

ESTUDIO DE LA BIOMECÁNICA DEL HUESO CON EL LONG-BONE-DIAPHYSEAL-CSG-TOOLKIT: UNA HERRAMIENTA PARA INVESTIGAR LA ACTIVIDAD FÍSICA EN LAS POBLACIONES ARQUEOLÓGICAS

BIOMECHANICAL STUDY OF BONE WITH THE LONG-BONE-DIAPHYSEAL-CSG-TOOLKIT: A TOOL FOR THE INVESTIGATION OF PHYSICAL ACTIVITY IN ARCHAEOLOGICAL POPULATIONS

Giulia UCCHEDDU *

Resumen

Este trabajo introduce una innovadora metodología arqueológica para analizar la morfometría geométrica en huesos humanos, enfocándose en las propiedades biomecánicas de las diáfisis de huesos largos como indicadores de actividad en poblaciones históricas. Se realizó un estudio en 126 individuos de cementerios musulmanes de la época Nazarí utilizando tecnología de escaneo 3D y la herramienta Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit herramientas para el análisis morfométrico. Los resultados ofrecen valiosa información sobre la actividad física y la carga de trabajo en esas poblaciones, destacando el potencial de esta metodología en la investigación arqueológica.

Palabras clave

Granada, época Nazarí, antropología física, morfometría geométrica 3D

Abstract

This work introduces an innovative archaeological methodology for analysing geometric morphometrics in human bones, focusing on the biomechanical properties of the long bone diaphysis as indicators of activity in historical populations. A study was conducted on 126 individuals from Muslim cemeteries of the Nasrid period using 3D scanning technology and the Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit for morphometric analysis. The results provide valuable information about physical activity and workload in these populations, highlighting the potential of this methodology in archaeological research.

Keywords

Granada, Nasrid period, physical anthropology, 3d geometric morphometrics

INTRODUCCIÓN

La evaluación de patrones de actividad a través del análisis de restos esqueléticos ha sido un tema de gran interés en la bioarqueología, con investigadores buscando incansablemente las claves que permitan comprender la vida cotidiana y las prácticas culturales de poblaciones pasadas (EVANS, 1953; FRESIA *et al.*, 1990; LIEBERMAN *et al.*, 2004; MARCHI, 2004; JURMAIN *et al.*, 2011). En esta búsqueda por reconstruir el pasado, es esencial no limitarse únicamente al estudio de los objetos materiales encontrados en los sitios arqueológicos, sino también considerar el invaluable tesoro de información que se encuentra en los restos óseos de los individuos que dejaron dichos vestigios. El cuerpo humano, como un archivo biológico y cultural, se convierte en una fuente privilegiada para comprender cómo las prácticas y valores sociales se manifestaron en diferentes sociedades a lo largo del tiempo (JOYCE 2005).

* Universidad de Granada, giuliauccheddu55@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-5869-520X>

Los restos óseos ofrecen importantes pistas sobre diversos aspectos de la vida de las poblaciones antiguas, y, la biomecánica ósea, centrada en la actividad física y la carga de trabajo, proporciona una valiosa perspectiva para la investigación arqueológica al establecer correlaciones con los datos históricos disponibles.

La relevancia de la carga mecánica en el desarrollo de la estructura ósea y la adaptación del hueso a su entorno mecánico a lo largo de la vida, sigue siendo ampliamente reconocida y aceptada entre los bioarqueólogos y antropólogos. El método de evaluación ampliamente utilizado para identificar posibles indicadores de actividad se centra en las características estructurales del hueso, en particular, en los cambios en la geometría de la sección transversal de los huesos largos (COWIN 2001; RUFF *et al.*, 2006). Este enfoque ha sido largamente empleado para reconocer patrones de actividad tanto generales como específicos en poblaciones arqueológicas, brindando valiosa información sobre actividades habituales, ocupaciones, movilidad, economías de subsistencia, división del trabajo, especialización o intensidad de actividades (HOLT 2003; MARCHI 2004; MARCHI *et al.*, 2006; SPARACELLO y MARCHI 2006; RUFF *et al.*, 2006; WESCOTT 2006; SLÁDEK *et al.*, 2007; MAGGIANO *et al.*, 2008; WEISS 2009; MARCHI *et al.*, 2011; SPARACELLO *et al.*, 2011; WALLANCE *et al.*, 2012; MACINTOSH 2014; CAMERON y STOCK 2018; HILL *et al.*, 2020).

Usando modelos de ingeniería aplicados a los ejes óseos (conocido como estudio de geometría transversal o CSG), se ha demostrado ampliamente la relación entre la carga mecánica y la remodelación ósea como respuesta a esta carga en lo que respecta a la forma y robustez del hueso (RUFF y HAYES 1983). Se acepta generalmente que un estrés mecánico aumentado en una determinada área de un hueso induce la deposición de tejido óseo en esa región para fortalecer el hueso y reducir la tensión a un nivel tolerable, proceso conocido como “adaptación funcional del hueso” (RUFF 2008; RUFF 2000) (Fig. 1). Una sola actividad dominante puede ocultar la presencia de múltiples comportamientos menos dominantes, y la realización habitual de múltiples comportamientos menos dominantes, sin uno dominante, puede influir en el cambio morfológico óseo (RUFF *et al.*, 2006). Además, los exámenes de asimetría bilateral pueden revelar cargas mecánicas diferenciales y proporcionar información sobre el uso de las extremidades y actividades específicas (AUERBACH y RUFF 2006; MAGGIANO *et al.*, 2008; WEISS 2009).

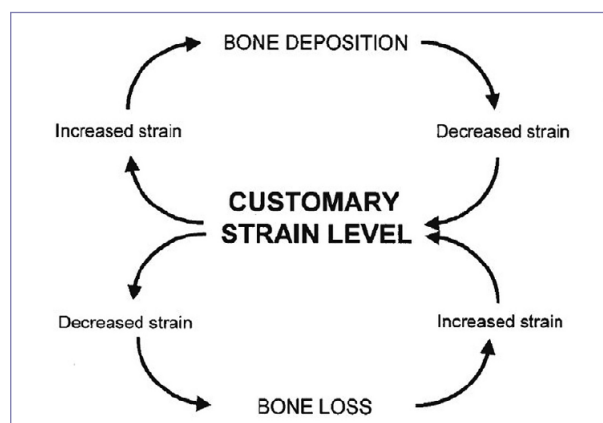


Fig. 1. Modelo de retroalimentación de la adaptación funcional ósea. Fuente: Imagen modificada de Lanyon, 1982 en RUFF 2006.

Existen varias herramientas analíticas para investigar las propiedades CSG del hueso, sin embargo, ninguna de estas herramientas analíticas es fácil de usar. Este artículo pretende presentar una aplicación de la innovadora herramienta Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit de código abierto y fácil de usar, desarrollada por Bertsatos y Chovalopolou en 2018, para permitir el análisis morfométrico en cada sección transversal a lo largo de toda la diáfisis a partir de los modelos tridimensionales de los huesos.

