

ARQUEOLOGÍA TRIDIMENSIONAL. LAS TÉCNICAS 3D APLICADAS AL REGISTRO PALEOLÍTICO

Tridimensional Archaeology. 3D techniques applied to the paleolithic record

JAVIER DUQUE MARTÍNEZ* y SARA DE FRANCISCO RODRÍGUEZ*

Resumen. La introducción de las técnicas 3D en el contexto patrimonial es una realidad plenamente consumada tal y como lo demuestra la aparición de la denominada “arqueología virtual”. Siguiendo esta tendencia, los estudios centrados en el Paleolítico han sufrido una verdadera revolución en sus trabajos de investigación y documentación de restos óseos, manifestaciones artísticas, colecciones líticas y trabajo de campo al poder mejorar y ampliar sus estudios hacia múltiples direcciones. Así pues, tras la presentación de un amplio estado de la cuestión sobre la utilización y las posibilidades de los métodos y herramientas tridimensionales tanto en la arqueología en general como en el mundo del Paleolítico en particular, se exponen dos ejemplos concretos de aplicación de tales técnicas a un conjunto de materiales y yacimientos adscritos al Paleolítico inferior africano. Por un lado, se describe la digitalización de artefactos líticos achelenses como medio de estudio y representación de los mismos; y por otro, se analiza la documentación del proceso de excavación mediante fotogrametría, como medio alternativo al levantamiento de plantas y secciones de manera manual. De este modo, la utilización y el empleo de las tecnologías 3D se muestra como un mecanismo viable que favorece y facilita el estudio del registro arqueológico.

Palabras clave: Arqueología Virtual. 3D. Láser escáner. Fotogrametría. Paleolítico. Industria lítica. Planimetrías.

Abstract: 3D techniques are nowadays widely used in a variety of heritage studies. The so-called “virtual archaeology” constitutes a good example of the growing strength accomplished by these techniques. Paleolithic studies have incorporated an increasing number of 3D routines in fieldwork, lithic, fossil bone and rock art studies, in order to enhance their analytical and interpretative tools. In this paper we present an updated review of the current uses and future possibilities of 3D techniques applied to Archaeology, particularly focusing on the Paleolithic record. In order to show the way in which the array of 3D techniques can be applied in Lower Palaeolithic contexts, two case studies are presented here. Through the digitalization of Acheulean lithic artefacts, the first example shows to what extent both formal representation and technological interpretation can benefit from 3D representation. Secondly, by comparing more traditional drawing procedures and photogrammetry we aim to stress how the later constitutes a much more efficient tool for data recovery and management in on-site archaeological fieldwork. In sum, this paper underlines how a wide range of archaeological procedures and studies can benefit from 3D technologies. .

Keywords: Virtual Archaeology. 3D. Laser scanner. Photogrammetry. Paleolithic. Lithic technology. Planimetry.

* Departamento de Prehistoria, Arqueología, Antropología Social, Ciencias y Técnicas Historiográficas de la Universidad de Valladolid. Pza. del Campus s/n 47011, Valladolid. Email: javier.duque@uva.es / saradefrancisco@gmail.com

1. Introducción: “la arqueología virtual”

En los últimos años, las técnicas de digitalización tridimensional han experimentado un vertiginoso ritmo de diversificación tanto en las metodologías como en los equipos, softwares e instrumental gracias a la investigación de diversas disciplinas ajenas, en principio, al mundo patrimonial y arqueológico: ingenierías (en sus ramas civil, industrial y biomédica), arquitectura, topografía y un largo etcétera. De hecho, su uso y empleo en el mundo del cine y la animación, laboratorios, hospitales, centrales nucleares o industrias de diseño y fabricación de todo tipo de piezas, han ido perfeccionando y ampliando el abanico de los procesos capaces de adquirir, analizar e interpretar información geométrica tridimensional, bien sobre una base real (digitalizando una topografía, un edificio o un objeto), bien sin ella (mediante programas informáticos de creación, edición y modelado 3D).

Las técnicas que digitalizan (Fig. 1), esto es, que documentan y reproducen el volumen, la textura y el color de una realidad tangible, al margen de los métodos topográficos (SIG a partir de coordenadas tomadas con GPS o estación total), se dividen en dos grandes grupos: aquellas que precisan de contacto directo con la pieza (sistemas de posicionamiento tridimensional y puntas exploratorias montadas sobre un brazo robot); y aquellos otros que no requieren de dicho contacto (técnicas sin contacto). A su vez, éstas últimas se subdividen en dos grupos: técnicas pasivas, que son aquellas cuyos sensores simplemente se limitan a recibir información (cámaras fotográficas); y técnicas activas, que se definen por interactuar con la superficie del objeto de trabajo mediante la emisión o proyección de algún tipo de señal o energía determinada en forma de radar, láser o luz. Así, dependiendo de la forma que tienen de recoger esa energía una vez ésta alcanza el objeto, las técnicas activas pueden ser de transmisión (caso de la tomografía computerizada), o de reflexión, en cuyo caso se diferencian entre sistemas ópticos (emiten un haz de luz visible) y no ópticos -microondas y ultrasonidos- (Vargas Balbuena, 2010: 1-3).

