

NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS A LA TAFONOMÍA: APORTACIONES DESDE LAS NUEVAS TÉCNICAS DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE ALTERACIONES ÓSEAS

JOSÉ YRAVEDRA¹, MIGUEL ÁNGEL MATÉ-GONZÁLEZ², LLOYD A. COURTENAY², DIEGO GONZÁLEZ-AGUILERA²

(1) Dpt. Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología. C.A.I. Arqueometría. Universidad Complutense. jyavedr@uclm.es (<https://orcid.org/0000-0002-4323-3379>)

(2) Dpt. Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca.

NEW TECHNOLOGIES APPLIED TO TAPHONOMY: CONTRIBUTIONS OF NEW TECHNIQUES IN THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF BONE ALTERATIONS

Since the publication of M. Pérez Ripoll's book titled Los Mamíferos del Yacimiento Musteriense de Cova Negra (Játiva, Valencia) in 1977, the field of taphonomy has come a long way. In recent years taphonomic analyses have been growing in importance, with more sites including the work of specialists in this field for different topics of investigation. Here, in tribute to the work of Pérez Ripoll, we present a brief overview of the most recent advances in taphonomic research applied to the Palaeolithic era of the Iberian Peninsula, incorporating new technologies that contribute greatly to solving specific taphonomic questions. Through these advances we present means of obtaining sufficient resolution for the identification of raw materials and tool types used to process animal carcasses, as well as the classification of carnivore agencies through the morphology of their tooth marks and the differentiation between naturally and anthropically produced microscopic traces.

Key Words: *Taphonomy, Photogrammetry, Geometric Morphometry, Machine Learning.*

1. INTRODUCCIÓN

Para la comunidad científica, el comienzo de la Tafonomía como disciplina científica comienza a partir de los trabajos de Efremov (1940), sin embargo, se conocen precedentes que pueden rastrearse hasta el s. XIX y la primera mitad del s. XX, los cuales están bien resumidos en trabajos como los de Cadee (1990), Lyman (1994) o Yravedra (2006). En todo caso será el año 1981 cuando la Tafonomía irrumpa con fuerza en el mundo de la Arqueología.

Aunque durante los años 50-70 hay abundantes trabajos tafonómicos de referencia (White 1952; Wasburn 1957; Bonfield y Li 1966; Voorhies 1969; Clark y Haynes 1970; Sutcliffe 1970a, b; Clark 1972; Bonnichesen 1973; Behrensemeyer 1975, 1978; Munthe y Mcleod 1975; Hill 1976), no será hasta el año 1981 cuando realmente la tafonomía irrumpa con fuerza en los estudios arqueológicos. En este año diversos autores como Bunn, Gifford-González, Gordon, Buikstra, Haynes, Jochim, Potts, Shipman, Scott, o Klein entre otros, escribirán trabajos importantes, pero serán los estudios Brain (1981) y Binford (1981) los más relevantes y los que más repercusión tendrán en las décadas posteriores.

Unos años antes de 1981, el profesor Pérez-Ripoll (1977) en un trabajo pionero en la Arqueología española interpretará los restos arqueofaunísticos de Cova Negra siguiendo una metodología tafonómica, siendo el primer escrito de la Arqueología española donde se utilice la tafonomía como herramienta de análisis con el que interpretar las acumulaciones fósiles de yacimientos, en este caso Cova Negra.

Dentro de la Arqueología española de los años 80, la tafonomía aún no estará demasiado extendida destacando solo algunos pequeños trabajos como los de Díez (1985) o Reixac (1986) entre otros, no obstante se darán las bases para que en los 90 diversos investigadores realicen importantes contribuciones tafonómicas en forma de artículos (Pumarejo y Bernaldo de Quiros 1990; Pumarejo y Cabrera 1992; Cáceres y Anconetani 1997; Mateos 1999), libros (Pérez-Ripoll 1992; Blasco 1992; 1995) o tesis doctorales (Díez 1992; Fernández-Jalvo 1992; Rueda 1993; Martínez Valle 1996; Martínez-Moreno 1998).

Para las dos últimas décadas el número de contribuciones tafonómicas en nuestro país aumentarán exponencialmente, no sólo por la cantidad de tesis

defendidas (Rosell 2001; Cáceres 2002; Cáceres-Sánchez 2003; Yravedra 2005; Huguet 2008; Saladié 2009; Espigares 2010; Fernández-Laso 2010; Sanchis 2010; Blasco 2011; Sala 2012; Gabuccio 2014; Rodríguez-Hidalgo 2015; Camarós 2016; Morales-Pérez 2016; Maté-González 2017; Real 2017; Rufa 2017; Pineda 2018 entre otras), sino también por la cantidad de trabajos publicados, así como por la integración de los tafónomos en los equipos de investigación.

En la mayor parte de estos trabajos de investigación, así como en la extensa bibliografía disponible los últimos años, los autores no sólo se han limitado al estudio de la tafonomía de los yacimientos contribuyendo a la interpretación empírica de los mismos. Sino que, además, en algunos casos, han planteado innovaciones metodológicas que han permitido avanzar en la resolución de problemas tafonómicos y construir nuevos marcos de interpretación (Camarós *et al.* 2013; Saladié *et al.* 2013; Pineda *et al.* 2014). En este sentido a través de este artículo queremos mostrar un resumen de las contribuciones que hemos realizado estos últimos años desde el extinto Departamento de Prehistoria de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), llamado ahora Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología, el Centro de Ayuda a la investigación (CAI) de Arqueometría de la UCM (<https://www.ucm.es/arqueoanalisis/>) así como al Grupo de investigación de Tecnologías de la Información para la Documentación del Patrimonio (TIDOP - <http://tidop.usal.es>) de la Escuela Politécnica Superior de Ávila asociado a la Universidad de Salamanca. La actividad generada durante los últimos años ha permitido desarrollar nuevas metodologías aplicadas a tafonomía, utilizando para ello nuevas tecnologías como la fotogrametría, la Morfometría Geométrica (MG) y el *Machine Learning* (ML). El objetivo de nuestro grupo al desarrollar estas nuevas metodologías es solucionar problemas concretos que la tafonomía tradicional no es capaz de resolver. En este sentido las líneas de investigación sobre las que hemos trabajado y que a continuación procederemos a mencionar son:

- Identificar a través de las marcas de corte que aparecen en los huesos con qué tipo de materia prima, o herramienta se ha producido.

- Afrontar los problemas de equifinalidad que rodean a las marcas de percusión. Según Pickering y Egeland (2006) el 30% de las marcas de percusión

que se generan pueden no tener microestrías produciendo un problema de equifinalidad con las marcas de diente de los carnívoros. Por ello hemos tratado de generar nuevas técnicas que permitan superar esta problemática.

- Superar las limitaciones derivadas de los estudios de marcas de diente de carnívoros. Hasta hace poco los estudios de marcas de diente solo podían diferenciar si las marcas de diente las producen carnívoros grandes o pequeños sin distinguir que carnívoro concreto produce las marcas (Selvagio y Wilder 2001; Andrés *et al* 2012). Nuestro objetivo es generar un método capaz de identificar el carnívoro a través de sus marcas de diente.

- Paliar la equifinalidad generada por las marcas de *trampling* que pueden ser confundidas con las marcas de corte, así como estudiar en más detalle las condiciones donde han producido dichas marcas de *trampling*.

Antes de mostrar la aplicación de nuestro método a estas problemáticas describiremos los métodos y técnicas utilizadas en la reconstrucción tridimensional de las alteraciones tafonómicas, así como su tratamiento morfométrico y estadístico.

2. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Hoy en día son varias las alternativas metodológicas capaces de realizar reconstrucciones tridimensionales de las alteraciones que aparecen en los huesos fósiles en los yacimientos arqueológicos. Por norma general, estas alteraciones eran documentadas por técnicas microscópicas, pero la irrupción de las técnicas fotogramétricas y técnicas laser ha posibilitado nuevas alternativas de trabajo (Maté-González *et al.* 2015; 2016; 2017a, b, c; Courtenay *et al.* 2017). Estas técnicas han posibilitado nuevas metodologías de trabajo, capaces de igualar los resultados de las tan costosas técnicas microscópicas (Maté-González *et al.* 2015; 2016; 2017a, b, c; Courtenay *et al.* 2019c). No hay que pasar por alto que las técnicas M-PG (sensor pasivo) presentan algunas desventajas, ya que requieren una mayor captura de datos y tiempo de procesamiento que las técnicas microscópicas y las técnicas láser (ambas técnicas emplean sensores activos) y cierta experiencia fotogramétrica para el correcto desarrollo de algunas fases técnicas (por

ejemplo, toma de datos, orientación y calibración) (ver Maté-González *et al.* 2017a para un mayor detalle). También hay que destacar que tanto las técnicas láser como las técnicas fotogramétricas no son capaces de documentar alteraciones en los huesos como es el *trampling* (Maté-González *et al.* 2016; 2017a, c; Courtenay *et al.* 2017; 2019c). Sin embargo, el uso de las técnicas fotogramétricas presentan la ventaja sobre las láser y microscópicas de que son muy económicas, por lo que son accesibles a toda la comunidad científica y flexibles a la hora de transportar y trabajar en yacimientos arqueológicos y museos. Teniendo en cuenta todo lo anterior, la combinación de todas estas técnicas satisface la documentación de las diferentes alteraciones que pueden aparecer en fósil (marcas de corte, marcas de percusión, marcas de dientes –*pits* o *scores*–, marcas bioquímicas, *trampling*, etc.) existiendo la posibilidad de producir modelos tridimensionales comparables de alta resolución utilizando cualquiera de estas técnicas, facilitando el intercambio de información y datos entre diferentes equipos de investigación.

2.1. MICRO-FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es una técnica que determina las propiedades geométricas de un objeto y su posición a partir de fotografías. La utilización de sensores fotográficos combinados con objetivos macro y la combinación de técnicas fotogramétricas y técnicas de visión computacional, han permitido la reconstrucción 3D de las alteraciones que aparecen en los huesos fosilizados (Maté-González *et al.* 2015). La aplicación de técnicas microfotogramétricas implica una metodología específica que dada la precisión con la que esperamos analizar estas alteraciones, es necesario ser explicada, ya que el éxito o fracaso para poder obtener un modelo 3D preciso radica en varios aspectos:

- **Colocar una retícula milimétrica de alta calidad que nos permita escalar el hueso en micras y obtener mediciones de alta precisión** (fig. 1). Esta es sin duda la desventaja más significativa de esta tecnología frente a los sistemas láser donde el resultado es ya métrico.