Dentro del contexto de este estudio, se utilizó el escaneo 3D para obtener modelos digitales tridimensionales de los huesos largos de dos colecciones osteoarqueológicas que datan de la época nazarí, Baza Mancoba II y La Torrecilla. A continuación, se analizó minuciosamente la morfometría de estos modelos utilizando la herramienta Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit. Este trabajo abarca desde la preparación de la muestra hasta el análisis de los datos obtenidos, lo que permite una interpretación de la biomecánica ósea y proporciona información arqueológica valiosa sobre la actividad física y la carga de trabajo en esas poblaciones, en relación con el entorno geográfico, cultural y socioeconómico (RUFF *et al.*, 2006; RUFF 2008).

El caso de estudio

Este estudio se centra en Baza y La Torrecilla, dos grupos humanos con una rica historia compartida, enmarcada en el Periodo Nazarí del Reino de Granada (XIII-XV), el último Estado musulmán de la península ibérica, la antigua al-Ándalus.

La ciudad de Baza fue un importante centro comercial en Al-Ándalus, en el altiplano nordeste de la provincia de Granada, en el surco intrabético de la península ibérica. Su importancia radica en su ubicación estratégica y geografía privilegiada, lo que la convirtió en un lugar de gran relevancia tanto desde el punto de vista geográfico como económico. La economía de los antiguos habitantes de Baza se basaba en diversas actividades comerciales y agrícolas, y la seda, una de las principales industrias del Reino Nazarí, destacaba como un producto de gran valor y relevancia pública (DELGADO 2001; PÉNDULO 2015).

Por otro lado, La Torrecilla era un pequeño asentamiento rural ubicado en un entorno de llanura cerca del río Cacín. La economía de la comunidad se basaba en la agricultura, principalmente el cultivo de cebada, olivos y almendros. La población estaba compuesta principalmente por campesinos con recursos económicos limitados, y el lugar estaba alejado de los grandes centros urbanos o rutas principales (MARTÍN 2006).

Estudios recientes han proporcionado nuevos conocimientos sobre las condiciones de vida en la sociedad musulmana de Al-Ándalus (PREVEDOROU *et al.*, 2005; LAFFRANCHI *et al.*, 2010; MUNDEE 2010; FULLER *et al.*, 2010; JIMÉNEZ BROBEIL *et al.*, 2012, 2021; SALAZAR-GARCÍA *et al.*, 2014; CHARISI *et al.*, 2016; LAFFRANCHI *et al.*, 2016; GUEDE *et al.*, 2017; INSKIP *et al.*, 2018; TOSO *et al.*, 2019; OSIPOV *et al.*, 2020; MACROBERTS *et al.*, 2020), por ejemplo, algunos de los análisis realizados apuntan a una dieta basada en verduras e indican que los hombres tenían una dieta más variada y rica en proteínas animales, además de un acceso privilegiado a los recursos alimentarios externos. Hombres y mujeres tenían roles sociales distintos, mientras los hombres tenían mayor autoridad y participación en ámbitos públicos y políticos, las mujeres se centraban principalmente en tareas domésticas y familiares (GUICHARD 1976; LÓPEZ DE LA PLAZA 1992). Además, varias investigaciones sugieren entidades y tipologías diferentes de actividad física en hombres y mujeres (POMEROY Y ZAKRZEWSKI 2009; JIMÉNEZ-BROBEIL *et al.*, 2012; INSKIP 2013; LAFFRANCHI *et al.*, 2016; OSIPOV *et al.*, 2020). No había diferencia solo entre hombres y mujeres, también se han reportado diferencias entre contextos islámicos rurales y urbanos, que sugieren un mayor estrés mecánico en las mujeres del contexto urbano (CHARISI *et al.*, 2016; LAFFRANCHI *et al.*, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material objeto de estudio procede de las necrópolis medievales hispanomusulmanes de Baza Mancoba II y La Torrecilla, ubicadas en la provincia de Granada (España). El material esquelético se encuentra depositado en el Laboratorio de Antropología Física de la Universidad de Granada (Fig. 2).

La muestra analizada incluye 126 individuos adultos de ambos sexos: Baza (55 individuos totales, 24 mujeres y 31 hombres) y La Torrecilla (71 individuos totales, 33 mujeres y 38 hombres). La muestra se limitó a adultos para evitar sesgos relacionados con la inmadurez del sistema esquelético en las variables analizadas y para garantizar resultados más precisos. Además, se excluyeron individuos con alteraciones patológicas significativas en el tejido óseo para mantener la homogeneidad de la muestra y garantizar la fiabilidad de los resultados.



Fig. 2. Almacenamiento de los restos óseos en el Laboratorio de Antropología Física de la UGR

Este estudio se ha focalizado en el análisis de la sección transversal del húmero y del cúbito, los huesos clave del brazo humano, esenciales para la movilidad y funcionamiento del mismo. Se analizó un total de 312 huesos largos, y de estos, 88 humeros izquierdos, 87 humeros derechos, 71 cúbitos derechos y 66 cúbitos izquierdas.

Métodos

Para llevar a cabo esta investigación se siguieron varios pasos, empezando por la limpieza de los materiales objeto de estudio. En primer lugar, se realizó una minuciosa limpieza de los restos óseos para eliminar cualquier sedimento o suciedad, empleando herramientas delicadas para preservar la integridad de los huesos. Una vez limpios y secos, se procedió a la delicada tarea de reconstruir los fragmentos fracturados. Los fragmentos contiguos fueron cuidadosamente unidos a lo largo de las líneas de fractura, utilizando cinta de papel y pegamento vinílico reversible en agua, asegurando una restauración precisa y sin daños adicionales. Durante el proceso de secado, se tomó especial cuidado al colocar los fragmentos en una bandeja de arena, proporcionando un soporte adecuado para evitar deformaciones o daños en la estructura ósea.

Esta etapa de reconstrucción fue esencial para asegurar que los huesos estuvieran en su forma más completa y original antes de realizar las mediciones y análisis. Posteriormente, se obtuvieron los modelos tridimensionales de los huesos utilizando la tecnología avanzada del Escáner 3D Artec Space Spider. Este escáner portátil de alta precisión capturó imágenes detalladas de los huesos en tres dimensiones, permitiendo obtener modelos digitales precisos y realistas.

Para poder analizar estadísticamente las propiedades geométricas de estos modelos tridimensionales, se emplearon dos herramientas de software especializadas: Meshlab y el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit. El software Meshlab (CIGNONI *et al.*, 2008) permitió manipular y editar los modelos tridimensionales, asegurando una visualización clara y precisa de los datos. Por otro lado, el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit es una herramienta innovadora desarrollada por Bertsatos y Chovalopoulou en 2018 en un entorno GnuOctave, que facilita el análisis de las propiedades geométricas específicas de los modelos tridimensionales de los huesos en cuestión.