Aprovechando esta enorme diversidad metodológica que, además, está en constante evolución, durante los últimos quince años aproximadamente el mundo del patrimonio cultural ha ido introduciendo con fuerza en sus dinámicas de trabajo las metodologías 3D con una triple intención (Kuzminsky y Gardiner, 2012): mejorar los métodos de documentación en campo (con vistas a un mejor registro, conservación, preservación y restauración de los bienes muebles e inmuebles); abrir nuevas líneas de estudio (con la intención de avanzar y profundizar en la investigación del registro histórico, monumental, artístico o arqueológico); y hacer más accesibles, atractivos y cercanos a la sociedad tanto los resultados de las investigaciones como los propios bienes patrimoniales (con el objetivo de

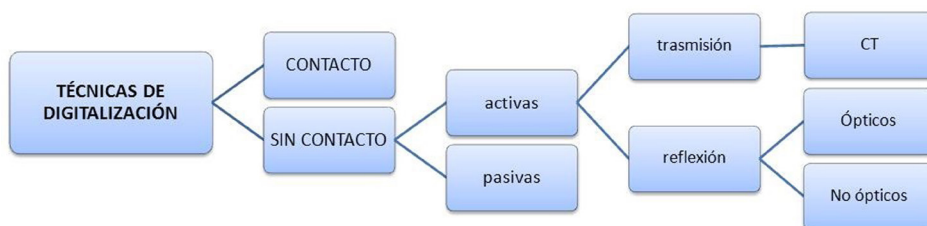


Fig. 1. Diagrama simplificado de la clasificación de las técnicas de digitalización 3D.

renovar y actualizar las fórmulas de divulgación en consonancia con los gustos de la denominada “sociedad de las nuevas tecnologías”). Así, al aunar patrimonio con técnicas 3D y, en general, con las nuevas tecnologías de la era digital, se ha constituido una nueva disciplina arqueológica: la arqueología virtual, que se define como “la disciplina científica que tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico” (López-Menchero Bendicho y Grande, 2011: 72).

Se puede decir que su formulación se remonta a inicios de la década de 1990, cuando Paul Reilly publicó el artículo “*Towards a virtual archaeology*” (Reilly, 1991). Sin embargo, no fue hasta la década de los 2000 cuando, con el lanzamiento del *eEurope 2002 Action Plan* por parte de los países miembros de la Unión Europea, se estimuló la utilización de las nuevas tecnologías con el fin de aprovechar las oportunidades que ofrecían en todos los ámbitos. Desde entonces, tres han sido los hitos principales que han conformado la nueva disciplina: a) la Declaración de Lund (Suecia) de abril de 2001, que promovió las actividades de digitalización haciendo especial hincapié en el campo cultural (piezas de museo, yacimientos arqueológicos, documentos históricos...) como forma de preservar el patrimonio y acercarlo a la ciudadanía mediante la educación y el turismo; b) la Carta de Londres de agosto de 2006, publicada por Hugh Denard bajo el título “*The London Charter for the Use of 3D Visualisation in the Research and Communication of Cultural Heritage*”, luego modificada en 2009, que estableció unos principios y recomendaciones básicas a la hora de utilizar con rigor las nuevas tecnologías en el campo patrimonial; y c) los Principios de Sevilla, que concretó y superó los presupuestos de Londres en el marco del I Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación celebrado en junio de 2009, si bien no se redactó en su forma definitiva hasta el año 2012 (Grande y López-Menchero Bendicho, 2012; Principles of Seville, 2012)¹.

¹ Al documento final de los Principios de Sevilla se puede acceder en el enlace siguiente: http://www.arqueologiavirtual.com/carta/?page_id=437 (consultado el 14 de marzo de 2015).

En paralelo, y como consecuencia del proceso anterior, los debates suscitados entre los investigadores acerca del patrimonio y su inserción en el mundo virtual fueron dando lugar a toda una serie de realidades que se han convertido a día de hoy en los auténticos marcadores de una disciplina que, aún en estado embrionario, está ya perfectamente conformada; entre tales “marcadores” destacan seis:

1. Constitución de grupos de profesionales entre los que destacan la *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), que con orígenes en 1910, tomó su nombre actual en 1980; la *CIPA Heritage Documentation* fundada en 1968 como una comisión del Consejo Internacional de Monumentos y sitios de la Unesco; la *Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology* (CAA), cuyo primer ciclo de conferencias lo organizaron en 1973; y la *Sociedad Española de Arqueología Virtual* (SEAV), creada en 2008 y cuya principal actividad se centra en el Centro Europeo en Innovación en Arqueología Virtual (Innova Center).