- **Sujetar e iluminar el fósil a fotografiar.** Es muy importante que el hueso tenga una iluminación buena y constante durante toda la toma de datos.

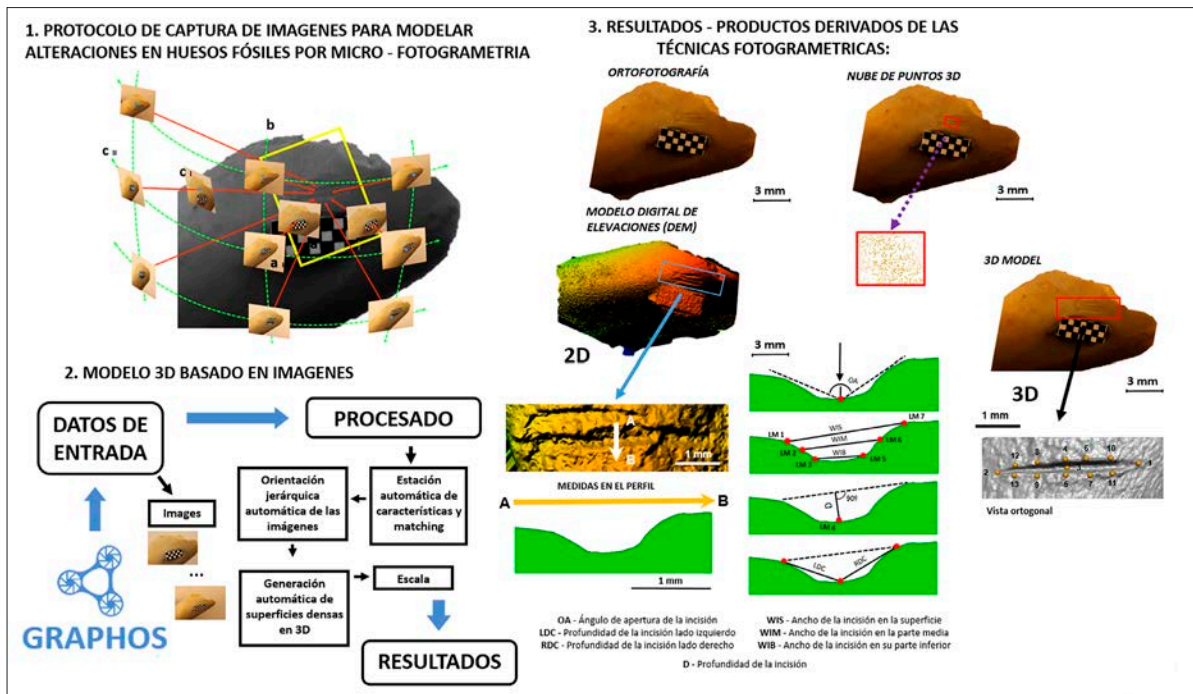


Fig. 1: Protocolo para la Obtención de Datos de MG utilizando Microfotogrametría.

Canon EOS 700D	
Type	CMOS
Sensor size	22.3 × 14.9 mm
Pixel size	4.3 μm
Image size	5184 × 3456 pixels
Total pixels	18.0 MP
Focal length	60 mm
Focused distance to objec	100–120 mm
Resolution	±0.017 mm

Fig. 2: Especificaciones técnicas del equipo utilizado para Microfotogrametría.

Normalmente las mesas de reproducción fotográficas llevan sistemas de iluminación incorporados, en caso de no ser suficientes, se pueden incrementar con sistemas auxiliares, como por ejemplo focos.

- **Configurar el sensor fotográfico, de tal forma que las fotografías salgan enfocadas y con buena luminosidad.** Para ello es necesario realizar una serie de pruebas con el tiempo de exposición y la apertura del diafragma de la cámara, para ver que parámetros son los óptimos a la hora de fotografiar el hueso en ese momento de tiempo, con esa iluminación. Cuanto más bajo sea el valor de la focal/ (f), más luz entrará

a través del objetivo (más abierto estará el diafragma), y cuanto más alto sea el valor de la f , menos luz entrará a través del objetivo (más cerrado estará el diafragma). Utilizando el enfoque manual se realizan unas fotografías de prueba para calcular una distancia aproximada donde aparezca bien enfocada la marca de corte en el hueso. El tiempo de exposición de la cámara y la iluminación se mantendrán constantes durante toda la toma de datos. Se utilizará un trípode para poder estabilizar la toma fotográfica.

- **Realizar una toma fotográfica correcta.** Para ello hay que realizar una toma fotográfica oblicua siguiendo el protocolo especificado en la figura 1. Se toman un total de 13 fotografías para cada marca.

- **Generación de los modelos 3D a partir de las fotografías.** Las fotografías se procesan con el software de reconstrucción fotogramétrico de código abierto *GRAPHOS* (*Suite Fotográfica integrate*) para generar un modelo 3D para cada marca. Los modelos 3D escalados se exportarán como archivos *PLY*. La cámara se autocalibró para calcular simultáneamente los parámetros internos y externos.

La reconstrucción 3D de una sola marca tarda en torno a 25 y 30 minutos, dependiendo de la calidad de las fotografías adquiridas. En las figuras 1 y 2 se detallan las especificaciones técnicas del equipo a utilizar.

2.2. ESCÁNER DE LUZ ESTRUCTURADA

Las marcas tafonómicas también se pueden digitalizar con un escáner de luz estructurada, en nuestro caso el modelo *DAVID SLS-2* acoplándole una serie de lentes macro para obtener mejores resoluciones. Este equipo consta de una cámara, de un proyector y de una tabla de calibración.

La primera fase siempre consiste en la calibración del sistema. Para calibrar el sistema, se coloca la cámara *DAVID USB CMOS* Monocromática y el proyector *ACER K132* (ajustada ya la lente macro) en Angulo de 15° a 25° en dirección al patrón de calibración. La proyección del proyector debe cubrir toda la placa de patrón de calibración, en nuestro caso el tamaño del patrón de calibración corresponde a una escala de 15 mm. Dentro del software *DAVID*, se introducirá ese dato, para que el software

tenga en cuenta la escala de los objetos escaneados. También se tendrá que configurar el tiempo de exposición de la cámara y ajustar todos los enfoques de los instrumentos para formar un conjunto perfecto. Una vez tenidas todas estas consideraciones, el equipo ya se puede calibrar. Durante este proceso, la cámara y el proyector, deben permanecer fijos y estables. Una vez que el sistema esta calibrado, podemos sustituir el patrón de calibración por los huesos que queremos escanear, y a partir de aquí se pueden tomar tantos escaneos como se quieran. El tiempo aproximado que dura un escaneo es inferior al minuto. El escáner de luz estructurada *DAVID SLS-2* puede producir una densidad de hasta 1.2 millones de puntos.

DAVID Structured-Light Scanner SLS-2	
Workpiece size	16 × 500 mm
Resolution	Up to 0.1% of scan size (down to ±0.016 mm)
Scanning time	One single scan within a few seconds
Mesh density	Up to 12,000,000 vertices per scan

Fig. 3: Especificaciones técnicas del equipo utilizado para el escaneado con luz estructurada.

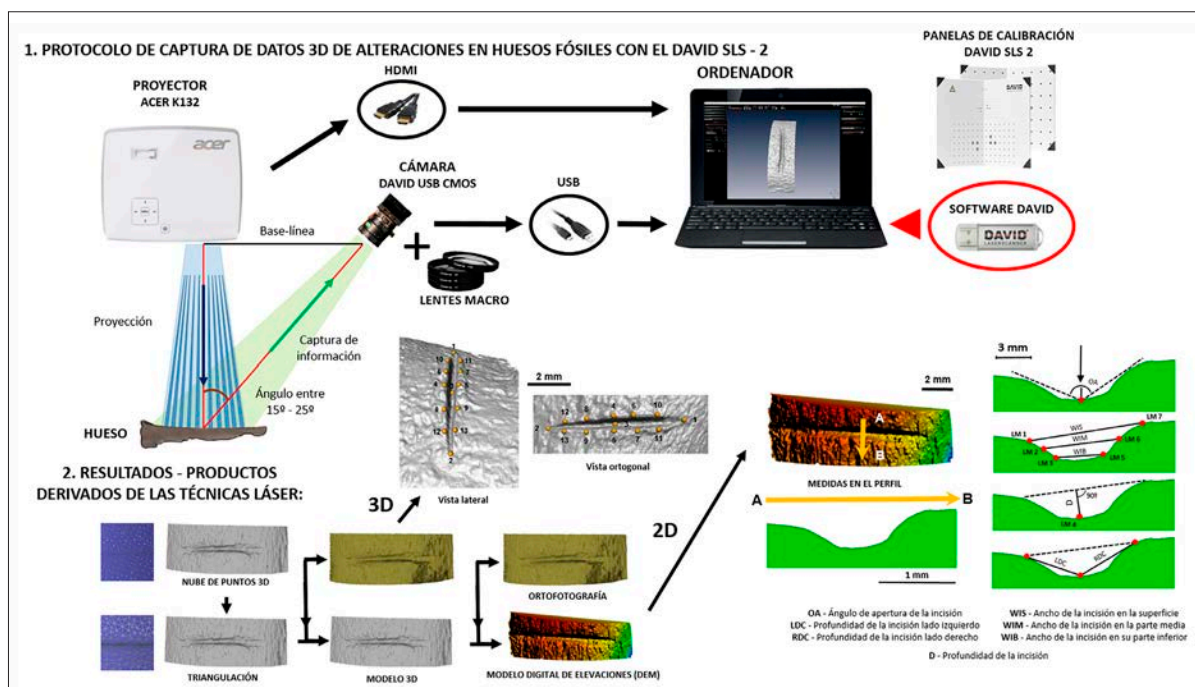


Fig. 4: Protocolo para la Obtención de Datos de MG utilizando el DAVID SLS-2 escáner de luz estructurada (ver Courtenay et al. 2017; Maté-González et al. 2017a para más detalle).