Escáner 3D Artec Space Spider

Se elaboraron los modelos tridimensionales de los 312 huesos utilizando la tecnología avanzada del Escáner 3D Artec Space Spider (Fig. 3, 4). Este escáner portátil de alta precisión utiliza la tecnología de luz estructurada para



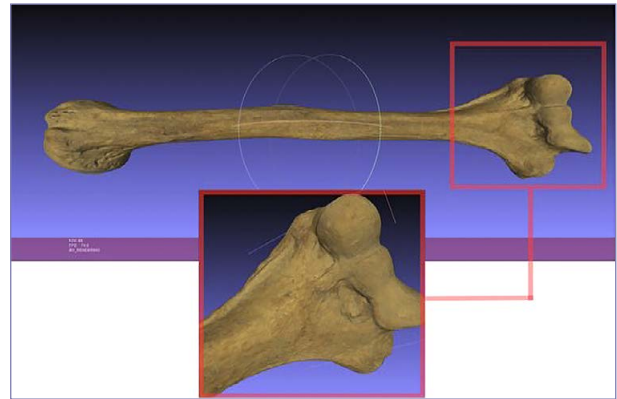
Fig. 3. Elaboración 3D de los huesos objeto de este estudio con el Escáner 3D Artec Space Spider, propiedad UGR



Fig. 4. El escáner 3D Artec Space Spider

capturar información geométrica precisa y texturas de alta resolución de los huesos en tres dimensiones, permitiendo obtener modelos digitales precisos y realistas (Fig. 5). El escáner es portátil y está acompañado por el software de procesamiento de datos que permite editar, fusionar y exportar los modelos escaneados en diversos formatos, lo que facilita la integración con otros sistemas y flujos de trabajo.

Fig. 5. Modelo 3D elaborado con el Escáner 3D Artec Space Spider. Elaboración propia



El Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit y las variables CSG

Para calcular las propiedades geométricas de la sección transversal del hueso directamente a partir del modelo 3D, se utilizó el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit, una herramienta desarrollada por Bertsatos y Chovalopoulou (2018, 2023). Se trata de un conjunto de herramientas integrado en el lenguaje de programación GnuOctave, que facilita la representación gráfica de los contornos periósticos calculados y sus respectivas propiedades geométricas transversales. Este paquete, ha sido oficialmente indexado en GnuOctavePackages y se ha convertido en una herramienta valiosa para el análisis de modelos tridimensionales de huesos largos. Su implementación es de código abierto, lo que significa que está disponible de forma gratuita para cualquier interesado en <https://github.com/pr0m1th3as/long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit>.

Además, esta herramienta emplea algoritmos de optimización para orientar anatómicamente el hueso y calcular contornos transversales en ubicaciones específicas a lo largo de la diáfisis (Fig. 6).

En este estudio, se han elegido dos ubicaciones particulares en los húmeros y los cúbitos, correspondientes al centroide del 35% y al centroide del 50% de la longitud desde el extremo distal del hueso (Fig. 7). Estas ubicaciones se han identificado previamente en investigaciones anteriores como las áreas más informativas sobre la carga del miembro superior (WEISS 2009; HILL *et al.*, 2020).

Fig. 7. Puntos de contorno transversales de un húmero (35% y 50%) y de un cúbito (50%). Elaboración propia

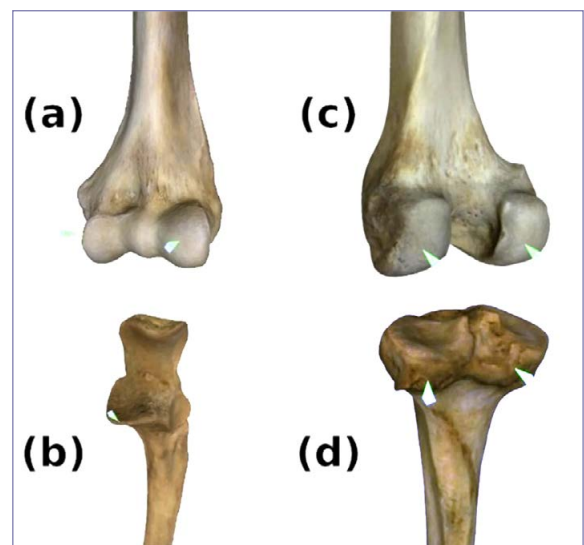


Fig. 6. Puntos de alineación inicial registrados automáticamente (mostrados con pines verdes) calculados con la función `longbone_Registration` para (a) húmero, (b) cúbito, (c) fémur y (d) tibia. Fuente: Tomado de Bertsatos *et al.* (2023)

Una ventaja del CSG-Toolkit desarrollado por Bertatos y Chovalopoulou (2018; 2023) es su capacidad para identificar y manejar modelos 3D que puedan estar dañados o contengan valores atípicos. Durante el procesamiento de los modelos, la herramienta realiza una serie de verificaciones y filtrados para asegurarse de que los datos sean confiables y adecuados para el análisis. Por ejemplo, puede detectar si un modelo 3D presenta agujeros o superficies duplicadas, lo que podría afectar negativamente la precisión de las mediciones y los cálculos de las propiedades geométricas. En caso de encontrar estos problemas, el toolkit puede realizar reparaciones o notificar al usuario para que tome las medidas necesarias antes de continuar con el análisis.

Además, el CSG-Toolkit también es capaz de identificar huesos con deformaciones patológicas, es decir, aquellos que pueden tener malformaciones o cambios estructurales debido a condiciones médicas o enfermedades.

Una característica destacada del paquete CSG-toolkit es su capacidad para visualizar la geometría de la sección transversal de los modelos 3D procesados, lo que permite inspeccionar los resultados de manera visual. Esto proporciona una herramienta útil para analizar y evaluar la calidad y precisión de los resultados obtenidos. El CSG-toolkit permite representar gráficamente las cinco secciones transversales importantes (ubicadas al 20%, 35%, 50%, 65% y 80% de la longitud del hueso) junto con sus respectivas propiedades CSG (Fig. 8).

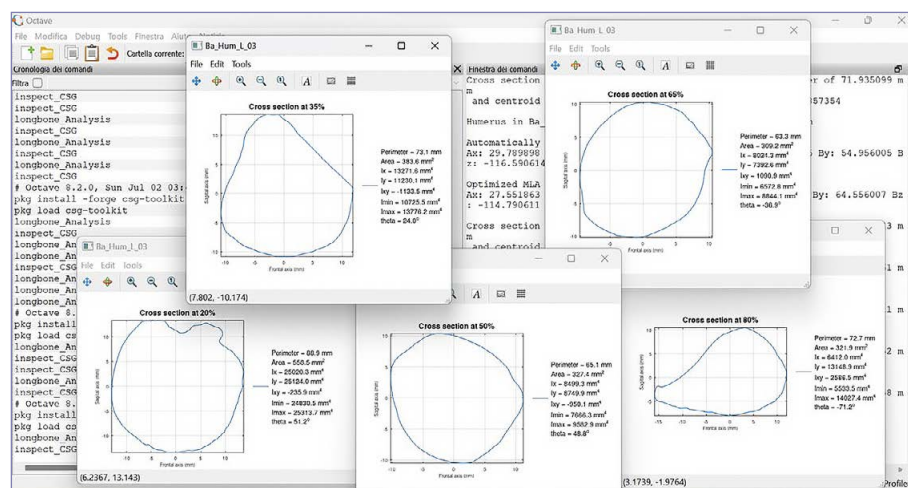


Fig. 8. Gráficos de geometría transversal de un humero generados con la función *inspect_CSG* para inspección visual

Esta visualización facilita la identificación de posibles patrones o tendencias en los datos y permite una interpretación más profunda de los resultados obtenidos.