2. Fundación de revistas especializadas, entre las que destacan *Archeomatica* (desde 2009); *Virtual Archaeology Review* (desde abril de 2010); *International Journal of Heritage in the Digital Era* (desde enero de 2012); o *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* (publicada por Elsevier desde 2014), si bien es cierto los trabajos se pueden encontrar en cualquier tipo de revistas científicas. También van apareciendo ya monografías como “*Good Practice in Archaeological Diagnostics. Non-invasive Survey of Complex Archaeological Sites*” (Springer, 2013), o “*3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*” (BAR International Series, 2014).

3. Actividad congresual periódica e internacional, capítulo en el que es fundamental el Congreso “*Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación, Arqueológica 2.0*”, que en 2016 celebrará en Valencia su octava edición después de los éxitos conseguidos desde 2009.

4. Aparición de cursos y másters de formación en tecnologías 3D aplicadas al patrimonio y la arqueología, docencia puntera en Italia y España. En este último destacan el Máster en Arqueología y Patrimonio Virtual (SEAV); el Máster en Patrimonio Virtual (Universidad de Alicante); el curso de postgrado en Tecnologías Digitales de Documentación Geométrica y Representación del Patrimonio (Incipit del CSIC); o los cursos UBU Abierta (Universidad de Burgos), junto a otros muchos talleres, seminarios o workshops.

5. Surgimiento de un nuevo lenguaje, de una casuística propia, que a menudo proviene del campo de las ciencias y la informática principalmente: anastilosis, infografía, virtualización, modelo 3D, digitalización, malla de puntos, renderizado..., así como todos aquellos términos que hacen referencia a programas o tipos de archivos informáticos.

6. Aplicación de unas herramientas de trabajo y una metodología que, aunque en constante evolución, son propias. En cuanto a las herramientas de digitalización, el RADAR, el LIDAR aerotransportado, el escáner láser terrestre, el escáner láser de triangulación y el escáner láser de luz estructurada (como técnicas basadas en sensores activos de reflexión o reflectivos), la fotogrametría (como técnica pasiva), y la topografía (con los sistemas de información geográfica), son las más extendidas en la práctica patrimonial y arqueológica; su elección depende de la naturaleza, las dimensiones y las características del material sujeto al estudio. Asimismo, los softwares son muy variados, dependiendo tanto de la herramienta empleada como de los fines que se persigan, si bien la metodología es siempre muy similar: hay una primera fase de adquisición de datos (que conlleva la selección de la herramienta a emplear), una segunda de post-procesado (depuración y edición de los datos), y finalmente una elaboración de los resultados que dependerá de los objetivos (representaciones gráficas, infografías, reconstrucciones...).

2. Técnicas 3D y patrimonio: líneas de actuación

Dentro de la coyuntura descrita, los trabajos presentados son cada vez más abundantes y, a la vez, más dispares en cronología, objetivos y herramientas empleadas tal y como acabamos de ver, de modo que aunque los ejemplos son ya a día de hoy infinitos, es importante destacar algunas de las líneas de investigación a nivel general para comprobar la gran versatilidad de acercamientos y posibilidades que ofrece el mundo 3D al ámbito que nos ocupa.

En este sentido, hay en primer lugar un gran grupo de publicaciones que se centra en el trabajo de campo, esto es, en la documentación de los bienes patrimoniales de todo tipo: elementos construidos (iglesias, catedrales, castillos, viviendas...), yacimientos arqueológicos (emplazamientos bien al aire libre, bien en cueva o abrigos) y objetos patrimoniales de diversa índole y dimensiones cuyo abanico se extiende desde una evidencia paleontológica (Adams *et alii*, 2010), hasta el objeto más reciente que se nos ocurra. Ahora bien, esta enorme disparidad del patrimonio hace que en muchos casos las investigaciones se centren en analizar la idoneidad, ventajas e inconvenientes de cada una de las herramientas disponibles a la hora de la elección, motivo por el cual abundan los estudios que, mediante casos concretos, ahondan en una determinada técnica o realizan comparaciones y/o combinaciones de varias (Alsawabkeh, 2006; Gutiérrez Alonso, 2007; Cardenal Escarcena *et alii*, 2010; Rodríguez Navarro, 2012; Lerma *et alii*, 2013).