El uso de este proceso de escaneo proporciona una reproducción real de la topografía externa del hueso. En este caso, la superficie mate pulida de los huesos evita problemas relacionados con la intensidad de la luz, o el contraste de luces y sombras durante la recolección de datos. Los modelos 3D escalados se exportarán como archivos *PLY*. En las figuras 3 y 4 se detallan las especificaciones técnicas del equipo a utilizar.

2.3. MICROSCOPIA DIGITAL

El uso de Microscopía Digital en la Arqueología ha permitido alcanzar nuevas resoluciones para el estudio de marcas superficiales. Nuevas herramientas como son los microscopios digitales de marca *HIROX*, *Keyence*, *Leica* y *Bruker*, o los microscopios de tipo confocal, permiten realizar reconstrucciones 3D a base de superposición de imágenes con diferentes enfoques para poder reconstruir el volumen del objeto estudiado a una escala de resolución microscópica. En nuestros estudios trabajamos principalmente con el Microscopio Digital 3D *HIROX KH-8700* (*HIROX*), localizado en el *Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social (IPHES)* de Tarragona. Este microscopio está equipado con un *MXG-5000REZ* lente giratoria de triple objetivo, con una magnificación que varía entre 35x a 5000x aumentos (para datos específicos sobre la lente giratoria ver fig. 5). Adicionalmente, el *HIROX* está equipado con una fuente de luz *LED* de alta intensidad que puede ser posicionada alrededor del objeto bajo estudio. Dicha fuente de luz genera una temperatura de color de 5700k, llegando casi a replicar la luz solar. El *HIROX* también presenta la posibilidad de combinar diferentes tipos de iluminación, incluyendo el uso de filtros polarizadores, y diafragmas coaxiales o de tipo anillo. Por último, para la captación y visualización de imágenes, el *HIROX* dispone de una cámara compacta que proyecta en tiempo real las imágenes a un monitor *HD* de 21.5", con una capacidad de exhibir hasta 16.77 millones de colores y un contraste de 1000:1 con un brillo de pantalla de 300 cd/m².

El propio software de esta herramienta dispone de numerosas herramientas de medición tanto como la posibilidad de enfocar automáticamente en el objeto. Las reconstrucciones 3D se realizan empleando

componentes de enfoque automático, síntesis de profundidad y herramientas de "mosaico" para la superposición de imágenes, obtenidos de forma relativamente rápida y eficiente a través del procesador gráfico *Genex Engine*.

A partir de estas herramientas de modelización 3D y medición, el *HIROX* permite reconstruir la topografía de la superficie de los objetos estudiados, la medición de distancias, áreas de superficie y volúmenes con una precisión de 1µm. Para la obtención de coordenadas 3D sobre el objeto y su procesado utilizando *MG* se usan varios tipos de mediciones de profundidad como la distancia entre los puntos reconstruidos con el objeto de establecer un sistema de coordenadas sobre cada objeto.

Para el protocolo final de la reconstrucción y estudio de elementos microscópicos con esta herramienta (fig. 6), Courtenay *et al.* (2019c) destacan la necesidad de utilizar entre 100x y 200x aumentos para la reconstrucción de marcas enteras mientras que para estudiar secciones de marcas, se recomienda utilizar entre unos 400x y 600x aumentos. Dichos autores también recomiendan el uso de un mínimo de 30 fotos por cada imagen captada para poder asegurar una mejor síntesis de profundidad. Por último, las mejores condiciones de luz requieren una colocación desde arriba combinando el uso de luz coaxial tanto como luz de tipo anillo, con el uso de polarizadores solo en magnificaciones más altas de los 1000x.

2.4. PROCESADO ESTADÍSTICO

Para el procesado de los modelos 3D, se aplican métodos de Morfometría Geométrica (*MG*) en 3D, tanto como en 2D para el caso de los perfiles obtenidos a través de datos tridimensionales. La *MG* es un campo de estudio que viene de otras áreas como son la Biología Sistemática y la Antropología Física, presentando la ventaja fundamental de poder cuantificar datos estructurales y así presentar una alternativa a los métodos tradicionales para estudios morfológicos a través de análisis más descriptivos y cualitativos. La *MG* presenta una nueva caja de herramientas actualizada para el estudio de variaciones en tamaño y forma (Kendall 1989; Goodall y Mardia 1993), con el uso de la estadística avanzada y una serie de herramientas para la visualización de

Aumentos de la Lente	Campo de Visión	Profundidad de Campo	Distancia de Trabajo
35x-250x	8.76-1.22 mm	0.72-0.07 2mm	10 mm
140x-1000x	2.18-0.31 mm	0.09-0.007 mm	10 mm
700x-5000x	0.44-0.06 mm	0.01mm-0.7 μm	3.5 mm

Fig. 5: Tabla describiendo los diferentes componentes técnicos del MXG-5000REZ lente giratoria de triple objetivo. Datos procedentes de Courtenay *et al.* (2019c).

resultados (Bookstein 1989; Rohlf y Marcus 1993). La fuente de información principal para este tipo de análisis viene de puntos homólogos conocidos como *landmarks*, que el analista tiene que localizar y colocar en cada individuo asegurando que cada punto siempre está presente en el objeto bajo análisis (fig. 7). A través de estos puntos, podemos estudiar la variación entre morfologías analizando su posición en el espacio en la forma de coordenadas cartesianas (Bookstein 1989). Los modelos que presentamos consisten en cuatro diferentes configuraciones:

1. Para modelos 2D sobre los perfiles de las marcas de cortes, aplicamos el modelo de Maté-González *et al.* (2015), consistiendo en siete *landmarks* (fig. 7, A). Este modelo consiste en una mezcla de *landmarks* Tipos II y III, según la clasificación de

Dryden y Mardia (1988). Dicho modelo es una adaptación del modelo de Bello y Soligo (2008) (fig. 7, B), convirtiendo cada punto de referencia para las medidas en puntos homólogos para análisis de MG. Junto al modelo de MG, también se incluye el análisis de medidas propuestos por Bello y Soligo (2008), analizando la anchura del corte tanto como su profundidad, ángulo de apertura y pendiente de las paredes (fig. 7, B).

2. El modelo 1 también ha sido adaptado para su uso en la clasificación de las marcas de diente tipo surco por Yravedra *et al.* (2017a).

3. Para modelos 3D sobre las marcas de diente tipo fosa, aplicamos el modelo de Aramendi *et al.* (2017), consistiendo en 17 *landmarks* de una mezcla de Tipo II y Tipo III (fig. 7, C). Este modelo también



Fig. 6: Protocolo para la Obtención de Datos de MG utilizando el Microscopio Digital 3D HIROX KH-8700 (Courtenay 2019).

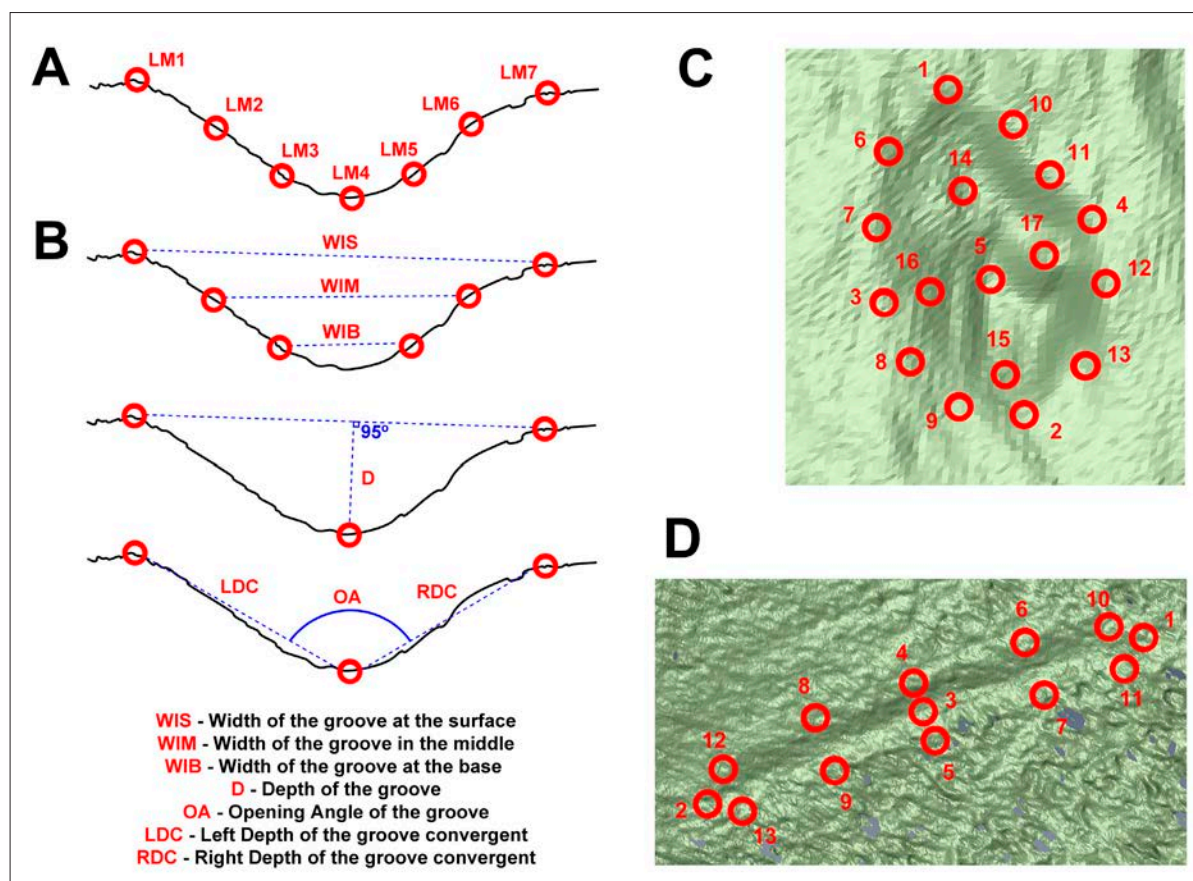


Fig. 7: Posicionamiento de los Landmark utilizado para el análisis de marcas de corte, o *scores* (A y B), *pits* o marcas de percusión (C), y marcas de corte o *scores* desde un tratamiento morfométrico no limitado a la sección (D).

ha sido adaptado para su uso en la caracterización de marcas de percusión y su diferenciación con marcas de dientes en Yravedra *et al.* (2018).