Es importante resaltar que el CSG-Toolkit, alineando anatómicamente los modelos a través de puntos ubicados en las epífisis y calculando la división en centroides a partir de la longitud máxima del hueso, requiere que se utilicen únicamente huesos completos para un análisis preciso. Se ha dedicado un esfuerzo considerable en la selección de los huesos que forman parte de la muestra, con el objetivo de garantizar la integridad de los mismos.

El método utilizado en este estudio ha sido sometido a rigurosas pruebas y validaciones mediante el empleo de modelos de huesos reales y modelos "ground-truth" con propiedades geométricas conocidas. Los resultados obtenidos durante estas pruebas demuestran de manera concluyente la precisión y confiabilidad del método, además de destacar su capacidad para superar los errores inherentes a los métodos tradicionales de cálculo de propiedades geométricas transversales (BERTSATOS y CHOVALOPOULOU 2018).

A seguir un detallado resumen de las propiedades geométricas transversales periostales analizadas mediante el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit (BERTSATOS y CHOVALOPOULOU 2018; BERTSATOS *et al.*, 2023) (Tab. 1).

Símbolo	Definición	Relevancia mecánica
Área	Área cortical	Indica la resistencia de la sección transversal a cargas de compresión o tensión
I_{max}	Segundo momento de área máximo	Correlación de la máxima resistencia a la flexión
I_{min}	Segundo momento de área mínimo	Correlación de la resistencia mínima a la flexión
I_x	El momento de inercia en el plano anterior-posterior	Correlación de la resistencia a la flexión sobre el eje x (plano anterior-posterior)
I_y	El momento de inercia en el plano medio-lateral	Correlación de la resistencia a la flexión sobre el eje y (plano medio-lateral)
θ	El ángulo θ se refiere a la orientación de los ejes principales de rigidez a la flexión	Se utiliza para describir la orientación de estos ejes principales de rigidez a la flexión con respecto a un punto de referencia, como el eje longitudinal del hueso.

Tab. 1. Descripción de las propiedades CSG estimadas con el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit. Fuente: Ruff, 2008.

A partir de las propiedades CSG obtenidas con el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit, se calcularon otros valores CSG adicionales (Tab. 2):

Símbolo	Definición	Relevancia mecánica
I_{min}/I_{max}	La relación entre I_{min}/I_{max}	Indica la forma de la sección transversal y la dirección de carga dentro de la estructura
$J = I_{min} + I_{max}$	El segundo momento polar de área	Mide la rigidez torsional de una sección transversal. Valores mayores de J indican una mayor carga mecánica.

Tab. 2. Valores CSG adicionales calculados

Procesado estadístico

Los datos analizados de cada uno de los huesos se han recogido y analizado en SPSS (Tab. 3). Se realizó una estimación de la masa corporal basada en el diámetro de la cabeza femoral, teniendo en cuenta el sexo de los individuos. A seguir, se ha utilizado la masa corporal estimada para estandarizar las propiedades CSG y eliminar el sesgo relacionado con las diferencias de tamaño entre individuos. Una vez recopilados los datos, estos han sido procesados estadísticamente con el objetivo de obtener los promedios de los valores CSG obtenidos, calcular el índice de dimorfismo sexual y el grado de asimetría bilateral del segundo momento polar del área (J) para reconocer el uso predominante de un brazo.

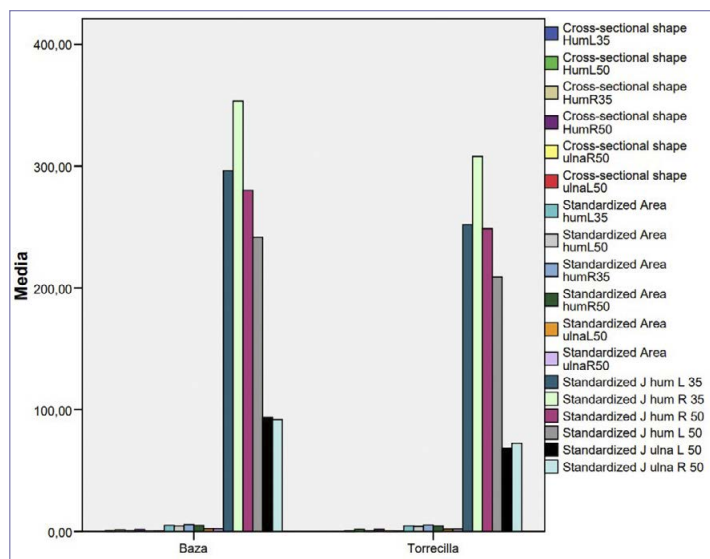
Símbolo	Definición	Formula
MC	Masa Corporal	Hombres = $(2,471 \times CF - 54,9) \times 0,9$ Mujeres = $(2,426 \times CF - 35,1) \times 0,9$
IDS	Índice de dimorfismo sexual	$(\text{Media de valores en hombres} / \text{Media de valores en mujeres}) \times 100$
AB	Asimetría bilateral	$[(\text{Valor derecho} - \text{Valor izquierdo}) / (\text{Media de los valores derecho e izquierdo})] \times 100$

Tab. 3. Masa Corporal, Índice de dimorfismo sexual, Asimetría bilateral

RESULTADOS

Variabilidad Intra/Inter Muestral de las propiedades CSG

Los análisis estadísticos apuntan a que los hombres y las mujeres de Baza eran más robustos que los de La Torrecilla, diferencias que se hacen más evidentes en los valores masculinos (Gráf. 1). La diferencia de medias en la masa corporal confirma una mayor robustez en los individuos de Baza en comparación con La Torrecilla, tanto en hombres como en mujeres.



