st season, without intervention program. Moreover, the lumbar spine BMD values found in the present study were

Table 3 BMD (g/cm²), BMC (g) and body composition of elite female artistic swimmers. Descriptive results

	Start 1st season (n = 16)	Start 2nd season (n = 16) Pre-intervention	End 2nd season (n = 16) Post-intervention
	T0	T1	T2
Weight (kg)	56.3 ± 5.8	56.8 ± 6.8	56.3 ± 5.8
BMI (kg/m ²)	19.4 ± 1.3	19.5 ± 1.3	19.4 ± 1.3
BMD (g/cm ²)			
Whole BMD	1.079 ± 0.068	1.064 ± 0.077	1.075 ± 0.069
BMD arms	0.727 ± 0.0588	0.676 ± 0.066	0.697 ± 0.059
BMD legs	1.145 ± 0.139	1.068 ± 0.128	1.102 ± 0.134
BMD trunk	1.008 ± 0.079	0.924 ± 0.114	0.944 ± 0.096
Z score	0.822 ± 0.819	0.485 ± 0.748	0.580 ± 0.662
Lumbar spine	1.087 ± 0.100	1.115 ± 0.112	1.138 ± 0.104 ^a
Z score	-0.219 ± 0.697	-0.094 ± 0.850	0.117 ± 0.864 ^a
Femoral neck	1.092 ± 0.101	1.088 ± 0.085	1.114 ± 0.085 ^a
Z score	1.105 ± 0.866	1.117 ± 0.864	1.287 ± 0.778 ^a
Total hip	1.048 ± 0.097	1.038 ± 0.091	1.058 ± 0.089 ^a
BMC (g)			
Total BMC	2354.3 ± 280.3	2347.5 ± 296.5	2357.4 ± 281.5
BMC arms	332.2 ± 53.3	305.5 ± 46.0	309.9 ± 41.5
BMC legs	862.1 ± 112.9	800.8 ± 145.8	805.8 ± 139.3
BMC trunk	736.7 ± 120.2	691.6 ± 135.8	706.5 ± 120.7
FM (g)			
Total FM	13,946.0 ± 2307.6	14,569.0 ± 2819.4	13,182.8 ± 1622.6
FM arms	1482.0 ± 379.5	1517.8 ± 314.7	1453.3 ± 215.2
FM legs	6010.9 ± 1110.2	6324.7 ± 1184.2	5681.7 ± 749.1 ^b
FFM (g)			
Total FFM	41,001.7 ± 5321.6	39,767.9 ± 5382.4	39,966.0 ± 4449.8
FFM arms	4369.4 ± 659.6	4229.3 ± 633.4	4289.8 ± 555.9
FFM legs	13,493.3 ± 2059.6	13,295.2 ± 2017.9	13,190.1 ± 1530.0
Calcium (mmol/l)	—	2.34 ± 0.06	2.27 ± 0.06 ^b
Phosphorus (mmol/l)	—	1.42 ± 0.11	1.33 ± 0.19
PTH (pmol/l)	—	3.74 ± 0.63	3.74 ± 0.63
Vitamin D ₃ (nmol/l)	—	100.45 ± 34.4	124.9 ± 36.7

Values are presented as mean ± SD. T0: baseline values 1st season, T1: baseline values 2nd season (only synchro swim), T2: 22 weeks values (synchro swim + intervention program). Significant difference between pre-intervention program and post-intervention, $p < 0.05$

BMD bone mineral density, BMC bone mineral content, FM fat mass, FFM fat-free mass

^aIncrease

^bDecrease

worryingly the lowest in relation to other sports (aquatic and non-aquatic), as in the general population [11]. These results are in line with a previous study performed on adolescent Japanese artistic swimmers where BMD values tended to be lower in athletes than in normal girls for lower limbs and lumbar vertebrae [29]. All these findings should be considered particularly significant because the lumbar spine and femur measurements are two assessment measures according to the WHO classification for diagnosing osteopenia and, specifically, the most susceptible sites for osteoporotic fracture [30]. The gain in the lumbar spine and femoral neck

BMD during 2nd season, after intervention program, could also come from normal growth and development since the bone mass peak is reached over 20 years. However, the fact that BMD did not increase during the first season, without weight-bearing impact training, leads us to consider the positive effect of the intervention program proposed on the lumbar spine and femoral neck BMD. The main factors that determine adult bone health are peak bone mass density at skeletal maturity and the rate of bone loss with advancing age; therefore, maximizing premenopausal BMD is a critical strategy for the prevention of osteoporosis [31]. In

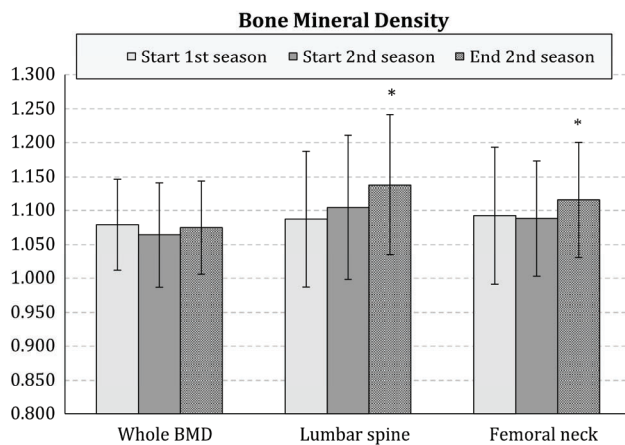


Fig. 2 Total body, lumbar spine and femoral neck BMD (g/cm^2) of elite female artistic swimmers. The first column corresponds to the values at the start of the 1st season, the second column to the start of the 2nd season. Finally, the third column reflects the final data from the 2nd season. Values are presented as mean $\pm$ SD. * $p < 0.05$ denotes a significant difference between pre-intervention (start 2nd season) and post-intervention program (end 2nd season)

swimmers, low BMD accrual and/or increased bone resorption can occur silently over time, leading to osteoporosis without developing a stress fracture during their competitive years [8]. Because 60% of osteoporosis risk is related to the amount of bone mass accrued by early adulthood, a high index of suspicion needs to be maintained in order to identify and screen athletes at risk for low BMD (artistic swimmers 1st season). The artistic swimmers in the present study not only did not lose bone but they gained 2% in BMD after a relatively short intervention program of 22 weeks. Our results were in line with a meta-analysis, based on yearly estimated changes in BMD in premenopausal women, which indicated that the overall positive impact exercise effect was found to be 1.5% at the spine and 0.9% at the femoral neck. The study showed that regular exercise can delay or halt bone loss in women [32]. According to a computer simulation, a 10% increase in peak bone mass in young adults could reduce the risk of fracture later in life by 50% and delay the onset of osteoporosis by 13 years [33]. This indicates that artistic swimmers should follow an impact training program similar to that carried out in this study throughout their sporting life to ensure sufficient BMD gain to delay the onset of osteoporosis.

During the first season, swimmers presented poor values of whole-body BMD and segments BMD without significant changes between both assessments. These results are probably because participants in the study were subjected to the usual elite training load in artistic swimming, including more than 30 h of water training/week, without weight-bearing impact activities. These findings are in accordance with previous studies where artistic swimmers had similar values

to sedentary controls in whole-body BMD and segments (lower and upper limbs) [11]. Artistic swimmers regularly practice in a hypo gravitational medium, such as astronauts, from an early age. Swimming reduces the gravitational forces on bone structure [34], which are considered essential for shaping bone density. Moreover, swimmers usually spend less time in weight-bearing daily activities [35]. At the elite level, artistic swimmers underwent a greater amount of water training hours per week for many years than players in other aquatic sports [11, 36], in line with the present study. The negative relationship between practice time and bone gains is a major concern because its effects could be harmful later in life [37].

The present study showed promising signs of improving bone status, despite the time-limited possibility of introducing new and long training programs in artistic swimmers' regular training routine. JR and WBV are timesaving interventions: only 20 min/day, twice per week, is required. Sometimes, less frequent weekly training programs produce the same benefits as more frequent weekly programs [38]. Previous studies suggested that high-impact activities in swimmers could help to increase their BMD and BMC values [39]. The present study quantifies the impact load of the jump rope in the context of osteogenic activities in women. Based on our results, we can consider jumping rope as a high impact and high-frequency activity that can be done without dedicating too much time every day and can be fitted into a swimmer's daily routine, in line with the literature [17, 18, 31].

We introduce the use of vibration stimulation for enhancing athletic performance and therapeutic use for increasing muscle strength and neuromuscular adaptations [24] to work with Olympic artistic swimmers. A similar study done in well-trained road cyclists showed that 10 weeks of WBV training increased hip and preserved spine BMD [25]. Conversely, WBV did not affect BMD, BMC and LM in swimmers [40–42]. The authors argue that the good physical condition of the young subjects, with a young musculoskeletal system, have no need to adapt to the protocols of the WBV [42]. Therefore, WBV protocols should be designed specifically for the subject population investigated. WBV training could be used as a safe, less fatiguing and less time-consuming type of exercise for patients instead of other more demanding interventions [43]. None of the above-mentioned studies combine JR with WBV and diverge from our study in time, weekly frequency, age and type of sport and sport level of the subjects. Most of the studies conducted in aquatic sports are performed in swimmers [40, 41]. The discrepancy between swimmers and artistic swimmers could be attributed to training differences related to the greater mechanical loading from repetitive pushing against the pool wall in speed swimming [12], propulsive strokes and resistance against water [44] and maybe also the

related to training exercises out of the water. Artistic swimming training involves the execution of repeated exercises with a variety of movements of arms and legs to accelerate, decelerate, rotate, turn to pull the body out of the water and even jump, without touching the pool floor. Touching the pool floor in a competition incurs a penalty for the artistic swimming team [10].

We cannot completely attribute bone gain to the exercise program, however, we can appreciate an improvement in bone variables after the intervention program. Thus, we would highlight that these findings are important in considering a complementary workout to improve BMD out of the water. This exercise program is short and enables the trainers to include it in their regular training sessions to protect bone health.

Lean and athletic appearance are very important in this sport [36]. The decrease in lower limb's fat mass is important, although no improvement in fat-free mass (FFM) was found during the intervention program, in agreement with other studies performed in highly trained swimmers [40] with WBV alone. In fact, high-vibration amplitudes (4 mm) seem to produce better adaptations for hypertrophy, improving FFM [45], unlike the findings of the present study. The osteogenic effect of exercise is mainly due to the impact and mechanical load applied to bone (mechanostat effect) [46]; however, it is stated that FFM greatly influences BMD and is a key predictor of bone change [7, 47, 48], in line with the low but positive correlation between total BMD and FFM in the present study. The additional isometric exercises performed while vibrating could have improved FFM significantly. On the other hand, some studies showed that even with significant improvements of FFM due to swimming training, swimmer's bone structure was not benefited, denoting that the osteogenic effect linked to muscle contraction seems more effective when performed in environments with normal gravity [49].

No differences in turnover markers calcium and vitamin D₃ or in phosphorus levels and PTH were observed after follow-up after 22 weeks; all were below the normal range values. Baseline vitamin D₃ was obtained during pre-season indoor training (September/October). The post-intervention vitamin D₃ measurement was done in May/June when outdoor training was more important. Athletes have a variable status of vitamin D₃ depending on the time spent training indoors/outdoors (during peak sunlight) [2]. Outdoor exposure time is not very different in both periods, although it is true that indirect exposure to the sun during swimming pool training may be the cause of increased plasma vitamin D₃ concentration. However, taking into account that the most advantageous serum concentrations of D₃ for bone mineralization [50] begin at 75 nmol/L (30 ng/mL), and the best are between 90 and 100 nmol/L (36–40 ng/mL), we can consider that both periods are in the range of optimal

functional values (change from 100 to 125 nmol/L) which does not explain the observed increase in BMD by itself. Blood parameters have a relationship with bone outcomes [3], in line with the present study, with a positive correlation between total BMD and vitamin D₃. The combination of DXA analysis and biochemical markers provides a more comprehensive insight into changes in bone outcomes [7].

The present study has several limitations. The first is the relatively small sample size, determined by the number of the Olympic female artistic swimmers team. Therefore, it is possible that we have not been able to show a clear effect of the intervention on bone structure. However, we had sufficient data to show an effect of the intervention on the BMD variable, which was the primary outcome. The second is the short duration of the specific training session (JR + WBV) included in the regular artistic swimming training session, together with the low intensity of the program, due to the technical needs of the sport. Both limitations should be taken into account considering the limited availability of time to introduce new training programs into the regular training routine of elite athletes. Finally, although there is not an external control group, the 1st season artistic swimmers, the same subjects as in the second season, acts as an internal control group without intervention. The participants were an Olympic artistic swimmers team who have trained regularly for more than 10 years at high intensity, volume and frequency, generating a very stable and consolidated physical work routine. This makes it difficult to conduct a matched study with control subjects of the same characteristics. It is impossible and ethically wrong to divide the Olympic team into two groups, one that completed the intervention program while the other group continued with their regular artistic swimming training alone, knowing that we are not avoiding bone loss in one group.

The strengths of the study are also interesting. It is distinctive in the way that it presents lifetime bone trait evaluation with the same Olympic artistic swimmers team over two consecutive seasons of training, the perfectly standardized follow-up of the participants, unthinkable in the general population where everyone has different dietary habits, exercise habits and lifestyles. The artistic swimmers present similar BMD values to the reference values for the general population. The artistic swimmer's group is a controlled sample with adherence to the requested physical work. Finally, to our knowledge, the specific effect of JR with WBV has not been explored thoroughly before.

Conclusions

Osteoporosis being considered almost endemic in many countries, with severe effects on people's health, our findings may encourage elite artistic swimmer's coaches to use new methods by adding JR and WBV sessions into their training

programs to improve athlete's BMD in key sites as a useful strategy for osteogenic stimulation.

Acknowledgements The authors acknowledge all the elite female athletes who voluntarily accepted to be our study subjects in the study: Esther Jaumà, a former coach, and Mayuko Fujiki, the current coach, for their support and comments, as well as all the technical staff of the Centre d'Alt Rendiment (CAR). The authors gratefully acknowledge the team physiotherapist, Cristina Martí, who participated in this study. We also thank to Dr. Ramon Canal, Medical Director of FC Barcelona Medical Services. We thank Manel Vela, head of the Sports Planification Department of the CAR, for his help in handling the study data. We particularly thank Jose Rios (PhD, MSc) for his help in the statistical analysis.

Author's contribution All authors contributed to the study conception and design. MB wrote the first draft of the manuscript and all authors commented on previous versions of the manuscript. MB carried out the bone densitometry studies, analyzed the results and drafted the manuscript; FD conceived and coordinated this study, participated in its design and reviewed the draft; VF and EJ helped in the analyses of the results and reviewed the draft; LD participated in the bone densitometry studies; XA supervised the technical execution of the exercise program; AT reviewed the document. All authors contributed to the editing and finalization of the manuscript. They have read and approved the final version of the manuscript, and agree with the order of presentation of the authors.

Funding This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial and/or not-for-profit sectors.

Declarations

Conflict of interest The authors certify that there is no conflict of interest with any financial organization regarding the material discussed in the manuscript.

References

- Maïmoun L, Coste O, Mura T, Philibert P, Galtier F, Mariano-Goulart D, Paris F, Sultan C (2013) Specific bone mass acquisition in elite female athletes. *J Clin Endocrinol Metab* 98:2844–2853. <https://doi.org/10.1210/jc.2013-1070>
- Valtueña J, Dominguez D, Til L, González-Gross M, Drobnic F (2014) High prevalence of vitamin D insufficiency among elite Spanish athletes: the importance of outdoor training adaptation. *Nutr Hosp* 30:124–131. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.1.7539>
- Larson-Meyer DE, Willis KS (2010) Vitamin D and athletes. *Curr Sports Med Rep* 9:220–226. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3181e7dd45>
- McWhannell N, Henaghan JL, Fowweather L, Doran DA, Batterham AM, Reilly T, Stratton G (2008) The effect of a 9-week physical activity programme on bone and body composition of children aged 10–11 years: an exploratory trial. *Int J Sports Med* 29:941–947. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1038601>
- Tveit M, Rosengren BE, Nilsson JÅ, Karlsson MK (2015) Exercise in youth: High bone mass, large bone size, and low fracture risk in old age: elite soccer, bone traits, and fractures. *Scand J Med Sci Sports* 25:453–461. <https://doi.org/10.1111/sms.12305>
- Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, García-Campayo J, Moreno LA, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2018) Swimming and peak bone mineral density: a systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci* 36:365–377. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1307440>
- Ubago-Guisado E, Vlachopoulos D, Fatouros IG, Deli CK, Leontsini D, Moreno LA, Courteix D, Gracia-Marco L (2018) Longitudinal determinants of 12-month changes on bone health in adolescent male athletes. *Arch Osteoporos* 13:106. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0519-4>
- Scofield KL, Hecht S (2012) Bone health in endurance athletes: runners, cyclists, and swimmers. *current sports medicine reports*. American College of Sports Medicine 11: 7
- Greene DA, Naughton GA, Bradshaw E, Moresi M, Ducher G (2012) Mechanical loading with or without weight-bearing activity: influence on bone strength index in elite female adolescent athletes engaged in water polo, gymnastics, and track-and-field. *J Bone Miner Metab* 30:580–587. <https://doi.org/10.1007/s00774-012-0360-6>
- FINA (2017) Artistic Swimming regulation. Budapest Congress. <https://www.fina.org>
- Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A (2019) Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. *Bone*. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2019.06.030>
- Ludwa IA, Falk B, Yao M, Corbett L, Klentrou P (2010) Bone speed of sound, bone turnover and IGF-I in adolescent synchronized swimmers. *Pediatr Exerc Sci* 22:421–430
- Lundy B (2011) Nutrition for synchronized swimming: a review. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 21:436–445
- Vlachopoulos D, Barker AR, Ubago-Guisado E, Williams CA, Gracia-Marco L (2018) The effect of a high-impact jumping intervention on bone mass, bone stiffness and fitness parameters in adolescent athletes. *Arch Osteoporos* 13:128. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0543-4>
- McKay HA, MacLean L, Petit M, MacKelvie-O'Brien K, Janssen P, Beck T, Khan KM (2005) "Bounce at the Bell": a novel program of short bouts of exercise improves proximal femur bone mass in early pubertal children. *Br J Sports Med* 39:521–526. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2004.014266>
- Kato T, Terashima T, Yamashita T, Hatanaka Y, Honda A, Umemura Y (2006) Effect of low-repetition jump training on bone mineral density in young women. *J Appl Physiol* 100:839–843. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00666.2005>
- Ha AS, Ng JYY (2017) Rope skipping increases bone mineral density at calcanei of pubertal girls in Hong Kong: a quasi-experimental investigation. *PLoS ONE* 12:e0189085. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189085>
- Arnett MG, Lutz B (2002) Effects of rope-jump training on the os calcis stiffness index of postpubescent girls. *Med Sci Sports Exerc* 34:1913–1919. <https://doi.org/10.1097/00005768-200212000-00009>
- Pittenger VM, McCaw ST, Thomas DQ (2002) Vertical ground reaction forces of children during one- and two-leg rope jumping. *Res Q Exerc Sport* 73:445–449. <https://doi.org/10.1080/02701367.2002.10609044>
- Chen Y-Y, Liaw L-J, Liang J-M, Hung W-T, Guo L-Y, Wu W-L (2013) Timing perception and motor coordination on rope jumping in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Phys Ther Sport* 14:105–109. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2012.03.012>
- Ozcivici E, Luu YK, Adler B, Qin Y-X, Rubin J, Judex S, Rubin CT (2010) Mechanical signals as anabolic agents in bone. *Nat Rev Rheumatol* 6:50–59. <https://doi.org/10.1038/nrrheum.2009.239>
- Matute-Llorente A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Olmedillas H, Vicente-Rodríguez G, Casajús JA (2015) Effect of whole body vibration training on bone mineral density and bone quality in adolescents with down syndrome: a randomized

- controlled trial. *Osteoporos Int* 26:2449–2459. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3159-1>
23. Slatkowska L, Alibhai SMH, Beyene J, Cheung AM (2010) Effect of whole-body vibration on BMD: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int* 21:1969–1980. <https://doi.org/10.1007/s00198-010-1228-z>
 24. Verschueren SM, Roelants M, Delecluse C, Swinnen S, Vanderschueren D, Boonen S (2003) Effect of 6-month whole body vibration training on hip density, muscle strength, and postural control in postmenopausal women: a randomized controlled pilot study. *J Bone Miner Res* 19:352–359. <https://doi.org/10.1359/JBMR.0301245>
 25. Pioreschi A, Oosthuyse T, Avidon I, McVeigh J (2012) Whole body vibration increases hip bone mineral density in road cyclists. *Int J Sports Med* 33:593–599. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1301886>
 26. Cardinale M, Pope MH (2003) The effects of whole body vibration on humans: dangerous or advantageous? *Acta Physiol Hung* 90:195–206. <https://doi.org/10.1556/APhysiol.90.2003.3.2>
 27. Totony de Zepetnek JO, Giangregorio LM, Craven BC (2009) Whole-body vibration as potential intervention for people with low bone mineral density and osteoporosis: a review. *J Rehabil Res Dev* 46:529–542. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2008.09.0136>
 28. Torvinen S, Kannus P, Sievänen H, Järvinen TAH, Pasanen M, Kontulainen S, Nenonen A, Järvinen TLN, Paakkala T, Järvinen M, Vuori I (2003) Effect of 8-month vertical whole body vibration on bone, muscle performance, and body balance: a randomized controlled study. *J Bone Miner Res* 18:876–884. <https://doi.org/10.1359/jbmr.2003.18.5.876>
 29. Tanaka C, Iida T, Tawara Y, Murata M, Takamatsu J, Homma M, Kawahara T (2006) Characteristics of bone density in adolescent synchronized swimmers. *Jpn J Phys Fitness Sports Med* 55:165–174. <https://doi.org/10.7600/jspfs.55.165>
 30. WHO study group on assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis (1994) Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. World Health Organization, Geneva
 31. Bailey CA, Brooke-Wavell K (2008) Exercise for optimising peak bone mass in women. *Proc Nutr Soc* 67:9–18. <https://doi.org/10.1017/S0029665108005971>
 32. Wallace BA, Cumming RG (2000) Systematic review of randomized trials of the effect of exercise on bone mass in pre- and postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 67:10–18. <https://doi.org/10.1007/s00223001089>
 33. Hernandez CJ, Beaupr GS, Carter DR (2003) A theoretical analysis of the relative influences of peak BMD, age-related bone loss and menopause on the development of osteoporosis. *Osteoporos Int* 14:843–847. <https://doi.org/10.1007/s00198-003-1454-8>
 34. Bellew JW, Gehrig L (2006) A comparison of bone mineral density in adolescent female swimmers, soccer players, and weight lifters. *Pediatr Phys Ther* 18:19–22. <https://doi.org/10.1097/01.ppt.0000200952.63544.16>
 35. Gómez-Bruton A, G n lez-Agüero A, Gómez-Cabello A, Matute-Llorente A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2016) Swimming and bone: is low bone mass due to hypogravity alone or does other physical activity influence it? *Osteoporos Int* 27:1785–1793. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3448-8>
 36. Robertson S, Mountjoy M (2018) A Review of prevention, diagnosis, and treatment of relative energy deficiency in sport in artistic (synchronized) swimming. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 28:375–384. <https://doi.org/10.1123/ijnsnem.2017-0329>
 37. Andreoli A, Celi M, Volpe SL, Sorge R, Tarantino U (2012) Long-term effect of exercise on bone mineral density and body composition in post-menopausal ex-elite athletes: a retrospective study. *Eur J Clin Nutr* 66:69–74. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2011.104>
 38. Bianchi M, Coratella G, Beato M (2018) Comparative effects of single vs double weekly plyometric training sessions on jump sprint and change of directions abilities of elite youth football players. *J Sports Med Phys Fitness*. 59:910–915. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08804-7>
 39. Gómez-Bruton A, G n lez-Agüero A, Gómez-Cabello A, Matute-Llorente A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2015) The effects of swimming training on bone tissue in adolescence: bone tissue in adolescent swimmers. *Scand J Med Sci Sports* 25:e589–e602. <https://doi.org/10.1111/sms.12378>
 40. Gómez-Bruton A, G n lez-Agüero A, Matute-Llorente A, Julián C, Lozano-Berges G, Gómez-Cabello A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2017) Do 6 months of whole-body vibration training improve lean mass and bone mass acquisition of adolescent swimmers? *Arch Osteoporos*. <https://doi.org/10.1007/s11657-017-0362-z>
 41. Marin-Puyalto J, Gomez-Cabello A, Gonzalez-Aguero A, Matute-Llorente A, Gomez-Bruton A, J rim e J, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2020) Effects of whole-body vibration training on bone density and turnover markers in adolescent swimmers. *J Pediatr Endocrinol Metab* 33:623–630. <https://doi.org/10.1515/jpem-2019-0400>
 42. Gómez-Bruton A, G n lez-Agüero A, Matute-Llorente A, Julián C, Lozano-Berges G, Gómez-Cabello A, Garatachea N, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2018) Effects of whole body vibration on tibia strength and structure of competitive adolescent swimmers: a randomized controlled trial. *PM R* 10:889–897. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.03.015>
 43. Chanou K, Gerodimos V, Karatrantou K, Jamurtas A (2012) Whole-body vibration and rehabilitation of chronic diseases: a review of the literature. *J Sports Sci Med* 11:187–200
 44. Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, G n lez-Agüero A, García-Campayo J, Moreno LA, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G (2016) The effect of swimming during childhood and adolescence on bone mineral density: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 46:365–379. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0427-3>
 45. Martínez-Pardo E, Romero-Arenas S, Alcaraz PE (2013) Effects of different amplitudes (high vs. low) of whole-body vibration training in active adults. *J Strength Cond Res* 27:1798–1806. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318276b9a4>
 46. Frost HM (1987) Bone “mass” and the “mechanostat”: a proposal. *Anat Rec* 219:1–9. <https://doi.org/10.1002/ar.1092190104>
 47. Ko ar  N (2016) Associations of lean and fat mass measures with whole body bone mineral content and bone mineral density in female adolescent weightlifters and swimmers. *Turk J Pediatr*. <https://doi.org/10.24953/turkjped.2016.01.011>
 48. Egan E, Reilly T, Giacomoni M, Redmond L, Turner C (2006) Bone mineral density among female sports participants. *Bone* 38:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.08.024>
 49. Ribeiro-dos-Santos MR, Lynch KR, Agostinete RR, Maillane-Vanegas S, Turi-Lynch B, Ito IH, Luiz-de-Marco R, Rodrigues-Junior MA, Fernandes RA (2016) Prolonged practice of swimming is negatively related to bone mineral density gains in adolescents. *J Bone Metab*. <https://doi.org/10.11005/jbm.2016.23.3.149>
 50. Bischoff-Ferrari HA, Giovannucci E, Willett WC, Dietrich T, Dawson-Hughes B (2006) Estimation of optimal serum concentrations of 25-hydroxyvitamin D for multiple health outcomes. *Am J Clin Nutr* 84:18–28. <https://doi.org/10.1093/ajcn/84.1.18>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

6.3. Objetivo 3:

Analizar la densidad mineral ósea (DMO) y contenido mineral óseo (CMO), en la edad adulta en ex nadadoras de natación artística, comparado con controles sedentarios.