4. Para modelos 3D de marcas de corte empleamos el modelo de Courtenay *et al.* (2017), consistiendo en 13 *landmarks* de una mezcla de Tipo II y Tipo III. Este modelo también ha sido adaptado para su uso en la caracterización de marcas de *trampling* por Courtenay *et al.* (2019c) (fig. 7, D).

A partir de los modelos de MG, el análisis estadístico consiste en un proceso llamado *Generalised Procrustes Superimposition* (GPA), que realiza una transformación de los datos a través de una serie de normalizaciones incluyendo traslación, rotación y superimposición de las coordenadas (Goodall 1991). A partir de aquí el GPA ayuda en la detección de patrones de variación y covariación entre los individuos. Las nuevas coordenadas transformadas ya se

pueden proyectar sobre un espacio Euclidiano plano que nos permite estudiar con el uso de numerosas herramientas estadísticas (Rohlf 1999; Slice 2001). Con este primer procedimiento la variable de tamaño queda anulada para poner atención en la “forma pura” (Richtsmeier *et al.* 2002). No obstante, el tamaño puede ser reintroducido en el análisis en caso de ser relevante para el mismo. A partir de aquí, las diferencias entre muestras pueden ser visualizadas mediante retículas de deformación (Bookstein 1989) y analizadas mediante estadística multivariante con la intención de identificar similitudes y diferencias dentro de la muestra, así como los procesos de variación o covariación (Bookstein 1991). Dado que en este tipo de estudios normalmente el número de variables es mayor que el número de casos, es necesario emplear métodos para reducir la dimensionalidad del análisis (Mitteroecker y Gunz 2009).

El primer paso que realizamos para poder llevar a cabo dicho proceso de reducción de dimensionalidad de la muestra consiste en el Análisis de Componentes Principales (PCA), convirtiendo cada individuo en un único punto en múltiples dimensiones que podemos colocar en un gráfico. El análisis PCA extrae numerosos componentes principales que expresan de manera sucesiva la varianza de la muestra. Estos resultados se pueden usar, a su vez, para otros test estadísticos y el entrenamiento de modelos de clasificación a través de la Inteligencia Artificial (IA).

Para el análisis estadístico de estos datos, es habitual emplear análisis multivariantes de varianza (*MANOVA*), tanto como los análisis canónicos de varianza (*CVA*), para poder explorar las diferencias entre las muestras. En el caso de que queremos comparar las similitudes morfológicas, empleamos un test de equivalencia (*TOST*). Por último, para poder generar modelos de clasificación a partir de estos datos, podemos emplear técnicas de IA para el entrenamiento de algoritmos complejos, que son capaces de aprender la diferenciación entre muestras, a partir de estos datos y así clasificar nuevas marcas arqueológicas a partir de su morfología.

3. APLICACIONES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En los estudios tradicionales de MG, la mayoría de las tareas de clasificación han empleado algoritmos como son los de análisis parcial de la distancia mínima al cuadrado (PLSDA) tanto como el análisis discriminante lineal (LDA). Sin embargo, aunque el objetivo del PCA es buscar relaciones y correlaciones lineales entre cada componente, cuando empezamos a trabajar con datos en altas dimensiones, las relaciones entre muestras no siempre se presentan de una forma lineal perfecta, y en ocasiones el solapamiento entre muestras en algunas dimensiones puede llegar a generar confusiones entre muestras. Dicha problemática genera bastantes problemas a la hora de producir modelos potentes de clasificación utilizando LDA y PLSDA (Courtenay *et al.* 2019a).

En otras disciplinas, el uso de algoritmos complejos de ML ha tenido mucho éxito en el procesamiento de datos altamente complejos, a pesar de su linealidad. Dichos algoritmos utilizan componentes

de cálculo, álgebra lineal, teoría de la probabilidad y estadística avanzada para mapear mejor las relaciones entre las variables. Dentro de estos algoritmos, podemos entrenar los modelos de forma supervisada (para trabajos de clasificación) o no-supervisada (detección de patrones y eliminación de anomalías) según la problemática que queremos contrastar. A partir de aquí, cada modelo busca a través de numerosos componentes matemáticos la mejor forma de explicar la variabilidad entre diferentes muestras, presentando a su vez unos métodos eficientes para poder evaluar la potencia de cada modelo y su fiabilidad cuando los utilizamos para estudiar muestras desconocidas, como son las muestras arqueológicas que queremos clasificar.

El modelo más eficiente y que ha tenido más éxito en el procesado de datos de MG consiste en la Máquina de Vectores de Soporte (SVM). SVM es capaz de generar los mapas que mejor encuentran las diferencias entre las variables (en formato vector) en un espacio dimensional muy amplio (Cortes y Vapnik 1995). La SVM busca la mejor separación entre las muestras utilizando un *hiperplano* con una superficie de decisión maximizada. Este concepto se describe como la “separación óptima” entre las muestras que busca la máxima distancia entre los puntos que estén más cerca de él mismo. La gran ventaja de los SVM es su capacidad de definir dicho espacio dimensional en una muestra limitada por conceptos de linealidad. A través de una transformación tipo *kernel*, el modelo proyecta cada punto en una nueva dimensión para poder dibujar el hiperplano de una manera curvado tanto como lineal, dependiendo de la muestra bajo estudio. A partir de aquí, podemos utilizar el hiperplano para poder clasificar cada punto según su posición en el espacio multidimensional transformado (Cortes y Vapnik 1995).

El último paso que se realiza antes de poder utilizar estos algoritmos para la clasificación de muestras arqueológicas se encuentra en la evaluación de los modelos. Para este último paso utilizamos una sub-muestra de la muestra (normalmente entre 20 y 30% de la muestra original) para poder ver si el modelo consigue clasificar la submuestra con éxito. También se utiliza una sub-submuestra del 80% restante para entrenar y validar el modelo durante el proceso de entrenamiento (Kuhn 2013; Chollet 2017). Para ello analizamos el error final producido

por el modelo, su éxito clasificando la submuestra de testeo, y un valor de kappa (κ) que evalúa la potencia del algoritmo a la hora de realizar clasificaciones (Kuhn 2013). Para más datos sobre el uso de ML en MG, se puede ver Courtenay *et al.* (2019a).

4. APLICACIONES PRÁCTICAS

4.1. NUEVAS INNOVACIONES TAFONÓMICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS MARCAS DE CORTE

Dentro de los estudios tafonómicos aplicados al estudio del Paleolítico, los análisis de marcas de corte son bastante relevantes por diferentes circunstancias. Por un lado, la presencia de huesos con marcas de corte es una evidencia clave para identificar el acceso a recursos cárnicos animales (De Heinzelin *et al.* 1999) o humanos (White 1992). Por otro lado, la situación de las marcas de corte permite identificar si están asociadas a diferentes actividades como la descarnación, la desarticulación, la evisceración o el desollado entre otras (Binford 1981; Shipman 1981). A su vez, sus frecuencias sobre los huesos y su situación permiten identificar la intensidad con la que se procesan las presas e incluso determinar si los seres humanos tienen un acceso primario o secundario sobre las carcasas (Lupo y O'Connell 2002). Sin embargo, su estudio puede deparar más informaciones relevantes.

Algunos autores han analizado las marcas de corte con el objeto de identificar la materia del útil empleado, ya sea metal o lítica (Olsen 1988; Greenfield 1999; Bello y Soligo 2008), concha (Choi y Driwantoro 2007), o bambú (Spennerman 1990), útiles simples, retocados o bifaciales (Walker 1978; Shipman y Rose 1983; Bello *et al.* 2009). La mayor parte de estos y otros estudios tratan de analizar las marcas de corte formando imágenes de gran resolución bidimensionales o tridimensionales y para ello se analizan las marcas de corte utilizando diferentes técnicas como el microscopio electrónico de barrido, microscopios de alta resolución, SEM, microscópicos de tecnología digital tridimensional etc. (Shipman 1981; Shipman y Rose 1983; Olsen 1988; Greenfield 1999; Bello y Soligo 2008; Bello *et al.* 2009 etc.). Aunque los resultados de estos estudios son positivos, también

presentan algunas limitaciones. Por una parte, en ocasiones necesitan de equipos muy caros a los que no todas las instituciones pueden acceder. Por otra parte, tienen la limitación de que su aplicación conlleva amplias inversiones de tiempo y análisis de pocas muestras. Por último, puede darse la situación de analizar muestras en lugares sin acceso a equipos técnicos que permiten obtener imágenes de gran resolución como por ejemplo cuando se analizan muestras en museos o en campo.

Para paliar estas dificultades, desde nuestro equipo nos planteamos la posibilidad de conseguir imágenes de alta resolución de alteraciones óseas utilizando para ello métodos de bajo coste y alta resolución, ya sea mediante la aplicación de fotogrametría con cámara digital y objetivo macro (Maté-González *et al.* 2015; 2016), o mediante la aplicación de scanner láser (Maté-González *et al.* 2017a, b, c). Aunque la utilización de cámara y objetivo macro dan la misma resolución que la utilización de escáneres láser o microscopios de alta resolución, ya sea tipo Confocal o Digital (Maté-González *et al.* 2017a, b; Courtenay *et al.* 2019c), el problema que tiene la utilización de la cámara es que conlleva mucho tiempo de procesado (25 a 30 minutos), no obstante, el scanner permite procesar cada muestra en muy poco tiempo (1 a 2 minutos).

Prueba de la alta resolución de la utilización de estas analíticas es que no solo han permitido diferenciar claramente marcas de corte producidas por sílex, metal, basalto o cuarcita a nivel experimental (Maté-González *et al.* 2015; 2016; 2017c; Courtenay *et al.* 2017), sino que además han permitido diferenciar marcas de corte producidas por diferentes tipos de cuarcitas de distinto grano (Maté-González *et al.* 2017c; Courtenay *et al.* 2019b) o distinguir si las marcas de corte producidas en algunos yacimientos arqueológicos como en BK (Olduvai Gorge) se produjeron con lascas de cuarcita o basalto (Yravedra *et al.* 2017b), lascas de sílex o cuarcita en el yacimiento Magdaleniense de Coímbre (Yravedra *et al.* 2019) o si se produjeron con lascas simples o bifaces (Yravedra *et al.* 2017c; Courtenay *et al.* 2017).