Gráf. 1. Variabilidad inter muestral de las propiedades CSG

El dimorfismo sexual (IDS)

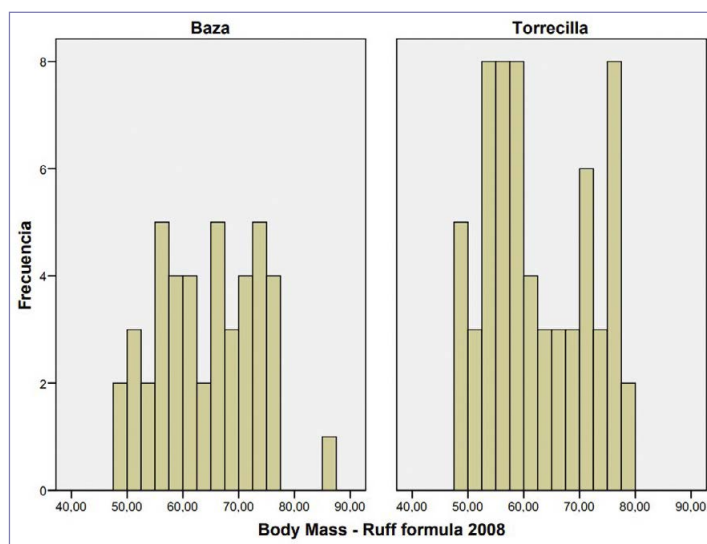
Los resultados obtenidos del IDS indican de manera concluyente un alto dimorfismo sexual presente en ambas poblaciones. Sin embargo, mediante una observación visual de la comparación de los índices IDS entre ambas poblaciones, se aprecia que el dimorfismo es más pronunciado en la población de La Torrecilla y menos en la de Baza (Gráf. 2).

Asimetría Bilateral (AB)

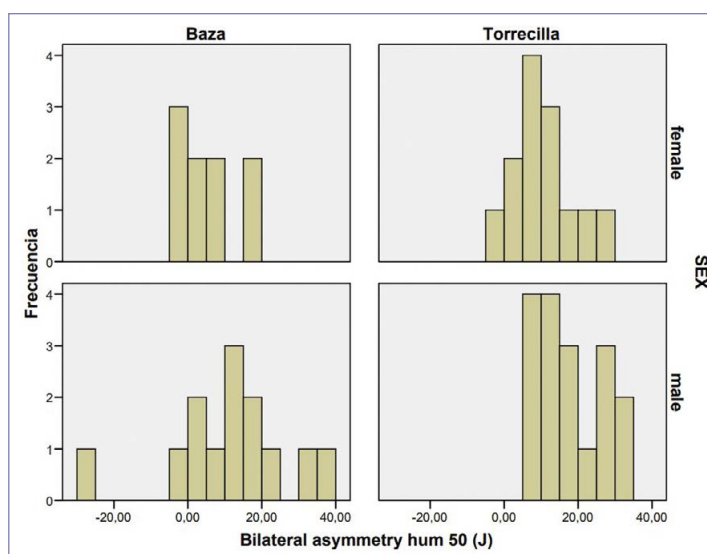
Los resultados apuntan a una mayor asimetría bilateral en el grupo de La Torrecilla, tanto en hombres como en mujeres (Gráf. 3). En La Torrecilla, también se ha observado una asimetría significativamente mayor en los hombres en comparación con las mujeres.

DISCUSIÓN

El uso del Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit representa una ventaja significativa en el análisis de la morfología ósea, ya que permite eliminar los errores intra e inter observadores al orientar de manera confiable los contornos transversales hacia una posición



Gráf. 2. El dimorfismo sexual (IDS)



Gráf. 3. Asimetría bilateral (AB)

cercana a la verdadera anatomía del hueso. Esta precisión en la orientación de los contornos resulta crucial para obtener mediciones geométricas confiables y coherentes a lo largo de la diáfisis del hueso.

Lo verdaderamente importante de este estudio es esta nueva propuesta metodológica, que a partir de los modelos tridimensionales de los huesos se revela extremadamente valiosa a la hora de reconstruir las actividades habituales de las poblaciones arqueológicas objeto de estudio (RUFF *et al.*, 2006).

Este estudio se basa en la evidencia de que la morfometría de los huesos cambia en función de la carga mecánica a la que se exponen durante la vida (RUFF *et al.*, 2006; WALLANCE *et al.*, 2012). Sin embargo, cabe destacar que también otros factores, como el estado de salud, la edad, el clima, factores genéticos y condiciones nutricionales, pueden influir en las propiedades geométricas de los huesos. Por esta razón, es importante evidenciar que la elección de las colecciones esqueléticas de Baza Mancoba II y La Torrecilla facilita un análisis más claro del estrés mecánico, debido a que comparten el espacio geográfico, el periodo histórico, la cultura y el patrimonio genético.

En general, los restos estudiados se hallaban en bastante buen estado de conservación, hecho que ha permitido el análisis de las propiedades geométricas de una muestra significativamente grande. Sin embargo, una gran limitación de esta metodología innovadora es que el CSG-Toolkit exige que los huesos estén completos, ya que sus cálculos se basan en la longitud total del hueso, algo que no es común en las colecciones arqueológicas. Lamentablemente, algunos huesos presentaban daños en sus epífisis, lo que podría haber sido motivo para su exclusión de la investigación. Para ampliar la muestra, se reconstruyeron virtualmente en Meshlab (CIGNONI *et al.*, 2008) las epífisis dañadas de los huesos que aún conservaban su forma y estructura. Gracias a esta técnica, se logró recuperar valiosa información de huesos que de otro modo habrían sido excluidos de la muestra, maximizando así el tamaño y la representatividad de la misma.

Es importante señalar que los húmeros y los cúbitos, siendo huesos del brazo, no se ven afectados por la locomoción, es decir, la forma de desplazarse de un lugar a otro. En cambio, las variaciones en sus dimensiones transversales y fuerza están más relacionadas con las actividades manuales habituales y las fuerzas que actúan sobre el esqueleto debido a estas actividades (MARCHI *et al.*, 2006; RUFF 2008). Por lo tanto, es de gran valor examinar la economía de estas comunidades si deseamos comprender los resultados biomecánicos.

Se documenta una gran robustez y desarrollo muscular en ambos grupos. Sin embargo, los individuos que vivían en el entorno urbano de Baza, especialmente los hombres, presentaban huesos más robustos en comparación con sus contrapartes del entorno rural de La Torrecilla.

Los avances tecnológicos de la época han seguramente permitido una mayor eficiencia en las tareas agrícolas, reduciendo la necesidad de un esfuerzo físico extremo y, en consecuencia, influyendo en los valores morfométricos observados en ambos grupos (MALPICA CUELLO 2012). Los musulmanes de La Torrecilla, cuya economía se basaba exclusivamente en la agricultura, muestran una menor robustez que podría estar vinculada a una adaptación a prácticas agrícolas más sofisticadas y menos exigentes desde el punto de vista físico. Los avances tecnológicos también mejoraron la productividad agrícola de la región, desarrollando complejas redes de acequias y canales para distribuir el agua de manera más eficiente en las zonas agrícolas y garantizando un suministro adecuado de agua para los cultivos en épocas de escasez (TORRES DELGADO 1987; MALPICA CUELLO 2012). Además, con la introducción de los molinos de agua, la producción de harina se volvió más rápida y eficiente, garantizando un suministro más estable de alimentos durante todo el año (MALPICA CUELLO 2012).