Evaluar el efecto de un programa de salto durante el confinamiento por COVID-19 en ex nadadoras de natación artística de alto nivel.

Montse Bellver, Ventura Ferrer-Roca, Luis Del Rio, Esther Jovell, Lucas Gomez-Chereguini, Franchek Drobic, Antoni Trilla.

Bone variables and body composition in former artistic swimmers teams: jump program effects during Covid-19 confinement. Original research

Apunts Sports Medicine.

Resumen

Introducción: La natación artística parece no beneficiar el desarrollo óseo como otras actividades físicas fuera del agua. *Objetivos:* (I) Determinar el efecto a largo plazo de un deporte acuático como la natación artística sobre las variables óseas; (II) evaluar el efecto de un programa de salto en el mismo grupo durante el confinamiento de COVID-19. *Métodos:* 25 ex nadadoras de artística, de 36 a 52 años, y 50 controles sedentarios fueron evaluados por densitometría ósea (DXA) para medir las variables óseas y la composición corporal. Los sujetos fueron asignados aleatoriamente a un grupo: grupo de salto y grupo de no intervención. *Resultados:* (I) La Z-score y T-score de la DMO total ($ES=0.932$; $p=0.001$ y $ES=0.626$; $p=0.016$, respectivamente), Z-score de la DMO de cuello femoral ($ES=0.352$; $p=0.046$) y la DMO de columna lumbar ($ES=0.594$; $p=0.017$) fueron significativamente mayores en nadadoras de artística en comparación con los controles sedentarios. (II) Se apreció una disminución significativa en la DMO de fémur en el grupo de no intervención ($ES=0.288$; $p=0.019$) y un aumento significativo en la Z-score de la DMO de columna lumbar en el grupo de salto ($ES=0.422$; $p=0.003$). *Conclusiones:* La actividad física durante la juventud parece tener un efecto beneficioso sobre el hueso en la madurez, incluso en los deportes acuáticos. Se deben considerar sesiones cortas, domiciliarias, de ejercicio de impacto para reducir el riesgo de pérdida ósea en deportistas acuáticas retiradas.



apunts

SPORTS MEDICINE

www.apunts.org



ORIGINAL ARTICLE

Bone variables and body composition in former artistic swimmers teams. Jump program effects during Covid-19 confinement: A randomized controlled study

Montse Bellver^{a,b,*}, Ventura Ferrer-Roca^a, Luis Del Rio^c, Esther Jovell^b, Lucas Gomez-Chereguini^d, Franchek Drobnic^e, Antoni Trilla^f

^a Centro de Alto Rendimiento (CAR), Av. Alcalde Barnils s/n; 08173 Sant Cugat del Valles – Barcelona Spain

^b Consorci Sanitari de Terrassa (CST). Carretera de Torrebonica s/n; 08227 Terrassa, Barcelona Spain

^c CETIR Centre Medic, c/Londres, 6; 08029 Barcelona Spain

^d CAP Sant Roc-Gorg, Badalona Spain

^e Shenhua Greenland FC Medical Services. Hunan Highway 2600, 21317 Shanghai, China

^f Hospital Clinic – University of Barcelona. c/ Villarroel 170; 08036 Barcelona Spain

Received 8 June 2021; accepted 11 August 2021

Available online xxx

Introduction

Osteoporosis is characterized by a deterioration of bone microarchitecture, low bone mass and an increased risk of fractures affecting mainly menopausal women.¹ The prevention of this disease at early ages of life is a determining factor in reducing the risk of fracture in the elderly.² Several studies have explored the osteogenic effect of physical activity.^{3–7} Adolescents engaged in sports showed lower incidence of traumatic fractures.² Moreover, adults engaged in non-professional sports in early life have higher BMD than their inactive peers, especially women.⁸ Particularly, sports involving high level impact from ground reaction forces are more osteogenic than non-weight bearing activities, like cycling and swimming. Elite water sports⁹ can lead to an osteoporosis risk situation when started at earlier ages, or at any case not improving the bone consolidation for the senescence. At the elite level, artistic swimmers (AS) underwent a greater amount of water training hours per week for many years: eight to ten pool sessions per week, with speed swimming

and artistic swimming-specific skills. The effect this may have on the future development of osteoporosis has not been defined.^{10,11} To the best of our knowledge, studies regarding BMD in highly trained older women athletes in aquatic sports have not been explored thorough fully before.

Several research related to different sports has tested the positive effect of a plyometric jump training program on premenopausal women's bone,¹² even when osteopenia is already established.¹³ A high-intensity, low repetition, short-lived, multidirectional jump program is also very effective in producing an osteogenic response, which can be introduced into daily life.¹⁴ It is important to find out jump programs that can counteract the potential negative consequences of non-osteogenic sport on bone health. The unprecedented worldwide confinement, caused by COVID-19, in which Spain has been one of the most affected-with severe rules governing confinement may have changed physical activity and sedentary habits due to prolonged stays at home.¹⁵

In an attempt to resolve these issues, ex artistic swimmers were included in a two –phases study (I) to

* Corresponding author at: c/ Via Augusta 114, 7.1., 08006 Barcelona, Spain.

E-mail address: mbellver@colab.car.edu (M. Bellver).

<https://doi.org/10.1016/j.apunsm.2021.100370>

2666-5069/© 2021 FUTBOL CLUB BARCELONA and CONSELL CATALÀ DE L'ESPORT. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

determine the effect of being involved in elite artistic swimmers during their youth on bone mineral density (BMD), bone mineral content (BMC) and body composition (BC) compared with sedentary controls; and (II) to evaluate the effects of a jump program on bone mineral density and body composition in a group of ex-Artistic Swimmers.

Methods

The present investigation includes two phases, first (I) a cross-sectional observational study that compares bone variables in ex artistic swimmers with sedentary controls and (II) a randomized controlled trial, pre-post intervention jump program in a group of ex artistic swimmers during the COVID-19 confinement.

Study design, protocol and informed consent forms were reviewed and approved by the Ethics and Clinical Research Committee of the Consorci Sanitari de Terrassa (CST) and met the requirements of the Declaration of Helsinki for research on human beings. Informed written consent was obtained from all participants included in the study.

Subjects

During the first part of the study, a total of 25 Caucasian ex artistic women swimmers were evaluated, aged 36-52 years and a group of 50 age-matched Caucasian sedentary participants, who served as the control group. The researchers contacted the swimmers participants thanks to the help of current artistic swimmers and coaches. The Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes (CETIR) randomly recruited the sedentary controls following the inclusion criteria of the study.

Inclusion criteria

Female ex-artistic swimmers with more than 8 years practice in their sport specialty when they were young, a minimum of 5 years' experience in high level competition (at national or international level), at least 10 hours of weekly training and at least 10 years since the end of the artistic swimming practice.

The sedentary controls had no formal training in any sport and did not reach the minimum physical activity recommended by the WHO, i.e. they practice less than 150 minutes/week of moderate physical activity or less than 75 minutes/week of vigorous physical activity.

Exclusion criteria

1) diagnosis of any medical condition, 2) the use of any medication known to affect bone metabolism (corticosteroids, oral contraceptives, supplementation or other drugs), 3) any contraindications for sports practice and 4) abnormal (non recommended) regular food intake 5) more than 150 min/-week physical activity practice during the period in which they stopped artistic swimming.

Medical history

To control possible confounding variables, the participants reported a questionnaire, including medication used, known diseases, menstrual cycle,¹¹ stress fractures history, current

dietary dairy products intake, vitamin and mineral supplementation, alcohol consumption¹⁶ and smoking. Smoking was classified as: (0) no, (1) yes. Alcohol consumption was classified as: (0) never, (1) 1-4 times/month, (2) more than twice a week. Dairy products intake: (1): <2, (2): >2. Sunbath was classified as: (1): <15min, (2): 15-30min, (3): >30min.

Physical activity assessment

Physical activity patterns, training history, including years of active sport-specific training, total training hours per week and the age of onset of the sport specific training were documented. During their youth, they competed at national and international levels.

Current and Past physical activity during 15 years in ex artistic swimmers and in sedentary controls were collected using a questionnaire.¹⁷

Measurement of Bone Mineral Density (BMD) and body composition

The BMD (g/cm²) and BMC (g) were assessed using dual energy X-Ray absorptiometry (DXA) "Lunar DXA TM GE Medical Systems, version 12.30". Total body, lumbar spine (L1-L4) and femoral neck BMD were measured according to standard operating procedures, with a coefficient of variation of 0.91%, 0.608% and 0.87% respectively.

Whole body DXA also assessed body composition and the variables selected were arms, legs, trunk, ginoïd and android regions and total fat mass (FM) and arms, legs, trunk, ginoïd and android regions and total fat-free mass (FFM).

Dual-energy X-ray absorciometry is a medical imaging device which has become the method of choice for the measurement of body composition in athletes¹⁸ and it is the reference method for measuring total BMD and diagnosing osteopenia and osteoporosis.¹⁹ Specific age and sex references were used to calculate BMD Z-scores and T-scores.

Participants were measured using DXA twice: pre and post intervention jump program. Participants were in light clothing, barefoot and without jewellery or metal buttons. All subjects went to the toilet before test. The same technician took all measurements. Athletes were evaluated in supine position, with their feet in slight internal rotation.

Medical check-ups were conducted at the CAR-CST medical department and bone densitometries were performed at the FCB Medical Unit.

Exercise intervention

In phase II, we evaluated on the same group of ex-Artistic Swimmers the effects of 8-month intervention program on Bone Mineral Density and Body Composition. Subjects were randomly assigned to one of the both groups: countermovement jump (CMJ) group and non-intervention group. A CMJ session consisted on 4 sets of 4 CMJ combined with a reactive jump with 10 seconds' rest between each set. This type of jump exceeded osteogenic thresholds to increase bone mass in premenopausal women in a previous study.²⁰ Before starting the intervention program, trained research assistants ensured that each participant could correctly

execute a set of four CMJ combined with a reactive jump. Participants were instructed to stand with feet shoulder-width apart with their arms raised above their head, to flex the knees and hips with arms “swinging” downwards and then jump upwards with arms “swinging” in the intended direction of travel to perform a maximal jump for height. Participants were cued to immediately jump vertically again after the initial jump landing and control the final second landing.

The intervention was divided into 2 levels. The first level lasted a month: 10 CMJ combined with a reactive jump, uni-directional, performed on a hard surface, twice a day, with at least 8 hours between sessions. The second level lasted 7 months: Participants performed 4 sets of 4 CMJ combined with a reactive jump with 10 seconds’ rest between each set, twice a day, with at least 8 hours between sessions, 6-7 days/week. In this second level, in order to increase multi-directional applied forces, a lateral or forward jump had to be made, before executing the next vertical CMJ.

The intervention compliance was checked using a weekly survey sent via e-mail and completed by participants, recording the number of jumps performed.

Previous to the training intervention, vertical ground reaction forces (GRF) were determined to provide a measure of the impact loading during exercise. GRF were collected using a force platform (model 9281EA, Kistler Instruments Ltd., Winterthur, Suiza) sampling at 1500 Hz. GRF were scaled to units of body weight. The peak of the vertical reaction forces (PVRF) and the impact load rate (ILR) of every jump was calculated and presented as the mean $\pm$ SD of the group. ILR was considered as the slope of the vertical reaction force between the initial floor contact and the peak of the vertical reaction force. To minimize risk of injury and maximize efficacy of the intervention, the jump training was performed wearing sport footwear, used a progressive intensity design and increasing jumping time slowly over the 8 months period.

The jump intervention was designed based on data from studies in adulthood women²¹ and animals²² showing that an “ideal” exercise prescription for bone health should include the following items: load the skeletal sites of interest, high-impact activity, result in dynamic strain, be “unusual” and include rest between loading cycles (10–15 seconds), sessions (8 hours) and blocks (several days).

Statistical analyses

The descriptive factors are presented as absolute and relative frequencies for the qualitative variables and with their mean and standard deviation for the quantitative variables. In phase I, qualitative variables, the chi-square test was used. The Shapiro Wilk Test was used to assess normality. The Shapiro-Wilk test showed that the sample was normally distributed. All the variables obtained p -values > 0.05 . Student t Test has been used to compare means of the group variable (ex -elite AS and sedentary controls). In phase II, independent t tests were used to examine baseline differences between the CMJ group and the non-intervention group. Paired t tests were used to examine pre and post training bone variables (BMD and BMC) and lean mass and fat mass in both groups. In both cases the homogeneity of variances has been proved with the Levene test.

Effect sizes (ES) of the differences (Cohen’s d) were also calculated. The magnitude of the differences was considered to be trivial ($ES < 0.2$), small ($0.2 \leq ES < 0.5$), moderate ($0.5 \leq ES < 0.8$), and large ($ES \geq 0.8$).

The level of statistical significance was set at 5%. Statistical analyses were performed using SPSS ver25 (Armonk, NY: IBM Corp.)

Results

The characteristics of the groups of the phase I are summarized in Table 1. There were no significant differences in age or body weight between groups. Artistic swimmers were taller (3.7%, $ES = 1.192$, $p = 0.001$); they had lower body fat percentage (4.6%, $ES = 0.438$, $p = 0.001$); and lower fat mass (13.6%, $ES = 0.531$, $p = 0.038$) than the sedentary control group.

Artistic swimmers and age-matched controls were into peri-menopause and without oestrogen replacement therapy.

Table 2 shows physical activity levels for a period of more than 15 years. The artistic swimmers had significantly higher activity levels during their time of competition compared with the sedentary control group ($p < 0.001$). Water training was about 23 hours/week. The fitness routines included three-sessions/ week for 1 hour 30 minutes. Not all the

Table 1 Participant characteristics

	Ex-Artistic Swimmers ($n = 25$)	Sedentary Controls ($n = 50$)	p-value
Age	45.2 $\pm$ 7.2	45.9 $\pm$ 6.1	0.619
Body weight (Kg)	62.2 $\pm$ 6.1	61.7 $\pm$ 7.1	0.737
Height (cm)	166.5 $\pm$ 5.2*	160.3 $\pm$ 5.3	0.001
BMI (Kg/m ²)	22.5 $\pm$ 2.4	24.0 $\pm$ 2.9	NS
Lean body mass (kg)	39.1 $\pm$ 4.9	37.0 $\pm$ 4.4	0.075
Fat mass (Kg)	19.8 $\pm$ 5.3	22.9 $\pm$ 6.4*	0.038
Percent body fat (%)	31.7 $\pm$ 5.9	36.3 $\pm$ 6.6*	0.001

Values are presented as Mean $\pm$ SD.

* Significantly greater, $p < 0.05$. BMI: Body Mass Index.

Table 2 Physical activity levels and life style at the time of study.

Variable	Categories	Ex-artistic swimmers (n = 25)	Sedentary controls (n = 50)	p-value
<i>Exercise parameters</i>				
Past Physical activity artistic swimming (years)		13 ± 6.4	-	
Competitive career duration (years)		8 ± 4.2	-	
Time since career end (years)		24 ± 14	-	
Past Physical activity (hours/week)		23 ± 2.8	1.0 ± 0	0.001*
Total physical activity (hours over 15 years)		1440 ± 509	1260 ± 254.7	NS
Current Physical activity (h/week)		2.0 ± 0.7	1.7 ± 0.6	NS
<i>Lifestyle factors</i>				
Current smoker (%)	no	16(72.7%)	16(59.3%)	0.0248
	yes	6(27.3%)	11(40.7%)	
Alcohol	no	4(18.2%)	9(33.3%)	0.575
	2-4 times/month	14(63.6%)	12(44.4%)	
	> twice a week	4(18.2%)	6(22.2%)	
Dairy products	<2 dairy prod.	16(72.7%)	13(48.1%)	0.073
	>2 dairy prod.	6(27.3%)	14(51.9%)	
Sunbathe (min/day)		15-30	-	

* Significantly greater, $p < 0.05$

swimmers continued to practice sport. The sports practiced since their retirement were Pilates, running, swimming; they were only active about 2 hours per week. The control group reported being active at gymnasium for about 1-2 hours per week. At the time of this study, there were no significant differences in activity levels between artistic swimmers and the sedentary control group. No significant differences in current life styles were found between groups.

Table 3 shows regional BMD and BMC of the both groups. Z-score and T-score of total BMD ($ES = 0.932$; $p = 0.001$ and $ES = 0.626$; $p = 0.016$, respectively) and trunk's BMD ($ES = 0.754$; $p = 0.002$) in the artistic swimmers group were significantly higher compared with the sedentary group. Artistic swimmers had significantly higher Z-score of the femoral neck too ($ES = 0.352$; $p = 0.046$). No differences between both groups were found in total BMD, arms' BMD and legs' BMD. BMD of the lumbar spine was significantly lower ($ES = 0.594$; $p = 0.017$) in the control group compared with the artistic swimmers group. Further, the artistic swimmers had significantly higher total BMC ($ES = 0.769$; $p = 0.002$) and arms' BMC ($ES = 1.108$; $p = 0.001$) than the control group. No differences were found in legs' and trunk' BMC.

Artistic swimmers had lower total body fat mass ($ES = 0.531$; $p = 0.038$), trunk ($ES = 0.708$; $p = 0.007$), ginoid ($ES = 0.818$; $p = 0.001$) and android regions ($ES = 0.823$; $p = 0.002$). Fat free mass was significantly lower in the control group ($ES = 0.438$; $p = 0.075$) with significant differences in arms ($ES = 0.844$; $p = 0.001$), legs ($ES = 1.068$; $p = 0.001$), ginoid ($ES = 2.055$; $p = 0.001$) and android region ($ES = 0.804$; $p = 0.003$) (Table 4).

In phase II, sample size reduced to 19 participants due to personal reasons during the COVID-19 pandemic and two participants reported episodes of tibia periostitis due to jump training and didn't continue the study. The characteristics of the groups are summarized in Table 5. Subjects

were randomly assigned to one of the both jumping groups during COVID-19 confinement: the CMJ group ($n = 9$) and the non-intervention group ($n = 10$). The intervention compliance was 92%.

There was a significant difference between the non-intervention group and the CMJ group for femoral neck' BMD in the pre intervention in favour of those that do not jump ($ES = 1.154$; $p = 0.023$), which was maintained in the post intervention ($ES = 1.430$; $p = 0.006$); and for femoral neck' BMC in the pre intervention ($ES = 1.136$; $p = 0.032$) and post intervention ($ES = 1.621$; $p = 0.008$). After the intervention period, the non-intervention group presented a significant decrease in femoral neck' BMC ($ES = 0.288$; $p = 0.019$) and a significant increase in fat free mass ($ES = 0.138$; $p = 0.001$) and in FM ($ES = 0.96$; $p = 0.001$). Furthermore, CMJ group showed a significant increase in Z-score lumbar spine BMD ($ES = 0.422$; $p = 0.003$) and a significant decrease in fat free mass ($ES = 0.130$; $p = 0.001$).

During the jump assessment before starting the intervention program, significant differences were found between the reactive jump and the final landing in the PVRF ($ES = 1.363$; $p < 0.001$) and in the ILR ($ES = 0.83$; $p = 0.002$). Participants obtained an average of PVRF of 4.08 ± 0.90 BW with an ILR of 45.86 ± 17.08 BW/s in the reactive jump and an average of PVRF of 3.06 ± 0.71 BW with an ILR of 35.72 ± 11.33 BW/s in the final landing.

Discussion

The main finding of the present study was that the long-term exposure to high level artistic swimming training at a younger age produced later significant increase in Z and T-score of Total BMD, Lumbar Spine BMD and Z-score of Femoral Neck BMD compared with controls of similar age and menopausal status. It is important to highlight that lumbar spine

Table 3 Bone mineral density (BMD) and Bone mineral content (BMC) of the groups.

	Ex-artistic swimmers (n = 25)	Sedentary controls (n = 50)	P-value
BMD (g/cm ²)			
Whole BMD	1.110 ± 0.09	1.077 ± 0.075	0.112
BMD arms	0.715 ± 0.05	0.736 ± 0.084	0.248
BMD legs	1.148 ± 0.08	1.139 ± 0.090	0.692
BMD trunk	0.948 ± 0.11*	0.879 ± 0.073	0.002
Z-score	0.734 ± 0.78*	-0.048 ± 0.906	0.001
T-score	0.400 ± 0.80*	-0.133 ± 0.915	0.016
BMD Lumbar spine	1.182 ± 0.17*	1.083 ± 0.164	0.017
Z-score	0.404 ± 1.39	-0.040 ± 0.156	0.029
T-score	0.025 ± 1.46*	-0.809 ± 1.363	0.024
BMD Femoral neck	0.946 ± 0.16	0.909 ± 0.123	0.262
Z-score	1.208 ± 0.24*	-0.116 ± 0.237	0.046
T-score	0.326 ± 0.89	-0.057 ± 0.238	0.081
BMC (g)			
Total BMC	2397.7 ± 268.5*	2201.4 ± 249.0	0.002
BMC arms	318.5 ± 33.5*	278.2 ± 38.4	0.001
BMC legs	830.6 ± 79.2	801.9 ± 99.6	0.215
BMC trunk	693.4 ± 141.7	647.7 ± 99.2	0.108
BMC Lumbar spine	62.0 ± 14.3	58.5 ± 9.4	0.218
BMC Femoral neck	4.5 ± 1.0	4.3 ± 0.6	0.353

Values are presented as Mean ± SD.

* Significantly greater, $p < 0.05$

BMD: Bone Mineral Density (g/cm²), BMC: Bone Mineral Content (g)

and femur measurements are two assessment measures according to the WHO classification for diagnosing osteopenia and osteoporosis¹⁹ and specifically related to the most susceptible sites for osteoporotic fracture. The specific improvement in these areas is probably due to the fact that

artistic swimming involves the execution of repeated exercises with an important participation of core and hip muscles.²³ Previous studies have suggested a site-specific skeletal response to the type of loading at each BMD site.²⁴ Tveit study²⁵ shows that after 20 to 29 years of retirement

Table 4 Segmental body composition parameters of the groups.

	Ex-artistic swimmers (n = 25)	Sedentary controls (n = 50)	P-value
Total fat mass (Kg)	19.8 ± 5.3	22.9 ± 6.4*	0.038
Fat mass arms	2.1 ± 0.6	2.2 ± 0.8	0.636
Fat mass legs	7.8 ± 1.9	8.5 ± 1.9	0.157
Fat mass trunk	8.9 ± 3.3	11.5 ± 3.9*	0.007
Fat mass-androide	1.3 ± 0.6	1.8 ± 0.8*	0.002
Fat mass ginoide	3.8 ± 1.0	4.6 ± 1.0*	0.001
Total Fat free mass (kg)	39.1 ± 4.9	37.0 ± 4.4	0.075
Fat free mass arms	4.0 ± 0.4*	3.7 ± 0.4	0.001
Fat free mass legs	13.6 ± 1.2*	12.1 ± 1.5	0.001
Fat free mass-trunk	19.0 ± 1.7	18.4 ± 1.8	0.187
Fat free mass-androide	2.7 ± 0.3*	2.4 ± 0.3	0.003
Fat free mass-ginoide	5.9 ± 0.5*	4.9 ± 0.4	0.001

Values are presented as Mean ± SD.

* Significantly greater, $p < 0.05$

Table 5 Participant characteristics, Body Composition and Bone values of elite female ex-Artistic Swimmers (CMJ group and non-intervention group) PRE-POST intervention program.

	PRE		POST	
	Non-intervention group (n = 10)	CMJ group (n = 9)	Non-intervention group (n = 10)	CMJ group (n = 9)
Age	46.3 ± 6.4	50.2 ± 10.7	47 ± 6.4	50.9 ± 10.7
Body weight	64.7 ± 6.4	60.5 ± 8.2	64.7 ± 4.2	60.4 ± 8.1
Height	167.1 ± 4.5	164.6 ± 4.6	167.1 ± 4.5	164.6 ± 4.6
Percent body fat (%)	32.6 ± 4.9	30.2 ± 4.9	33.3 ± 6.1	29.9 ± 5.7
Total fat mass (Kg)	20.76 ± 4.54	18.55 ± 5.91	21.51 ± 5.61 ^c	18.21 ± 5.71
Fat mas legs (Kg)	7.89 ± 1.51	7.87 ± 1.85	8.09 ± 1.74	7.62 ± 1.83
Fat free mass (kg)	38.97 ± 7.12	39.65 ± 3.90	39.84 ± 2.69 ^c	39.17 ± 4.05 ^d
Fat free mass-legs (Kg)	14.31 ± 1.17	13.31 ± 1.59	14.30 ± 0.99	13.42 ± 1.50
Whole BMD (g/cm ²)	1.134 ± 0.098	1.050 ± 0.112	1.134 ± 0.093	1.059 ± 0.077
BMD legs	1.172 ± 0.115	1.128 ± 0.099	1.168 ± 0.106	1.083 ± 0.073
Z-score	0.790 ± 1.062	0.557 ± 0.509	0.810 ± 0.988	0.355 ± 0.564
Lumbar spine BMD	1.224 ± 0.194	1.098 ± 0.160	1.226 ± 0.192	1.098 ± 0.170
Z-score	0.540 ± 1.680	0.047 ± 1.330	1.020 ± 1.658	0.188 ± 1.375 ^d
Femoral neck BMD	1.008 ± 0.127	0.835 ± 0.172 ^a	1.014 ± 0.124	0.836 ± 0.125 ^b
Z-score	0.660 ± 1.158	-0.484 ± 1.242	0.700 ± 1.179	-0.466 ± 0.791 ^b
Total BMC	2425.7 ± 333.2	2285.3 ± 250.5	2441.4 ± 327.7	2276.4 ± 252.8
Lumbar spine BMC	62.4 ± 16.5	57.8 ± 13.4	65.3 ± 14.4	58.1 ± 12.9
Femoral neck BMC	4.9 ± 0.7	3.8 ± 1.2 ^a	4.8 ± 0.6 ^c	3.9 ± 0.5 ^b

CMJ: countermovement jump

^a significant differences between groups (non-intervention and CMJ group) at pre-intervention^b significant differences between groups (non-intervention and CMJ group) at post-intervention^c significant differences within the non-intervention group for pre and post-intervention values^d significant differences within the CMJ group for pre and post-intervention values

from sport, former male soccer players had a higher whole and legs' BMD than controls, similar to Mantovani study,⁸ in line to the present study for whole BMD. These results were related with the special biomechanical characteristics of soccer as changes of direction, speed, jump and kicks that offer additional mechanical stress in lower extremities, different from our artistic swimmers. In fact, a previous study conducted by us in young Olympic athletes, aquatic athletes (swimmers, artistic swimmers, water polo players) and non aquatic ones (football, volleyball, field hockey players)¹⁰ conclude that mean BMD values were highest in non aquatic sports athletes at all measured sites compared to aquatic athletes. However, all high level sports participants, aquatic and non-aquatic, had higher values than the sedentary controls, in lumbar spine and femur measures, in line with our current study in adult women.