En definitiva, estas técnicas ofrecen un grado de resolución bastante óptimo capaz de ayudar en la identificación de los instrumentos y las materias primas con las que se produjeron dichas marcas de corte.

4.2. NUEVAS INNOVACIONES TAFONÓMICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS MARCAS DE PERCUSIÓN (fig. 8)

Junta a las marcas de corte, la otra evidencia indicativa de una actividad humana sobre una carcasa son las marcas de percusión. Estas marcas se producen como consecuencia del impacto de un percutor contra el hueso, con el ánimo de romperlo para acceder a su contenido medular. La morfología de estas marcas suele ser de aspecto circular con microestrías (Binford 1981; Blumenschine y Selvaggio 1988; Blumenschine 1995). La problemática que conlleva el análisis de estas marcas es que pueden ser confundidas con los *pits* o fosas generadas por los carnívoros cuando muerden los huesos (Blumenschine y Selvaggio 1988; Selvaggio 1994; Blumenschine 1995). No obstante, las marcas de percusión suelen tener microestrías en su interior lo que les diferencia de las marcas de diente que suelen ser de fondo plano (Blumenschine y Selvaggio 1988; Blumenschine 1995).

Sin embargo, en un trabajo posterior, Pickering y Egeland (2006) observaron que el 30% de las marcas de percusión que se producen experimentalmente pueden no tener microestrías produciendo un problema de equifinalidad en su identificación y diferenciación respecto a las marcas de diente generadas por los carnívoros.

Para paliar esta problemática, en un trabajo experimental nos propusimos experimentar con percutores de varias materias primas sin modificar con el objeto de realizar marcas de percusión, y analizar

aquellas marcas de percusión sin microestrías y diferenciarlas de los *pits* o fosas generadas por carnívoros (Yravedra *et al.* 2018). Nuestros resultados fueron bastantes significativos. Respecto al 30% de marcas de percusión que estarían sujetas a equifinalidad según Pickering y Egeland (2006) y que serían indistinguibles de las marcas de diente que generan los carnívoros, en Yravedra *et al.* (2018) se pudo identificar el 95% de las marcas de percusión de modo que pudimos reducir de un 30% a un 5% aquellas marcas de percusión sujetas a equifinalidad.

4.3. NUEVAS INNOVACIONES TAFONÓMICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS MARCAS DE DIENTE (fig. 9)

Una de las líneas de investigación que más interés ha suscitado en tafonomía durante las dos últimas décadas son los estudios de carnívoros. Desde que Brain (1981) y Binford (1981) mostrarán el impacto que tuvieron en la formación de los primeros yacimientos de la humanidad, la tafonomía de carnívoros ha ido adquiriendo una progresiva importancia.

El objetivo de esta línea de investigación, consiste en caracterizar qué comportamiento tiene cada carnívoro e identificar su acción en el registro fósil, y después, determinar qué rol desempeñó en la acumulación ósea final. Este tipo de estudios han sido especialmente útiles en el “debate caza-carroñeo”, así como en la interpretación de diversos yacimientos paleontológicos y arqueológicos.

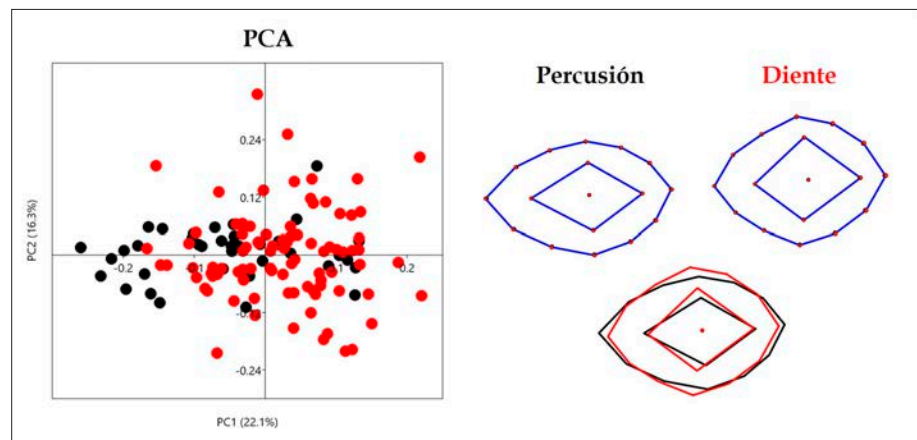


Fig. 8: Gráfico PCA comparando marcas de dientes con marcas de percusión. A la derecha se observa la morfología media entre las diferentes muestras.

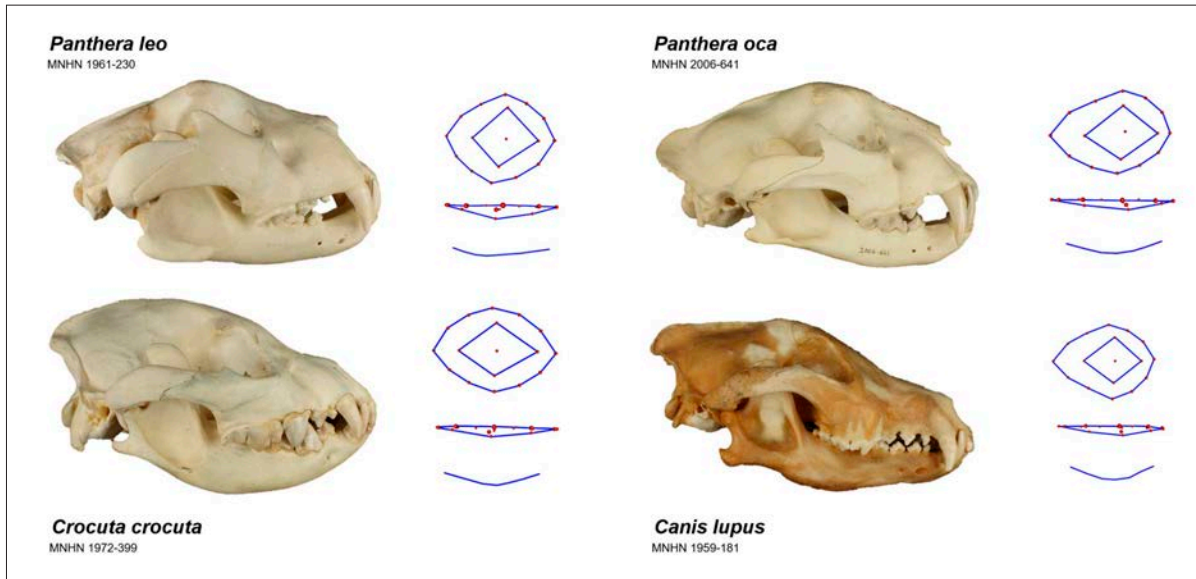


Fig. 9: Morfología Media de los Pits y Scores para cada carnívoro. Las fotos de cada cráneo son de la colección de Mammifères et Oiseaux – Anatomie Comparée du Muséum National d’Histoire Naturelle, Paris (Francia). Figura de LAC, procedente de Courtenay (2019).

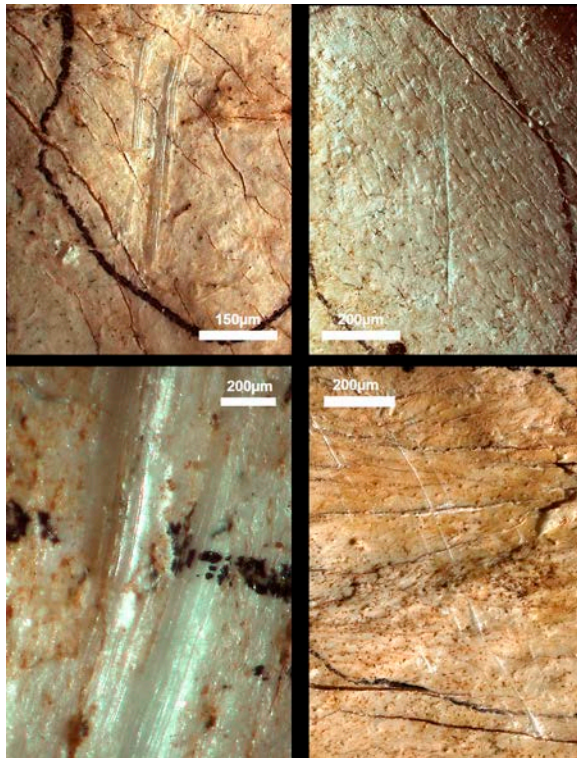


Fig. 10: Ejemplos de Grazes (izquierda) y Scratches (derecho). Fotos obtenidas con el HIROX KH-8700 localizado en el IPHES, Tarragona (Courtenay 2019).

Dentro de los estudios dedicados a la tafonomía de carnívoros, algunos de los más prometedores son aquellos que tratan de identificar el carnívoro a través del estudio de sus marcas de diente, ya sean fosas o surcos. El problema es que los estudios existentes no han conseguido resultados contundentes. En algunos trabajos como los de Selvagio y Wilder (2001) o Andrés *et al.* (2012) los resultados que obtenían al medir las fosas y surcos de las marcas de diente solo podían diferenciar entre carnívoros grandes y pequeños, lo cual deja margen a una gran variabilidad en la gama de carnívoros. Para paliar esto y a través de los métodos que hemos mencionado hemos tratado de diferenciar experimentalmente cada carnívoro a partir de las marcas de diente que produce. Nuestros resultados iniciales aplicados a surcos fueron optimistas, permitiendo diferenciar en un porcentaje importante los surcos de jaguares, leones, hienas y lobos (Yravedra *et al.* 2017a), así como los pits (Arriaza *et al.* 2017). En otro trabajo, se pudo identificar si los restos de algunos homínidos fueron manipulados por felinos o hienas (Aramendi *et al.* 2017) y en otros corroborar que ambos, leones y hienas, habían intervenido en la acumulación ósea de un yacimiento inicialmente acumulado por leones (Arriaza *et al.* 2017).