Mientras que los individuos de Baza disfrutaban de un entorno urbano próspero, el grupo de La Torrecilla vivía en un entorno rural empobrecido y aislado. Un nivel socioeconómico superior suele correlacionarse con

una mayor estatura y un tamaño corporal más robusto (GUSTAFSSON *et al.*, 2007), debido a la influencia de factores como la nutrición, el acceso a servicios médicos y la calidad de vida, que pueden ejercer un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo óseo. Una mejor nutrición proporciona beneficios clave a partir de una mejor calidad de vida y una mejor resistencia física, que a su vez, permite enfrentar mejor los desafíos diarios y mantener una productividad más constante en sus actividades laborales y cotidianas. Asimismo, una dieta rica en proteínas, con un mayor consumo de carne, podría favorecer el crecimiento muscular (GRAY y WOLFE 1980; DURY *et al.*, 2018). Estudios previos afirman que las verduras predominaban en la dieta de los musulmanes de Al-Ándalus, no obstante, también reportan que los habitantes de las ciudades disfrutaban de una dieta más variada, incorporando cantidades significativas de carne en su alimentación (MUNDEE 2010; JIMÉNEZ BROBEIL *et al.*, 2012), hecho vinculable con el mayor desarrollo muscular de los individuos de Baza.

La baja asimetría bilateral en los húmeros dentro de la muestra de Baza se puede atribuir al hecho de que la población en el centro urbano tenía un repertorio más amplio de tareas que requerían el uso de ambos brazos, como se ha señalado en estudios previos (TORRES MARTÍN 2006). Dichos estudios indican que la población de Baza probablemente estaba involucrada en actividades físicas bimanuales intensas y frecuentes que involucraban esfuerzos y el transporte de cargas considerables (PRIETO 2006).

Además, considerando la ubicación fronteriza de Baza, es posible que debido a las hostilidades intermitentes que existían con el Reino de Castilla, la población estuviera expuesta a situaciones de alta demanda física y tareas físicas extenuantes, como cargar y manejar armas pesadas, levantar y transportar equipos de asedio. (PRIETO 2006; RÍOS *et al.*, 2007).

En ambas muestras, se observa que todas las dimensiones son mayores en los individuos masculinos que en los femeninos. Esta tendencia no resulta sorprendente, dado que ha sido ampliamente documentado que, en general, los hombres suelen ser más grandes que las mujeres en todas las poblaciones humanas (GRAY y WOLF 1980; GUSTAFSSON *et al.*, 2007). Sin embargo, los resultados apuntan a que las mujeres de Baza vivían sujetas a un mayor estrés mecánico, lo cual es coherente con diversos estudios previos (FIERRO 1989; RUBIERA 1989; LAFFRANCHI *et al.* 2010) que afirman que, en las áreas urbanas más prosperas, las mujeres tenían un rol más activo en la vida laboral, y al ser así, también se les otorgaba un trato más equitativo y una dieta más variada y nutritiva (HOLDEN y MACE 1999; JIMÉNEZ BROBEIL *et al.*, 2021; OSIPOV *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

Debido a las limitaciones del método, que requiere el hueso en su totalidad, el análisis de las propiedades CSG se ha visto, en varias ocasiones, dificultado por la conservación de los restos. Sin embargo, se ha podido ampliar la muestra reconstruyendo virtualmente en Meshlab las porciones de las epífisis dañadas en aquellos huesos que aun conservaban su estructura.

En esta una aproximación a las condiciones de vida de los grupos arqueológicos de Baza Mancoba II y La Torrecilla, hay evidentes indicios de una fuerte relación entre sus condiciones de vida y las propiedades biomecánicas de la sección transversal de los huesos largos extrapoladas con el Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit.

Los valores de robustez ósea en la muestra de Baza corresponden a una mejor esperanza de vida y mejores condiciones de salud, que se relacionan a su realidad urbana económicamente prospera en la que la producción de seda y los diversos oficios implicaban actividades físicas bimanuales intensas, junto con la alta demanda física debida a la ubicación fronteriza de Baza en una época de conflictos. Los avances tecnológicos agrícolas, como la irrigación y los molinos de agua, redujeron el esfuerzo físico en ambos grupos. Esto se refleja prin-

principalmente en la menor robustez ósea del grupo rural, cuya economía se centraba en la agricultura. Además, los valores más bajos en La Torrecilla podrían deberse a su entorno empobrecido y aislado, que limitaba su acceso a una dieta nutritiva para el desarrollo óseo. En cuanto a las diferencias observadas entre hombres y mujeres, probablemente se debe a que las mujeres de Baza tenían un papel más activo en la vida laboral debido a la prosperidad económica de la ciudad.

Los resultados de este trabajo deben tomarse con precaución debido al tamaño limitado de la muestra y a las diversas influencias en la mecánica del hueso; investigaciones futuras podrán ampliar las muestras de Baza y La Torrecilla y explorar las propiedades biomecánicas de las extremidades inferiores para obtener una imagen más completa del estrés físico experimentado por ambas poblaciones.

Los resultados destacan de manera concluyente el valor incuestionable de la tecnología innovadora utilizada, conocida como Long-bone-diaphyseal-CSG-Toolkit, en combinación con el escáner 3D, demostrando un inmenso potencial en el contexto de la investigación arqueológica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un extracto del Trabajo de Fin de Máster titulado: “Reconstrucción de la actividad física rural y urbana en el Reino Nazarí de Granada a través del estudio biomecánico de los huesos largos de dos colecciones osteoarqueológicas, La Torrecilla y Baza Mancoba II (Granada, España).” Agradezco al Departamento de Antropología física de la Universidad de Granada por facilitar el acceso al material óseo de este trabajo y dejarme utilizar el escáner 3D necesario para el estudio. A Drosia Charisi, doctoranda antropóloga física, por proporcionarme datos osteométricos y los modelos tridimensionales de la colección de La Torrecilla, además de introducirme al mundo de la morfometría geométrica 3D y facilitarme información sobre la metodología. A mis tutoras Sylvia Jiménez Brobeil y Rosa Maroto Benavides por asesorarme y ayudarme durante la elaboración del TFM.