Despite our positive results in lumbar spine and femoral neck, we were concerned about the bone health of the elite aquatic athletes. They showed similar results than the sedentary group in total BMD, arms' BMD and legs' BMD. In swimmers, low BMD accrual and/or increased bone resorption can occur silently over time, leading to osteoporosis without developing a stress fracture during their competitive years.²⁶ The main factors that determine adult bone health are peak bone mass density at skeletal maturity and the rate of bone loss with advancing age; therefore, maximizing premenopausal BMD should be a critical strategy for the prevention of osteoporosis in this population.¹⁴

The artistic swimmers included in this study presented greater fat free mass (FFM) arms and legs and lower total and trunk fat mass (FM) than the control group, in line with the literature.^{8,24} Probably, these results are related to the fact that Artistic swimming training involves the execution of repeated exercises with a variety of movements of arms and legs to accelerate, decelerate, rotate, and turn to pull the body out of the water and even jump. Thus, artistic swimmers could develop a large muscle mass in extremities that increase bone mass in legs and femoral neck, a situation that occur in our population. On the contrary, other studies found greater FM in former soccer players and similar FFM than controls.²⁵ Legs were more affected by sports participation probably because these body segments are more exposed to biomechanical ground reaction forces generated by the sport. As well as, fat free mass was the most relevant determinant of all-bone related outcomes. It is stated that FFM greatly influence BMD and BMC in adolescent women.²⁷ Muscle strength applied to bone could be an important predictor of BMD,^{4,28} even in water sports. Sports participation in early life positively affects muscle mass gains, mainly in adolescence, and these gains in muscle mass could affect BMD through life, in line with these women athletes. The present study provided some evidence that participation in high-level aquatic sports during early life is not as adverse for the bone in adulthood as hypothesized in previous studies in swimmers.^{29–31} The discrepancy between swimmers and artistic swimmers could be attributed to training differences

related to the greater mechanical loading from repetitive pushing against the pool wall in speed swimming,³² propulsive strokes and resistance against water³⁰ and maybe also the related to training exercises out of the water.

As we have previously mentioned, one of the main factors that determine adult bone health is the rate of bone loss with age. Women are more susceptible to bone loss during menopause, mainly because of significant hormonal changes and a decline in exercise solicitation. Intervention approaches should aim to foster more positive attitudes to aging and retirement and promote physical activity at all stages in life.^{33,34} In line with our concern for the bone health of our retired artistic swimmers we designed phase II that matched with Covid-19 confinement. Results of the intervention program applied on the Phase II showed a decrease in femoral neck BMC' in the non-intervention group. Furthermore, the CMJ group showed an increase in Z-score lumbar spine BMD', in line with the literature.²¹ These improvements may be related to the high-impact tasks performed during the intervention program. The magnitudes of the PVRF (4.08 BW's) and the ILR (45,86 BW/s) for the reactive jumps after the first landing of the CMJ, exceed the defined osteogenic thresholds previously shown to improve bone mass at clinically relevant sites for premenopausal women (>3 BW's and 43 BW•s-1). In line with these results, previous studies with bouts of exercise designs (short duration, high-impact) similar to the present study found improvement in BMD on femoral neck.^{35–37} A recent study conducted by us showed that after 22 weeks of a jumping rope and whole body vibration program, only 20 min/day, twice week, the olympic artistic swimmers team increased lumbar spine and femoral neck BMD' compared to the same group of athletes without intervention program.³⁸ It has been difficult to follow the program during COVID-19 confinement, in line with a study that showed that the Spanish adult population decreased daily self-reported physical activity and increased sedentary time during COVID-19 confinement. The lockdown and social distancing caused by COVID-19 has influenced common health behaviour. Vigorous physical activities and walking time decreased by 16.8% and 58.2%, respectively, whereas sedentary time increased by 23.8%.¹⁵

The present study has several limitations. The first one is the relatively small sample size in phase I and phase II, determined by the small number of former elite artistic swimmers. Years ago artistic swimming did not have many practitioners. The difficulty in the recall bias from collecting information on physical activity levels from 15 years ago may exist. In phase II, the main limitation is the compliance with the intervention exercise program with the COVID-19 confinement.

On the other side, the present study has also several strengths. Our study is distinctive in the way that it presents lifetime bone trait evaluation in high level artistic swimmers, who trained regularly at a high intensity, volume and frequency, the perfectly standardized sport performed during early life, unthinkable in general population where everyone has dietary and exercise habits and different lifestyles. There are few studies in the literature that have taken into account the physical activity levels, bone variables and body composition of former elite artistic swimmers. The current study presents a high-intensity, low repetition, multidirectional jump program that could be introduced into daily life.

Conclusion

Professional sport participation during childhood and adolescence was positively associated with bone health in adulthood, even in aquatic sports, and specifically in artistic swimmers.

Short bouts of home exercise should be considered to reduce the risk of bone lost in retired artistic swimmers. After 8 months of high-impact jump training, BMD can be maintained or improved in premenopausal women.

Funding/support statement

No financial or material support of any kind was received for the work described in this article. No funding received.

Author's contribution

All authors contributed to the study conception and design. MB wrote the first draft of the manuscript and all authors commented on previous versions of the manuscript. MB carried out the bone densitometry studies, analysed the results and drafted the manuscript; FD conceived and coordinated this study, participated in its design and reviewed the draft; VF and EJ helped in the analyses of the results and reviewed the draft; LD participated in the bone densitometry studies; LG controlled the jump program and bone densitometry studies; VF and AT reviewed the document. All authors contributed to the editing and finalization of the manuscript. They have read and approved the final version of the manuscript, and agree with the order of presentation of the authors.

Conflicts of interest statement

The author(s) have no conflicts of interest relevant to this article.

Acknowledgments

We thank all the ex elite female athletes who voluntarily accepted to participate as study subjects, all the technical staff of the Centre d'Alt Rendiment, as well as Manel Vela, head of the Sports Planification Department of the CAR, for his help in handling the study data. We also thank to Dr. Ramon Canal, Medical Director of the FC Barcelona Medical Services, the Consorci Sanitari de Terrassa and CETIR (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes) for their unconditional support during the study development. We particularly thank Carmen Perez-Ventana for her help in bibliographic searches.

References

1. Office of the Surgeon General (US). Bone Health and Osteoporosis: A Report of the Surgeon General. Rockville (MD): Office of the Surgeon General (US); 2004.

2. Lynch KR, Fredericson M, Turi-Lynch B, Agostinete RR, Ito IH, Luiz-de-Marco R, et al. Sports participation decreases the incidence of traumatic, nonsports-related fractures among adolescents. *Pediatr Exerc Sci.* 2019;31:47–51.
3. Agostinete RR, Maillane-Vanegas S, Lynch KR, Turi-Lynch B, Coelho-e-Silva MJ, Campos EZ, et al. The impact of training load on bone mineral density of adolescent swimmers: a structural equation modeling approach. *Pediatr Exerc Sci.* 2017;29:520–8.
4. Egan E, Reilly T, Giacomoni M, Redmond L, Turner C. Bone mineral density among female sports participants. *Bone.* 2006;38:227–33.
5. Kohrt WM, Bloomfield SA, Little KD, Nelson ME, Yingling VR. American College of Sports Medicine. American college of sports medicine position stand: physical activity and bone health. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36:1985–96.
6. Layne JE, Nelson ME. The effects of progressive resistance training on bone density: a review. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:25–30.
7. Magkos F, Yannakoulia M, Kavouras SA, Sidossis LS. The type and intensity of exercise have independent and additive effects on bone mineral density. *Int J Sports Med.* 2007;28:773–9.
8. Mantovani AM, de Lima MCS, Gobbo LA, Ronque ERV, Romanzini M, Turi-Lynch BC, et al. Adults engaged in sports in early life have higher bone mass than their inactive peers. *J Phys Act Health.* 2018;15:516–22.
9. Bellew JW, Gehrig L. A comparison of bone mineral density in adolescent female swimmers, soccer players, and weight lifters. *Pediatr Phys Ther.* 2006;18:19–22.
10. Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. *Bone.* 2019.
11. Robertson S, Mountjoy M. A review of prevention, diagnosis, and treatment of relative energy deficiency in sport in artistic (synchronized) swimming. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2018;28:375–84.
12. Tucker LA, Strong JE, LeCheminant JD, Bailey BW. Effect of two jumping programs on hip bone mineral density in premenopausal women: a randomized controlled trial. *Am J Health Promot.* 2015;29:158–64.
13. Okubo R, Sanada LS, Castania VA, Louzada MJQ, de Paula FJA, Maffulli N, et al. Jumping exercise preserves bone mineral density and mechanical properties in ovariectomized rats even following established osteopenia. *Osteoporos Int.* 2017;28:1461–71.
14. Bailey CA, Brooke-Wavell K. Exercise for optimising peak bone mass in women. *Proc Nutr Soc.* 2008;67:9–18.
15. Castañeda-Babarro A, Arbillaga-Etxarri A, Gutiérrez-Santamaría B, Coca A. Physical activity change during COVID-19 confinement. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17.
16. Bush K. The AUDIT alcohol consumption questions (AUDIT-C) an effective brief screening test for problem drinking. *Arch Intern Med.* 1998;158:1789.
17. Elosua R, Garcia M, Aguilar A, Molina L, Covas MI, Marrugat J. Validation of the minnesota leisure time physical activity questionnaire in Spanish women. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1431–7.
18. Hind K, Slater G, Oldroyd B, Lees M, Thurlow S, Barlow M, et al. Interpretation of dual-energy X-ray absorptiometry-derived body composition change in athletes: a review and recommendations for best practice. *J Clin Densitom.* 2018;21:429–43.
19. WHO Study Group on Assessment of Fracture Risk and its Application to Screening for Postmenopausal Osteoporosis (Ed.). *Assessment of Fracture Risk and Its Application to Screening for Postmenopausal Osteoporosis.* Geneva: World Health Organization; 1994. p. 129.
20. Clissold TL, Winwood PW, Cronin JB, De Souza MJ. Do bilateral vertical jumps with reactive jump landings achieve osteogenic thresholds with and without instruction in premenopausal women? *J Appl Biomech.* 2018;34:118–26.
21. Xu J, Lombardi G, Jiao W, Banfi G. Effects of exercise on bone status in female subjects, from young girls to postmenopausal women: an overview of systematic reviews and meta-analyses. *Sports Med.* 2016;46:1165–82.
22. Saxon LK, Robling AG, Alam I, Turner CH. Mechanosensitivity of the rat skeleton decreases after a long period of loading, but is improved with time off. *Bone.* 2005;36:454–64.
23. Tinto A, Campanella M, Fasano M. Core strengthening and synchronized swimming: TRX® suspension training in young female athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 2017;57:744–51.
24. Andreoli A, Celi M, Volpe SL, Sorge R, Tarantino U. Long-term effect of exercise on bone mineral density and body composition in post-menopausal ex-elite athletes: a retrospective study. *Eur J Clin Nutr.* 2012;66:69–74.
25. Tveit M, Rosengren BE, Nilsson JÅ, Karlsson MK. Exercise in youth: high bone mass, large bone size, and low fracture risk in old age: elite soccer, bone traits, and fractures. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25:453–61.
26. Scofield KL. Bone health in endurance athletes: runners, cyclists, and swimmers. *Current Sports Medicine Reports.* American College of Sports Medicine. 2012;11:7.
27. Maillane-Vanegas S, Agostinete RR, Lynch KR, Ito IH, Luiz-de-Marco R, Rodrigues-Junior MA, et al. Bone mineral density and sports participation. *J Clin Densitom.* 2020;23:294–302.
28. Koşar ŞN. Associations of lean and fat mass measures with whole body bone mineral content and bone mineral density in female adolescent weightlifters and swimmers. *Turk J Pediatr.* 2016;58:79.
29. Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. Is bone tissue really affected by swimming? A systematic review (B Smith, Ed.). *PLoS One.* 2013;8:e70119.
30. Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, García-Campayo J, Moreno LA, Casajús JA, et al. The effect of swimming during childhood and adolescence on bone mineral density: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.* 2016;46:365–79.
31. Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, García-Campayo J, Moreno LA, et al. Swimming and peak bone mineral density: a systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci.* 2017: 1–13.
32. Ludwa IA, Falk B, Yao M, Corbett L, Klentrou P. Bone speed of sound, bone turnover and IGF-I in adolescent synchronized swimmers. *Pediatr Exerc Sci.* 2010;22:421–30.
33. Rai R, Jongenelis MI, Jackson B, Newton RU, Pettigrew S. Retirement and physical activity: the opportunity of a lifetime or the beginning of the end? *J Aging Phys Act.* 2020;28:365–75.
34. Erkkola RU, Vasankari T, Erkkola RA. Opinion paper: exercise for healthy aging. *Maturitas.* 2021;144:45–52.
35. Babatunde OO, Forsyth JJ, Gidlow CJ. A meta-analysis of brief high-impact exercises for enhancing bone health in premenopausal women. *Osteoporos Int.* 2012;23:109–19.
36. Martyn-St James M, Carroll S. Effects of different impact exercise modalities on bone mineral density in premenopausal women: a meta-analysis. *J Bone Miner Metab.* 2010;28:251–67.
37. Zhao R, Zhao M, Zhang L. Efficiency of jumping exercise in improving bone mineral density among premenopausal women: a meta-analysis. *Sports Med.* 2014;44:1393–402.
38. Bellver M, Drobnic F, Jovell E, Ferrer-Roca V, Abalos X, Del Rio L, et al. Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers. *J Bone Miner Metab.* 2021.

Objetivo 4:

Explorar la utilidad de una prueba de última generación por imagen en mineralización ósea “3D-DXA”, orientada al estudio de hueso trabecular y cortical, que en nuestro caso se evalúa en deportistas en referencia a sujetos no deportistas.

Amineh Amani, **Montse Bellver**, Luis del Rio, Joan Ramon Torrella, Antonia Lizarraga, Ludovic Humbert, Franchek Drobic.

Comparison in cortical and trabecular bone mineral density assessed by 3D-DXA in female elite athletes involved in weight bearing and non-weight bearing sports

Resumen

Introducción: La actividad física genera distintas tensiones en los diferentes componentes del esqueleto. La herramienta de evaluación clínica estándar actual para estudiar la densidad ósea es la DXA. Recientemente, se han desarrollado nuevos métodos para evaluar el hueso cortical y trabecular del fémur proximal en 3D, a partir de imágenes DXA estándar. *Objetivo:* Evaluar la densidad ósea cortical y trabecular mediante análisis 3D derivado de la DXA en deportistas de alto rendimiento de deportes con impacto, futbolistas del 1^{er} equipo del Fútbol Club Barcelona (n=60), y de deportes sin impacto, selección olímpica española de natación artística (n=25); y comparar posibles diferencias con mujeres no deportistas (n=40). La densidad mineral ósea se midió mediante densitometría ósea (DXA) y 3D-DXA en fémur proximal. *Resultados:* Las jugadoras de fútbol presentaron valores de densidad mineral ósea (DMO) de cuello, trocánter y fémur proximal total significativamente mayores que los de las nadadoras de artística (11.9%, p=0.000; 16.9%, p=0.000; 16.3%, p=0.000) y que el grupo control (14.9%, p=0.000; 19.9%, p=0.000; 14%, p=0.000). Las futbolistas mostraron valores mayores estadísticamente significativos en DMO volumétrica (vBMD) integral y trabecular respecto a las nadadoras de artística (12.5%, p=0.000; 15.9%, p=0.000) y en vDMO integral, trabecular y cortical respecto al grupo control (13.4%, p=0.000; 18.9%, p=0.000; 5.7%, p=0.029). Finalmente, las jugadoras de fútbol mostraron mayores valores en espesor cortical y densidad mineral ósea superficial (sDMO) en comparación con las nadadoras de artística (13.7%, p=0.000; 17.7%, p=0.000) y el grupo control (7.7%, p=0.000; 12%, p=0.000). Las jugadoras de fútbol femenino mostraron el mayor grosor cortical y la mayor vDMO trabecular. La 3D-DXA podría proporcionar una evaluación de la estructura ósea y una mejor clasificación de los deportistas según su riesgo de fractura, complementaria a la densitometría ósea convencional.

Comparison of cortical and trabecular bone mineral density assessed by 3D-DXA in female elite athletes involved in weight bearing and non-weight bearing sports

Amineh Amani^{a,c}, Montse Bellver^b, Luis del Rio^{a,c}, Joan Ramon Torrella^{c*}, Antonia Lizarraga^d, Ludovic Humbert^e, Franchek Drobnic^{b,d}

^a *CETIR Centre Medic, Barcelona, Spain*

^b *Sports Medicine Department, CAR Centre d'Alt Rendiment, Sant Cugat del Valles, Barcelona, Spain- Consorci Sanitari de Terrassa*

^c *Departament de Biologia Cel·lular, Fisiologia i Immunologia, Secció de Fisiologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Spain*

^d *Serveis Mèdics Futbol Club Barcelona, Barcelona, Spain*

^e *Galgo Medical, Barcelona, Spain*

Corresponding author:

*Joan Ramon Torrella

Departament Biologia Cel·lular, Fisiologia i Immunologia

Facultat de Biologia

Universitat de Barcelona

Av. Diagonal, 643, 4a. planta, 08028 Barcelona (Spain)

e-mail: jtorrella@ub.edu

Abstract

Physical activity generates different stress in different components of the skeleton. The current standard clinical evaluation tool for fracture prediction is dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). Recently, new methods have been developed to evaluate the cortical and trabecular bone of the proximal femur in 3D from standard DXA images. The aim of the present study was to evaluate cortical and trabecular bone mineral density by DXA-derived 3D analysis in high performance athletes from weight bearing (football players from Football Club Barcelona team, n=60) and non-weight bearing sports (the Spanish artistic swimming Olympic team, n=25) and to compare possible differences with non-exercise women (n=40). Bone mineral density scans were performed using DXA and 3D-DXA evaluations at proximal femur. Football players had neck, trochanter and total femur proximal bone mineral density (BMD) values were significantly higher than those of artistic swimmers (11.9%, p=0.000; 16.9%, p=0.000; 16.3%, p=0.000) and non-exercise group (14.9%, p=0.000; 19.9%, p=0.000; 14%, p=0.000). Football players showed significant differences in integral and trabecular volumetric BMD (vBMD) than artistic swimmers (12.5%, p=0.000; 15.9%, p=0.000) and in integral, trabecular and cortical vBMD than non-exercise group (13.4%, p=0.000; 18.9%, p=0.000; 5.7%, p=0.029). Finally, female football players had higher cortical thickness and sBMD compared to artistic swimmers team (13.7%, p=0.000; 17.7%, p=0.000) and non-exercise group (7.7%, p=0.000; 12%, p=0.000). Female football players showed the highest trabecular vBMD and cortical thickness. 3D-DXA could provide assessment of the bone structure and a better classification of the athletes based on their fracture risk.

Highlights

- 3D-DXA is used to evaluate cortical and trabecular BMD.
- 3D-DXA could detect athlete's fracture risk.
- Football players show a positive effect on trabecular vBMD and cortical thickness.
- Artistic swimming cannot provide a positive effect on bone.

Keywords:

Bone health; 3D analysis; Exercise; Gender; Weight bearing

Introduction

Osteoporosis affects millions of people around the world, mainly menopausal women¹. The disease is characterized by a deterioration of bone micro architecture, low bone mass and increased risk of fractures². The current standard clinical evaluation tool for fracture prediction is dual-energy X-ray absorptiometry (DXA)³. DXA measurements are limited to two-dimensional evaluation of integral bone mineral mainly at lumbar spine and proximal femur and, contrary to quantitative computed tomography (QTC) cannot differentiate between trabecular and cortical bone compartments. However, the high-dose radiation and cost, as well as the limited access to QTC, constitute some of the main limitations for its applicability in clinical practice⁴. Recently, new methods have been developed to evaluate the cortical and trabecular vBMD and cortical thickness of the proximal femur in 3D from standard DXA images^{5,6}. The three dimensional (3D) distribution of the cortical and trabecular bone mass and mineral density in the proximal femur are critical components in determining fracture resistance^{7,8}. 3D-DXA is the new software for a better classification of the subjects based on their fracture risk and allows us to understand and quantify the response of the bone to the loads to which it is subjected during sports practice. Physical exercise is highly beneficial to increase bone mineral density (BMD) and bone mineral content (BMC), to reduce the risk of osteopenia that leads to osteoporosis and to reduce the burden of frailty fractures⁹. Exercising during youth is a non-pharmacological preventive strategy, not only to increase muscle strength but also to stimulate bone formation¹⁰. Some prior studies have compared the effects of various types of exercise on different athletic populations, suggesting that athletes involved in high level impact from ground reaction forces are more osteogenic than non-weight bearing activities¹¹⁻¹³. Interestingly, weight-bearing exercise with impacts from varying directions is associated with beneficial effects on bone mass, cortical and trabecular¹⁴. The participation in professional weight bearing sports (football, field hockey and volleyball) is associated with higher BMD measurements than in non-weight bearing sports (swimming, artistic swimming, water polo) and in sedentary controls. Non-weight bearing sports presented similar values than those of sedentary controls at total BMD and segments measurements, however they showed higher values than sedentary controls in femur measurements¹⁵. In a recent systematic review¹⁶, children and adolescents swimmers presented similar values of total BMD in the femur than controls and lower values than other impact sports. A further study¹⁷ carried out with university level athletes, an intermediate population between both mentioned studies, concludes that impact sports have higher BMD values than non-impact sports similar to sedentary subjects. The results emphasize that non-weight bearing activities, such as swimming, cannot provide a positive effect on bones' health. The potential effect this may have on the future development of osteoporosis is not well defined^{16,18}. Athletes train and exercise since their childhood, with their personal goals aimed at having fun and a good performance in the short term, probably without being aware of the investment that a well-

practiced sport means for their future health. Prior studies demonstrated that inactivity and disuse enhance or compromise respectively the bone quantity and quality, mainly cortical compartment¹⁹. Whereas it has been shown that cortical thickness and bone mineral density are critical factors in determining the strength of bone structures and depend on the mechanical stressors along the structure²⁰. Since the DXA technique cannot distinguish whether changes in BMD are due to changes in bone volumetric BMD (vBMD) or in bone geometrical parameters, data regarding the role of physical activity on bone structural parameters is scarce. In this way, thanks to 3D-DXA we could be aimed to design more effective programs with sport's interventions for the prevention of osteoporosis. Nevertheless, at the present, there are no data on the usefulness of 3D-DXA in elite athletes.

The aim of the present study was to evaluate cortical and trabecular bone mineral density by a new software, 3D analysis-DXA, in adult high performance female athletes of weight bearing sports, non-weight bearing sports and non-exercise controls.

Methods

Participants

Study design, protocol and informed consent forms were reviewed and approved by the Institutional Review Board of Ethics and Clinical Research Committee of CETIR and met the requirements of the Declaration of Helsinki for research on human beings.

Three groups of women were recruited in a cross-sectional observational study: (1) a weight bearing group of 60 football players from the first and second teams of Football Club Barcelona (FCB), (2) a non-weight bearing group of 25 artistic swimmers from the Olympic Spanish artistic swimming team and (3) a non-exercise control group of 40 non-exercise women.

The inclusion criteria for the sports women participating in the study were to be female athletes over 18 years of age, with more than 8 years of sports practice in their discipline, to have at least a 3-year experience in high-level competition, to train at least 12h.-15h/week. This criterion was based on previous research demonstrating osteogenic benefits with 3h. of activity per week²¹. High competition sport means competing in World Championships (WC) and Olympic Games (OG). The Spanish artistic swimming team was silver medallist in OG London 2012 (duet free and team free routine). The football players belong to the first and second Football Club Barcelona teams, play regularly in the Spanish "Liga Iberdrola" and the UEFA Champions League since 2014–15 and won the Spanish Copa de la Reina 2016 and again in 2017.

Written informed consent was obtained from all athletes prior to participation.

The controls (non-exercise) group had no formal training in any sport and did not reach the minimum physical activity recommended by the World Health Organization, i.e., less than 150 min/week of

moderate physical activity or less than 75 min/week of vigorous physical activity. They were selected from the CETIR database (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes, Barcelona, Spain) with selection criteria for healthy participants in different studies. The selection of women from the control group was carried out considering the level of activity practiced and the individual Z-score that was evaluated, being the range of ± 1 standard deviation from the reference values. An epidemiological questionnaire was distributed prior to densitometry for all young healthy women. The questionnaire gathered information about their sedentary lifestyle, regular walking, sport's practice and intensity degree (0: occasional or 1 h/week, 1: < 5 h/week, 2: > 5 h/week). Comments on physical activity during life were also added and only subjects with 0 scores were selected.

Exclusion criteria for both athletes and non-exercise group were: 1) the diagnosis of any medical condition, 2) the use of any medication known to affect bone metabolism (corticosteroids, oral contraceptives, supplementation or other drugs), 3) any contra-indication for sports practice, 4) any type of menstrual dysfunction and/or 5) abnormal (non-recommended) regular food intake. For non-exercise group, youths involved in competitive sport (holders of a practising license from the Spanish Federation) were excluded from the study.

All athletes underwent regular medical examinations. To control for possible confounding variables, a questionnaire was used to all participants to collect data on their physical training and sports history, clinical history, drugs intake, stress fractures and gynaecological history (menstrual cycle).

Medical check-ups were conducted at the CAR-CST medical department as usually every season. Bone densitometries were performed at the FCB Medical Unit and study scans at CETIR medical centre.

Nutrition

All the athletes were controlled and evaluated monthly by the nutritionist of the FCB for the professional football players and by the nutritionist of the Olympic training centre for the artistic swimmers, who determined a balanced diet and the intake of all basic nutrients during the training and competition seasons. The nutritionist evaluates the average energy output, calorie and calcium input, including a detailed 5-day nutritional intake record. None of the participants needed nor received any dietary supplementation related to bone formation during the study period.

Exercise training

Football players trained at the FCB ,Sant Joan Despí and the Olympic artistic swimmers trained at the High Performance Centre (CAR), Sant Cugat del Vallés.

Professional Football training program includes seven to eight sessions per week about 90

minutes/season, three fitness sessions per week and about 700-800 caloric expenditure per session. Artistic swimming program, at the elite competition level, includes eight to ten pool sessions per week, with speed swimming, synchronized swimming-specific skills and fitness routines. Overall, it is a high-intensity training program that includes time devoted to choreography. Additional hours of water training may be required to reach perfect synchronization. Their water training was 36 h/week. The fitness routines included three sessions per week for 1 h 30 min. First they had a 30-min warm-up with core exercises and hip and shoulder prevention exercises. In the second part, they did a free-weight routine for 1h: five lower body and five upper body exercises, four sets of ten repetitions at 75% of their 1-repetition maximum (1RM), which represents a regular training load, and four flexibility work sessions. The non-water training was about 4–5 h/week.

Measurement of Bone Mineral Density (BMD) and body composition

Hip scans were performed using dual X-ray absorptiometry (DXA) (Lunar iDXA GE Medical Systems, version 12.30). Bone mineral density (BMD) at proximal femur was measured according to standard operating procedures (SOP) with a coefficient of variation (CV) of 1%.