El problema de estos estudios es que no logran alcanzar una resolución superior al 80% del total de las marcas de diente, de modo que un 20% era susceptible de no ser asignado a ningún carnívoro con seguridad mostrando cierta equifinalidad. Sin embargo, utilizando los nuevos métodos de ML aplicados a la MG, hemos logrado resultados mejores pudiendo identificar con gran precisión qué carnívoro produce cada marca, incluyendo tanto *pits* como *scores* de carnívoros como el jaguar, la hiena, el lobo o el león (Courtenay *et al.* 2019a), la combinación de diferentes técnicas como la MG, y el ML han permitido obtener estos resultados tan interesantes.

4.4. NUEVAS INNOVACIONES TAFONÓMICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS MARCAS DE TRAMPLING (fig. 10)

Las marcas de *trampling* también llamadas marcas de pisoteo son un tipo de alteraciones de morfología parecida a las marcas de corte, lo cual en ocasiones puede conducir a identificaciones problemáticas sujetas a equifinalidad (McPherron *et al.* 2010; Thompson *et al.* 2015; Sahle *et al.* 2017). La problemática que entrañan estas alteraciones ya fue planteada desde hace muchos años por diversos investigadores (Fiorillo 1984; Behrensmeyer *et al.* 1986; Olsen y Shipman 1988), y vienen a destacar el parecido que tienen con las marcas de corte.

El problema que presenta el método de reconstrucción tridimensional que estamos proponiendo cuando queremos aplicarlo a las marcas de *trampling*, es que este tipo de alteraciones son tan superficiales que con un escáner láser o una cámara digital apenas puede captarse a gran resolución. Por ello, y para poder analizar este tipo de alteraciones, se recurrió al uso de un microscopio digital de alta resolución (Courtenay *et al.* 2019c)

Los resultados obtenidos tras el análisis fueron bastante satisfactorios ya que permitieron estudiar las marcas de *trampling* y del mismo modo se pudo detectar dos tipos de *trampling*, los *graze trampling* que serían como unas rozaduras y los *scratch trampling* que serían como unos rallados. Análisis más detallados de los dos tipos de marcas han permitido observar un mayor o menor número de *scratches* o *grazes*. Aunque la hipótesis preliminar cree que el

tipo de sedimento puede ser un factor condicionante en la morfología del *trampling*, este tema aún está en desarrollo y proceso de investigación (Courtenay 2019).

5. VALORACIONES FINALES

Mediante este trabajo hemos mostrado algunas de las innovaciones técnicas que pueden aplicarse a la tafonomía y cómo en conjunto ofrecen una amplia serie de posibilidades que pueden ayudar a interpretar las alteraciones óseas que aparecen en los yacimientos. Del mismo modo, la utilización de estas técnicas puede ayudar a resolver cuestiones concretas que se plantean dentro de los estudios tafonómicos. Sin embargo, y a pesar de sus resultados, queremos destacar que estas nuevas tecnologías aplicadas a tafonomía no sustituyen la forma de analizar tafonómicamente los yacimientos, sino que más bien estos nuevos análisis vienen a complementar los estudios tafonómicos estándar realizados hasta el momento, complementando o completando los resultados obtenidos por los estudios tafonómicos.

Por ejemplo, en estudios tafonómicos recientes como los realizados en la cueva de Amalda (Zestoa, Guipúzcoa), se interpreta que el aporte de rebecos al yacimiento fue consecuencia de la actuación de carnívoros (Yravedra 2005), concretamente y a partir de distintos argumentos tafonómicos se propone al leopardo como el principal agente acumulador. En este caso concreto, la aplicación de nuevas metodologías como la mostrada en Courtenay *et al.* (2019a), permitiría matizar si las marcas de diente localizadas sobre los restos son de leopardo, zorro u otros depredadores. Lo mismo podría aplicarse a otros yacimientos con importante actividad de carnívoros como Llonin (Sanchis *et al.* 2019) o la cueva del Buxu (Rojo y Menéndez. 2014). En definitiva, estas nuevas técnicas nos permitirán matizar y concretar mejor los resultados, ampliando el conocimiento que tenemos de los mismos, por ejemplo, contribuyendo a especificar con qué útil se hicieron las marcas de corte que aparecen sobre los restos faunísticos de un lugar, tal y como hemos mostrado en los casos de varios yacimientos como FLKW y BK en Olduvai Gorge o en la cueva de Coímbre (Asturias).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los editores de este volumen y concretamente al catedrático de Prehistoria D. Valentín Villaverde por invitarnos a participar en este homenaje al profesor Manuel Pérez Ripoll. Del mismo modo nuestro agradecimiento al CAI de Arqueometría de la Universidad Complutense, al Grupo TIDOP de la Universidad de Salamanca y al IPHES de la Universidad de Tarragona por el apoyo logístico que han permitido realizar las distintas analíticas tratadas en este trabajo. Igualmente queremos agradecer al parque de la naturaleza de Cabárceno la disposición que han tenido al permitirnos obtener muestras experimentales con las que construir los marcos de referencia utilizados en estos trabajos.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉS, M.; GIDNA, A.; YRAVEDRA, J.; DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2012): A study of dimensional differences of tooth marks (pits and scores) on bones modified by small and large carnivores, *Archaeological and Anthropological Science* 4 (3), 209-219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-012-0093-4>
- ARAMENDI, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; YRAVEDRA, J.; CRUZ, M.; ARRIAZA, M. C.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2017): Discerning carnivore agency through the three-dimensional study of tooth pits: revisiting crocodile feeding behaviour at FLK-Zinj and FLK NN3 (Olduvai Gorge, Tanzania), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 488, 93-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.05.021>
- ARRIAZA, M. C.; YRAVEDRA, J.; DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A. (2017): On applications of micro-photogrammetry and geometric morphometrics to studies of tooth mark morphology: The modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 488, 103-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.036>
- BEHRENSMEYER, A. K. (1975): The Taphonomy and Paleoecology of Plio-Pleistocene vertebrate assemblages east of lake Rudolf, Kenya, *Bulletin Museum Comparative Zoology* 146, 473-578.
- BEHRENSMEYER, A. K. (1978): Taphonomic and ecological information from bone weathering, *Paleobiology* 4 (2), 150-162.
- BEHRENSMEYER, A. K.; GORDON, K. D.; YANAGI, G. T. (1986): Trampling as a cause for bone surface damage and pseudo-cutmarks, *Nature* 319, 768-771.
- BELLO, S. M.; SOLIGO, C. (2008): A new method for the quantitative analysis of cutmark micromorphology, *Journal of Archaeological Science* 35(6), 1542-1552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.10.018>
- BELLO, S. M.; PARFITT, S.A.; STRINGER, C.B. (2009): Quantitative micromorphological analyses of cut marks produced by ancient and modern handaxes, *Journal of Archaeological Science* 36, 1869-1880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.04.014>
- BINFORD, L. (1981): *Bones: Ancient Men and Modern Myths*, Academic Press Inc.
- BLASCO, M. F. (1992): *Tafonomía y Prehistoria, métodos y procedimientos de investigación*, Departamento de ciencias de la antigüedad (Prehistoria), Zaragoza.
- BLASCO, M. F. (1995): *Hombres, fieras y presas, estudio arqueológico y tafonómico del yacimiento del Paleolítico Medio en la cueva de Gabasa 1 Huesca*, Zaragoza.
- BLASCO, R. (2011): *La amplitud de la dieta cárnica en el Pleistoceno medio peninsular: una aproximación a partir de la Cova del Bolomor (Tavernes de la Vall-digna, Valencia) y del subnivel TD10-1 de Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- BLUMENSCHINE, R. J. (1995): Percussion marks, tooth marks and the experimental determinations of the timing of hominid and carnivore access to long bones at FLK Zinjanthropus, Olduvai Gorge, Tanzania, *Journal of Human Evolution* 29, 21-51.
- BLUMENSCHINE, R. J.; SALVAGGIO, M. (1988): Percussion marks on bone surfaces as a new diagnostic of hominid behavior, *Nature* 333, 763-765.
- BONFIELD, W.; LI, C. H. (1966): Deformation and fracture of bone, *Journal of Applied Physics* 37 (2), 869-875.
- BONNICHSEN, R. (1973): Some operational aspects of human and animal bone alteration, *Mammalia osteoarchaeology: North America* (M. Gilbert, ed.), Columbia Miss Missouri Archaeology society, 9-24.
- BOOKSTEIN, F. L. (1989): Principal Warps: Thin Plate Spline and the Decomposition of Deformations, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11 (6), 567-585
- BOOKSTEIN, F. L. (1991): *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*, New York.
- BRAIN, C. K. (1981): *The Hunters or the Hunted? An Introduction to African Cave Taphonomy*, University of Chicago Press.
- BUNN, H. T. (1981): Archaeological evidence for meat-eating by Plio-Pleistocene hominids from Koobi Fora, Kenya, *Nature* 291, 574-577.
- CÁCERES I. (2002): *Tafonomía de yacimientos antrópicos en karst. Complejo Galería (Sierra de Atapuerca, Burgos), Vanguard Cave (Gibraltar) y Abric Romani (Caplledes, Barcelona)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- CÁCERES-SÁNCHEZ, I. (2003): *La transición de los cazadores-recolectores a pastores-agricultores en el Mediodía peninsular a través de los restos óseos*, Tesis doctoral, Universidad de Cádiz.