A partir de aquí, las utilidades de la documentación patrimonial son diversas, encontrando así múltiples líneas de actuación entre las que destaca en primer lugar la digitalización del patrimonio construido, especialmente de fachadas, para

marcar las pautas de restauraciones, facilitar los estudios de lectura de paramentos o realizar cualquier otro tipo de intervención, lo que está en relación directa con la denominada “arqueología de la arquitectura” (Marambio y García-Almirall, 2003; Mañana Borrazás, Rodríguez Paz y Blanco Rotea, 2008; Rütther *et alii*, 2009; García Gómez, Fernández de Gorostiza López de Viñaspre y Mesanza Moraza, 2011; García Molina y de Paula Montes Tubío, 2012). No menos importantes resultan las propuestas metodológicas que se centran en registrar el avance de las excavaciones arqueológicas en sus sucesivos niveles y superficies a través, principalmente, de la presentación de la fotogrametría como rutina de trabajo alternativa al dibujo arqueológico de planos, secciones y planimetrías (López Fraile, 2007; McPherron, Gernat y Hublin, 2009; De Reu *et alii*, 2014; Roosevelt *et alii*, 2015). Junto a ambas aplicaciones, existen otra serie de perspectivas que enfocan la documentación digital como un medio de conservación preventiva ante posibles daños futuros en los bienes patrimoniales (Álvarez Vicente, 2012: 83-85) o, directamente, ante procesos de destrucción activa como consecuencia del paso del tiempo, la despoblación o la falta de recursos para acometer actividades de preservación, línea en la que resultan muy interesantes los resultados obtenidos en los conjuntos arquitectónico-etnográficos asturianos (Rodríguez Pérez, 2012).

Más allá del trabajo de documentación, existe un segundo grupo de estudios que se centran en mejorar y ampliar las líneas de investigación vigentes en la actualidad, campo en el que últimamente está cobrando gran importancia la lectura de petroglifos, grabados e inscripciones (Novoa-Álvarez, 2005; Díaz Andreu, 2013; Correia Santos, Pires y Sousa, 2014; Lerma y Muir, 2014; Rodríguez López, 2014). Así, frente a los daños producidos por el paso del tiempo (erosión y nacimiento de líquenes y musgos), o por la acción humana, los análisis 3D de las superficies se muestran como la herramienta idónea para resaltar los trazos e incisiones practicados sobre la roca, pudiendo descifrar con ello formas artísticas o grafías casi perdidas. En este sentido, las aportaciones más interesantes las ha presentado el equipo de Hugo Pires, que ha desarrollado una técnica especializada en tal cuestión: el Morphological Residual Model (MRM), que permite resaltar las depresiones de las superficies escaneadas facilitando así el trabajo de identificación de formas (Pires *et alii*, 2014). Igualmente, cada vez son más las vías abiertas destinadas a sopesar el escaneado tridimensional del terreno como medio de prospección y detección de yacimientos, destacando en este sentido el empleo del Lidar.

Sin embargo, la mayor parte de los trabajos de investigación se centran en la digitalización de bienes patrimoniales de pequeño formato entre los que destacan los objetos arqueológicos (Tejado Sebastián, 2005; Hanke *et alii*, 2008; Solera Arganda, 2012; Pantoja Lorenzo, 2014; Rubio Gil *et alii*, 2010; Slizewski y Semal, 2009) sea cual sea su materia prima: piedra, hueso, madera (Lobb *et alii*,

2010), cerámica (Karasik y Smilansky, 2008), metal, etc... A este respecto, los estudios de morfometría geométrica son los más extendidos, un tipo de análisis tomado del campo de la biología que trata de caracterizar de manera exhaustiva el tamaño y la forma de artefactos de tipología semejante para, a partir de ahí, extraer relaciones de causalidad entre la variabilidad tipométrica y parámetros tan diferentes como las materias primas utilizadas, el lugar ambiental de aparición o la funcionalidad. De este modo, y puesto que para ello es necesario determinar las relaciones geométricas de las distintas piezas a fin de compararlas posteriormente mediante puntos fijos denominados “*landmarks*”, los modelos 3D han supuesto una verdadera revolución al permitir fijar tales puntos en las tres dimensiones, lo que implica una mayor precisión en tales estudios. Igualmente significativos, son todos los trabajos que presentan los modelos 3D como un medio de representación alternativo al dibujo tradicional (Gilboa *et alii*, 2013), cuestión de la que trataremos más adelante, y aquellos que ya rastrean las posibilidades de la impresión tridimensional de objetos (Ó Foghulú, 2015). De este modo, comienzan a aparecer ya las primeras tesis doctorales destinadas a la investigación de las posibilidades del 3D al registro arqueológico de piezas de diversa cronología y material, siendo pionero el trabajo presentado por la portuguesa Moitinho de Almeida (2013).