Assessment by dual X-ray absorptiometry is the reference method for measuring areal BMD and diagnosing osteopenia according to the WHO classification, specifically assessing the most susceptible sites of osteoporotic fractures, such as the lumbar spine and the neck of the femur ²².

Participants were measured in light clothing, barefoot and without jewellery or metal buttons, used the toilets before testing and were evaluated by the same by the same technician following recommendations from the International Society of Clinical Densitometry ²³, in supine position, with their feet in slight internal rotation to have good visibility of the femoral neck.

The 3D-SHAPER software (v2.4, Galgo Medical, Barcelona, Spain) was used to assess 3D femoral shape, the trabecular macrostructure and the cortex from DXA scans of the participants. The method relies on a statistical shape and density model of the proximal femur built from a database of Quantitative Computed Tomography (QCT) images, which is an imaging technique modality for analysing bone cortex in 3D ⁵. In order to maximize the similarity between the volumetric 3D reconstruction and the 2D-DXA images, a reconstruction was performed in an intensity based 3D-2D personalized registration process. The 3D statistical model was registered onto the DXA scan to obtain a 3D patient-specific model of the proximal femur shape and BMD distribution of the patient. The cortical thickness and density was computed by fitting a mathematical function to the density profile computed along the normal vector at each node of the proximal femur surface mesh ²⁴. 3D-DXA measurements include the volumetric Bone Mineral Density (vBMD) of the cortical, trabecular and integral (cortical + trabecular) bone compartments and mean cortical thickness. All 3D-DXA measurements are performed at the total femur.

Models and measurements provided by the “3D-DXA” software algorithm were evaluated, by comparing 3D-DXA analyses with measurements performed by Quantitative Computed Tomography. Correlation coefficients (R) between the 3D-DXA and QCT measurements were 0.86, 0.93, and 0.95 for the vBMD at the trabecular, cortical and integral compartments respectively, and 0.91 for the mean cortical thickness²⁵. 3D-DXA could potentially improve osteoporosis management while maintaining DXA as the standard routine modality.

Statistical analysis

All quantitative variables are presented with means and standard deviations (SD). The Kolmogorov-Smirnov test was used to assess normality. The Kolmogorov-Smirnov test showed that the sample was normally distributed. All the variables obtained p values > 0.05. For determining differences in 3D-DXA and DXA between the three groups a One-Way ANOVA test was run using Scheffe’s test as *post hoc* procedure for multiple comparisons. The average cortical thickness and density mapping were generated using the 3D-DXA models. To compare the volumetric densities of the cases and controls, the mean 3D-DXA-density instance was computed for each group and projected onto the mean femoral shape for the group.

A frontal slice was computed for each group for comparison purposes. R 3.3.2 software (www.r-project.org) was used to perform the statistical analysis²⁶.

Effect sizes (ES) of the differences (Cohen’s d) were also calculated. The magnitude of the differences was considered to be trivial (ES<0.2), small ($0.2 \leq ES < 0.5$), moderate ($0.5 \leq ES < 0.8$), and large ($ES \geq 0.8$).

Bone density variables were further analysed using ANCOVA, with adjustments for FFM (lean mass), age and height and Bonferroni’s test for multiple comparisons.

All hypothesis tests with P values lower than 0.05 were considered statistically significant.

Results

Group means for anthropometric and training data are summarized in Table 1. No statistically significant differences in age were found between groups. Height was significantly higher in the football and artistic swimmers group respect to non-exercise group (control group). Body mass was significantly higher in the football players group than in the artistic swimmers group.

FM percentage is higher in the control group than in all the athletes. FFM are higher in the artistic swimmers and football players groups, and all of them are higher than those of the control group.

The average detailed 5-day nutritional intake record in the football players group was 3600 kcal/day and 1400-1900 mg/day of calcium.

The average detailed 5-day nutritional intake record in the artistic swimmers group was 2034 kcal/day and 943 mg/day of calcium. This intake was homogeneous throughout the season.

All subjects of the study hadn't any type of menstrual dysfunction and didn't use oral contraceptives.

Table 2 shows aBMD measurements. Football players presented significantly higher aBMD when compared to artistic swimmers in femoral neck ($p=0.000$; $ES=0.989$), in trochanter ($p=0.000$, $ES=1.056$) and in total proximal femur BMD ($p=0.000$, $ES=1.325$). Football players presented significantly higher aBMD when compared to controls in femoral neck ($p=0.000$; $ES=1.745$), in trochanter ($p=0.000$, $ES=1.767$) and in total proximal femur BMD ($p=0.000$, $ES=1.380$). Statistically significant higher aBMD were found between artistic swimmers and controls in neck ($p=0.002$, $ES=0.745$) and trochanter ($p=0.015$, $ES=0.573$) but not in shaft and total aBMD. Neck Z-score and total proximal femur Z-score were significantly higher in football players when compared to artistic swimmers ($p=0.000$, $ES=0.939$; $p=0.000$, $ES=1.280$) and controls ($p=0.000$, $ES=1.600$; $p=0.000$, $ES=1.378$). Artistic swimmers showed significantly higher neck Z-score when compared to controls ($p=0.000$, $ES=0.674$).

After adjusting by FFM, age and height (Table 3), the statistically significant differences between artistic swimmers and controls disappeared. Football players have neck, trochanter and total femur proximal bone mineral density (BMD) values significantly higher than those of artistic swimmers (11.9%, $p=0.000$; 16.9%, $p=0.000$; 16.3%, $p=0.000$) and non-exercise group (14.9%, $p=0.000$; 19.9%, $p=0.000$; 14%, $p=0.000$). FFM explains 2.3%, height explains 3% and the type of sport explains 26.3% of the BMD of the femoral neck ($R=0.394$). FFM explains 3.7% and the type of sport explains 29.8% of the BMD of the trochanter ($R=0.392$). FFM explains 2.8% and the type of sport explains 27.6% of the total proximal femur BMD ($R=0.327$).

The 3D-DXA femoral measurements are shown in Table 4. Football players had higher statistical significant vBMD values in all compartments: integral ($p=0.000$, $ES=0.921$), trabecular ($p=0.000$, $ES=1.023$) and cortical ($p=0.001$, $ES=0.594$) when compared to controls and in integral ($p=0.000$, $ES=0.921$), trabecular ($p=0.000$, $ES=0.892$) and cortical ($p=0.022$, $ES=0.558$) when compared to artistic swimmers. Football players had also higher cortical thickness and BMD cortical surface (sBMD) compared to artistic swimmers ($p=0.000$, $ES=1.399$; $p=0.000$, $ES=1.339$, respectively) and controls ($p=0.000$, $ES=1.505$; $p=0.000$, $ES=1.474$). When the model is adjusted by FFM, age and height (Table 5), statistically significant differences between football players, artistic swimmers and controls remain, except for cortical vBMD between football players and artistic swimmers which differences disappeared.

As well as significant differences appears between artistic swimmers and non-exercise group in cortical thickness. Football players showed significant differences in integral and trabecular volumetric BMD (vBMD) than artistic swimmers (12.5%, $p=0.000$; 15.9%, $p=0.000$) and in integral, trabecular and cortical vBMD than non-exercise group (13.4%, $p=0.000$; 18.9%, $p=0.000$; 5.7%, $p=0.029$). Finally, female

football players had significantly higher cortical thickness and sBMD compared to artistic swimmers team (13.7%, $p=0.001$; 17.7%, $p=0.000$) and controls (7.7%, $p=0.000$; 12%, $p=0.000$). Non-exercise group showed higher significant differences than artistic swimmers in cortical thickness (6.5%, $p=0.046$). FFM explains 3.4%, height explains 7.9% and type of sport explains 30.7% of the cortical thickness ($R=0.399$). FFM explains 3.3%, height explains 2.6% and type of sport explains 19.3% of the integral vBMD ($R=0.283$). FFM explains 2.9%, height explains 1.5% and type of sport explains 20.4% of the trabecular vBMD. ($R=0.302$). FFM explains 1.9%, height explains 2.4% and type of sport explains 7.5% of the cortical vBMD ($R=0.101$). FFM explains 4.3%, height explains 0.7% and type of sport explains 29.2% of the sBMD ($R=0.359$).

Figure 1 shows the colour maps depicting the percentages of differences in cortical surface (sBMD) of the proximal femur for all pairwise Comparisons. Label left is anterior and label right is posterior.

The colour maps show that the most significant differences were found between football players and controls (Fig. 1C) and football players and artistic swimmers (Fig. 1A) in the neck and in the trochanter zones. Slighter differences (but still significant in the neck) are evident between artistic swimmers and controls (Fig. 1B).

Discussion

The present study used new 3D-DXA software to compare different bone compartments at the proximal femur between elite female football players and artistic swimmers as well as a non-exercise group. Football players showed proximal femur aBMD values higher than those of artistic swimmers and non-exercise group, in agreement with a study performed in highly trained athletes using dual X-ray absorptiometry¹⁵. The present study is important because it provides information about different bone compartments. The athletes involved in the weight bearing sport (football players) had higher trabecular vBMD, cortical thickness and sBMD compared to non-weight bearing sport practitioners (artistic swimmers), in agreement with a study performed in soccer players, a weight-bearing exercise with impacts from varying directions¹⁴. The non-weight bearing sport showed trabecular vBMD and cortical thickness similar to astronauts²⁰. Cortical bone thickness and density eventually recovered after return to Earth but cortical porosity and trabecular bone failed to recover, that could happen to elite women who practice a non-weight bearing sport.

Artistic swimmers presented bone values significantly lower than those of football players and similar to non-exercise group except for cortical vBMD. Artistic Swimmers regularly practice in a hypo gravitational medium, such as astronauts, from an early age and underwent a greater amount of water training hours per week for many years than players in other sports^{15,27}, in line with the present study. Several authors^{18,28} and a systematic review¹⁶ show a neutral or non-effect of swimming in BMD and

BMC, similar to sedentary controls and lower than impact or anti-gravitational sports. However, artistic swimming training, which involves the execution of repeated exercises with a variety of movements of arms and legs to accelerate, decelerate, rotate, turn to pull the body out of the water and even jump, should develop a large muscle mass in extremities that could increase proximal femur BMD²⁹, that didn't occur in the present study. The negative relationship between water practice time and bone gains is a major concern because its effects could be harmful later in life³⁰. The lack of impact characteristics of this sport could lead to a risk of acute stress fracture and osteoporosis in adulthood. Further, as the practice of artistic swimming starts at a younger age and requires many hours of training in a weightless environment, at a time when attainment of peak bone mass is critical, studies that evaluate cortical and trabecular bone mineral density are of paramount importance like our study. A prior study showed that it is important to consider a complementary workout out of the water to improve femoral neck BMD³¹. Football showed the highest bone values than artistic swimmers and non-exercise controls. Football is a sport with special biomechanical characteristics: changes of direction, speed, jumps and kicks that offers additional mechanical stress in lower extremities due to the force of reaction against the ground during these actions³². The strain generated by this sport may cause higher cortical bone, increasing BMD, bone strength making the bones more resistant to fractures. Football practice seems to be beneficial for the bone acquisition in girls during childhood and adolescence, especially at the femoral neck and trochanter BMD which are the most sensitive areas to the mechanical stress of the football actions³³. Since football players present the highest FFM values in legs and the highest femoral bone values, in line with the literature^{28,34}.

Football players and artistic swimmers showed a body size with genetically determined physical characteristics that contribute to an individual's predisposition to play a particular sport (height, body shape, body composition) that could have influenced the bone variables. When adjusting by age, height and FFM, significant differences in aBMD between artistic swimmers and non-exercise group disappeared. The basic morphology of the skeleton is determined genetically, but its final mass, geometry, architecture and tissue quality is modulated by adaptive mechanisms sensitive to mechanical factors³⁵. There is evidence that young bones have greater capacity to respond to increased mechanical loading than the adult skeleton and the importance of FFM for optimizing bone strength during growth¹⁰. The association between exercise loading and bone parameters is sport specific¹⁴. Our results provided evidence that FFM (1.9-4.3%) and type of sport (19.3-30.7%) are important values that influences bone parameters, in line with the literature¹³.

A recent study by Gifre et al.⁴ showed that patients with spinal cord injury, showed a marked decrease in integral (8.8%), trabecular (11.6%) and cortical (2.4%) vBMD at 6 months after the injury, with a further decrease at 12 months. Cortical thickness also decreased at 6 and 12 months (8% and 11.4%) with the

maximal decrease being observed the first 6 month. A recent study suggests that microstructural and biomechanical degradation occurs particularly within the cortical compartment as a result of non-weight bearing and persists following return to normal loading ¹⁹, contrary to artistic swimmers group in the present study. These prior studies indicated that the lack of physical activity induces a severe loss of bone thickness and bone mass. On the other hand, despite the presence of certain osteoporosis risk factors such as low energy availability, primary amenorrhoea and lower body weight, professional ballet dancers revealed higher bone density for both cortical and trabecular bone compartments and thicker cortex compared to controls ³⁶. Artistic swimming is an aquatic ballet dancer with similar aesthetic characteristics without impact, contrary to ballet dancers.

It was observed that as time spent in weight-bearing physical activity increases, BMD augment around the integral femoral neck, but with differences in bone mass gain rates between sub regions depending on the magnitude and directions of the hip contact forces; high magnitude vertical impacts favours the gain of bone mass superiorly at the femoral neck while high and moderate impacts from odd directions promoted the largest bone mass gain rates at the anterior and posterior sub regions of the femoral neck ³⁷. The inclusion of these types of mechanical loading in a physical activity regime may provide femoral neck stability at the vulnerable regions during aging. Exercise involving hip flexion might have targeted mechanical loading to help preserve the most vulnerable regions of femoral neck ⁸. To preserve stability of the cortex, regular loading targeted to the superior-lateral cortex might need to be life long, as occurs naturally when femur is extended at the hip from a flexed position (cycling, gymnastics). In many societies in which sitting on the ground level is usual, hip fracture is rare, even when most women older than 65 years have osteoporosis ³⁸.

We could not find other published data that could verify our results on the description of trabecular and cortical femur characteristics using 3D-DXA in elite athletes. The vast majority of descriptive and exercise intervention studies have relied upon aBMD or BMC measures derived from dual X-ray absorptiometry (DXA), established as the most widely used method for measuring BMD ¹⁵ or quantitative computed tomography. Besides that, the contribution of altered bone geometry to fracture risk is unappreciated by clinical assessment using DXA, because this technique cannot distinguish between cortical and trabecular bone. 3D imaging methods can measure both compartments separately, playing independent roles in fragility fracture⁵. This 3D-DXA method might be a promising approach to quantify cortical thickness and density using clinical routine imaging techniques in athletes. Further studies are required to establish the technique as a viable alternative to QCT in research and clinical practice. Previous studies found that cortical and trabecular bone measurements computed by QCT could better discriminate hip fracture than aBMD measurements computed by DXA ³⁹. However, there is no clear evidence either that QCT-based finite-element analysis would lead to an improvement of fracture risk

prediction. Considering these results, it is expected that this new technique will have a positive influence to detect the fracture risk and the quality of the bone more than it is observed in the standard values of BMD.

The present study has several limitations. The first limitation is the relatively small sample size, determined by the small number of elite and Olympic athletes. Secondly, the cross-sectional design of the study is a limitation because it only speculates and limits the possibility to prove causality, generating the need for follow-up measurements in the future. The design used is the main reason regarding the absence of information about time of the season training: training loads change according to the season timing and progress, and this might affect bone that is constantly adapting. Finally, a limitation is that the accuracy of the 3D-DXA software algorithms has not been specifically evaluated for athletes. Its validity in individual cases should be interpreted with caution⁴⁰.

The present study has also several strengths. The participants included are all high-performance female athletes from 1st Football Club Barcelona team and Olympic Spanish artistic swimmers team who train regularly at a high intensity, volume and frequency. The perfectly standardized check-up of the participants is unthinkable in the general population with different dietary, exercise habits and lifestyles. One of the advantages of our methodology is that 3D-DXA is based on standard hip DXA scans and, therefore, retrospective data can be used. 3D-DXA data evaluation is a promising technology for measurements of a variety of 3D shape and macro structural measurements of the proximal femur in elite athlete's women, but few studies had presented values in these elite athletes before.

Conclusion

The weight bearing sport with impacts from varying directions showed the highest trabecular vBMD and cortical thickness of the proximal femur. 3D-DXA could provide assessment in athletes allowing better identification of the different bone compartments to bone strength and fracture risk. It could be used to design programs with exercise intervention for the prevention of osteoporosis.

Practical implications

The present study showed promising signs of using this technique for the evaluation and follow up of the impact of exercise on bone. 3D-DXA could provide assessment of the bone structure; it is a complementary instrument for a better classification of the subjects based on their fracture risk. In the field of sports, this method could allow us to make and design more effective programs in the prevention of osteoporosis.

Acknowledgements

We thank all the elite female athletes who voluntarily accepted to be our study subjects; their commitment has been fundamental for the correct development of the project. Authors would also to thank Mayuko Fujiki, the current coach of the national team for her evaluation and comments, as well as all the technical staff of the Centre d'Alt Rendiment. We also thank to Dr. Ramon Canal, Medical Director of the FC Barcelona Medical Services, Consorci Sanitari de Terrassa and CETIR (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes) and CETIR (Centre for Technical Studies with Radioactive Isotopes) for their unconditional support during the development of the study.

We thank specially Esther Jovell (PhD) and Ventura Ferrer (PhD) for their help in the statistical analysis as well as the reviewers for their comments and suggestions.

Declaration of Competing Interest None declared. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial and/or not-for-profit sectors.

References

1. Compston JE, Papapoulos SE, Blanchard F. Report on osteoporosis in the European Community: current status and recommendations for the future. Working Party from European Union Member States. *Osteoporos Int* 1998;8:531–534.
2. Office of the Surgeon General (US). Bone Health and Osteoporosis: A Report of the Surgeon General. Rockville (MD): Office of the Surgeon General (US); 2004.
3. El Maghraoui A, Roux C. DXA scanning in clinical practice. *QJM* 2008;101:605–617.
4. Gifre L, Humbert L, Muxi A, Del Rio L, Vidal J, Portell E, Monegal A, Guañabens N, Peris P. Analysis of the evolution of cortical and trabecular bone compartments in the proximal femur after spinal cord injury by 3D-DXA. *Osteoporosis International* 2018;29:201–209.
5. Humbert L, Martelli Y, Fonolla R, Steghofer M, Di Gregorio S, Malouf J, Romera J, Barquero LMDR. 3D-DXA: Assessing the Femoral Shape, the Trabecular Macrostructure and the Cortex in 3D from DXA images. *IEEE Trans Med Imaging* 2017;36:27–39.
6. Väänänen SP, Grassi L, Flivik G, Jurvelin JS, Isaksson H. Generation of 3D shape, density, cortical thickness and finite element mesh of proximal femur from a DXA image. *Med Image Anal* 2015;24:125–134.
7. Bala Y, Zebaze R, Seeman E. Role of cortical bone in bone fragility: Current Opinion in *Rheumatology* 2015;27:406–413.
8. Mayhew PM, Thomas CD, Clement JG, Loveridge N, Beck TJ, Bonfield W, Burgoyne CJ, Reeve J. Relation between age, femoral neck cortical stability, and hip fracture risk. *The Lancet* 2005;366:129–135.
9. Tveit M, Rosengren BE, Nilsson JÅ, Karlsson MK. Exercise in youth: High bone mass, large bone size, and low fracture risk in old age: Elite soccer, bone traits, and fractures. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 2015;25:453–461.
10. Farr JN, Amin S, LeBrasseur NK, Atkinson EJ, Achenbach SJ, McCready LK, Joseph Melton L, Khosla S. Body composition during childhood and adolescence: relations to bone strength and microstructure. *J Clin Endocrinol Metab* 2014;99:4641–4648.
11. Agostinete RR, Fernandes RA, Narciso PH, Maillane-Vanegas S, Werneck AO, Vlachopoulos D. Categorizing 10 Sports According to Bone and Soft Tissue Profiles in Adolescents. *Med Sci Sports Exerc* 2020;52:2673–2681.
12. Stojanović E, Radovanović D, Dalbo VJ, Jakovljević V, Ponorac N, Agostinete RR, Svoboda Z, Scanlan AT. Basketball players possess a higher bone mineral density than matched non-athletes, swimming, soccer, and volleyball athletes: a systematic review and meta-analysis. *Arch Osteoporos* 2020;15:123.

- 447 13. Ubago-Guisado E, Vlachopoulos D, Fatouros IG, Deli CK, Leontsini D, Moreno LA, Courteix D,
448 Gracia-Marco L. Longitudinal determinants of 12-month changes on bone health in adolescent male
449 athletes. *Arch Osteoporos* 2018;13:106.
- 450 14. Nilsson M, Ohlsson C, Mellström D, Lorentzon M. Sport-specific association between exercise
451 loading and the density, geometry, and microstructure of weight-bearing bone in young adult men.
452 *Osteoporos Int* 2013;24:1613–1622.
- 453 15. Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobnic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral
454 content among female elite athletes. *Bone* 2019;
- 455 16. Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, García-Campayo J, Moreno LA,
456 Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. The Effect of Swimming During Childhood and Adolescence on Bone
457 Mineral Density: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2016;46:365–379.
- 458 17. Stanforth D, Lu T, Stults-Kolehmainen MA, Crim BN, Stanforth PR. Bone Mineral Content and
459 Density Among Female NCAA Division I Athletes Across the Competitive Season and Over a Multi-
460 Year Time Frame: *Journal of Strength and Conditioning Research* 2016;30:2828–2838.
- 461 18. Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. Is
462 Bone Tissue Really Affected by Swimming? A Systematic Review (B Smith, Ed.). *PLoS ONE*
463 2013;8:e70119.
- 464 19. Kazakia GJ, Tjong W, Nirody JA, Burghardt AJ, Carballido-Gamio J, Patsch JM, Link T, Feeley
465 BT, Ma CB. The influence of disuse on bone microstructure and mechanics assessed by HR-pQCT. *Bone*
466 2014;63:132–140.
- 467 20. Vico L, van Rietbergen B, Vilayphiou N, Linossier MT, Locrelle H, Normand M, Zouch M,
468 Gerbaix M, Bonnet N, Novikov V, Thomas T, Vassilieva G. Cortical and Trabecular Bone Microstructure
469 Did Not Recover at Weight-Bearing Skeletal Sites and Progressively Deteriorated at Non-Weight-Bearing
470 Sites During the Year Following International Space Station Missions. *J Bone Miner Res* 2017;32:2010–
471 2021.
- 472 21. Ubago-Guisado E, Gómez-Cabello A, Sánchez-Sánchez J, García-Unanue J, Gallardo L.
473 Influence of different sports on bone mass in growing girls. *J Sports Sci* 2015;33:1710–1718.
- 474 22. WHO Study Group on Assessment of Fracture Risk and its Application to Screening for
475 Postmenopausal Osteoporosis (Ed.). *Assessment of fracture risk and its application to screening for*
476 *postmenopausal osteoporosis*. Geneva: World Health Organization; 1994. 129 p.
- 477 23. Lewiecki EM, Binkley N, Morgan SL, Shuhart CR, Camargos BM, Carey JJ, Gordon CM,
478 Jankowski LG, Lee JK, Leslie WD, International Society for Clinical Densitometry. Best Practices for
479 Dual-Energy X-ray Absorptiometry Measurement and Reporting: International Society for Clinical
480 Densitometry Guidance. *J Clin Densitom* 2016;19:127–140.

24. Humbert L, Hazrati Marangalou J, del Río Barquero LM, van Lenthe GH, van Rietbergen B. Technical Note: Cortical thickness and density estimation from clinical CT using a prior thickness-density relationship: Estimating cortical thickness and density from clinical CT. *Medical Physics* 2016;43:1945–1954.
25. Humbert L, Martelli Y, Fonolla R, Steghofer M, Di Gregorio S, Malouf J, Romera J, Barquero LMDR. 3D-DXA: Assessing the Femoral Shape, the Trabecular Macrostructure and the Cortex in 3D from DXA images. *IEEE Trans Med Imaging* 2017;36:27–39.
26. Orduna G, Humbert L, Fonolla R, Romera J, Cos ML, Rial A, Nogués X, Diez-Perez A, Mellibovsky L. Cortical and Trabecular Bone Analysis of Patients With High Bone Mass From the Barcelona Osteoporosis Cohort Using 3-Dimensional Dual-Energy X-ray Absorptiometry: A Case-Control Study. *Journal of Clinical Densitometry* 2018;21:480–484.
27. Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, Carter S, Constantini N, Lebrun C, Meyer N, Sherman R, Steffen K, Budgett R, Ljungqvist A. The IOC consensus statement: beyond the Female Athlete Triad--Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *Br J Sports Med* 2014;48:491–497.
28. Koşar ŞN. Associations of lean and fat mass measures with whole body bone mineral content and bone mineral density in female adolescent weightlifters and swimmers. *The Turkish Journal of Pediatrics* 2016;58:79.
29. Tinto A, Campanella M, Fasano M. Core strengthening and synchronized swimming: TRX® suspension training in young female athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 2017;57:744–751.
30. Andreoli A, Celi M, Volpe SL, Sorge R, Tarantino U. Long-term effect of exercise on bone mineral density and body composition in post-menopausal ex-elite athletes: a retrospective study. *Eur J Clin Nutr* 2012;66:69–74.
31. Bellver M, Drobnic F, Jovell E, Ferrer-Roca V, Abalos X, Del Rio L, Trilla A. Jumping rope and whole-body vibration program effects on bone values in Olympic artistic swimmers. *J Bone Miner Metab* 2021;
32. Lozano-Berges G, Matute-Llorente Á, González-Agüero A, Gómez-Bruton A, Gómez-Cabello A, Vicente-Rodríguez G, Casajús JA. Soccer helps build strong bones during growth: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Pediatr* 2018;177:295–310.
33. Plaza-Carmona M, Vicente-Rodríguez G, Gómez-Cabello A, Martín-García M, Sánchez-Sánchez J, Gallardo L, Ara I. Higher bone mass in prepubertal and peripubertal female footballers. *European Journal of Sport Science* 2016;16:877–883.
34. Egan E, Reilly T, Giacomoni M, Redmond L, Turner C. Bone mineral density among female sports participants. *Bone* 2006;38:227–233.

Figure legends

Figure 1. Colour scale showing the distribution of cortical bone sBMD average differences between the different groups studied, anterior and posterior views. Panel A, football players versus artistic swimmers; B, artistic swimmers versus sedentary controls; C, football players versus sedentary controls. The intense green and blue colour expresses significant differences in cortical bone sBMD between both groups. Right panel: anterior view (Panel A) and posterior view (Panel B and C); Left panel: anterior view (Panel B and C) and posterior view (Panel A).