BIBLIOGRAFÍA

- AUERBACH, B. M., RUFF, C. B. (2006): Limb bone bilateral asymmetry: variability and commonality among modern humans. *Journal of Human Evolution* 50: 203-218.
- BERTSOTOS, A., CHOVALOPOULOU, M. E. (2018): A novel method for analyzing long bone diaphyseal cross-sectional geometry. A GNU Octave CSG Toolkit. *Forensic Science International* 297: 65–71.
- BERTSOTOS, A., GAROUFI, N., KOLIARAKI, M., CHOVALOPOULOU, M. E. (2023): Paving new ways in forensic contexts with virtual osteology applications: csg-toolkit – a 3D osteology package for cross-sectional geometry analysis. *Annals of 3D Printed Medicine* 9.
- CAMERON, M. E., STOCK, J. T. (2018): Ecological variation in later stone age southern African biomechanical properties. *Journal of Archaeological Science: Reports* 17: 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.10.033>
- CHARISI, D., LAFFRANCHI, Z., JIMÉNEZ-BROBEIL, S. A. (2016): Sexual dimorphism in two mediaeval Muslim populations from Spain. *Elsevier* 67 (5): 397-408. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2016.08.001>
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F., RANZUGLIA, G. (2008): MeshLab: an open-source mesh processing tool. *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*: 129-136.
- COWIN, S. C. (2001): The false premis in Wolff's law. En Cowin S. C. (Ed.): *Bone biomechanics handbook*: 1-18. Florida: CRC Press.

- DURY, G., LYTHER, A., MARQUEZ-GRANT, N., GARCIA-RUBIO, A., GRAZIANI, G., MARI, J., ZIRIAX, M., SCHULTING, R. (2018): The Islamic cemetery at 33 Bartomeu Vicent Ramon, Ibiza: Investigating diet and mobility through light stable isotopes in bone collagen and tooth enamel. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 3913-3930. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0644-4>
- EVANS, F. G. (1953): Methods of studying the biomechanical significance of bone form. *American Journal of Physical Anthropology* 11: 413-434. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330110315>
- FIERRO, I. (1989): La mujer en el Corán y el Hadiz. En Viguera M. J. (ed.): *La mujer en Al Ándalus: Reflejos históricos de su actividad y categorías sociales: Actas de las V Jornadas de Investigación Interdisciplinaria*: 35-51. Málaga: Seminario de Estudios de la Mujer.
- FRESIA, A. E., RUFF, C. B., LARSEN, C. S. (1990): Temporal decline in bilateral asymmetry of the upper limb on the Georgia coast. *Anthropological Papers of the American Museum of Natural History* 68: 121-135.
- FULLER, B. T., MARQUEZ-GRANT, N., RICHARDS, M. P. (2010): Investigation of diachronic dietary patterns on the islands of Ibiza and Formentera, Spain: Evidence from carbon and nitrogen stable isotope ratio analysis. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 512-522. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21334>
- GUEDE, I., ORTEGA, L. A., ZULUAGA, M. C., ALONSO-OLAZABAL, A., MURELAGA, X., PINA, M., GUTIÉRREZ, F. J., IACUMIN, P. (2017): Isotope analyses to explore diet and mobility in a medieval Muslim population at Tauste (NE Spain). *Plos One* 12 (5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176572>
- GUICHARD, P. (1976): *Al Ándalus. Estructura antropológica de una sociedad islámica en Occidente*. Barcelona: Barral Editores.
- GRAY, J. P., WOLFE, L. D. (1980): Height and sexual dimorphism of stature among human societies. *American Journal of Physical Anthropology* 53: 441-456.
- GUSTAFSSON, A., WERDELIN, L., TULLBERG, B. S., LINDENFORS, P. (2007): Stature and sexual stature dimorphism in Sweden, from the 10th to the end of the 20th century. *American Journal of Human Biology* 19: 861-870.
- HILL, E. C., PEARSON, O. M., DURBAND, A. C., WALSH, K., CARLSON, K. J., GRINE, F. E. (2020): An examination of the cross-sectional geometrical properties of the long bone diaphyses of Holocene foragers from Roonka, South Australia. *American Journal of Physical Anthropology* 172: 682-697. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24021>
- HOLDEN, C., MACE, R. (1999): Sexual dimorphism in stature and women's work: A phylogenetic cross-cultural analysis. *American Journal of Physical Anthropology* 110: 27-45.
- HOLT, B. M. (2003): Mobility in Upper Paleolithic and Mesolithic Europe: Evidence from the lower limb. *American Journal of Physical Anthropology* 122 (3): 200-215. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10256>
- INSKIP, S., CARROLL, G., WATERS-RIST, A., LÓPEZ-COSTAS, O. (2018): Diet and food strategies in a southern al-Andalusian urban environment during Caliphal period, Écija, Sevilla. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 3857-3874. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0694-7>
- JOYCE, R. (2005): Archaeology of the Body. *Annual Review of Anthropology* 34: 139-158.
- JURMAIN, R., ALVES CARDOSO, F., HENDERSON, C., VILLOTTE, S. (2011): Bioarchaeology's holy grail: The reconstruction of activity. En Grauer, A. L. (Ed.), *A companion to paleopathology*: 531-552. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- LAFFRANCHI, Z., MARTÍN, J. S., JIMÉNEZ-BROBEIL, S. A., AL-OUAOU, I. (2010): Enteseal changes in two medieval Muslim populations from the Iberian Peninsula. *American Journal of Physical Anthropology* 175 (4): 794-15.
- LAFFRANCHI, Z., MARTÍN FLÓREZ, J. S., CHARISI, D., JIMÉNEZ-BROBEIL, S. A. (2016): Aproximación al estilo de vida en el Reino de Granada desde la antropología física: La ciudad y el campo. *Estudios sobre Patrimonio, Cultura y Ciencias Medievales* 18: 659- 684.
- LIEBERMAN, D. E., POLK, J. D., DEMES, B. (2004): Predicting long bone loading from Cross-Sectional Geometry. *American Journal of Physical Anthropology* 123: 156-171. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10316>