- CÁCERES-SÁNCHEZ, I.; ANCONETANI P. (1997): Procesos tafonómicos del nivel Solutrense de la Cueva de Higueral de Motillas (cádiz), *Zephyrus* L, 37-50.
- CADÉE, G. C. (1990): The history of taphonomy, *The processes of fossilization* (S. K. Donovan, ed.), New York Columbia University Press, 3-21.
- CAMAROS, E. (2016): *Hominin-carnivore interaction during the pleistocene: development of new methods for the study of human behavior through a trans-disciplinary and evolutionary approach*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- CAMAROS, E.; CUETO, M.; TEIRA, L.; TAPIA, J.; CUBAS, M.; BLASCO, R.; ROSELL, J.; RUIBALS, F. (2013): Large carnivores as taphonomic agents of space modification: an experimental approach with archaeological implications, *Journal of Archaeological Science* 40 (2), 1361-1368.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.037>
- CHOI, K.; DRIWANTORO, D. (2007): Shell tool use by early members of *Homo erectus* in Sangiran, central Java, Indonesia: cut mark evidence, *Journal of Archaeological Science* 34, 48-58.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.03.013>
- CHOLLET, F. (2017): *Deep Learning with Python*. Online E-Book Publisher: Manning Publications.
- CLARK, J. D. (1972): Palaeolithic butchery practices, *Man settlement and urbanism* (P. J. Ucko, R. Tringham, G. W. Dimbleby, eds.), Londres, 149-156.
- CLARK J. D.; HAYNES, C. V. (1970): An elephant butchery site at Mwangada's lake, Karonga, Malawi and its relevance for palaeolithic archaeology, *World Archaeology* 1, 390-411.
- CORTES, C.; VAPNIK, V. (1995): Support-Vector Networks, *Machine Learning* 20, 273-297
- COURTENAY, L. A. (2019): *New Methodological Advances in the Study of Taphonomic Equifinality in the Lower Pleistocene Site of FLK-West (Olduvai Gorge, Tanzania)*, Trabajo Final de Máster. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.
- COURTENAY, L. A.; YRAVEDRA, J.; HUGUET, R.; ARAMENDI, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; ARRIAZA, M. C. (2019a): Combining Machine Learning Algorithms and Geometric Morphometrics: a Study of Carnivore Tooth Marks, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 522, 28-29.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.03.007>
- COURTENAY, L. A.; YRAVEDRA, J.; ARAMENDI, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á.; MARTÍN-PEREA, D. M. (2019b): Cut Marks and Raw Material Exploitation in the Lower Pleistocene Site of Bell's Korongo (BK, Olduvai Gorge, Tanzania): A Geometric Morphometric Analysis, *Quaternary International* 526, 155-168.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.06.018>
- COURTENAY, L. A.; YRAVEDRA, J.; HUGUET, R.; OLLÉ, A.; ARAMENDI, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2019c): New Taphonomic Advances in 3D Digital Microscopy: a Morphological Characterisation of Trampling Marks, *Quaternary International* 517, 55-66.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.019>
- COURTENAY, L. A.; YRAVEDRA, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á.; ARAMENDI, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2017): 3D Analysis of Cut Marks using a New Geometric Morphometric Methodological Approach, *Journal of Archaeological and Anthropological Sciences* 11 (2), 1-15.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0554-x>
- DE HEINZELIN, J.; CLARK, J. D.; WHITE, T.; HART, W.; RENNE, P.; WOLDE, G.; BEYENEY, G.; VRBA, E. (1999): Environment and behavior of 2.5-million-year-old Bouri hominids, *Science* 284, 625-629
- DÍEZ, J. C. (1985): Tafonomía y zooarqueología, ciencias olvidadas en la Prehistoria, *Revista de Arqueología* 51, 6-7.
- DÍEZ, J. C. (1992): *Zooarqueología de Atapuerca (Burgos), e implicaciones paleoconómicas del estudio tafonómico de yacimientos del Pleistoceno Medio*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- DRYDEN, I. L.; MARDIA, K. V. (1998): *Statistical Shape Analysis*, New York: John Wiley and Sons.
- EFREMOV, L. A. (1940): Taphonomy a new branch of Paleontology, *Pan American Geologist* 74 (2), 81-93.
- ESPIGARES, P. (2010): *Análisis y modelización del contexto sedimentario y los atributos tafonómicos de los yacimientos pleistocénicos del borde nororiental de la cuenca de Guadix-Baza*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- FERNÁNDEZ-JALVO, Y. (1992): *Tafonomía de Microvertebrados del Complejo Kárstico de Atapuerca (Burgos)*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- FERNÁNDEZ-LASO, M. C. (2010): *Remontajes de restos faunísticos y relaciones entre áreas domésticas en los niveles k, l y M del Abric Romaní: (Capellades, Barcelona, España)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- FIORILLO, A. R. (1984): An experimental study of trampling: implications for the fossil record, *Bone Modification* (R. Bonnichsen, M. H. Sorg, eds.), University of Maine Press, Maine, 73-98.
- GABUCCIO, M. J. (2017): *Estudi espaciotemporal d'un palimpsest: anàlisi zooarqueològica i tafonòmica del nivell O de l'Abric Romaní (Capellades, Barcelona, Espanya)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- GIFFORD GONZÁLEZ D. P. (1981): Taphonomy and Paleoecology: A critique review of Archaeology's sister disciplines, *Advances in Archaeological Method and Theory* 4, 77-101.

- GOODALL, C. R. (1991): Procrustes Methods in the Statistical Analysis of Shape, *Journal of the Royal Statistical Society* (Series B) 53 (2), 285-339.
- GOODALL, C. R.; MARDIA, K. V. (1993): Multivariate Aspects of Shape Theory, *The Annals of Statistics* 21(2), 848-866.
- GORDON, C. C.; BUIKSTRA, J. E. (1981): Soil PH, bone preservation, and sampling bias at mortuary sites, *American Antiquity* 46 (3), 566-571.
- GREENFIELD, H. J. (1999): The origins of metallurgy: distinguishing stone from metal cut-marks on bones from archaeological sites, *Journal of Archaeological Science* 26, 797-808.
- HAYNES G. A. (1981): *Bone modification and skeletal disturbances by natural agencies: studies in North America*. University Microfilms International, Tesis doctoral, The Catholic University of America.
- HILL, A. (1976): On carnivore and weathering damage to bone, *Current Anthropology* 17 (2), 335-336.
- HUGUET, R. (2010): *Primeras ocupaciones humanas en la Península Ibérica: Paleoeconomía en la Sierra de Atapuerca (Burgos) y la Cuenca de Guadix-Baza (Granada) durante del Pleistoceno Inferior*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- JOCHIM, M. A. (1981): *Strategies for survival: Cultural behavior in an ecological context*, New York.
- KENDALL, D. (1989): A Survey of the Statistical Theory of Shape, *Statistical Science* 4 (2), 87-89.
- KUHN, M.; JOHNSON, K. (2013): *Applied Predictive Modelling*, Heidelberg.
- LUPO K. D.; O'CONNELL J. F. (2002): Cut and tooth mark distributions on large animal bones: ethnoarchaeological data from the Hadza and their implications for current ideas about early human carnivore, *Journal of Archaeological Science* 29, 85-109.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jasc.2001.0690>
- MARTÍNEZ-MORENO, J. (1998): *El modo de vida Neandertal: Una reflexión en torno a la ambigüedad en la interpretación de la subsistencia durante el Paleolítico Medio Cantábrico*, Tesis doctoral, inédita. U.A.B.
- MARTÍNEZ VALLE, R. (1996): *Fauna del Pleistoceno Superior en el País Valenciano. Aspectos económicos, huellas de manipulación y valoración paleoambiental*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A. (2017): *Implicaciones de la fotogrametría y de las técnicas láser en la identificación y caracterización de las trazas antrópicas sobre restos óseos en los yacimientos arqueológicos del pleistoceno*, Tesis doctoral, Universidad de Salamanca.
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; YRAVEDRA, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. F.; DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2015): Microphotogrammetric characterization of cut marks on bones, *Journal of Archaeological Science* 62, 128-142.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.08.006>
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. F.; YRAVEDRA, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2016): Micro-photogrammetric and morphometric differentiation of cut marks on bones using metal knives, quartzite and flint flakes, *Journal of Archaeological and Anthropological Science* 10 (4), 805-816.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0401-5>
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; ARAMENDI, J.; YRAVEDRA, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2017a): Statistical Comparison between Low-Cost Methods for 3D Characterization of Cut-Marks on Bones, *Remote Sensing* 9 (9), 873.
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9090873>
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; YRAVEDRA, J.; MARTÍN-PÉREZ, D.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J.; SANJUAN-BLAZQUEZ, M.; ESTACA-GÓMEZ, V. (2017b): Flint and quartzite: Distinguishing raw material through bone cut marks, *Archaeometry* 60 (3), 437-452.
DOI: <https://doi.org/10.1111/arcm.12327>
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; ARAMENDI, J.; YRAVEDRA, J.; BLASCO, R.; ROSELL, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2017c): Assessment of statistical agreement of three techniques for the study of cut marks: 3D Digital Microscope, Laser Scanning Confocal Microscopy and Micro-Photogrammetry, *Journal of Microscopy* 267 (3), 356-370.
DOI: <https://doi.org/10.1111/jmi.12575>
- MATEOS, A. (1999): Alimentación y consumo no cárnico en el Solutrense cantábrico: mandíbulas y falanges fracturadas intencionalmente eb ek nivel 9 de la cueva de las Caldas (Priorio, Oviedo), *Zephyrus* LII, 33-52.
- MCPHERRON, S. P.; ALEMSEGED, Z.; MAREAN, C. W.; WYNN, J. G.; REED, D.; GERAADS, D.; BOBE, R.; BEARAT, H. (2010): Evidence for Stone-Tool-Assisted Consumption of Animal Tissues before 3.39 Million Years Ago at Dikika, Ethiopia, *Nature Letters* 466, 857-860.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09248>
- MITTEROECKER, P.; GUNZ, P. (2009): Advances in Geometric Morphometrics, *Evolutionary Biology* 36, 235-247.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11692-009-9055-x>
- MORALES-PÉREZ, J. V. (2016): *Explotació dels mamífers i economia de les darrerrescomunitats caçadores-recol'lectores del vessant mediterrani ibèricdurant la transició Tardiglacial-Holocé*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- MUNTHE, L.; MCLEOD, S. A. (1975): *Collection of taphonomic information from fossil of recent vertebrate specimens with a selected bibliography*, PaleoBios 19. Greg Brown Bibliography.
- OLSEN, S. L. (1988): *The identification of stone and metal tool marks on bone artifacts*, B.A.R. 452, 337-360. Oxford