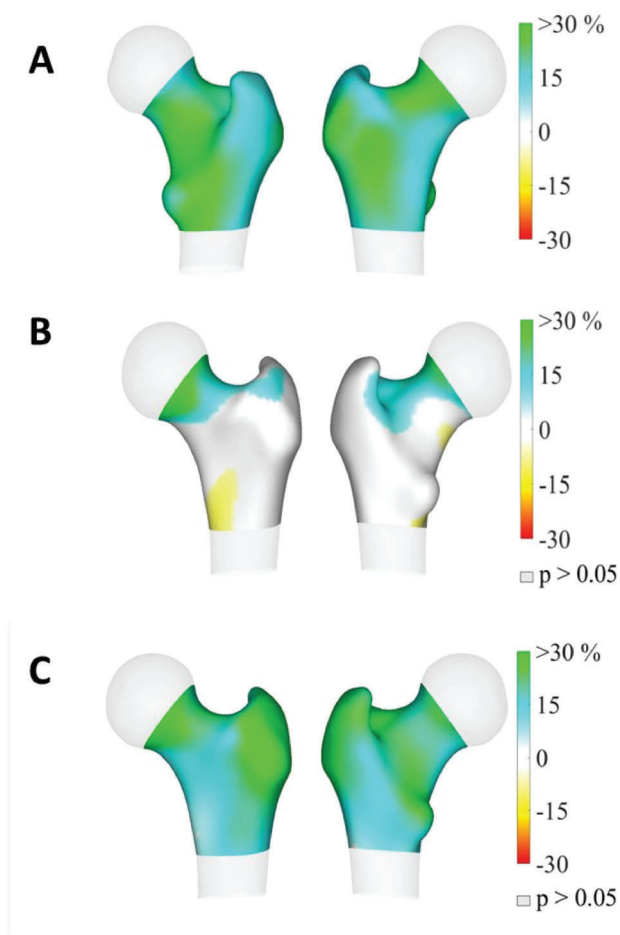


Table 1. Elite female athletes main descriptive data mean (SD) grouped by sport and non-exercise (control) group.

	Non-exercise group (n = 40)	Artistic Swimmers (n = 25)	Football Players (n = 60)
Age (years)	22.0 (3.1)	20.4 (5.3)	21.9 (4.2)
Height (m)	1.62 (7.4)	1.71 (6.4) ^a	1.69 (7.2) ^a
Body mass (Kg)	60.1 (16.7)	56.4 (6.2)	62.6 (9.4) ^b
BMI (Kg/m ²)	22.8 (5.6)	19.4 (1.5) ^a	21.8 (2.2) ^b
FM (Kg)	19.5 (8.7) ^{b,c}	13.8 (2.6)	14.6 (3.9)
FFM (Kg)	37.4 (4.2)	41.1 (4.3) ^a	42.5 (4.5) ^a
FFM arms (Kg)	-	4.5 (0.5)	4.2 (0.6)
FFM legs (Kg)	-	13.5 (1.7)	15.5 (1.6) ^b
Water training (h/week)	-	36	0
Non water training (h/week)	-	3	12-15

BMI: Body Mass Index, FM: Fat Mass, FFM: Fat Free Mass.

^a Significantly greater than non-exercise group, $p < 0.05$

^b Significantly greater than artistic swimming, $p < 0.05$

^c Significantly greater than football, $p < 0.05$

Table 2. Areal bone mineral density (aBMD) in neck, trochanter, shaft and total femur for the three groups studied. Values are expressed in g/cm² as mean (SD). Statistical significant differences (P<0.05) after running a one-way ANOVA test are indicated as *a*: versus non-exercise group; *b*: versus artistic swimmers.

	Non-exercise group (n=40)	Artistic Swimmers (n=25)	Football players (n=60)
Neck	1.010 (0.121)	1.103 (0.131) ^a	1.234 (0.133) ^{ab}
Trochanter	0.781 (0.120)	0.856 (0.147) ^a	1.015 (0.140) ^{ab}
Shaft	1.221 (0.159)	1.176 (0.158)	1.416 (0.176) ^{ab}
Total	1.032 (0.130)	1.034 (0.134)	1.223 (0.146) ^{ab}
Z-score neck	0.3 (1.0)	1.0 (1.1) ^a	2.1 (1.2) ^{ab}
Z-score total	0.2 (1.1)	0.3 (1.1)	1.8 (1.2) ^{ab}

Table 3. Age, height, FFM adjusted areal bone mineral density (aBMD) in neck, trochanter, shaft and total proximal femur for the three groups studied. Values are expressed in g/cm² as mean (SEM). Statistical significant differences (P<0.05) are indicated as *a*:significantly greater than non-exercise group; *b*:significantly greater than artistic swimmers.

	Non-exercise group (n=40)	Artistic swimmers (n=25)	Football players (n=60)
Neck	1.042 (0.024)	1.078 (0.027)	1.224 (0.018) ^{ab}
Trochanter	0.810 (0.025)	0.841 (0.028)	1.012 (0.018) ^{ab}
Shaft	1.244 (0.033)	1.165 (0.036)	1.409 (0.024) ^{ab}
Total	1.049 (0.027)	1.020 (0.030)	1.219 (0.019) ^{ab}

Table 4. Total Proximal Femoral 3D-DXA measurements for each studied group. Cortical, trabecular and integral (cortical plus trabecular) volumetric bone mineral density (vBMD) (mg/cm^3), cortical thickness (mm) and the ratio between density and thickness (surface bone mineral density, sBMD) (mg/cm^2) are expressed as mean (SD). Statistical significant differences ($P<0.05$) after running a one-way ANOVA test are indicated as *a*: versus non-exercise group; *b*: versus artistic swimmers.

	Non-exercise group (n=40)	Artistic Swimmers (n=25)	Football players (n=60)
vBMD Integral (mg/cm^3)	369 (65)	373 (56)	422 (52) ^{ab}
vBMD Trabecular (mg/cm^3)	215 (51)	224 (43)	263 (44) ^{ab}
vBMDCortical (mg/cm^3)	841 (85)	844 (89)	886 (69) ^{ab}
Cortical thickness (mm)	1.87 (0.16)	1.85 (0.15)	2.12 (0.19) ^{ab}
sBMD (mg/cm^2)	158 (23)	156 (21)	188 (22) ^{ab}

Table 5. Age, height, FFM adjusted Total Proximal Femoral 3D-DXA measurements for each studied group. Cortical, trabecular and integral (cortical plus trabecular) volumetric bone mineral density (vBMD) (mg/cm^3), cortical thickness (mm) and the ratio between density and thickness (surface bone mineral density, sBMD) (mg/cm^2) are expressed as mean (SEM). Statistical significant differences ($P<0.05$) are indicated as *a*: versus non-exercise group; *b*: versus artistic swimmers

	Non-exercise group (n=40)	Artistic swimmers (n=25)	Football players (n=60)
vBMD Integral (mg/cm^3)	367 (9.9)	371 (11)	424 (7.3) ^{ab}
vBMD Trabecular (mg/cm^3)	214 (8)	222 (9)	264 (5.8) ^{ab}
vBMDCortical (mg/cm^3)	837 (14)	846 (16)	888 (10.5) ^a
Cortical thickness (mm)	1.936 (0.032) ^b	1.810 (0.036)	2.097 (0.023) ^{ab}
sBMD (mg/cm^2)	162 (4)	153 (4.5)	186 (3) ^{ab}

7. DISCUSIÓN

7.1. Disciplinas deportivas de alto nivel y hueso

La práctica deportiva provoca beneficios sobre la DMO [9,43,44,54,141]. Sin embargo, no todos los deportes tienen el mismo efecto sobre el hueso. En esta tesis se estudia el impacto sobre el hueso de la práctica de diversos deportes en deportistas femeninas del más alto nivel deportivo. La particularidad de esta muestra es que se trata de mujeres deportistas de alto nivel, participantes en campeonatos mundiales y en JJOO, tanto a nivel individual como por equipos, y de las profesionales del primer equipo de fútbol del FC Barcelona, deportistas que precisan de una intensidad, volumen y frecuencia de entrenamientos muy elevado, para alcanzar y mantener la excelencia deportiva. Todas ellas cuentan con un extenso palmarés deportivo. Las nadadoras fueron medallistas en los JJOO de Londres 2012, Rio 2016 y en Mundiales como Barcelona 2013, Budapest 2017. Las nadadoras de natación artística fueron medallistas en los JJOO de Londres 2012, en el Mundial de Barcelona 2013 y en el Mundial de Gwangju 2019. El equipo femenino de waterpolo fue medallista en los JJOO de Londres 2012 y en el Mundial de Barcelona 2013. La selección absoluta femenina de voleibol ocupa el 33º lugar en el ranking europeo. La selección absoluta femenina de hockey hierba fue medallista en el Mundial de Londres 2018. Las jugadoras que se han evaluado del primer equipo femenino del FCB juegan la Liga española, la UEFA y la copa de la Reina, siendo campeonas de esta competición en 2016 y 2017.

En esta tesis doctoral se demuestra que las deportistas de alto nivel agrupadas según practiquen deportes no acuáticos, fútbol, voleibol, hockey hierba, presentan valores de DMO total, por segmentos corporales, en columna lumbar y en región femoral superiores respecto a las deportistas de alto nivel que practican deportes acuáticos, natación, natación artística, waterpolo, y éstas también presentan valores de DMO superiores con respecto a los controles sedentarios.

Mención especial merece la evaluación de las extremidades superiores, en las que la DMO es similar en los deportes acuáticos y no acuáticos pero superior a los controles sedentarios, y la DMO en las extremidades inferiores, que es mayor en los deportes no acuáticos respecto a deportes acuáticos y a los controles sedentarios, siendo en ambos grupos similar.

Al analizar los distintos deportes no acuáticos de forma individual (**Figura 10**), el fútbol, el hockey hierba y el voleibol; y los acuáticos, la natación, la natación artística y el waterpolo, frente a los controles sedentarios, se observa que todos los deportes de alto nivel estudiados presentaron valores superiores de DMO total y por segmentos, excepto para las extremidades inferiores en que los valores de DMO de las nadadoras y de las deportistas de natación artística fueron similares a los controles sedentarios. Así mismo, todas las deportistas presentaron valores superiores de DMO en cuello femoral y en columna lumbar, excepto la natación artística que mostró valores similares a los controles sedentarios. La columna lumbar y el cuello femoral son las localizaciones indicadas por la OMS como las más útiles para diagnosticar osteopenia y como las zonas anatómicas más susceptibles de padecer fracturas óseas [133]. Las jugadoras de waterpolo presentaron los mayores valores de DMO en columna lumbar y en todos los segmentos de fémur entre las deportistas de agua, mientras que las jugadoras de hockey hierba presentaron los valores inferiores de DMO en columna lumbar y en fémur proximal entre las deportistas no acuáticas. En las jugadoras de waterpolo podría explicarse por la mayor cantidad de trabajo fuera del agua; y en las jugadoras de hockey hierba por el menor impacto óseo en las jugadas respecto a otros deportes con impacto.

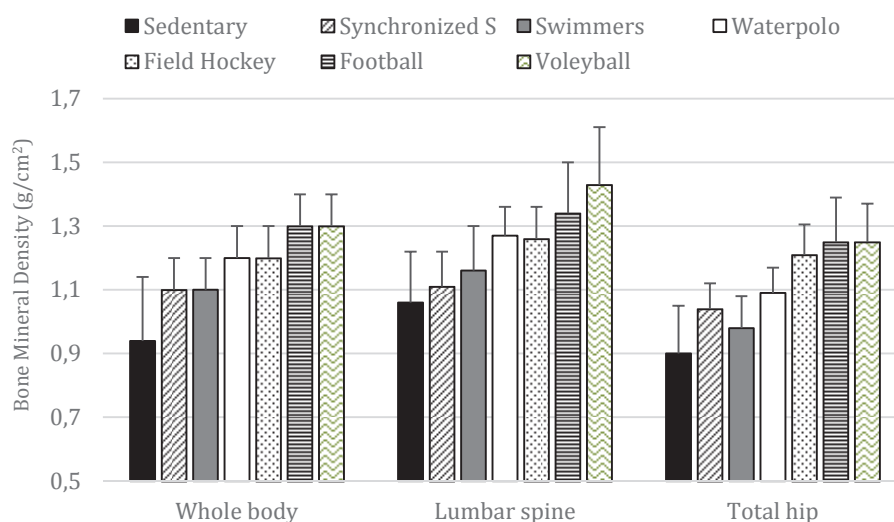


Figura 10. DMO total, columna lumbar y región femoral en deportistas femeninas de élite, por deportes.

Estos datos constituyen un hallazgo que puede tener importancia en la prevención de la osteoporosis. En estudios recientes [50] y en revisiones sistemáticas [51] se muestra un efecto neutro de la natación sobre el hueso, similar al de los controles sedentarios y menor que los deportes de impacto. A pesar de que la natación no afecta de forma tan negativa al hueso, tampoco es el deporte más idóneo para mejorar el hueso, puesto que es un deporte que se practica en un medio sin gravedad y sin impacto.

7.1.1. DMO total y por segmentos

El ejercicio físico tiene un efecto formador de hueso debido en su mayor parte a la carga mecánica aplicada sobre el mismo. Es el efecto mecanostato de Frost [60]. El proceso de formación y remodelado óseo se adapta a las nuevas demandas y como consecuencia la DMO y el CMO se modifican [56] en función del deporte practicado, como se demuestra en este estudio. Según la teoría del mecanostato, el esqueleto se adapta a estas cargas, incrementando la calidad y fuerza del hueso. Así mismo, muchos estudios refieren una asociación evidente entre CMO, DMO y masa magra (*Fat Free Mass* o FFM) [65–67]. Parece ser que la masa magra y la masa apendicular influyen en la DMO y la CMO en niños y adolescentes obesos [65] y a lo largo de la vida [66]. Estudios muestran que el incremento en fuerza muscular, medido como FFM, precede al incremento en CMO “*the muscle-bone unit*” [67]. La FM y en particular la FFM influyen en la DMO y CMO, en mujeres adolescentes, aunque estas asociaciones difieren en función del deporte practicado [142]. Como se puede apreciar en esta tesis, la masa magra y el tipo de deporte explican la DMO y el CMO, tanto en los deportes acuáticos como en los no-acuáticos, de acuerdo con la literatura [142,143]. Las nadadoras y las nadadoras de natación artística presentan valores de masa magra total superiores a los controles sedentarios.

Las nadadoras presentan valores de DMO en extremidades superiores similar al resto de deportistas, pero superior a los controles sedentarios, en línea con la literatura [107]. La mayor DMO en brazos en nadadoras puede ser debida a la combinación de brazadas propulsivas y de resistencia contra el agua [51]. El trabajo muscular en brazos durante la brazada protegería al hueso [144] con una mayor masa magra en brazos debida a las largas rutinas en la natación. Sin embargo, esta mayor masa magra en brazos, superior en nadadoras respecto a las jugadoras de fútbol y hockey hierba, no

se corresponde con una mayor DMO en brazos en nadadoras respecto al resto de deportistas estudiadas, en el presente estudio. En este sentido y con el fin de caracterizar la importancia de este resultado, es interesante recalcar que las nadadoras de élite nadan entre 16.000 y 25.000 brazadas en una rutina semanal, de las que alrededor del 80% son en estilo de crol. Así mismo, en la natación, la DMO en brazos puede ser debida a la fuerza muscular aplicada en las extremidades superiores necesaria para nadar destacando que las extremidades superiores son una parte del cuerpo no utilizada en la vida diaria por la población general. Otros autores [144] argumentan que las cargas de entrenamiento sin impacto afectan de forma negativa a la DMO principalmente en las extremidades inferiores, de forma independiente al efecto positivo de la masa muscular en extremidades inferiores, de acuerdo con el presente estudio, en que las nadadoras junto con las nadadoras de natación artística presentan los menores valores de DMO en extremidades inferiores y similares a la de los controles sedentarios.

Si se considera que las participantes del estudio tienen un tamaño corporal distinto según los deportes practicados, debido a la selección para cada modalidad deportiva, las comparaciones en DMO se deberán ver afectadas. Por lo tanto, es importante ajustar por tamaño corporal las variables óseas como se ha realizado en el presente estudio y en línea con la literatura existente [110]. Las variables de composición corporal, FFM (masa magra o libre de grasa) y la FM (masa grasa) en menor grado también pueden afectar las variables óseas y dependen del deporte practicado [110]. Estudios recientes [40,71] identifican a los mediadores que afectan de forma más relevante a la DMO en función del deporte practicado entre ellos la FFM, en línea con el presente estudio.

Las jugadoras de waterpolo y voleibol presentan los valores más altos de masa magra o FFM en extremidades superiores e inferiores respectivamente en comparación con el resto de las deportistas y controles sedentarios, que se corresponde en este caso con una mayor DMO en extremidades inferiores junto con las jugadoras de fútbol. Así mismo, la FFM total y la masa apendicular (AM) son superiores en waterpolo y voleibol. Se podría explicar por el tamaño corporal superior de las jugadoras de waterpolo y de voleibol con respecto al resto de deportistas, pues es una característica física que predispone a un individuo a practicar un deporte en concreto (altura,

estructura y composición corporales).

Las jugadoras de waterpolo son las que presentan valores de DMO total similares al fútbol, hockey hierba y voleibol, sin ajustar las variables, lo que beneficia la DMO del grupo de deportes acuáticos, que puede deberse a su mayor FFM y entrenamiento fuera del agua. El valor de la FFM en el waterpolo se debe en su mayor parte al músculo esquelético, elemento generador de fuerza para las situaciones de juego en que se transmiten y reciben impactos. Las jugadoras de waterpolo se comportan más como deportistas no-acuáticas en relación a su entrenamiento fuera del agua.

Al ajustar la DMO a otras variables como la edad, la talla y la FFM, la diferencia estadística desaparece entre las jugadoras de waterpolo y voleibol en extremidades superiores e inferiores respecto al resto de deportes y controles sedentarios, y se evidencian diferencias estadísticamente significativas en DMO total y en extremidades inferiores en las jugadoras de fútbol respecto al resto de deportistas y controles sedentarios. El reciente estudio realizado por Agostinete et al (2020) [110] con deportistas adolescentes de distintos deportes a nivel de clubs deportivos corrobora nuestros resultados. En el mencionado estudio los jugadores de fútbol ocupan el primer lugar en valores de DMO total y los nadadores ocupan el último lugar [110]. La ausencia de GRF durante el entrenamiento de natación no beneficia la DMO total. En el estudio mencionado, los jugadores de futbol mostraron los mayores valores de FFM total, mientras que en nuestro estudio los valores mayores de FFM total se observaron en las jugadoras de waterpolo y voleibol. El mismo grupo investigador [107] estudió el efecto de distintas disciplinas deportivas de impacto (judo, karate, baloncesto) y sin impacto (natación) sobre la DMO después de 18 meses de su práctica deportiva habitual observando valores superiores de DMO total y por segmentos en los deportes de impacto respecto a la natación, coincidiendo con el presente estudio. Sin embargo, observó menores valores de DMO total y en extremidades inferiores en nadadores respecto al grupo control, contrario al presente estudio.

7.1.2. DMO en columna lumbar y cuello femoral

Los valores de DMO en el fémur y la columna lumbar fueron más elevados en los deportes no acuáticos. La intensidad del impacto (carga de alto impacto) en deportes como el voleibol y la distribución de la carga de impacto en varias direcciones en

deportes como el fútbol (carga de impacto multidireccional) aumentan la DMO [9]. Sin embargo, fútbol y voleibol, aunque son deportes osteogénicos, muestran un patrón de actividad distinto. Las jugadoras de voleibol y de fútbol mostraron los mayores valores de DMO en fémur y el voleibol presentó los valores más elevados en la columna lumbar acorde con la literatura [110]. Las futbolistas profesionales mostraron los valores más elevados en piernas, fémur (diáfisis) y pelvis, en línea con un estudio realizado en mujeres adolescentes jugadoras de fútbol sólo 2h./semana, y de forma más evidente en la etapa prepuberal [145]. Estos valores elevados de DMO en extremidades inferiores podrían ser atribuidas a que en edades más adultas los jugadores llevan más años practicando y se han expuesto a más cargas de impacto durante más tiempo.

Estos hallazgos muestran que el fútbol es un deporte con características biomecánicas especiales: intermitente, con patrones de carga variables, estrés repetido por la carrera continua, con cambios de dirección, velocidad, saltos y chutes que ofrece un estrés mecánico adicional en las extremidades inferiores debido a la fuerza de reacción contra el suelo [109], lo que facilita la acumulación de mineral óseo, desde la cortical hasta la trabecular en toda su dimensión funcional. El voleibol, por otra parte, es un deporte con movimientos largos, rápidos y cortos, tanto en acciones defensivas como ofensivas para ajustar la posición del cuerpo a la posición del balón en un corto período de tiempo, ya que el balón tarda 1.2-1.4 segundos en pasar de un lado de la cancha al otro [120]. El salto vertical en la mayor parte de las acciones, con una GRF de 4.3-8.9 su peso corporal, el cambio de dirección, el trabajo de velocidad y la potencia parecen beneficiosos para la formación de un hueso adecuado desde la infancia hasta la edad adulta, como ocurre con la gimnasia artística o el balonmano [146–148]. Sin embargo, el voleibol es menos osteogénico que el baloncesto cuyos jugadores se mueven por todo el campo de juego, con acciones multidireccionales, movimientos de alta intensidad con aceleración, desaceleración, sprint y saltos triplanares de 0.1-2.6 veces su peso corporal [123]. Algunos autores concluyen que las cargas deportivas variables, como en el baloncesto, son más efectivas para incrementar la DMO y el CMO que otras actividades más estresantes como el paracaidismo con cargas constantes en un sitio concreto [149]. Parece que el hueso responde más a ejercicios dinámicos y no repetitivos en la dirección de la carga, como el baloncesto.

Hay algún estudio [150] donde se muestra que los saltos breves y el ejercicio diario durante 6 meses aumentan la DMO en cuello femoral, como en este estudio en que las deportistas practican su especialidad deportiva desde la infancia. En una revisión sistemática reciente [51], niños y adolescentes nadadores de ambos sexos presentaron valores similares de DMO total en el fémur y columna lumbar respecto a los sujetos control y valores menores que los deportes de impacto. En esta tesis, al ajustar los valores de DMO por edad, talla y FFM en columna lumbar y fémur en todas las regiones, las nadadoras y nadadores de natación artística muestran valores superiores a los controles sedentarios, sin embargo, desaparecen las diferencias estadísticas en columna lumbar para ambas disciplinas deportivas y en cuello femoral para las nadadoras. Parece ser que la natación practicada de forma habitual tiene un efecto neutro sobre la DMO en niños y adolescentes [51], y que estas diferencias aumentan con la edad ya que los deportistas de deportes impacto continúan con su práctica deportiva, situación que favorece la mejora de la DMO. Por el contrario, los deportistas de deportes acuáticos continúan entrenando en un medio que no tiene un efecto mecánico positivo sobre el hueso, y esta diferencia es más evidente al inicio de la edad adulta. Las deportistas incluidas en el presente estudio son casi adultas, entrenan una media de 12-15h. / semana, a elevada intensidad y su edad biológica no se ve afectada por factores hormonales ni de maduración, ya que son adultas sin trastornos hormonales ni menstruales (criterios de inclusión).

Un estudio realizado con deportistas universitarios [122], población intermedia entre el presente estudio y el realizado por Gómez Bruton [51], concluye que los deportes de impacto tienen valores de DMO y CMO más elevados que los deportes sin impacto. Así mismo, estos autores observan que la única diferencia entre controles y nadadores es que estos últimos presentan mayor DMO en los brazos, pero menores valores de DMO en columna lumbar y cuerpo total que los controles sedentarios, a diferencia de nuestros hallazgos que presentan valores de DMO en brazos, DMO total y en columna lumbar similares a los controles sedentarios, una vez ajustados los valores por edad, peso y FFM, que podría ser atribuible al entrenamiento fuera del agua.

7.1.3. Natación artística vs natación

Las nadadoras de natación artística son el grupo que presenta menor DMO por segmentos y columna lumbar, excepto en fémur que es ligeramente superior a las nadadoras. Esta mayor DMO en fémur en nadadoras de natación artística podría ser debida a que la mayor parte de los desplazamientos en esta disciplina se realizan a partir de la patada “eggbeater” y de diferentes tipos de remadas, implicando por lo tanto principalmente a la articulación de la cadera. La patada “eggbeater” se utiliza principalmente para mantener una posición vertical y desplazarlo en cualquier dirección con la mayor parte posible del cuerpo fuera del agua. Para que esta patada sea efectiva, se realiza un trabajo importante de la musculatura de la cadera, manteniendo una buena flexión y abducción de cadera, asegurando un buen apoyo cercano a la superficie del agua y realizando un correcto batido circular utilizando la articulación de la rodilla y del pie. Las diferencias en DMO en columna lumbar en nadadoras respecto a las nadadoras de natación artística podría atribuirse a diferencias de entrenamiento relacionadas con la mayor carga mecánica al empujar repetidamente contra la pared de la piscina durante los virajes en la natación de velocidad [99] y también puede estar relacionada con el trabajo de entrenamiento fuera del agua. El entrenamiento de natación artística implica la ejecución de ejercicios repetidos con una variedad de movimientos de brazos y piernas para acelerar, desacelerar, rotar, girar para sacar el cuerpo del agua e incluso saltar, que podría tener un efecto óseo positivo en la columna. Así, las deportistas de natación artística deberían desarrollar una gran masa muscular en las extremidades que podría incrementar su masa ósea, situación que sólo ocurre en la DMO de cuello femoral. Tres horas a la semana de entrenamiento fuera del agua parece suficiente para que las nadadoras de natación artística mantengan su DMO. Como referencia al respecto, la OMS recomienda al menos 150 minutos de actividad física, de intensidad moderada a vigorosa por semana para mejorar la salud en general de la población. Para mejorar la salud ósea y alcanzar un mayor pico de masa ósea, la ACSM [151], recomienda 2-5 días/semana de actividad física que incluya ejercicios de fuerza muscular y de impacto durante 5-6 meses: ejercicios de fuerza con 10-12 repeticiones, 3 días/semana, con ejercicios de impacto 2 días/semana, unos 50 saltos, 10 minutos/día y ejercicio aeróbico de intensidad moderada 3-5 días/semana, 60 minutos/día.

En la natación, la mayoría de movimientos se producen en el plano horizontal, la fuerza se realiza con las extremidades superiores, reduciendo la fuerza en extremidades inferiores que sirven solo para estabilizar. En el presente estudio, la FFM en brazos y piernas, así como la DMO en brazos y piernas en nadadoras es superior a las nadadoras de natación artística, aunque no se aprecian diferencias significativas, que podría ser atribuido al entrenamiento fuera del agua.

7.2. Natación artística y hueso

Al observar que las nadadoras de carreras y las nadadoras de natación artística presentaban valores de DMO inferiores respecto al resto de deportistas de élite, se decidió implementar un programa de ejercicio de impacto durante 22 semanas en el segundo grupo de deportistas durante una temporada deportiva para objetivar si se podían mejorar los resultados de la DMO de la temporada anterior, en la que sólo realizaban el entrenamiento habitual de natación artística.