Por último, el campo de la difusión y la museística también se ve favorecido por este nuevo mundo, incluso con más fuerza si cabe que en los casos anteriores, puesto que las aportaciones en este sentido son infinitas: reconstrucción de piezas a través de simples fragmentos, reconstrucción virtual de espacios y yacimientos a partir de las evidencias arqueológicas, creación de museos y catálogos virtuales, mejora de los paneles informativos mediante infografías (Valero Sancho, 2000), etc... De hecho, la Realidad Virtual (RV), tan cercana y accesible a la ciudadanía, se ha convertido en la herramienta perfecta para dar a conocer, acercar y explicar de una forma más atractiva cuestiones patrimoniales de cualquier tipo. En este sentido, son muchas las propuestas que, más allá del campo teórico, están plenamente vigentes en las redes, caso del Virtual Curation Laboratory promovido desde la Virginia Commonwealth University, que tiene el propósito de “to develop a digital data project that incorporates the use of a three-dimensional object scanner in recording American Indian and historic artifacts for analysis and conservation”², para lo cual han creado la página virtualcurationmuseum.wordpress.com. En la misma línea se sitúa la plataforma micropast.org, que además de incentivar la cooperación entre profesionales y no profesionales del mundo de la arqueología, pretende enriquecer los viejos archivos fotográficos con la creación de modelos 3D de objetos arqueológicos que puedan ser visualizados en la web.

² <https://vcuarchaeology3d.wordpress.com/about/>

Documentación en campo	Investigación	Conservación-divulgación
Marcar las pautas de las intervenciones y restauraciones de los edificios históricos.	Analizar la idoneidad, ventajas e inconvenientes de cada una de las herramientas 3D.	Conservación preventiva de piezas.
Registrar el avance de las excavaciones: planimetrías y secciones.	Medio de detección de yacimientos arqueológicos.	Reconstrucciones virtuales a partir de los vestigios materiales del pasado.
Registrar el patrimonio en proceso de desaparición.	Lectura de petroglifos, grabados e inscripciones.	Creación de museos y catálogos virtuales de fácil accesibilidad.
	Morfometría geométrica, mediciones y cuantificación de parámetros	Otros: Visores on-line, PDF 3D e impresión 3D.
	Representación gráfica.	

Tabla I. Cuadro resumen de las aplicaciones de las técnicas 3D a las prácticas patrimonial y arqueológica.

Además, la reconstrucción virtual de los bienes patrimoniales mediante el estudio de los restos que subsisten en el presente (el denominado proceso de anastilosis), ha proporcionado a su vez una importante reflexión teórica en el mundo arqueológico con la propuesta de la Escala de Evidencia Histórica (Figueiredo y Aparicio Resco, 2014). Se trata de una adaptación de una idea original del proyecto Byzantium 1200 que, mediante una gama de colores, expone el grado de fiabilidad de los elementos presentes en una reconstrucción, desde aquellos que se conservan y siguen vigentes en la actualidad, hasta los que están directamente añadidos por el tipo de contexto (Tabla I).

3. Las técnicas 3D en el contexto paleolítico

1. Aplicaciones y usos en las industrias líticas

Dentro del contexto general descrito hasta el momento, la arqueología del Paleolítico también ha comenzado a incluir las técnicas 3D en sus trabajos siguiendo las tendencias generales, siendo de especial relevancia aquellos relacionados con la industria lítica. En este sentido, los primeros trabajos de digitalización de este tipo de objetos los encontramos en los comienzos del actual milenio (Riel Salvatore *et alii*, 2002), de modo que aunque desde entonces han sido dos las técnicas utilizadas preferentemente, escáneres en todas sus vertientes (Altantsetseg *et alii*, 2011) y fotogrametría (Sumner y Riddle, 2008), hay ejemplos de utilización de otras dinámicas de trabajo como, por ejemplo, la micro-CT (Abel *et alii*, 2011).

En primer lugar, existe un amplísimo grupo de estudios relacionados con la cuantificación de los diferentes parámetros que pueden ser medidos en cada uno de los objetos líticos, especialmente de aquellos que mediante las metodologías y las herramientas tradicionales -como los calibres- presentan algún tipo de problema; por ejemplo, el grado de convexidad de las lascas, que resulta difícil de precisar mediante una medición directa y manual. Por lo tanto son, en general, trabajos en los que a partir del modelo tridimensional de las piezas, se intentan crear nuevas metodologías de medición precisa por medio de softwares aplicados a parámetros concretos. Así pues, hay quienes lo emplean para estimar la variación morfológica de los conjuntos a fin de clasificar formalmente las industrias (Bretzke y Conard, 2012), quienes lo emplean para aproximarse a las secuencias de reducción (Lin *et alii*, 2010; Morales, Lorenzo y Vergès, 2015), o quienes con enfoques morfométricos lo utilizan para realizar análisis de contornos (Sholts *et alii*, 2012). Sin embargo, si alguien destaca en este campo es el profesor Chris Clarkson, que interesado en las cuestiones del comportamiento y la cognición durante el Paleolítico, ha realizado varios trabajos en los que, mediante el 3D, trata de profundizar en los sistemas de explotación de núcleos y configuración de herramientas mediante diferentes cuantificaciones sobre la pauta dorsal (Clarkson, Vinicius y Mirazón Lahr, 2006), la masa perdida en el proceso de talla (Clarkson, 2013; Clarkson, Shipton y Weisler, 2014 y 2015) o la masa original de las lascas a partir del estudio de las superficies talonares (Clarkson y Hiscock, 2011; y Muller y Clarkson, 2014). Asimismo son muy comunes los estudios que emplean la morfometría geométrica (Shott y Trail, 2010 y 2012; Gingerich *et alii*, 2014), entre los que destacan por su interés aquellos que se aplican a la técnica levallois (Eren y Lycett, 2012; Lycett y Von Cramon-Taubadel, 2013) y a otros métodos de reducción predeterminada como el Victoria West (Lycett, Von Cramon-Taubadel y Gowlett, 2010).