- OLSEN, S. L.; SHIPMAN, P. (1988): Surface modification on bone: trampling versus butchery, *Journal of Archaeological Science* 15, 535-553.
- PÉREZ RIPOLL, M. (1977): *Los mamíferos del yacimiento musteriense de Cova Negra (Játiva, Valencia)*, Serie Trabajos Varios. S.I.P. 53. Diputació de València.
- PÉREZ RIPOLL, M. (1992): *Marcas de carnicería, fracturas intencionadas y mordeduras de carnívoros en huesos prehistóricos del Mediterráneo español*, Instituto de Cultura "Juan-Gil Albert".
- PICKERING, T. R.; EGELAND, C. P. (2006): Experimental pattern of hammerstone percussion damage on bones: implications for inferences of carcass processing by humans, *Journal of Archaeological Science* 33, 459-69.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.09.001>
- PINEDA, A. (2018): *El rol de los homínidos en la formación de conjuntos arqueo-paleontológicos al aire libre: la Mina y el Forn (Barranc de la Boella, la Canonja, Tarragona) y Torralba (Torralba del Moral, Soria)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- PINEDA, A.; SALADIE, P.; VERGES, J. M.; HUGUET, R.; CACERES, I.; VALLVERDU, J. (2014): Trampling versus cut marks on chemically altered surfaces: an experimental approach and archaeological application at the Barranc de la Boella site (la Canonja, Tarragona, Spain), *Journal of Archaeological Science* 102, 35-47.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.018>
- POTTS, R.; SHIPMAN, P. (1981): Cutmarks made by stone tools from Olduvai Gorge, Tanzania, *Nature* 291, 577-580.
- PUMAREJO, P. G.; BERNALDO DE QUIRÓS, F. (1990): Huellas humanas en huesos, análisis de sus implicaciones económicas, *Revista de Arqueología* 108-109.
- PUMAREJO, P. G.; CABRERA VALDÉS, V. (1992): Huellas de descarnado sobre restos de fauna del Auriñaciense de la Cueva del Castillo, *Espacio, Tiempo y Forma* 5 (1), 39-52.
- REAL, C. (2017): *Estudio arqueozoológico y tafonómico del Magdaleniense de la Cova de les Cendres (Teulada-Moraira, Alicante)*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- REIXACH, J. (1986): Huellas antrópicas: Metodología, diferenciación y problemática, *Revista de Arqueología* 60, 6-14.
- RICHTSMEIER, J. T.; DELEON, V. B.; LELE, S. R. (2002): The Promise of Geometric Morphometrics, *Yearbook of Physical Anthropology* 45, 63-91.
- RODRÍGUEZ-HIDALGO, A. (2015): *Dinámicas Subsistenciales durante el Pleistoceno Medio en la Sierra de Atapuerca: los Conjuntos Arqueológicos de TD10.1 y TD10.2*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- ROHLF, F. J.; MARCUS, L. F. (1993): A Revolution in Morphometrics, *Trends in Ecology & Evolution* 8, 129-132.
- ROHLF, F. K. (1999): Shape Statistics: Procrustes Superimpositions and Tangent Spaces, *Journal of Classification* 16 (2), 197-223.
- ROJO, J.; MENÉNDEZ, M. (2012): Nuevas aportaciones al debate especialización-diversificación en el sustrato cantábrico. Estudio arqueozoológico y tafonómico de los macromamíferos de la cueva del Buxu (Cardes, Asturias, España), *Espacio, Tiempo y Forma* 5, 296-308.
DOI: <https://doi.org/10.5944/etfi.5.2012.2647>
- ROSELL, J. (2001): *Patrons d'aprofitament de les biomasses animals durant el Pleistocè inferior i mig (Sierra de Atapuerca, Burgos) i superior (Abric Romaní, Barcelona)*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- RUEDA, J. M. (1993): *L'acció antròpica sobre les matèries dures animals durant el Pleistocè del Nord-est de Catalunya*, Tesis doctoral inédita, Universidad de Girona.
- RUFA, A. (2017): *El papel de las pequeñas presas en la dieta humana del Paleolítico medio y superior: una visión diacrónica desde el valle del Ródano al arco mediterráneo*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- SAHLE, Y.; ZAATARI, S.; WHITE, T. D. (2017) Hominid Butchers and Biting Crocodiles in the African Plio-Pleistocene, *PNAS* 114 (50), 13164-13169.
DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1716317114>
- SALA, N. (2012): *Tafonomía de yacimientos kársticos de carnívoros en el Pleistoceno*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- SALADIE, P. (2009): *Mossegades d'omnívoros: aproximació experimental i aplicació zooarqueològica a la Sierra de Atapuerca*, Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili.
- SALADIE, P.; RODRÍGUEZ-HIDALGO, A.; DÍEZ, C.; MARTÍN, P.; CARBONELL, E. (2013): Range of bone modification by human chewing, *Journal of Archaeological Science* 40, 380-397.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.002>
- SANCHIS, A. (2010): *Los lagomorfos del Paleolítico medio de la región central y sudoriental del mediterráneo ibérico: caracterización tafonómica y taxonómica*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- SANCHIS, A.; REAL, C.; SAUQUÉ, V.; NÚÑEZ, C.; ÉGÜEZ, N.; TORMO, C.; PÉREZ-RIPOLL, M.; CARRIÓN, Y.; DUARTE, E.; DE LA RASILLA, M. (2019): Neanderthal and carnivore activities at Llonin Cave, Asturias, northern Iberian Peninsula: Faunal study of Mousterian levels (MIS 3), *Comptes Rendus Palevol* 18, 113-141.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2018.06.001>
- SCOTT, L.; KLEIN, R. G. (1981): A hyaena-accumulated bone assemblage from Late Holocene deposits at Deelplan, Orange Free State, *Annals of the South African Museum* 86, 217-227.

- SELVAGGIO, M. M. (1994): Carnivore tooth marks and stone tool butchery marks on scavenger bones: Archaeological implications, *Journal of Human Evolution* 27, 215-228.
- SELVAGGIO, M. M.; WILDER, J. (2001): Identifying the involvement of multiple carnivore taxon with archaeological bone assemblages, *Journal of Archaeological Science* 28, 465-470.
- SHIPMAN, P. (1981): *Life history of a fossil. An introduction to taphonomy and palaeoecology*, Harvard University Press. Cambridge.
- SHIPMAN, P.; ROSE, J. (1983): Early hominid hunting, butchering and carcass processing behaviours: a roaches to the fossil record, *Journal of Anthropological Archaeology* 2, 57-98.
- SLICE, DE. (2001): Landmark Coordinates Aligned by Procrustes Analysis do not Lie in Kendall's Shape Space, *Systematic Biology* 50 (1), 141-149.
- SPENNERMAN, D. H. R. (1990): Don't forget the bamboo on recognising and interpreting butchery marks in tropical faunal assemblages some comments asking for caution, *Problems Solving Taphonomy Tempus* 2 (S. Solomon, I. Davidson, D. Watson, eds.), 80-101.
- SUTCLIFFE, A. J. (1970a): Spotted hyena: Crusher, gnawer, digester and collector of bones, *Nature* 227, 1110-1113.
- SUTCLIFFE, A. J. (1970b): Similarity of bones and antlers gnawed by deer to human artefacts, *Nature* 246 (5433), 428-430.
- THOMPSON, J. C.; MCPHERRON, S. P.; BOBE, R.; REED, D.; BARR, W. A.; WYNN, J. G.; MAREAN, C. W.; GERAADS, D.; ALEMSEGED, Z. (2015): Taphonomy of Fossils from the Hominin-Bearing Deposits at Dikika, Ethiopia, *Journal of Human Evolution* 86, 112-135.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2015.06.013>
- VOORHIES, M. (1969): Taphonomy and population dynamics of an early Pliocene vertebrate fauna, Knox country, Nebraska, special paper nº 1. Univ. of Wyoming Press.
- WALKER, P.L. (1978): Butchering and stone tool function, *American Antiquity* 43 (4), 710-715.
- WASHBURN, S.L. (1957): The Australopithecus. The Hunted or the Hunter, *American Anthropologist* 59, 612-614.
- WHITE, T. E. (1952): Observations on the butchering technique of some aboriginal peoples, 1, *American Antiquity* 17, 337-338.
- WHITE, T. D. (1992): *Prehistoric cannibalism at Manos 5 MTUMR-2346*, Princeton: Princeton University Press.
- YRAVEDRA, J. (2005): *Patrones de aprovechamiento de recursos animales en el Pleistoceno Superior de la Península Ibérica: estudio tafonómico y zooarqueológico de los yacimientos del Esquilieu, Amalda, Cueva Ambrosio y la Peña de Estebanvela*, Tesis doctoral, UNED.
- YRAVEDRA, J.; GARCÍA VARGAS, E.; MATÉ GONZÁLEZ, M. A.; ARAMENDI, J.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. (2017a): The use of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics for identifying carnivore agency in bone assemblage, *Journal of Archaeological Science Reports* 14, 106-115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.043>
- YRAVEDRA, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. F.; ARAMENDI, J.; ESTACA-GÓMEZ, V. (2017b): A New Approach to Raw Material use in the Exploitation of Animal Carcasses at BK (Upper Bed II, Olduvai Gorge, Tanzania): a Micro-Photogrammetric and Geometric Morphometric Analysis of Fossil Cut Marks, *BOREAS* 46 (4), 860-873.
DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12224>
- YRAVEDRA, J.; DIEZ-MARTÍN, F.; EGELAND, C. P.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. F. (2017c): FLK-West (Lower Bed II, Olduvai Gorge, Tanzania): a new early Acheulean site with evidence for human exploitation of fauna. *BOREAS* 46 (3), 486-502.
DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12243>
- YRAVEDRA, J.; ARAMENDI, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; COURTENAY, L. A.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2018): Differentiating Percussion Pits and Carnivore Tooth Pits using 3D Reconstructions and Geometric Morphometrics, *PLoS ONE* 13 (3), 0194324.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194324>
- YRAVEDRA, J.; MATÉ-GONZÁLEZ, M. A.; COURTENAY, L. A.; LÓPEZ-CISNEROS, P.; ESTACA-GÓMEZ, V. (2019): Approaching Raw Material Functionality in the Upper Magdalenian of Coímbre Cave (Asturias, Spain) through Geometric Morphometrics, *Quaternary International* 517, 97-106.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.01.008>