El principal hallazgo fue que después de 22 semanas de introducir un programa de salto a la cuerda y de plataforma vibratoria (WBV) a su entrenamiento habitual, las nadadoras de natación artística presentaron un incremento en DMO en columna lumbar (2.1%) y en cuello femoral (2.4%) y una disminución de masa grasa en extremidades inferiores (10.2%) en comparación con el mismo grupo de deportistas durante la 1ª temporada, sin programa de intervención. Estos resultados están en línea con un estudio previo realizado en nadadoras adolescentes japonesas de natación artística donde los valores de DMO tendían a ser más bajos en las deportistas que en las niñas sedentarias, para miembros inferiores y vértebras lumbares [152]. Estos hallazgos son de gran relevancia, como ya se ha indicado, puesto que la DMO en la columna lumbar y en el fémur son las dos medidas de diagnóstico de osteopenia según la clasificación de la OMS y, en especial, en referencia a las localizaciones más susceptibles de fractura osteoporótica [133]. Se podría atribuir la ganancia en la DMO en columna lumbar y cuello femoral durante la 2ª temporada después del programa de intervención, al crecimiento y desarrollo normales, ya que el pico de masa ósea se alcanza a los 20 años. Sin embargo, el hecho de que la DMO no aumentase durante la primera temporada, sin entrenamiento de impacto, nos lleva a considerar con

seriedad el efecto positivo del programa de intervención propuesto sobre la DMO de columna lumbar y cuello femoral.

7.3. Pico de masa ósea alcanzado

El presente estudio en deportistas de natación artística cuantifica la carga de impacto del salto a la cuerda, en el contexto de actividades osteogénicas en mujeres. Las nadadoras de natación artística del presente estudio saltaron una media de lo que correspondería a 3.97 veces su peso corporal. En relación con estos hallazgos, otros estudios consideran que para proporcionar una ganancia de densidad mineral ósea femoral en mujeres pre menopaúsicas, las actividades deben conseguir picos de fuerza vertical por encima de 3 veces el peso corporal [75]. Por lo tanto, en línea con la literatura existente, podemos considerar el salto a la cuerda como una actividad de un impacto y frecuencia adecuada al objetivo osteogénico, que se puede realizar sin dedicar demasiado tiempo, todos los días y que se puede incorporar a la rutina diaria de un nadador sin menoscabar su entrenamiento específico [9,79,80].

Los principales factores que determinan la salud ósea en el adulto son el pico de masa ósea alcanzado y la tasa de pérdida ósea con la edad. Por lo tanto, maximizar la DMO en la mujer premenopáusica, como se ha realizado en este trabajo, es una estrategia crítica para la prevención de la osteoporosis [9]. En las nadadoras, la baja adquisición de DMO y / o el aumento de la resorción ósea pueden ocurrir de manera silente durante los años de entrenamiento en el agua, alcanzando niveles de osteopenia, sin desarrollar una fractura por estrés, durante el periodo competitivo [57]. Debido a que el 60% del riesgo de osteoporosis está relacionado con la cantidad de masa ósea acumulada al principio de la edad adulta, es necesario mantener un alto índice de sospecha para identificar y evaluar a los deportistas con riesgo de baja DMO (nadadoras de natación artística durante la primera temporada). En el presente estudio, las nadadoras de natación artística no solo no perdieron hueso, sino que ganaron un 2% en DMO después de un programa de intervención relativamente corto de 22 semanas. Los resultados del presente trabajo coincidieron con un metaanálisis [10], basado en los cambios anuales estimados en la DMO en mujeres premenopáusicas, que observó un efecto positivo del ejercicio de impacto del 1.5% en columna vertebral y del 0.9% en el cuello femoral. El mencionado estudio mostró que

el ejercicio regular puede retrasar o detener la pérdida ósea en las mujeres [10]. Según una simulación por ordenador, un aumento del 10% en la masa ósea máxima en adultos jóvenes podría reducir el riesgo de fractura en etapas posteriores de la vida en un 50% y retrasar la aparición de la osteoporosis en 13 años [11]. Estos resultados orientan a que las nadadoras de natación artística deberían seguir un programa suplementario de entrenamiento de impacto, similar al realizado en este estudio, a lo largo de su vida deportiva, con el fin de asegurar una ganancia de DMO suficiente para retrasar la aparición de la osteoporosis.

Durante la primera temporada, en nuestro estudio las nadadoras presentaron valores bajos de DMO de cuerpo total y por segmentos, sin cambios significativos entre ambas evaluaciones. Estos resultados se deben, sin duda, a que las participantes en el estudio fueron sometidas a la carga habitual de entrenamiento de alto nivel en natación artística, que consiste en más de 30 horas de entrenamiento en el agua por semana, sin actividades de impacto fuera del agua. Estos hallazgos están de acuerdo con el primer estudio, que responde al primer objetivo, realizado por nuestro grupo en el que las nadadoras de natación artística tenían valores similares a los controles sedentarios en DMO total y por segmentos (miembros inferiores y superiores) al ajustar las variables óseas por edad, talla y FFM [101]. Las nadadoras de natación artística practican regularmente en un medio de baja gravedad, como los astronautas, desde una edad temprana y suelen dedicar poco tiempo a las actividades de impacto fuera del agua [153]. La natación reduce las fuerzas gravitacionales sobre la estructura ósea [118], que se consideran esenciales para aumentar/mantener la densidad ósea. En las nadadoras de natación artística, a nivel de la élite, el tiempo de entrenamiento en el agua es mayor que en otros deportes acuáticos y se mantiene durante muchos años [97,101], en línea con el presente estudio. La relación negativa que existe entre el tiempo de entrenamiento en el agua y las ganancias óseas es motivo de preocupación puesto que sus efectos podrían ser perjudiciales a largo plazo [154]. El presente estudio mostró signos prometedores de mejora del estado óseo, a pesar de la limitada posibilidad de introducir programas nuevos de entrenamiento y prolongados en la rutina de entrenamiento habitual. El salto a la cuerda y la plataforma vibratoria son intervenciones que ocupan poco tiempo, sólo 20 minutos / día, dos veces por semana, resultando suficientes, pues programas de entrenamiento semanales con este fin y de

esta calidad producen los mismos beneficios que los programas semanales más frecuentes. Además, dada su intensidad y características, no perjudican en las habilidades motoras aprendidas para el deporte practicado [155]. Estudios anteriores sugieren que las actividades de alto impacto en nadadores podrían ayudar a aumentar sus valores de DMO y CMO [49]. En este estudio se introduce el uso de la estimulación con la plataforma vibratoria con fines terapéuticos y de entrenamiento, para aumentar la fuerza muscular y las adaptaciones neuromusculares, para mejorar el rendimiento y prevenir lesiones [92]. Sin embargo, el uso de la WBV como elemento osteogénico no está definido. En un estudio similar realizado en ciclistas de ruta, bien entrenados, mostró que 10 semanas de entrenamiento con WBV aumentaron la DMO de la cadera y preservaron la DMO de la columna [93]. Por el contrario, en otros estudios realizados en nadadores, la WBV no afectó la DMO, CMO y FFM [156–158]. Los autores argumentan que la buena condición física de los sujetos jóvenes, con un sistema musculoesquelético joven, no tiene necesidad de adaptarse a los protocolos de la WBV para mejorar su DMO [158]. Aunque quizás el posible efecto positivo de los regímenes de WBV utilizados en los nadadores de los estudios se ve afectado por el trabajo en el agua, más duradero e intenso. Una aportación del presente estudio es que los protocolos de WBV deberían diseñarse específicamente para la población de sujetos investigada. El entrenamiento con WBV podría utilizarse como un tipo de ejercicio seguro, menos fatigante y que consume menos tiempo para los pacientes, en lugar de otras intervenciones más exigentes [159]. Los resultados de este estudio son más prometedores en cuanto a capacidad osteogénica del programa de intervención quizás porque ninguno de los estudios mencionados combina salto a la cuerda con WBV y difiere de nuestro estudio en tiempo, frecuencia semanal, edad, tipo de deporte y nivel deportivo de los sujetos; puesto que la mayoría de los estudios realizados en deportes acuáticos se realizaron en nadadores [156,157]. La discrepancia entre nadadoras de carreras y nadadoras de natación artística, que ya se ha mencionado previamente en esta tesis, podría atribuirse a las diferencias de entrenamiento relacionadas con la mayor carga mecánica producida por diversas causas, como el empuje repetido contra la pared de la piscina en los virajes, en la natación [99], las brazadas de propulsión y resistencia contra el agua, que podrían influir en la DMO de columna lumbar [51] y quizás también a los diferentes modelos de

ejercicios y horas invertidas en entrenamiento fuera del agua. El entrenamiento de natación artística implica unos gestos biomecánicos específicos, una patada característica para mantener el cuerpo a flote durante los desplazamientos en el agua “eggbeater” que puede influir en la DMO de fémur. Hay que recordar que el hecho de tocar el suelo de la piscina en una competición supone una penalización para el equipo de natación artística [96], por lo que el impacto del salto contra el suelo no existe.

Es cierto que no se puede atribuir por completo la ganancia ósea observada al programa de ejercicio añadido, sin embargo, se puede apreciar una mejora en las variables óseas después del programa de intervención. Por lo tanto, se destaca que estos hallazgos son importantes al considerar un entrenamiento complementario para mejorar la DMO fuera del agua. Una gran aportación del programa de ejercicio realizado en el presente estudio es que este programa de ejercicios es breve y permite a los entrenadores incluirlo en sus sesiones de entrenamiento regulares para proteger la salud ósea.

7.4. Hueso y composición corporal

La apariencia delgada y atlética es muy importante en la natación artística [97]. La disminución de la masa grasa de los miembros inferiores después del programa de intervención es importante, aunque no se encontró ninguna mejora en la masa libre de grasa (FFM) durante el mismo, de acuerdo con otros estudios realizados en nadadores altamente entrenados [156], solo con WBV. De hecho, las amplitudes de alta vibración (4 mm) parecen producir mejores adaptaciones para la hipertrofia, mejorando la FFM [160], a diferencia de los hallazgos del presente estudio. El efecto osteogénico del ejercicio se debe principalmente al impacto y la carga mecánica aplicada al hueso (efecto mecanostato) [60], sin embargo, se conoce que la FFM también influye en la DMO, como ya se ha mencionado en párrafos anteriores y es un predictor clave del recambio óseo [40,142,143], en línea con la baja pero positiva correlación entre la DMO total y la FFM, observada en el presente estudio. Los ejercicios isométricos adicionales realizados en la plataforma podrían haber mejorado significativamente la FFM. Por otro lado, algunos estudios mostraron que incluso con mejoras significativas de FFM, debido al entrenamiento de natación, la estructura ósea de los nadadores no se benefició, lo que denota que el efecto osteogénico relacionado

con la contracción muscular parece más efectivo cuando se realiza en ambientes con normogravedad [161].

7.5. Metabolismo óseo: calcio y vitamina D

Como se describe en los resultados, los marcadores bioquímicos del metabolismo óseo como calcio, fósforo, vitamina D₃ y PTH se hallaron en el rango de normalidad. La vitamina D₃ se obtuvo durante el entrenamiento en piscina interior, septiembre / octubre. La medición de vitamina D₃ posterior a la intervención se realizó en mayo / junio, cuando el entrenamiento al aire libre es más importante. Los atletas suelen presentar niveles variables de vitamina D₃ dependiendo del tiempo que entrenen en interiores / exteriores (durante la luz solar máxima) [25]. El tiempo de exposición al aire libre no es muy diferente en ambos períodos, aunque es cierto que la exposición indirecta al sol durante el entrenamiento en piscina exterior puede ser la causa de un aumento de la concentración plasmática de vitamina D₃. Sin embargo, teniendo en cuenta que las concentraciones séricas más ventajosas de D₃ para la mineralización ósea [39] comienzan en 75 nmol / L (30 ng / mL), y las mejores están entre 90 y 100 nmol / L (36-40 ng / mL), se puede considerar que ambos periodos se encuentran en el rango de valores funcionales óptimos (cambio de 100 a 125 nmol / L) lo que no explica por sí sólo el aumento observado de la DMO. Los parámetros sanguíneos bioquímicos tienen una relación con los valores óseos [26], en línea con el presente estudio, con una correlación positiva entre la DMO total y la Vitamina D₃. La combinación estudiada en esta tesis, que incluye el análisis óseo por DXA y los marcadores bioquímicos proporciona una visión más completa de los cambios en los valores óseos [40] que se podría trasladar en la clínica en actuaciones precoces.

7.6. Del entrenamiento y práctica de alto rendimiento a la comunidad

Analizados los datos de los estudios de DMO en las practicantes de deportes acuáticos, puede trasladarse una cierta preocupación en individuos considerados en buen estado de salud general actual, pero quizás con una deficiente salud ósea para el futuro. Por esa razón se considera oportuno identificar el estado de salud ósea de ex deportistas premenopáusicas de las mujeres que fueron nadadoras de natación artística, en la actualidad ya retiradas. El principal hallazgo fue que la exposición a largo plazo al entrenamiento de natación artística de alto nivel a una edad más temprana no fue tan

negativo como se esperaba y los datos que se obtuvieron ofrecieron valores de DMO total Z-score y T-score, de DMO lumbar y DMO Z-score en cuello femoral mayores que los de la población control de las mismas características de edad y medidas antropométricas. La mejora específica en las ex nadadoras de natación artística en estas áreas es muy posible que se deba al hecho de que la natación artística implica la ejecución de ejercicios repetidos con una participación importante de los músculos de la cintura abdominal y de la cadera [162]. El estudio de Tveit [47] muestra que después de 20 a 29 años de retirada del deporte, los ex jugadores de fútbol masculinos tenían una DMO total y en piernas mayor que los controles sedentarios, similar al estudio de Mantovani [46], y en línea con el presente estudio para la DMO total. Estos resultados se relacionaron con las características biomecánicas especiales del fútbol como ya se ha comentado, con cambios de dirección, velocidad, salto y patadas que ofrecen un estrés mecánico adicional en las extremidades inferiores, diferente a nuestras ex nadadoras de artística. Estos resultados son similares a los resultados observados en la primera parte de esta tesis, en deportistas jóvenes de alto nivel.

Con respecto a la composición corporal, las ex nadadoras de natación artística presentaron una mayor FFM en miembros superiores e inferiores y una menor FM total y en tronco comparado con el grupo control sedentario, en línea con estudios existentes en la literatura [46,154]. Es conocida que la participación deportiva en edades tempranas afecta de forma positiva en la ganancia de masa muscular, principalmente en la adolescencia, y esta ganancia podría afectar a la DMO a lo largo de la vida, en línea con estas mujeres deportistas. Sin embargo, aún disponiendo de unos resultados estimulantes a favor de la natación artística para los valores de columna lumbar y cuello femoral, los valores de DMO total, miembros superiores e inferiores fueron similares a los del grupo de controles sedentarias. En definitiva, el presente estudio muestra que la participación en deportes acuáticos de alto nivel en edades tempranas si bien no mejora la calidad del hueso, no es tan adverso para el hueso en la edad adulta como se evidencia en estudios previos en nadadores jóvenes [50,51,104].

7.7. Tasa de pérdida ósea

Como ya ha sido mencionado previamente, uno de los principales factores que

determinan la salud ósea del adulto es la tasa de pérdida ósea con la edad. Las mujeres son más susceptibles a la pérdida de masa ósea durante la menopausia, principalmente debido a cambios hormonales significativos y una disminución en la solicitud de ejercicio. Los programas de intervención deben tener como objetivo promover la actividad física en todas las etapas de la vida [163,164]. Es por ello que en una segunda fase y gracias a los conocimientos obtenidos en estudios previos de esta misma tesis, se diseñó un programa de salto que coincidió con el confinamiento por la pandemia de COVID-19. El programa consistía en múltiples saltos, counter movement jump (CMJ) de alto impacto con aterrizaje y rebote. Las magnitudes del PVRF (4.08 el peso corporal) y el ILR (45.86 peso corporal/ seg.) para los saltos reactivos después del primer aterrizaje del CMJ, exceden los umbrales osteogénicos definidos previamente demostrados para mejorar la masa ósea en sitios clínicamente relevantes para mujeres pre-menopáusicas. (> 3 veces el peso corporal y 43 peso corporal/ seg.). Se observó una disminución en el CMO del cuello femoral en el grupo sin intervención, mientras que el grupo CMJ mostró un aumento en la DMO Z-score de la columna lumbar, en línea con la literatura [87]. Estas mejoras pueden estar relacionadas con los saltos de alto impacto realizados durante el programa de intervención. En la misma línea que estos resultados, estudios previos con saltos de corta duración y alto impacto, similares al presente estudio encontraron una mejoría en la DMO en el cuello femoral [165–167]. El seguimiento y cumplimiento del programa de intervención no fue fácil durante la pandemia, la incertidumbre al respecto de la duración del periodo de cierre y la limitación de la actividad (“*lock-down*”), está en línea con un estudio que demostró que la población adulta española disminuyó la actividad física diaria y aumentó el tiempo de sedentarismo durante la pandemia por COVID-19, aún así el cumplimiento fue del 92%. El seguimiento se realizó con un cuestionario semanal que se mandó por correo electrónico y que fue cumplimentado por las participantes del estudio, en el que se recogían los saltos realizados. El confinamiento y el distanciamiento social causado por la COVID-19 ha influido en el comportamiento de los ciudadanos. Las actividades físicas vigorosas y el tiempo de caminar disminuyeron en un 16.8% y 58.2%, respectivamente, mientras que el tiempo sedentario aumentó en un 23.8% [168]. Un programa de salto, con cargas elevadas (más de 3 veces el peso corporal), multidireccionales, corto, con pocas repeticiones y periodos de descanso entre los

saltos parece ser efectivo en la respuesta osteogénica y puede ser introducido en la vida diaria.

7.8. Una nueva técnica de medida de la estructura del hueso

Con la finalidad de seguir estudiando el hueso y su estructura, se utilizó un nuevo software 3D-DXA para comparar diferentes compartimentos óseos en el fémur proximal entre jugadoras de fútbol de élite (deporte con impacto) y nadadoras de natación artística (deporte sin impacto), así como un grupo sin ejercicio. Las futbolistas muestran valores de DMO de fémur proximal superiores a los de las nadadoras de natación artística y el grupo no deportista, en línea con el primer estudio presentado en esta tesis realizado en deportistas altamente entrenadas utilizando DXA [101]. Con el nuevo método de medida, las futbolistas también presentan mayor vDMO trabecular, grosor cortical y sDMO en comparación con las nadadoras de natación artística, en línea con un estudio realizado en futbolistas, deporte con impacto multidireccional [119]. Es interesante comentar el hallazgo de que la vDMO trabecular y el grosor cortical de las nadadoras de natación artística es similar al de los astronautas, cuando vuelven del espacio [73]. En éstos, el grosor y la densidad del hueso cortical se recupera después del regreso a la Tierra, pero no la porosidad cortical y el hueso trabecular, lo que podría quizás también suceder en las mujeres deportistas de élite que practican un deporte sin carga. Esta es una inquietud y una línea de investigación que sin duda recibirá respuestas gracias a las nuevas y futuras herramientas y métodos de valoración.

La razón de que las nadadoras de natación artística presenten valores óseos significativamente más bajos que los de las jugadoras de fútbol y similares al grupo sin ejercicio, excepto para la vDMO cortical puede deberse a que las nadadoras de artística practican su deporte en un medio hipo gravitacional, como los astronautas, desde edades tempranas, muchas desde la infancia, y durante muchos años hasta la edad adulta, realizando mayor cantidad de horas de entrenamiento acuático por semana que otras deportistas de agua [101,128].

El fútbol mostró valores óseos mayores que las nadadoras de natación artística y los controles. El gesto biomecánico en el fútbol con impactos y cambios de dirección ofrece un estrés mecánico adicional en las extremidades inferiores debido a la fuerza

de reacción contra el suelo durante estas acciones [112]. La tensión que genera este deporte puede provocar una mayor tensión cortical, aumento de la DMO, que hace que los huesos sean más resistentes a las fracturas. La práctica del fútbol parece ser beneficiosa para la adquisición de hueso en las niñas durante la infancia y la adolescencia, especialmente en el cuello femoral y el trocánter, que son las áreas más sensibles al estrés mecánico de las acciones del fútbol [113], dado que las jugadoras de fútbol presentan los valores más altos de FFM en piernas y como consecuencia valores de hueso femoral mayores, en línea con la literatura [142,143].

Las futbolistas y las nadadoras de natación artística presentan un tamaño corporal con unas características físicas determinadas genéticamente que contribuyen a la predisposición de un individuo a practicar un deporte en particular (altura, forma y composición corporal) que puede influir en las variables óseas, como se ha comentado en anteriores párrafos de esta tesis. Al ajustar las variables óseas por edad, altura y FFM, desaparecen las diferencias significativas en la DMO entre nadadoras de natación artística y el grupo control. La morfología básica del esqueleto está determinada genéticamente, pero su masa final, geometría, arquitectura y calidad tisular está modulada por mecanismos adaptativos sensibles a factores mecánicos [60]. Existe evidencia de que el hueso joven tiene mayor capacidad para responder al aumento de la carga mecánica que el esqueleto adulto, además debemos destacar la importancia de la FFM para optimizar la fuerza ósea durante el crecimiento [169]. La asociación entre la carga de ejercicio y los parámetros óseos es específica del deporte [119]. Los resultados del presente estudio, en los distintos estudios realizados, proporcionaron evidencia de que la FFM y principalmente el tipo de deporte son variables que influyen en los valores óseos, en línea con la literatura [40].

Un estudio reciente de Gifre et al. [170] mostró que los pacientes con lesión medular, mostraron una marcada disminución en la vDMO integral (8.8%), trabecular (11.6%) y cortical (2.4%) a los 6 meses de la lesión, con una mayor pérdida a los 12 meses. El grosor cortical también disminuyó a los 6 y 12 meses (8% y 11.4%). La degradación microestructural y biomecánica ocurre particularmente dentro del compartimento cortical como resultado de la falta de carga y persiste luego del retorno a la carga normal [72], al contrario de lo que ocurre en las nadadoras de natación artística en el presente estudio. La literatura nos muestra que la falta de actividad física induce una

pérdida severa de masa ósea. Por otro lado, a pesar de la presencia de ciertos factores de riesgo de osteoporosis como baja disponibilidad de energía, amenorrea primaria y menor peso corporal, las bailarinas de ballet profesionales revelaron una mayor densidad ósea para los compartimentos óseos corticales y trabeculares, y una corteza más gruesa en comparación con los controles [171].

La nadadora de natación artística es una bailarina acuática con similares características estéticas que las bailarinas pero con ejercicios sin ningún impacto, ni acciones excéntricas, que mejoren la DMO. Al aumentar el tiempo dedicado a la actividad física de impacto, aumenta la DMO en cuello femoral integral, pero con diferentes ganancias en función de la región, según la magnitud y la dirección de las fuerzas de contacto de la cadera. Los impactos verticales de elevada magnitud favorecen la ganancia de masa ósea en la zona superior del cuello femoral, mientras que los impactos intensos y moderados desde diferentes direcciones aumentan la masa ósea en las zonas anterior y posterior del cuello femoral [59]. La inclusión de este tipo de mecanismos de carga en un programa de actividad física puede proporcionar estabilidad al cuello femoral en las regiones que son más vulnerables durante el envejecimiento.

Es importante mencionar que los ejercicios con flexión de cadera ayudan a preservar a las regiones más vulnerables del cuello femoral [172]. Para preservar la estabilidad de la corteza, es posible que la carga regular dirigida a la corteza lateral superior deba durar toda la vida, como ocurre naturalmente cuando el fémur se extiende en la cadera desde una posición flexionada (ciclismo, gimnasia). En muchas sociedades en las que es habitual sentarse en el suelo, la fractura de cadera es rara, incluso cuando la mayoría de las mujeres mayores de 65 años tienen osteoporosis [173].

El presente estudio es el primero en analizar las características del fémur trabecular y cortical utilizando 3D-DXA en deportistas de élite. La gran mayoría de estudios se basan en medidas de DMO o CMO derivadas de la absorciometría dual de rayos X (DXA), establecida como el método más utilizado para medir la DMO [101] o la tomografía computerizada cuantitativa. La DXA no puede distinguir entre hueso cortical y trabecular; sin embargo, los métodos de imágenes 3D pueden medir ambos compartimentos por separado, desempeñando funciones independientes en la fractura por fragilidad [174]. Este método 3D-DXA podría proporcionar un enfoque prometedor para cuantificar el grosor y la densidad cortical utilizando técnicas de

imagenología de rutina clínica en deportistas. Se requieren más estudios para establecer esta técnica como una alternativa viable a la tomografía cuantitativa computarizada (QCT) en la investigación y la práctica clínica. Estudios anteriores apuntan que las mediciones de hueso cortical y trabecular calculadas por QCT podrían discriminar mejor el riesgo de fractura de cadera que las mediciones de aDMO calculadas por DXA [175]. Sin embargo, tampoco hay evidencia clara de que el análisis de elementos finitos basado en QCT conduzca a una mejora en la predicción del riesgo de fractura. Teniendo en cuenta estos resultados, se espera que esta nueva técnica proporcione una influencia positiva para detectar mejor el riesgo de fractura y la calidad ósea en nuestra población de deportistas y dar conocimiento al proceso de formación y resorción del hueso y su relación con las fuerzas estimulantes del mecanostato.

8. LIMITACIONES DE LOS ESTUDIOS

Esta tesis es válida asumiendo las limitaciones propias de la naturaleza de la muestra que condiciona el diseño y la metodología. Es por ello, que los resultados se deben evaluar o considerar con el criterio que nace de las consideraciones que se aportan a continuación:

1. Tamaño de la muestra:

- Justificación: El número de deportistas de élite está limitado a selecciones internacionales y olímpicas que entrenan con una intensidad, volumen y frecuencia elevados, y con resultados deportivos a nivel internacional: selección olímpica de natación, de natación artística, de waterpolo, de hockey hierba, de voleibol y 1^{er} equipo de FCB; tanto para las determinaciones con DXA como para los estudios 3D-DXA.
- Justificación: El tamaño de muestra en el grupo de ex nadadoras de natación artística es reducido debido a la escasez de practicantes de este deporte hace 15 años, tiempo en que la natación artística era casi desconocida y el número de mujeres deportistas de alto nivel era, por lo tanto, también escaso. En este sentido, el tamaño de la muestra es posible que limite la observación de los efectos reales de un programa de intervención sobre el hueso como el planteado.

2. Ausencia de grupo control: En el objetivo 2, “Evaluar el posible efecto positivo en el patrón de mineralización ósea de un programa de ejercicio físico incrementando la carga gravitatoria, controlando la suplementación y la dieta en nadadoras de natación artística de alto nivel”, no se dispone de un grupo control de las mismas características.