Sin embargo, es el Instituto de Arqueología de la Universidad Hebrea de Jerusalén³, y en su seno el Laboratorio de Arqueología Computerizada, el que ha desarrollado al máximo las posibilidades del 3D aplicado a las industrias líticas. Al frente de Leroe Grosman, y teniendo como referente el yacimiento achelense de Geshar Benot Ya' aqov (Israel)⁴, sus estudios se han diversificado hasta abarcar todos los campos posibles. Por un lado, ha creado y desarrollado un algoritmo que, mediante los modelos tridimensionales, permite orientar las piezas, extraer una serie de medidas estándar que evitan las posibles ambigüedades que pueden surgir en las mediciones realizadas a mano – tales como longitud, anchura o grosor-, y calcular otra serie de parámetros que, de forma tradicional, no podían hallarse –como el volumen o el centro de gravedad de las piezas (Grosman,

³ <http://archaeology.huji.ac.il/depart/computerized.asp>

⁴ http://gby.huji.ac.il/centers/arch/arch_project_lithic.html

Smikt y Smilansky, 2008; Grosman *et alii*, 2014). Por otro lado, se ha adentrado en el campo de la tafonomía al tratar de reconocer los efectos de los procesos postdeposicionales sobre la morfología de bifaces expuestos a corrientes de agua de alta energía (Grosman *et alii*, 2011). Y finalmente ha utilizado los modelos tridimensionales como medio de representación, primero mediante la creación de un algoritmo de detección automática de las extracciones y aristas presentes en las piezas, método que dio ciertos problemas en algunas superficies (Richardson *et alii*, 2013), y posteriormente mediante la introducción en los artículos de la imagen del propio escáner, sin textura, en color gris, sin ninguna modificación posterior y mostrando diferentes orientaciones (Sharon, Alperson-Afil y Gonen-Inbar, 2011; Goren-Inbar *et alii*, 2015; Sharon y Barsky, 2015). Todo ello, unido a otras aplicaciones como la creación de secciones transversales de las piezas para, por ejemplo, tratar de calcular la morfología original de una serie de núcleos (Goren-Inbar, 2011; Goren-Inbar, Grosman y Sharon, 2011), se muestran en otros artículos de este grupo de investigación (Grosman, Goldsmith y Smilansky, 2011; Grosman *et alii*, 2016; Malinsky-Buller, Grosman y Marder, 2011; Zaidner y Grosman, 2015).

Precisamente, la cuestión de la representación gráfica mediante modelos tridimensionales que acabamos de mencionar constituye, por sí misma, un segundo grupo de trabajos de especial relevancia. Este tipo de estudios se estructuran siempre de la misma manera: partiendo de la situación actual de la ilustración lítica, que combina la fotografía –incapaz de reemplazar al dibujo tal y como se preveía en un principio– con el dibujo arqueológico tradicional realizado a mano –que sigue fiel a los convencionalismos con los que nació a mediados del siglo XIX, ponen de relevancia los problemas que acarrearán ambos métodos de representación. Así, si la fotografía es criticada porque, además de percibir mal las superficies reflectantes de las piezas, se muestra incapaz de captar las características técnicas del objeto con la precisión del dibujo, quedando así con un sentido más estético que práctico, al dibujo lo muestran como una interpretación subjetiva de las industrias que, a menudo, quedan restringidas a un pequeño grupo de características y atributos que se quieren hacer destacar por parte del investigador. Si a ello unimos que, en ambos casos, el paso desde las tres dimensiones del objeto real a las dos del papel supone una importante pérdida de información especialmente sensible en lo que al volumen y la textura se refiere, comprenderemos que muchos autores vean en los modelos tridimensionales el método idóneo de representación (Pastoors y Weniger, 2011a); no en vano, hay quienes llegan a decir que el 3D “supera ampliamente al dibujo tradicional” (López Fraile, 2011: 334). De esta forma, las imágenes de los modelos tridimensionales obtenidos bien mediante el escaneado láser, bien a través de la fotogrametría, se presentan como altamente competitivos señalando en ellos toda una serie de

ventajas entre las que, a menudo, se destaca una mayor rapidez y una supuesta mayor objetividad (Magnani, 2014).