- LÓPEZ DE LA PLAZA, G. (1992): *Al-Andalus: Mujeres, sociedad y religión*. Málaga: Universidad de Málaga.
- MACROBERTS, R. A., BARROCAS DIAS, C. M., MATOS FERNANDES, T., SANTOS, A. L., UMBELINO, C., GONÇALVES, A., SANTOS, J., RIBEIRO, R., SCHÖNE, B. R., BARROS, F., CARREIA, F., VASCONCELOS VILAR, H., MAURER, A. F. (2020): Diet and mobility during the Christian conquest of Iberia: The multiisotopic investigation of a 12th–13th century military order in Évora, Portugal. *Journal of Archaeological Science* 30.
- MAGGIANO, I. S., SCHULTZ, M., KIERDORF, H., SOSA, T. S., MAGGIANO, C. M., TIESLER BLOS, V. (2008): Cross-sectional analysis of long bones, occupational activities and long distance trade of the classic Maya from Xcambo – Archaeological and osteological evidence. *American Journal of Physical Anthropology* 136 (4): 470-477.
- MALPICA CUELLO, A. (2012): La vida agrícola y la ganadería en al-Ándalus y en el reino Nazarí de Granada. En Marín López, R. (Coord.) *Homenaje al Profesor Dr. D. José Ignacio Fernández de Viana y Veites*. Granada: Universidad de Granada
- MARCHI, D. (2004): *Cross-sectional geometry of the limb bones of the hominoidea: its relationships with locomotion and posture*. Tesis Doctoral. Pisa: Università di Pisa.
- MARCHI, D., SPARACELLO, V. S., HOLT, B. M., FORMICOLA, V. (2006): Biomechanical approach to the reconstruction of activity patterns in Neolithic Western Liguria, Italy. *American Journal of Physical Anthropology* 131 (4): 447-455. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20449>
- MARCHI, D., SPARACELLO, V. S., SHAW, C. N. (2011): Mobility and Lower Limb Robusticity of a Pastoralist Neolithic Population from North-Western Italy. En Pinhasi R. y Stock J. T. (eds.): *Human Bioarchaeology of the Transition to Agriculture*. New York: Wiley Online.
- MARCHI, D., SPARACELLO, V. S. (2006): Cross-sectional geometry of the humerus of a Western Liguria Neolithic sample. En *Atti del XVI Congresso degli Antropologi Italiani*: 631-640. Genova: Edicolors Publishing.
- MUNDEE, M. M. (2010): *Exploring Diet and Society in Medieval Spain: New Approaches Using Stable Isotope Analysis*. Tesis doctoral. Durham: University of Durham.
- OSIPOV, B., ALAICA, A. K., PICKARD, C., GARCIA-DONAS, J. G., MARQUEZ-GRANT, N., KRANIOTI, E. F. (2020): The effect of diet and sociopolitical change on physiological stress and behavior in late Roman-early Byzantine (300-700 AD) and Islamic (902-1,235 AD) populations from Ibiza, Spain. *American Journal of Physical Anthropology* 172: 189-213. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24062>
- POMEROY, E., ZAKRZEWSKI, S. R. (2009): Sexual dimorphism in diaphyseal cross sectional shape in the medieval Muslim population of Ecija, Spain, and Anglo-Saxon Great Chesterford, UK. *International Journal of Osteoarchaeology* 19: 50-65.
- PREVEDOROU, E., DÍAZ-ZORITA BONILLA, M., ROMERO, A., BUIKSTRA, J. E., DE MIGUEL IBÁÑEZ, M. P., KNUDSON, K. J. (2005): Residential mobility and dental decoration in early medieval Spain: Results from the eighth-century site of Plaza del Castillo, Pamplona. *Dental Anthropology* 23: 42-52. <https://doi.org/10.26575/daj.v23i2.74>
- PRIETO, P. (2006): *El conocimiento de las poblaciones del pasado a través de los restos óseos: indicadores paleopatológicos encontrados en la necrópolis hispanomusulmana de Baza (Granada, s. XII a XVI)*. Tesis doctoral. Pisa: Università di Pisa.
- RUBIERA, M. J. (1989): Oficios nobles, oficios viles. En Viguera, M. J. (Ed.): *La mujer en Al-Ándalus: Reflejos históricos de su actividad y categorías sociales*: 71-76. Madrid: Seminario de Estudios de la Mujer.
- RUFF, C. B., HOLT, B., TRINKAUS, E. (2006): Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation. *American Journal of Physical Anthropology* 129: 484-498. <https://doi:10.1002/ajpa.20371>
- RUFF, C. B., HAYES, W. C. (1983): Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae: a biomechanical investigation. I. Method and general patterns of variation. *American Journal of Physical Anthropology* 60: 359-381. <https://doi:10.1002/ajpa.1330600308>
- RUFF, C. B. (2000): Biomechanical analysis of archaeological human skeletal material. En Katzenberg M. y Saunders S. (eds.): *Biological anthropology of the human skeleton*: 71-102. New York: Wiley-Liss.

- RUFF, C. B. (2008): Biomechanical analyses of archaeological human skeletons. *Biological Anthropology of Human Skeleton* 2: 183-206.
- RUFF, C. B., HOLT, B., TRINKAUS, E. (2006): Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation. *American Journal of Physical Anthropology* 129: 484-498. <https://doi:10.1002/ajpa.2037>
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., RICHARDS, M. P., NEHLICH, O., HENRY, A. G. (2014): Dental calculus is not equivalent to bone collagen for isotope analysis: A comparison between carbon and nitrogen stable isotope analysis of bulk dental calculus, bone and dentine collagen from same individuals from the Medieval site of El Raval (Alicante, Spain). *Journal of Archaeological Science* 47: 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.026>
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., ROMERO, A., GARCÍA-BORJA, P., SUBIRÀ, M. E., RICHARDS, M. P. (2016): A combined dietary approach using isotope and dental buccal-microwear analysis of human remains from the Neolithic, Roman and Medieval periods from the archaeological site of Tossal de les Basses (Alicante, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports* 6: 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.03.002>
- SARR PÉNDULO, B. (2015): "Lo que quiero de estas tierras es Baza": la evolución histórica de la Baza andalusí a través de las fuentes árabes. *Papeles de Bastitania* 16: 37-50.
- SLÁDEK, V., BERNER, M., SAILER, R. (2006): Mobility in Central European Late Eneolithic and Early Bronze Age: Femoral cross-sectional geometry. *American Journal of Physical Anthropology* 130 (3): 320-332.
- SPARACELLO, V. S., PEARSON, O. M., COPPA, A., MARCHI, D. (2011): Changes in Skeletal Robusticity in an Iron Age Agropastoral Group: The Samnites from the Alfedena Necropolis (Abruzzo, Central Italy). *American Journal of Physical Anthropology* 144: 119-130.
- TORRES DELGADO, C. (1987): De la Baza nazarí a la Baza cristiana. Transición de la ciudad nazarí de Baza (1316-4 diciembre, 1489) a la Edad Moderna. En Alonso García, M. J., Dañobeitia Fernández, M. L., y Rubio Flores, A. R. (eds.): *Literatura y Cristiandad. Homenaje al profesor Jesús Montoya Martínez (Estudios sobre hagiografía, mariología, épica y retórica)*: 95. Granada: Universidad de Granada.
- TORRES DELGADO, C. (2001): La ciudad de Baza y el Libro de Repartimiento después de su conquista. *Acta historica et archaeologica mediaevalia* 22: 747-794.
- TORRES MARTÍN, F. M. (2006): El espacio rural del Reino de Granada a finales de la Edad Media según el libro fundacional de la Cartuja. *Arqueología del Territorio* 3: 59-71.
- TOSO, A., GASPAR, S., DA SILVA, R. B., GARCIA, S. J., ALEXANDER, M. (2019): High status diet and health in medieval Lisbon: A combined isotopic and osteological analysis of the Islamic population from Sao Jorge Castle, Portugal. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 3699-3716. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00822-7>
- WALLANCE, I. J., TOMMASINI, S. M., JUDEX, S., GARLAND, T., DEMES, B. (2012): Genetic variations and physical activity as determinants of limb bone morphology: An 76 experimental Approach using a mouse model. *American Journal of Physical Anthropology* 148: 24-35.
- WEISS, E. (2009): Sex differences in humeral bilateral asymmetry in two hunter-gatherer populations: California Amerinds and British Columbian Amerinds. *American Journal of Physical Anthropology* 140 (1): 19-24. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21025>