- Justificación: Las participantes eran deportistas olímpicas que habían entrenado de forma regular durante 10 años, a elevada intensidad, volumen y frecuencia, generando un grupo de entrenamiento estable y consolidado. Dada la dificultad de poder reclutar un grupo de participantes que cumplan por sus características con los criterios de inclusión como grupo control, las participantes del grupo intervención son controles de sí

mismas. Por otra parte, nos pareció incorrecto, y no planteable desde el punto de vista ético, dividir al equipo de nadadoras de natación artística y aleatorizar la muestra en dos grupos, con el fin del estudio presente, en un grupo con el programa de intervención y el otro grupo con su rutina de entrenamiento, siendo conocedores de la pérdida ósea que se podría producir en el grupo sin intervención debido al riesgo de modificar cualidades que pudieran incidir en el rendimiento técnico y deportivo en unas y otras. Por ello, las mismas nadadoras de la primera temporada constituyen el grupo control interno, sin intervención en la segunda temporada, momento en el que realizan la intervención.

3. Duración de los programas de intervención:

- Justificación: En el caso de las nadadoras de natación artística olímpicas, el tiempo se ajustó teniendo en cuenta su baja disponibilidad de tiempo para introducir nuevos programas de entrenamiento en las rutinas de entrenamiento diarias. Se realizó un programa más corto y más intenso.
- Justificación: En las ex nadadoras de natación artística, la indicación del programa coincidió con la pandemia por COVID-19. La incertidumbre al respecto de la duración del periodo de cierre y limitación de la actividad (“lock-down”), nos hizo pensar que un periodo largo de intervención condicionaría una disminución de la adherencia al mismo.

4. Evaluación as hoc de la ingesta nutricional en cada proyecto:

- Justificación: El objetivo de todos nuestros estudios incluidos en la presente tesis era caracterizar los valores óseos en deportistas con ingestas equilibradas y normocalóricas. Por ello, no se han realizado estudios estadísticos con variables nutricionales. Si que hemos garantizado y asegurado que, como es habitual, todas las deportistas hayan sido controladas en el departamento de nutrición con el fin de garantizar una dieta equilibrada durante las competiciones y la temporada de entrenamiento, y reevaluadas mensualmente para asegurar que la ingesta nutricional es la correcta.

5. Otras limitaciones:

- En el objetivo 3, existe un sesgo de difícil evaluación en relación al registro de información sobre los niveles de actividad física de hace 15 años, basados en la memoria de las propias deportistas.
- El diseño cruzado-seccional en los estudios 1º, 3º(I) y 4º limita la posibilidad de determinar una relación de causalidad, planteando la necesidad de futuros estudios longitudinales.
- La técnica 3D-DXA y su software son muy recientes y no se ha evaluado para deportistas. Su validez en casos individuales debería ser interpretada con precaución [176].

9. FORTALEZAS DE ESTA TESIS

La presente tesis tiene varias fortalezas.

1. Las participantes son deportistas de alto rendimiento de diferentes selecciones olímpicas, nacionales e internacionales no estudiadas antes en la literatura: natación artística, natación, waterpolo, hockey hierba, voleibol del Centro de Alto Rendimiento de Sant Cugat del Vallés y futbolistas del 1º y 2º equipo del Futbol Club Barcelona. Deporte de alto nivel significa competir a en JJOO y Campeonatos del Mundo. El equipo de natación fue medallista en los JJOO de Londres 2012, Rio 2016 y en el campeonato del mundo de Barcelona 2013, Budapest 2017. El equipo de natación artística fue plata en los JJOO Londres 2012 (dúo y rutina libre). El equipo femenino de waterpolo fue plata en los JJOO de Londres 2012, medallista en el Mundial de Barcelona 2013 y en Budapest 2017. La selección absoluta femenina de voleibol estaba posicionada, en el momento del estudio, en el 33º lugar del ranking europeo. La selección femenina de hockey hierba fue 8ª en los JJOO de Londres 2012 y bronce en el Mundial de Londres 2018. Las futbolistas pertenecen al 1º y 2º equipo del FCB, jugadoras de la Liga Nacional Iberdrola y de la UEFA, campeonas de la Copa de la Reina en 2016 y 2017
2. Las características de los deportistas de élite sometidos a un entrenamiento diario y con rutinas muy bien establecidas permite una recogida exhaustiva, real y sin pérdidas de la información necesaria para asegurar la calidad metodológica del estudio. Este modelo de seguimiento es impensable e impracticable en la población general con unos hábitos de ejercicio físico, nutrición y estilo de vida distintos para cada sujeto.
3. Con el presente estudio se ha contribuido a incrementar la evidencia científica respecto a la relación entre la masa magra (FFM) y el hueso, relación de reciente estudio en la literatura científica, y que está potenciada por el nivel de los deportistas y diferentes deportes de esta tesis.
4. La contribución de la mejora del rendimiento con la realización de entrenamiento complementario, fuera del agua, en deportistas de agua no ha sido reportado en la mayoría de estudios revisados y es considerado muy

oportuno de conocer en nuestro ámbito de trabajo, para poder prevenir situaciones de osteopenia y fracturas de fatiga en nuestras deportistas.

5. La presente tesis presenta un programa de salto multidireccional de alta intensidad y baja repetición que podría introducirse en la vida diaria de la población sana, que como se ha demostrado en esta tesis podría mejorar el grosor cortical disminuyendo el riesgo de fractura.
6. La nueva técnica 3D-DXA se basa en escáneres DXA de cadera estandarizados que permiten ser evaluados de forma retrospectiva en pruebas DXA anteriores.

10. APLICABILIDAD DE LOS RESULTADOS

Dado que la osteoporosis se considera una enfermedad casi endémica en muchos países, con graves efectos sobre la salud poblacional:

- Los hallazgos de la presente tesis sugieren que la natación y la natación artística en deportistas femeninas de alto nivel deben combinarse con trabajo complementario de impacto o de fuerza muscular fuera del agua, puesto que no son deportes osteogénicos *per se*.
- Alentamos a los entrenadores de natación artística de élite a utilizar nuevos métodos, como los propuestos de salto a la cuerda y la plataforma vibratoria, en su rutina de entrenamiento con el fin de mejorar la DMO de las deportistas, como una herramienta estratégica de estimulación ósea.
- La práctica deportiva durante la adolescencia se relaciona de forma positiva con una buena salud ósea durante la etapa adulta, incluso en deportes acuáticos. Se recomienda la introducción de programas de salto multidireccional, de elevada intensidad, poca repetición, cortos, incluso domiciliarios, para reducir el riesgo de osteoporosis en la mujer menopaúsica.
- La nueva técnica, 3D-DXA, puede proporcionar una evaluación y facilitar un seguimiento más preciso del impacto del ejercicio en el hueso, del compartimento trabecular y cortical, y determinar su resistencia. Puede ser un instrumento complementario para una mejor clasificación de los sujetos en función de su riesgo de fractura. En el ámbito del deporte, este método nos permitirá diseñar programas de ejercicio más eficaces en la prevención de la osteoporosis.

11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Estudiar el efecto de distintos protocolos de ejercicio fuera del agua (impacto vs fuerza muscular) en la densidad mineral ósea en el grupo de nadadoras de natación artística y nadadoras de carreras de alto nivel.
- Analizar el efecto de una suplementación con calcio y vitamina D vs ejercicio físico vs ejercicio físico y suplementación con calcio y vitamina D en la densidad mineral ósea en el grupo de ex nadadoras de natación artística del equipo olímpico español.
- Estudiar la densidad mineral ósea de ex deportistas de élite de impacto (voleibol) vs no impacto (natación artística) con controles no deportistas.

12. CONCLUSIONES

- Todos los deportes de alto nivel estudiados fomentan la osteogénesis siendo los practicados con acciones anti gravitacionales superiores a los que no la tienen.
- Los valores de DMO son más elevados en las deportistas no acuáticas en todas las regiones corporales en comparación con las deportistas acuáticas. De ellos, el fútbol, deporte con impacto multidireccional, mostró la mayor vDMO trabecular y el mayor grosor cortical en fémur proximal, al ser estudiado mediante 3D-DXA.
- La masa magra (FFM) y el tipo de deporte explican los valores de DMO y CMO de deportistas acuáticas y no-acuáticas.
- El tiempo de entrenamiento fuera del agua mejora la DMO.
- Las 3h./semanales de entrenamiento fuera del agua son suficientes para las nadadoras de natación artística para mejorar su DMO.
- Nuevos métodos de entrenamiento con salto a la cuerda y plataforma vibratoria, incluidos en las rutinas de entrenamiento de las deportistas de élite de natación artística, mejoran la DMO en las localizaciones anatómicas más susceptibles de fractura ósea.
- El modelo de trabajo fijo de series cortas, de elevada intensidad, multidireccionales, de carácter domiciliario para reducir el riesgo de pérdida ósea en nadadoras de natación artística retiradas es efectivo.

- La nueva metodología 3D-DXA proporciona unos datos en referencia a los compartimentos óseos, trabecular y cortical, que abren una puerta a la investigación y optimización de la clasificación de los mismos.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Becker DJ, Kilgore ML, Morrissey MA. The Societal Burden of Osteoporosis. *Current Rheumatology Reports* 2010;12:186–91. <https://doi.org/10.1007/s11926-010-0097-y>.
- [2] Hernlund E, Svedbom A, Ivergård M, Compston J, Cooper C, Stenmark J, et al. Osteoporosis in the European Union: medical management, epidemiology and economic burden: A report prepared in collaboration with the International Osteoporosis Foundation (IOF) and the European Federation of Pharmaceutical Industry Associations (EFPIA). *Archives of Osteoporosis* 2013;8. <https://doi.org/10.1007/s11657-013-0136-1>.
- [3] Caeiro JR, Bartra A, Mesa-Ramos M, Etxebarria Í, Montejo J, Carpintero P, et al. Burden of First Osteoporotic Hip Fracture in Spain: A Prospective, 12-Month, Observational Study. *Calcif Tissue Int* 2017;100:29–39. <https://doi.org/10.1007/s00223-016-0193-8>.
- [4] Carbonell Abella C, Toquero de la Torre F, Rodríguez Sendín JJ, Martín Jiménez JA, Valdés y Llorca C. Guía de buena práctica clínica en osteoporosis. Madrid: International Marketing & Communications; 2008.
- [5] Rizzoli R, Bianchi ML, Garabédian M, McKay HA, Moreno LA. Maximizing bone mineral mass gain during growth for the prevention of fractures in the adolescents and the elderly. *Bone* 2010;46:294–305. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2009.10.005>.
- [6] Maïmoun L, Coste O, Mura T, Philibert P, Galtier F, Mariano-Goulart D, et al. Specific Bone Mass Acquisition in Elite Female Athletes. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2013;98:2844–53. <https://doi.org/10.1210/jc.2013-1070>.
- [7] Weaver CM, Gordon CM, Janz KF, Kalkwarf HJ, Lappe JM, Lewis R, et al. The National Osteoporosis Foundation's position statement on peak bone mass development and lifestyle factors: a systematic review and implementation recommendations. *Osteoporos Int* 2016;27:1281–386. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3440-3>.
- [8] Baxter-Jones ADG, Faulkner RA, Forwood MR, Mirwald RL, Bailey DA. Bone mineral accrual from 8 to 30 years of age: an estimation of peak bone mass. *J Bone Miner Res* 2011;26:1729–39. <https://doi.org/10.1002/jbmr.412>.
- [9] Bailey CA, Brooke-Wavell K. Exercise for optimising peak bone mass in women. *Proceedings of the Nutrition Society* 2008;67:9–18. <https://doi.org/10.1017/S0029665108005971>.
- [10] 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. <https://doi.org/10.1007/s00223001089>.
- [11] Hernandez CJ, Beauprè GS, Carter DR. A theoretical analysis of the relative influences of peak BMD, age-related bone loss and menopause on the development of osteoporosis. *Osteoporosis International* 2003;14:843–7. <https://doi.org/10.1007/s00198-003-1454-8>.
- [12] Bagur Caritat. Ejercicio físico y masa ósea (I). Evolución ontogénica de la masa ósea e influencia de la actividad física sobre el hueso en las diferentes etapas de la vida. *Apunts Medicina de l'Esport* 2007;153:40–6.

- [13] Kirmani S, Christen D, van Lenthe GH, Fischer PR, Bouxsein ML, McCready LK, et al. Bone structure at the distal radius during adolescent growth. *J Bone Miner Res* 2009;24:1033–42. <https://doi.org/10.1359/jbmr.081255>.
- [14] Seeman E. An exercise in geometry. *J Bone Miner Res* 2002;17:373–80. <https://doi.org/10.1359/jbmr.2002.17.3.373>.
- [15] Walsh JS, Paggiosi MA, Eastell R. Cortical consolidation of the radius and tibia in young men and women. *J Clin Endocrinol Metab* 2012;97:3342–8. <https://doi.org/10.1210/jc.2012-1677>.
- [16] Duan Y, Seeman E, Turner CH. The biomechanical basis of vertebral body fragility in men and women. *J Bone Miner Res* 2001;16:2276–83. <https://doi.org/10.1359/jbmr.2001.16.12.2276>.
- [17] Wallace JM, Rajachar RM, Allen MR, Bloomfield SA, Robey PG, Young MF, et al. Exercise-induced changes in the cortical bone of growing mice are bone- and gender-specific. *Bone* 2007;40:1120–7. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2006.12.002>.
- [18] Ireland A, Maden-Wilkinson T, McPhee J, Cooke K, Narici M, Degens H, et al. Upper limb muscle-bone asymmetries and bone adaptation in elite youth tennis players. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45:1749–58. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31828f882f>.
- [19] Baker BS, Chen Z, Larson RD, Bembien MG, Bembien DA. Sex differences in bone density, geometry, and bone strength of competitive soccer players. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2020;20:62–76.
- [20] Ettinger B, Sidney S, Cummings SR, Libanati C, Bikle DD, Tekawa IS, et al. Racial differences in bone density between young adult black and white subjects persist after adjustment for anthropometric, lifestyle, and biochemical differences. *J Clin Endocrinol Metab* 1997;82:429–34. <https://doi.org/10.1210/jcem.82.2.3732>.
- [21] Jorgetti V, dos Reis LM, Ott SM. Ethnic differences in bone and mineral metabolism in healthy people and patients with CKD. *Kidney International* 2014;85:1283–9. <https://doi.org/10.1038/ki.2013.443>.
- [22] Hochberg MC. Racial differences in bone strength. *Trans Am Clin Climatol Assoc* 2007;118:305–15.
- [23] Correa-Rodríguez M, Schmidt Rio-Valle J, Rueda-Medina B. The RSPO3 gene as genetic markers for bone mass assessed by quantitative ultrasound in a population of young adults. *Ann Hum Genet* 2018;82:143–9. <https://doi.org/10.1111/ahg.12235>.
- [24] Mouratidou T, Vicente-Rodríguez G, Gracia-Marco L, Huybrechts I, Sioen I, Widhalm K, et al. Associations of dietary calcium, vitamin D, milk intakes, and 25-hydroxyvitamin D with bone mass in Spanish adolescents: the HELENA study. *J Clin Densitom* 2013;16:110–7. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2012.07.008>.
- [25] Valtueña J, Dominguez D, Til L, González-Gross M, Drobnic F. High prevalence of vitamin D insufficiency among elite Spanish athletes the importance of outdoor training adaptation. *Nutr Hosp* 2014;30:124–31. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.1.7539>.
- [26] Larson-Meyer DE, Willis KS. Vitamin D and athletes. *Curr Sports Med Rep* 2010;9:220–6. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3181e7dd45>.

- [27] Hoch AZ, Pajewski NM, Moraski L, Carrera GF, Wilson CR, Hoffmann RG, et al. Prevalence of the female athlete triad in high school athletes and sedentary students. *Clin J Sport Med* 2009;19:421–8. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181b8c136>.
- [28] Sundgot-Borgen J, Torstveit MK. Prevalence of eating disorders in elite athletes is higher than in the general population. *Clin J Sport Med* 2004;14:25–32. <https://doi.org/10.1097/00042752-200401000-00005>.
- [29] Ward KD, Klesges RC. A meta-analysis of the effects of cigarette smoking on bone mineral density. *Calcif Tissue Int* 2001;68:259–70. <https://doi.org/10.1007/BF02390832>.
- [30] Trevisan C, Alessi A, Girotti G, Zanforlini BM, Bertocco A, Mazzochin M, et al. The Impact of Smoking on Bone Metabolism, Bone Mineral Density and Vertebral Fractures in Postmenopausal Women. *Journal of Clinical Densitometry* 2020;23:381–9. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2019.07.007>.
- [31] Williams FMK. The effect of moderate alcohol consumption on bone mineral density: a study of female twins. *Annals of the Rheumatic Diseases* 2005;64:309–10. <https://doi.org/10.1136/ard.2004.022269>.
- [32] Clark MK, Sowers MFR, Dekordi F, Nichols S. Bone mineral density and fractures among alcohol-dependent women in treatment and in recovery. *Osteoporos Int* 2003;14:396–403. <https://doi.org/10.1007/s00198-003-1387-2>.
- [33] Kanis JA, Johnell O, Oden A, Johansson H, McCloskey E. FRAXTM and the assessment of fracture probability in men and women from the UK. *Osteoporos Int* 2008;19:385–97. <https://doi.org/10.1007/s00198-007-0543-5>.
- [34] Okan F, Okan S, Zincir H. Effect of Sunlight Exposure on Vitamin D Status of Individuals Living in a Nursing Home and Their Own Homes. *J Clin Densitom* 2020;23:21–8. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2018.12.005>.
- [35] Ruohola J-P, Laaksi I, Ylikomi T, Haataja R, Mattila VM, Sahi T, et al. Association between serum 25(OH)D concentrations and bone stress fractures in Finnish young men. *J Bone Miner Res* 2006;21:1483–8. <https://doi.org/10.1359/jbmr.060607>.
- [36] Lappe J, Cullen D, Haynatzki G, Recker R, Ahlf R, Thompson K. Calcium and vitamin d supplementation decreases incidence of stress fractures in female navy recruits. *J Bone Miner Res* 2008;23:741–9. <https://doi.org/10.1359/jbmr.080102>.
- [37] Lehtonen-Veromaa M, Möttönen T, Irjala K, Kärkkäinen M, Lamberg-Allardt C, Hakola P, et al. Vitamin D intake is low and hypovitaminosis D common in healthy 9- to 15-year-old Finnish girls. *Eur J Clin Nutr* 1999;53:746–51. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600844>.
- [38] Hamilton B, Grantham J, Racinais S, Chalabi H. Vitamin D deficiency is endemic in Middle Eastern sportsmen. *Public Health Nutr* 2010;13:1528–34. <https://doi.org/10.1017/S136898000999320X>.
- [39] Bischoff-Ferrari HA, Giovannucci E, Willett WC, Dietrich T, Dawson-Hughes B. Estimation of optimal serum concentrations of 25-hydroxyvitamin D for multiple health outcomes. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2006;84:18–28. <https://doi.org/10.1093/ajcn/84.1.18>.

- [40] Ubago-Guisado E, Vlachopoulos D, Fatouros IG, Deli CK, Leontsini D, Moreno LA, et al. Longitudinal determinants of 12-month changes on bone health in adolescent male athletes. *Arch Osteoporos* 2018;13:106. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0519-4>.
- [41] De Souza MJ, Nattiv A, Joy E, Misra M, Williams NI, Mallinson RJ, et al. 2014 Female Athlete Triad Coalition consensus statement on treatment and return to play of the female athlete triad: 1st International Conference held in San Francisco, CA, May 2012, and 2nd International Conference held in Indianapolis, IN, May 2013. *Clin J Sport Med* 2014;24:96–119. <https://doi.org/10.1097/JSM.000000000000085>.
- [42] Weiss Kelly AK, Hecht S, Council on Sports Medicine and Fitness. The Female Athlete Triad. *Pediatrics* 2016;138. <https://doi.org/10.1542/peds.2016-0922>.
- [43] Karlsson MagnusK, Nordqvist A, Karlsson C. Physical activity increases bone mass during growth. *Food & Nutrition Research* 2008;52:1871. <https://doi.org/10.3402/fnr.v52i0.1871>.
- [44] Vlachopoulos D, Ubago-Guisado E, Barker AR, Metcalf BS, Fatouros IG, Avloniti A, et al. Determinants of Bone Outcomes in Adolescent Athletes at Baseline: The PRO-BONE Study. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 2017;49:1389–96. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001233>.
- [45] Vlachopoulos D, Barker AR, Williams CA, Knapp KM, Metcalf BS, Gracia-Marco L. Effect of a program of short bouts of exercise on bone health in adolescents involved in different sports: the PRO-BONE study protocol. *BMC Public Health* 2015;15:361. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1633-5>.
- [46] Mantovani AM, de Lima MCS, Gobbo LA, Ronque ERV, Romanzini M, Turi-Lynch BC, et al. Adults Engaged in Sports in Early Life Have Higher Bone Mass Than Their Inactive Peers. *J Phys Act Health* 2018;15:516–22. <https://doi.org/10.1123/jpah.2017-0366>.
- [47] Tveit M, Rosengren BE, Nilsson JÅ, Karlsson MK. Exercise in youth: High bone mass, large bone size, and low fracture risk in old age: Elite soccer, bone traits, and fractures. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 2015;25:453–61. <https://doi.org/10.1111/sms.12305>.
- [48] Lynch KR, Fredericson M, Turi-Lynch B, Agostinete RR, Ito IH, Luiz-de-Marco R, et al. Sports Participation Decreases the Incidence of Traumatic, Nonsports-Related Fractures Among Adolescents. *Pediatr Exerc Sci* 2019;31:47–51. <https://doi.org/10.1123/pes.2018-0053>.
- [49] Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Matute-Llorente A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. The effects of swimming training on bone tissue in adolescence: Bone tissue in adolescent swimmers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 2015;25:e589–602. <https://doi.org/10.1111/sms.12378>.
- [50] Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. Is Bone Tissue Really Affected by Swimming? A Systematic Review. *PLoS ONE* 2013;8:e70119. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070119>.
- [51] Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, García-Campayo J, Moreno LA, Casajús JA, et al. The Effect of Swimming During Childhood and Adolescence on Bone Mineral Density: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2016;46:365–79. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0427-3>.

- [52] Lanyon LE. Functional strain as a determinant for bone remodeling. *Calcif Tissue Int* 1984;36 Suppl 1:S56-61.
- [53] Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif Tissue Int* 1985;37:411–7.
- [54] Ferry B, Lespessailles E, Rochcongar P, Duclos M, Courteix D. Bone health during late adolescence: Effects of an 8-month training program on bone geometry in female athletes. *Joint Bone Spine* 2013;80:57–63.
<https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2012.01.006>.
- [55] Hind K, Gannon L, Whatley E, Cooke C, Truscott J. Bone cross-sectional geometry in male runners, gymnasts, swimmers and non-athletic controls: a hip-structural analysis study. *European Journal of Applied Physiology* 2012;112:535–41.
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2008-y>.
- [56] Bergmann P, Body JJ, Boonen S, Boutsen Y, Devogelaer JP, Goemaere S, et al. Loading and skeletal development and maintenance. *J Osteoporos* 2010;2011:786752. <https://doi.org/10.4061/2011/786752>.
- [57] Scofield KL. Bone Health in Endurance Athletes: Runners, Cyclists, and Swimmers 2012;11:7.
- [58] McKay HA, MacLean L, Petit M, MacKelvie-O'Brien K, Janssen P, Beck T, et al. “Bounce at the Bell”: a novel program of short bouts of exercise improves proximal femur bone mass in early pubertal children. *Br J Sports Med* 2005;39:521–6. <https://doi.org/10.1136/bjism.2004.014266>.
- [59] Machado MM, Fernandes PR, Cardadeiro G, Baptista F. Femoral neck bone adaptation to weight-bearing physical activity by computational analysis. *J Biomech* 2013;46:2179–85. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.06.031>.
- [60] Frost HM. Bone “mass” and the “mechanostat”: a proposal. *Anat Rec* 1987;219:1–9. <https://doi.org/10.1002/ar.1092190104>.
- [61] Robinson TL, Snow-Harter C, Taaffe DR, Gillis D, Shaw J, Marcus R. Gymnasts exhibit higher bone mass than runners despite similar prevalence of amenorrhea and oligomenorrhea. *J Bone Miner Res* 1995;10:26–35.
<https://doi.org/10.1002/jbmr.5650100107>.
- [62] Heinonen A, Oja P, Kannus P, Sievänen H, Haapasalo H, Mänttari A, et al. Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone* 1995;17:197–203.
[https://doi.org/10.1016/8756-3282\(95\)00151-3](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)00151-3).
- [63] Kerr D, Morton A, Dick I, Prince R. Exercise effects on bone mass in postmenopausal women are site-specific and load-dependent. *J Bone Miner Res* 1996;11:218–25. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650110211>.
- [64] Vainionpää A, Korpelainen R, Sievänen H, Vihriälä E, Leppäluoto J, Jämsä T. Effect of impact exercise and its intensity on bone geometry at weight-bearing tibia and femur. *Bone* 2007;40:604–11. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2006.10.005>.
- [65] Manzoni P, Brambilla P, Pietrobelli A, Beccaria L, Bianchessi A, Mora S, et al. Influence of body composition on bone mineral content in children and adolescents. *Am J Clin Nutr* 1996;64:603–7.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/64.4.603>.

- [66] Ferretti JL, Capozza RF, Cointry GR, García SL, Plotkin H, Alvarez Filgueira ML, et al. Gender-related differences in the relationship between densitometric values of whole-body bone mineral content and lean body mass in humans between 2 and 87 years of age. *Bone* 1998;22:683–90.
- [67] Rauch F, Bailey DA, Baxter-Jones A, Mirwald R, Faulkner R. The “muscle-bone unit” during the pubertal growth spurt. *Bone* 2004;34:771–5. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.01.022>.
- [68] Bass SL, Eser P, Daly R. The effect of exercise and nutrition on the mechanostat. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2005;5:239–54.
- [69] Schoenau E. From mechanostat theory to development of the “Functional Muscle-Bone-Unit.” *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2005;5:232–8.
- [70] Jeon W, Harrison JM, Stanforth PR, Griffin L. Bone Mineral Density Differences Across Female Olympic Lifters, Power Lifters, and Soccer Players. *J Strength Cond Res* 2021;35:638–43. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003944>.
- [71] Maillane-Vanegas S, Agostinete RR, Lynch KR, Ito IH, Luiz-de-Marco R, Rodrigues-Junior MA, et al. Bone Mineral Density and Sports Participation. *Journal of Clinical Densitometry* 2020;23:294–302. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2018.05.041>.
- [72] Kazakia GJ, Tjong W, Nirody JA, Burghardt AJ, Carballido-Gamio J, Patsch JM, et al. The influence of disuse on bone microstructure and mechanics assessed by HR-pQCT. *Bone* 2014;63:132–40. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2014.02.014>.
- [73] Vico L, van Rietbergen B, Vilayphiou N, Linossier M-T, Locrelle H, Normand M, et al. Cortical and Trabecular Bone Microstructure Did Not Recover at Weight-Bearing Skeletal Sites and Progressively Deteriorated at Non-Weight-Bearing Sites During the Year Following International Space Station Missions. *J Bone Miner Res* 2017;32:2010–21. <https://doi.org/10.1002/jbmr.3188>.
- [74] Bassey EJ, Littlewood JJ, Taylor SJ. Relations between compressive axial forces in an instrumented massive femoral implant, ground reaction forces, and integrated electromyographs from vastus lateralis during various “osteogenic” exercises. *J Biomech* 1997;30:213–23. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(96\)00043-7](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(96)00043-7).
- [75] Bassey E. Weight-bearing exercise and ground reaction forces: A 12-month randomized controlled trial of effects on bone mineral density in healthy postmenopausal women. *EMC - Cardiologie-Angéiologie* 1995:469–76. [https://doi.org/10.1016/8756-3282\(95\)90193-0](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)90193-0).
- [76] McKay HA, MacLean L, Petit M, MacKelvie-O’Brien K, Janssen P, Beck T, et al. “Bounce at the Bell”: a novel program of short bouts of exercise improves proximal femur bone mass in early pubertal children. *Br J Sports Med* 2005;39:521–6. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2004.014266>.
- [77] Vlachopoulos D, Barker AR, Ubago-Guisado E, Williams CA, Gracia-Marco L. The effect of a high-impact jumping intervention on bone mass, bone stiffness and fitness parameters in adolescent athletes. *Arch Osteoporos* 2018;13:128. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0543-4>.
- [78] Kato T, Terashima T, Yamashita T, Hatanaka Y, Honda A, Umemura Y. Effect of low-repetition jump training on bone mineral density in young women. *J Appl Physiol* 2006;100:839–43. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00666.2005>.
- [79] Ha AS, Ng JYY. Rope skipping increases bone mineral density at calcanei of pubertal girls in Hong Kong: A quasi-experimental investigation. *PLoS ONE* 2017;12:e0189085. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189085>.