Desde esta postura, el 3D se muestra como el mejor método a la hora de plasmar las características principales de una pieza lítica, a saber: la naturaleza de la materia prima, que dependerá del tamaño de grano de la misma; la naturaleza de sus superficies, diferenciando las zonas corticales y las partes talladas, y captando el carácter volumétrico de las mismas –elevaciones, depresiones, concavidades y convexidades-; y los atributos tecnológicos –bulbos, talones, extracciones...- (Pastoors y Weniger, 2011b). A partir de aquí, las propuestas se hacen versátiles en tres direcciones diferentes: a) tratar de solucionar los problemas de captación de los datos tridimensionales en las piezas realizadas sobre materias primas de naturaleza reflectante, para lo cual hay propuestas verdaderamente interesantes (Thi Porter, Roussel y Soressi, 2016); b) rastrear las posibilidades que ofrecen las revistas on-line y herramientas como el PDF3d (Mañana Borrazás, 2012) para difundir los propios modelos tridimensionales bien como información adicional, bien embebidos en los textos a modo de ilustración; y c) profundizar en las posibilidades de impresión tridimensional de las propias piezas a través de los modelos. En este sentido, la utilización de plástico ABS, capaz de reproducir perfectamente las características de los objetos, se muestra como una opción beneficiosa a la hora de disminuir los desplazamientos para consultar las piezas y, a su vez, reducir los problemas de accesibilidad que poseen ciertas colecciones e instituciones (Olson *et alii*, 2014; 2015).

Con todo ello, encontramos ya una gran cantidad de artículos que, bien de forma exclusiva, bien en combinación de fotografías y dibujos, utilizan las imágenes de los modelos tridimensionales como medio de ilustración preferente (Rodríguez Untoria y López Recio, 2010; Shipton *et alii*, 2014; Shipton y Clarkson, 2015). Entre todos ellos, y debido a que una de las bondades esgrimidas sobre los modelos tridimensionales es su capacidad de captar los atributos tecnológicos de las industrias líticas así como las características de sus superficies, cada vez son más los trabajos en los que se emplean para ilustrar esquemas diacríticos de mayor o menor dificultad (Clarkson, Jones y Harris, 2012; Haslam *et alii*, 2012a y 2012b; Shipton *et alii*, 2013; Diez-Martín *et alii*, 2015).

Ahora bien, tales beneficios no sólo sirven para mejorar la ilustración y los estudios diacríticos, sino que a partir de ellos se ha abierto una nueva aproximación al análisis de las superficies líticas que es especialmente relevante en el caso de los elementos de percusión como yunques, martillos o esferoides (Hanke *et alii*, 2008). Se trata de trabajos en los que, por medio de la combinación de los datos tridimensionales con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), analizan las superficies de las herramientas a fin de crear mapas topográficos de las mismas. De este modo, el descubrimiento de depresiones, elevaciones, rugosidades

o superficies planas a escala micro puede mostrar estigmas, abrasiones o pulidos permitiendo con ello la profundización en la utilidad de los utensilios como si se tratase de huellas de uso. Por ello, este tipo de aproximación está comenzando a captar gran interés en los estudios realizados sobre los primeros estadios tecnológicos: el olduvayense, que tiene una significativa proporción de herramientas de machacado y, por analogía, los útiles que emplean los primates de la actualidad en su medio natural, recogidos por la llamada “*arqueología de los primates*” (Haslam *et alii*, 2009).

En este sentido, resulta pionero el acercamiento llevado a cabo sobre materiales realizados por los macacos (Haslam *et alii*, 2013), donde los escáneres permitieron el reconocimiento de las huellas de abrasión, piqueteado, estrías y fracturas con un doble fin: identificar y clasificar las propias marcas, y representarlas de manera fidedigna a modo de ilustración. Igualmente interesante resulta el estudio de las herramientas de los chimpancés de Bossou (Benito Calvo *et alii*, 2015), donde una vez escaneadas las piezas, los datos se introdujeron en el GIS creándose entonces mapas topográficos a color de las superficies de los objetos identificando depresiones, crestas, índices de rugosidad y, con ello, patrones de uso. Además, y como variación a tales análisis, existen también propuestas de creación de una técnica morfométrica “for distinguishing anthropogenically-generated damage patterns on percussive tolos from naturally damaged river cobbles” a través del análisis de las superficies de herramientas arqueológicas, herramientas experimentales y cantos con estigmas producidos por abrasiones naturales (Caruana *et alii*, 2014).