- [80] 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.
<https://doi.org/10.1097/00005768-200212000-00009>.
- [81] Pittenger VM, McCaw ST, Thomas DQ. Vertical ground reaction forces of children during one- and two-leg rope jumping. *Res Q Exerc Sport* 2002;73:445–9.
<https://doi.org/10.1080/02701367.2002.10609044>.
- [82] Chen Y-Y, Liaw L-J, Liang J-M, Hung W-T, Guo L-Y, Wu W-L. Timing perception and motor coordination on rope jumping in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Physical Therapy in Sport* 2013;14:105–9.
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2012.03.012>.
- [83] Tucker LA, Strong JE, LeCheminant JD, Bailey BW. Effect of Two Jumping Programs on Hip Bone Mineral Density in Premenopausal Women: A Randomized Controlled Trial. *American Journal of Health Promotion* 2015;29:158–64.
<https://doi.org/10.4278/ajhp.130430-QUAN-200>.
- [84] Okubo R, Sanada LS, Castania VA, Louzada MJQ, de Paula FJA, Maffulli N, et al. Jumping exercise preserves bone mineral density and mechanical properties in osteopenic ovariectomized rats even following established osteopenia. *Osteoporos Int* 2017;28:1461–71. <https://doi.org/10.1007/s00198-017-3905-7>.
- [85] Clissold TL, Winwood PW, Cronin JB, De Souza MJ. Do Bilateral Vertical Jumps With Reactive Jump Landings Achieve Osteogenic Thresholds With and Without Instruction in Premenopausal Women? *J Appl Biomech* 2018;34:118–26.
<https://doi.org/10.1123/jab.2017-0114>.
- [86] Xu J, Lombardi G, Jiao W, Banfi G. Effects of Exercise on Bone Status in Female Subjects, from Young Girls to Postmenopausal Women: An Overview of Systematic Reviews and Meta-Analyses. *Sports Med* 2016;46:1165–82.
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0494-0>.
- [87] Saxon LK, Robling AG, Alam I, Turner CH. Mechanosensitivity of the rat skeleton decreases after a long period of loading, but is improved with time off. *Bone* 2005;36:454–64. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.12.001>.
- [88] Cardinale M, Wakeling J. Whole body vibration exercise: are vibrations good for you? *Br J Sports Med* 2005;39:585–9; discussion 589.
<https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.016857>.
- [89] Ozcivici E, Luu YK, Adler B, Qin Y-X, Rubin J, Judex S, et al. Mechanical signals as anabolic agents in bone. *Nat Rev Rheumatol* 2010;6:50–9.
<https://doi.org/10.1038/nrrheum.2009.239>.
- [90] Matute-Llorente A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Olmedillas H, Vicente-Rodríguez G, Casajús JA. Effect of whole body vibration training on bone mineral density and bone quality in adolescents with Down syndrome: a randomized controlled trial. *Osteoporos Int* 2015;26:2449–59.
<https://doi.org/10.1007/s00198-015-3159-1>.
- [91] Slatkovska L, Alibhai SMH, Beyene J, Cheung AM. Effect of whole-body vibration on BMD: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int* 2010;21:1969–80.
<https://doi.org/10.1007/s00198-010-1228-z>.

- [92] Verschueren SM, Roelants M, Delecluse C, Swinnen S, Vanderschueren D, Boonen S. Effect of 6-Month Whole Body Vibration Training on Hip Density, Muscle Strength, and Postural Control in Postmenopausal Women: A Randomized Controlled Pilot Study. *Journal of Bone and Mineral Research* 2003;19:352–9. <https://doi.org/10.1359/JBMR.0301245>.
- [93] Prioreshi A, Oosthuyse T, Avidon I, McVeigh J. Whole Body Vibration Increases Hip Bone Mineral Density in Road Cyclists. *International Journal of Sports Medicine* 2012;33:593–9. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1301886>.
- [94] Kohrt WM, Bloomfield SA, Little KD, Nelson ME, Yingling VR, American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine Position Stand: physical activity and bone health. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:1985–96. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000142662.21767.58>.
- [95] Tenforde AS, Fredericson M. Influence of sports participation on bone health in the young athlete: a review of the literature. *PM R* 2011;3:861–7. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.05.019>.
- [96] FINA. Reglamento Natación Artística 2017-2021. 2017.
- [97] Robertson S, Mountjoy M. A Review of Prevention, Diagnosis, and Treatment of Relative Energy Deficiency in Sport in Artistic (Synchronized) Swimming. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2018;28:375–84. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2017-0329>.
- [98] Tinto A, Campanella M, Fasano M. Core strengthening and synchronized swimming: TRX® suspension training in young female athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 2017;57:744–51. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06338-6>.
- [99] Ludwa IA, Falk B, Yao M, Corbett L, Klentrou P. Bone speed of sound, bone turnover and IGF-I in adolescent synchronized swimmers. *Pediatr Exerc Sci* 2010;22:421–30.
- [100] Lundy B. Nutrition for synchronized swimming: a review. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2011;21:436–45.
- [101] Bellver M, Del Rio L, Jovell E, Drobic F, Trilla A. Bone mineral density and bone mineral content among female elite athletes. *Bone* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2019.06.030>.
- [102] Liang MTC, Arnaud SB, Steele CR, Hatch P, Moreno A. Ulnar and tibial bending stiffness as an index of bone strength in synchronized swimmers and gymnasts. *Eur J Appl Physiol* 2005;94:400–7. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-1351-2>.
- [103] Drobic F. Impacto sobre la salud de los compuestos utilizados en el tratamiento del agua en las piscinas. Estado de la cuestión. *Apunts Medicina de l'Esport* 2009;161:42–7.
- [104] Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, García-Campayo J, Moreno LA, et al. Swimming and peak bone mineral density: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences* 2017:1–13. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1307440>.
- [105] Nikander R, Sievänen H, Heinonen A, Kannus P. Femoral Neck Structure in Adult Female Athletes Subjected to Different Loading Modalities. *Journal of Bone and Mineral Research* 2004;20:520–8. <https://doi.org/10.1359/JBMR.041119>.

- [106] Ferry B, Duclos M, Burt L, Therre P, Le Gall F, Jaffré C, et al. Bone geometry and strength adaptations to physical constraints inherent in different sports: comparison between elite female soccer players and swimmers. *J Bone Miner Metab* 2011;29:342–51. <https://doi.org/10.1007/s00774-010-0226-8>.
- [107] Agostinete RR, Vlachopoulos D, Werneck AO, Maillane-Vanegas S, Lynch KR, Naughton G, et al. Bone accrual over 18 months of participation in different loading sports during adolescence. *Arch Osteoporos* 2020;15:64. <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00727-2>.
- [108] Greene DA, Naughton GA, Bradshaw E, Moresi M, Ducher G. Mechanical loading with or without weight-bearing activity: influence on bone strength index in elite female adolescent athletes engaged in water polo, gymnastics, and track-and-field. *Journal of Bone and Mineral Metabolism* 2012;30:580–7. <https://doi.org/10.1007/s00774-012-0360-6>.
- [109] Calbet JA, Dorado C, Díaz-Herrera P, Rodríguez-Rodríguez LP. High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:1682–7.
- [110] Agostinete RR, Fernandes RA, Narciso PH, Maillane-Vanegas S, Werneck AO, Vlachopoulos D. Categorizing 10 Sports According to Bone and Soft Tissue Profiles in Adolescents. *Med Sci Sports Exerc* 2020;52:2673–81. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002420>.
- [111] Vlachopoulos D, Barker AR, Ubago-Guisado E, Ortega FB, Krstrup P, Metcalf B, et al. The effect of 12-month participation in osteogenic and non-osteogenic sports on bone development in adolescent male athletes. The PRO-BONE study. *J Sci Med Sport* 2018;21:404–9. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.08.018>.
- [112] Lozano-Berges G, Matute-Llorente Á, González-Agüero A, Gómez-Bruton A, Gómez-Cabello A, Vicente-Rodríguez G, et al. Soccer helps build strong bones during growth: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Pediatr* 2018;177:295–310. <https://doi.org/10.1007/s00431-017-3060-3>.
- [113] Plaza-Carmona M, Vicente-Rodríguez G, Gómez-Cabello A, Martín-García M, Sánchez-Sánchez J, Gallardo L, et al. Higher bone mass in prepubertal and peripubertal female footballers. *Eur J Sport Sci* 2016;16:877–83. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1144794>.
- [114] Carmona MP-, Vicente-Rodríguez G, Martín-García M, Burillo P, Felipe JL, Mata E, et al. Influence of hard vs. soft ground surfaces on bone accretion in prepubertal footballers. *Int J Sports Med* 2014;35:55–61. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1345140>.
- [115] Vicente-Rodríguez G, Jimenez-Ramirez J, Ara I, Serrano-Sanchez JA, Dorado C, Calbet J a. L. Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent footballers. *Bone* 2003;33:853–9. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2003.08.003>.
- [116] Zouch M, Zribi A, Alexandre C, Chaari H, Frere D, Tabka Z, et al. Soccer increases bone mass in prepubescent boys during growth: a 3-yr longitudinal study. *J Clin Densitom* 2015;18:179–86. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2014.10.004>.
- [117] Ubago-Guisado E, Gómez-Cabello A, Sánchez-Sánchez J, García-Unanue J, Gallardo L. Influence of different sports on bone mass in growing girls. *J Sports Sci* 2015;33:1710–8. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1004639>.

- [118] Bellew JW, Gehrig L. A comparison of bone mineral density in adolescent female swimmers, soccer players, and weight lifters. *Pediatr Phys Ther* 2006;18:19–22. <https://doi.org/10.1097/01.pep.0000200952.63544.16>.
- [119] Nilsson M, Ohlsson C, Mellström D, Lorentzon M. Sport-specific association between exercise loading and the density, geometry, and microstructure of weight-bearing bone in young adult men. *Osteoporos Int* 2013;24:1613–22. <https://doi.org/10.1007/s00198-012-2142-3>.
- [120] Borràs X, Balius X, Drobnic F, Galilea P. Vertical jump assessment on volleyball: a follow-up of three seasons of a high-level volleyball team. *J Strength Cond Res* 2011;25:1686–94. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181db9f2e>.
- [121] Bisch KL, Bosch TA, Carbuhn A, Stanforth PR, Oliver JM, Bach CW, et al. Positional Body Composition of Female Division I Collegiate Volleyball Players. *J Strength Cond Res* 2020;34:3055–61. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003808>.
- [122] Stanforth D, Lu T, Stults-Kolehmainen MA, Crim BN, Stanforth PR. Bone Mineral Content and Density Among Female NCAA Division I Athletes Across the Competitive Season and Over a Multi-Year Time Frame: *Journal of Strength and Conditioning Research* 2016;30:2828–38. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000785>.
- [123] Stojanović E, Radovanović D, Dalbo VJ, Jakovljević V, Ponorac N, Agostinete RR, et al. Basketball players possess a higher bone mineral density than matched non-athletes, swimming, soccer, and volleyball athletes: a systematic review and meta-analysis. *Arch Osteoporos* 2020;15:123. <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00803-7>.
- [124] Valente-Dos-Santos J, Tavares ÓM, Duarte JP, Sousa-E-Silva PM, Rama LM, Casanova JM, et al. Total and regional bone mineral and tissue composition in female adolescent athletes: comparison between volleyball players and swimmers. *BMC Pediatr* 2018;18:212. <https://doi.org/10.1186/s12887-018-1182z>.
- [125] Krzykała M, Konarski JM, Malina RM, Rachwałski K, Leszczyński P, Ziółkowska-Łajp E. Fatness of female field hockey players: Comparison of estimates with different methods. *Homo* 2016;67:245–57. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2016.03.003>.
- [126] Wylleman P, Reints A. A lifespan perspective on the career of talented and elite athletes: perspectives on high-intensity sports. *Scand J Med Sci Sports* 2010;20 Suppl 2:88–94. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01194.x>.
- [127] Ministerio de Educación y Ciencia, «BOE». Real Decreto 971/2007, de 13 de julio, sobre deportistas de alto nivel y alto rendimiento. M. vol. núm. 177, de 25 de julio de 2007 Referencia: BOE-A-2007–14231. n.d.
- [128] Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, Carter S, Constantini N, Lebrun C, et al. The IOC consensus statement: beyond the Female Athlete Triad--Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *Br J Sports Med* 2014;48:491–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093502>.
- [129] De Souza MJ, Nattiv A, Joy E, Misra M, Williams NI, Mallinson RJ, et al. 2014 Female Athlete Triad Coalition Consensus Statement on Treatment and Return to Play of the Female Athlete Triad: 1st International Conference held in San Francisco, California, May 2012 and 2nd International Conference held in Indianapolis, Indiana, May 2013. *Br J Sports Med* 2014;48:289. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093218>.

- [130] Keen AD, Drinkwater BL. Irreversible bone loss in former amenorrheic athletes. *Osteoporos Int* 1997;7:311–5. <https://doi.org/10.1007/BF01623770>.
- [131] Thralls KJ, Nichols JF, Barrack MT, Kern M, Rauh MJ. Body Mass-Related Predictors of the Female Athlete Triad Among Adolescent Athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2016;26:17–25. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2015-0072>.
- [132] Hind K, Slater G, Oldroyd B, Lees M, Thurlow S, Barlow M, et al. Interpretation of Dual-Energy X-Ray Absorptiometry-Derived Body Composition Change in Athletes: A Review and Recommendations for Best Practice. *Journal of Clinical Densitometry* 2018;21:429–43. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2018.01.002>.
- [133] WHO Study Group on Assessment of Fracture Risk and its Application to Screening for Postmenopausal Osteoporosis, editor. *Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis*. Geneva: World Health Organization; 1994.
- [134] Pothuau L, Carceller P, Hans D. Correlations between grey-level variations in 2D projection images (TBS) and 3D microarchitecture: applications in the study of human trabecular bone microarchitecture. *Bone* 2008;42:775–87. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.11.018>.
- [135] Lewiecki EM, Binkley N, Morgan SL, Shuhart CR, Camargos BM, Carey JJ, et al. Best Practices for Dual-Energy X-ray Absorptiometry Measurement and Reporting: International Society for Clinical Densitometry Guidance. *J Clin Densitom* 2016;19:127–40. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.03.003>.
- [136] Drobnic F, Galobardes A, Til L, Yanguas J, Del Río L, Di Gregorio S, García M,, Fernández X. Análisis de la composición corporal mediante DXA en fútbol. Evaluación del sistema y el método. *Proceedings 4º Congreso FEMEDE, Santander* 2012. En proceso de publicación. n.d.
- [137] Humbert L, Martelli Y, Fonolla R, Steghofer M, Di Gregorio S, Malouf J, et al. 3D-DXA: Assessing the Femoral Shape, the Trabecular Macrostructure and the Cortex in 3D from DXA images. *IEEE Trans Med Imaging* 2017;36:27–39. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2593346>.
- [138] Humbert L, Hazrati Marangalou J, Del Río Barquero LM, van Lenthe GH, van Rietbergen B. Technical Note: Cortical thickness and density estimation from clinical CT using a prior thickness-density relationship. *Med Phys* 2016;43:1945. <https://doi.org/10.1118/1.4944501>.
- [139] Humbert L, Winzenrieth R, Di Gregorio S, Thomas T, Vico L, Malouf J, et al. 3D Analysis of Cortical and Trabecular Bone From Hip DXA: Precision and Trend Assessment Interval in Postmenopausal Women. *J Clin Densitom* 2019;22:214–8. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2018.05.001>.
- [140] Ruiz Wills C, Olivares AL, Tassani S, Ceresa M, Zimmer V, González Ballester MA, et al. 3D patient-specific finite element models of the proximal femur based on DXA towards the classification of fracture and non-fracture cases. *Bone* 2019;121:89–99. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2019.01.001>.
- [141] Maïmoun L, Coste O, Philibert P, Briot K, Mura T, Galtier F, et al. Peripubertal female athletes in high-impact sports show improved bone mass acquisition and bone geometry. *Metabolism* 2013;62:1088–98. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2012.11.010>.

- [142] Koşar ŞN. Associations of lean and fat mass measures with whole body bone mineral content and bone mineral density in female adolescent weightlifters and swimmers. *The Turkish Journal of Pediatrics* 2016;58:79. <https://doi.org/10.24953/turkijped.2016.01.011>.
- [143] Egan E, Reilly T, Giacomoni M, Redmond L, Turner C. Bone mineral density among female sports participants. *Bone* 2006;38:227–33. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.08.024>.
- [144] Agostinete RR, Maillane-Vanegas S, Lynch KR, Turi-Lynch B, Coelho-e-Silva MJ, Campos EZ, et al. The Impact of Training Load on Bone Mineral Density of Adolescent Swimmers: A Structural Equation Modeling Approach. *Pediatric Exercise Science* 2017;29:520–8. <https://doi.org/10.1123/pes.2017-0008>.
- [145] Plaza-Carmona M, Vicente-Rodríguez G, Gómez-Cabello A, Martín-García M, Sánchez-Sánchez J, Gallardo L, et al. Higher bone mass in prepubertal and peripubertal female footballers. *European Journal of Sport Science* 2016;16:877–83. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1144794>.
- [146] Lee EJ, Long KA, Risser WL, Poindexter HB, Gibbons WE, Goldzieher J. Variations in bone status of contralateral and regional sites in young athletic women. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:1354–61.
- [147] Vicente-Rodríguez G, Dorado C, Ara I, Perez-Gomez J, Olmedillas H, Delgado-Guerra S, et al. Artistic versus rhythmic gymnastics: effects on bone and muscle mass in young girls. *Int J Sports Med* 2007;28:386–93. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924397>.
- [148] Vicente-Rodríguez G, Dorado C, Perez-Gomez J, Gonzalez-Henriquez JJ, Calbet J a. L. Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone* 2004;35:1208–15. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.06.012>.
- [149] Luo Y, Luo C, Cai Y, Jiang T, Chen T, Xiao W, et al. Analysis of Bone Mineral Density/Content of Paratroopers and Hoopsters. *Journal of Healthcare Engineering* 2018;2018:1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/6030624>.
- [150] Bailey CA, Brooke-Wavell K. Optimum frequency of exercise for bone health: Randomised controlled trial of a high-impact unilateral intervention. *Bone* 2010;46:1043–9. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2009.12.001>.
- [151] Min S-K, Oh T, Kim SH, Cho J, Chung HY, Park D-H, et al. Position Statement: Exercise Guidelines to Increase Peak Bone Mass in Adolescents. *J Bone Metab* 2019;26:225–39. <https://doi.org/10.11005/jbm.2019.26.4.225>.
- [152] Tanaka C, Iida T, Tawara Y, Murata M, Takamatsu J, Homma M, et al. Characteristics of bone density in adolescent synchronized swimmers. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 2006;55:165–74. <https://doi.org/10.7600/jspfsm.55.165>.
- [153] Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Gómez-Cabello A, Matute-Llorente A, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. Swimming and bone: Is low bone mass due to hypogravity alone or does other physical activity influence it? *Osteoporos Int* 2016;27:1785–93. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3448-8>.
- [154] Andreoli A, Celi M, Volpe SL, Sorge R, Tarantino U. Long-term effect of exercise on bone mineral density and body composition in post-menopausal ex-elite athletes: a retrospective study. *Eur J Clin Nutr* 2012;66:69–74. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2011.104>.

- [155] Bianchi M, Coratella G, Dello Iacono A, Beato M. Comparative effects of single vs. double weekly plyometric training sessions on jump, sprint and change of directions abilities of elite youth football players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 2019;59. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08804-7>.
- [156] Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Matute-Llorente A, Julián C, Lozano-Berges G, Gómez-Cabello A, et al. Do 6 months of whole-body vibration training improve lean mass and bone mass acquisition of adolescent swimmers? *Archives of Osteoporosis* 2017;12. <https://doi.org/10.1007/s11657-017-0362-z>.
- [157] Marin-Puyalto J, Gomez-Cabello A, Gonzalez-Aguero A, Matute-Llorente A, Gomez-Bruton A, Jürimäe J, et al. Effects of whole-body vibration training on bone density and turnover markers in adolescent swimmers. *Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism* 2020;33:623–30. <https://doi.org/10.1515/jpem-2019-0400>.
- [158] Gómez-Bruton A, González-Agüero A, Matute-Llorente A, Julián C, Lozano-Berges G, Gómez-Cabello A, et al. Effects of Whole Body Vibration on Tibia Strength and Structure of Competitive Adolescent Swimmers: A Randomized Controlled Trial. *PM R* 2018;10:889–97. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.03.015>.
- [159] Chanou K, Gerodimos V, Karatrantou K, Jamurtas A. Whole-body vibration and rehabilitation of chronic diseases: a review of the literature. *J Sports Sci Med* 2012;11:187–200.
- [160] Martínez-Pardo E, Romero-Arenas S, Alcaraz PE. Effects of different amplitudes (high vs. low) of whole-body vibration training in active adults. *J Strength Cond Res* 2013;27:1798–806. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318276b9a4>.
- [161] Ribeiro-dos-Santos MR, Lynch KR, Agostinete RR, Maillane-Vanegas S, Turi-Lynch B, Ito IH, et al. Prolonged Practice of Swimming Is Negatively Related to Bone Mineral Density Gains in Adolescents. *Journal of Bone Metabolism* 2016;23:149. <https://doi.org/10.11005/jbm.2016.23.3.149>.
- [162] Tinto A, Campanella M, Fasano M. Core strengthening and synchronized swimming: TRX® suspension training in young female athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 2017;57:744–51. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06338-6>.
- [163] Rai R, Jongenelis MI, Jackson B, Newton RU, Pettigrew S. Retirement and Physical Activity: The Opportunity of a Lifetime or the Beginning of the End? *Journal of Aging and Physical Activity* 2020;28:365–75. <https://doi.org/10.1123/japa.2019-0023>.
- [164] Erkkola RU, Vasankari T, Erkkola RA. Opinion paper: Exercise for healthy aging. *Maturitas* 2021;144:45–52. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2020.10.012>.
- [165] Babatunde OO, Forsyth JJ, Gidlow CJ. A meta-analysis of brief high-impact exercises for enhancing bone health in premenopausal women. *Osteoporos Int* 2012;23:109–19. <https://doi.org/10.1007/s00198-011-1801-0>.
- [166] Martyn-St James M, Carroll S. Effects of different impact exercise modalities on bone mineral density in premenopausal women: a meta-analysis. *J Bone Miner Metab* 2010;28:251–67. <https://doi.org/10.1007/s00774-009-0139-6>.
- [167] Zhao R, Zhao M, Zhang L. Efficiency of jumping exercise in improving bone mineral density among premenopausal women: a meta-analysis. *Sports Med* 2014;44:1393–402. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0220-8>.

- [168] Castañeda-Babarro A, Arbillaga-Etxarri A, Gutiérrez-Santamaría B, Coca A. Physical Activity Change during COVID-19 Confinement. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:E6878. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186878>.
- [169] Farr JN, Amin S, LeBrasseur NK, Atkinson EJ, Achenbach SJ, McCready LK, et al. Body composition during childhood and adolescence: relations to bone strength and microstructure. *J Clin Endocrinol Metab* 2014;99:4641–8. <https://doi.org/10.1210/jc.2014-1113>.
- [170] Gifre L, Humbert L, Muxi A, Del Rio L, Vidal J, Portell E, et al. Analysis of the evolution of cortical and trabecular bone compartments in the proximal femur after spinal cord injury by 3D-DXA. *Osteoporosis International* 2018;29:201–9. <https://doi.org/10.1007/s00198-017-4268-9>.
- [171] Freitas L, Amorim T, Humbert L, Fonollá R, Flouris AD, Metsios GS, et al. Cortical and trabecular bone analysis of professional dancers using 3D-DXA: a case-control study. *J Sports Sci* 2019;37:82–9. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1483178>.
- [172] Mayhew PM, Thomas CD, Clement JG, Loveridge N, Beck TJ, Bonfield W, et al. Relation between age, femoral neck cortical stability, and hip fracture risk. *The Lancet* 2005;366:129–35. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)66870-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)66870-5).
- [173] Aspray TJ, Prentice A, Cole TJ, Sawo Y, Reeve J, Francis RM. Low bone mineral content is common but osteoporotic fractures are rare in elderly rural Gambian women. *J Bone Miner Res* 1996;11:1019–25. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650110720>.
- [174] Humbert L, Martelli Y, Fonolla R, Steghofer M, Di Gregorio S, Malouf J, et al. 3D-DXA: Assessing the Femoral Shape, the Trabecular Macrostructure and the Cortex in 3D from DXA images. *IEEE Trans Med Imaging* 2017;36:27–39. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2593346>.
- [175] Bredbenner TL, Mason RL, Havill LM, Orwoll ES, Nicolella DP, for the Osteoporotic Fractures in Men (MrOS) Study. Fracture Risk Predictions Based on Statistical Shape and Density Modeling of the Proximal Femur: Fracture risk predictions based on ssdm of the proximal femur. *Journal of Bone and Mineral Research* 2014;29:2090–100. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2241>.
- [176] O'Rourke D, Beck BR, Harding AT, Watson SL, Pivonka P, Martelli S. Assessment of femoral neck strength and bone mineral density changes following exercise using 3D-DXA images. *J Biomech* 2021;119:110315. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110315>.

**BELLVER
VIVES**

**MONTSERRAT
- 36976834X**

Firmado digitalmente
por BELLVER VIVES
MONTSERRAT -
36976834X
Fecha: 2021.09.30
08:51:36 +02'00'