Precisamente, el análisis de las superficies a escala micro está permitiendo a su vez la aplicación de las técnicas tridimensionales en los estudios de huellas de uso. El microscopio láser confocal y el perfilómetro láser introducen nuevos avances en los estudios funcionales, ya que producen datos tridimensionales con imágenes de alta resolución, mayor precisión y datos cuantitativos (Evans y Donahue, 2008; Evans *et alii*, 2014; Stemp y Chung, 2011; Stevens, Harro y Hicklin, 2010). De entre ellos, la cuantificación de las huellas de uso es la innovación más destacada ya que proporcionan datos matemáticos de las superficies de las piezas que nos ayudan a discriminar las huellas en los útiles líticos (Stemp, 2014).

2. Otras aplicaciones al registro paleolítico

La necesidad de obtener la máxima información posible de un registro parcial y sesgado como consecuencia del paso del tiempo y la conservación diferencial de los materiales, ha provocado que, junto a los trabajos sobre industria lítica, se hayan desarrollado una amplia gama de estudios centrados en comprobar

las posibilidades de la digitalización 3D en el resto del registro arqueológico paleolítico.

En este sentido, su utilización comienza por el propio trabajo de campo en los yacimientos, como alternativa o complemento del registro tradicional en forma de planos, dibujos o notas (Dellepiane *et alii*, 2013; De Reu *et alii*, 2013; 2014). Para ello, existen propuestas muy variadas: recolección de datos con PDAs (Canals i Salomó *et alii*, 2008; Canals i Salomó y Guerra Rodríguez, 2011); realización de planimetrías y secciones en el campo mediante fotogrametría (de la Torre *et alii*, 2014) o escáneres láser terrestres (Campaña *et alii*, 2014; Aragón Galera, 2012; McPherron *et alii*, 2009; Lerma *et alii*, 2010); y desarrollo de aplicaciones para *Smartphone*, diseñadas exclusivamente para el desempeño de la labor arqueológica (Casalheira *et alii*, 2014). Todas estas nuevas aplicaciones tienen como objetivo agilizar las labores en el campo y por ende, conseguir un mayor número de datos en el menor tiempo posible, pero así mismo pretende salvaguardar los datos obtenidos en la excavación de una forma más segura.

Desde el punto de vista del estudio de los materiales, los trabajos se centran principalmente en los restos óseos. La aplicación de las técnicas tridimensionales al campo de la paleontología humana o paleoantropología se vincula a la denominada *Virtual Anthropology (VA)*, disciplina que une a los criterios biológicos tradicionales, el empleo de los métodos de digitalización en tres dimensiones (Weber y Bookstein, 2011). Sus autores, han dividido esta materia en seis áreas diferentes: digitalización de los restos, análisis de los mismos, comparación de parámetros, reconstrucción de las formas (perdidas), materialización de las reconstrucciones (a menudo con fines divulgativos), y colaboración entre la comunidad científica internacional compartiendo los datos (Weber, 2013). De entre todas ellas, tres son especialmente relevantes en el mundo de la investigación del paleolítico: la accesibilidad completa a los restos, incluyendo áreas ocultas como por ejemplo las cajas craneales o las cavidades medulares de los huesos largos; la obtención de modelos con una información geométrica perfecta para la realización de análisis cuantitativos y comparativos de todo tipo; y la reconstrucción de los elementos perdidos de los fósiles para tratar de inferir así datos de diversa índole. De esta forma se ha conseguido que las posibilidades y la precisión de los estudios paleoantropológicos aumenten, de modo que los ejemplos son, una vez más, múltiples.

En conjunto, su metodología de escaneo es semejante al utilizar en estos casos, y de forma recurrente, la tomografía en todas sus variedades (computerizada o CT, micro-computerizada o μ -CT y resonancia magnética o MRT). Sin embargo, sus objetivos son muy variados dada la enorme versatilidad de su empleo tal y como acamábamos de mencionar, si bien es cierto que entre todos ellos priman los acercamientos basados en la morfometría geométrica 3d (Terhune, Kimbel y

Lockwood, 2007; Baab y McNulty, 2009). A este respecto, hay que destacar que la precisión de los modelos tridimensionales permite reconsiderar la adscripción de algunos fósiles a un taxón concreto o incluso comprobar la variabilidad de una misma especie a lo largo del tiempo o del espacio (Violet *et alii*, 2010). Igualmente, la comparación entre fósiles de diferentes especies extintas, o de éstos con restos óseos de primates actuales, puede llevar a una mejor comprensión de las características de un determinado taxón y, con ello, acercarnos mejor tanto a sus modos de vida como a su situación en el árbol evolutivo humano (Ledogar *et alii*, 2016). Asimismo resultan interesantes los trabajos que tratan de indagar en cuestiones tales como la alimentación, la dieta o las capacidades neuronales de los distintos taxones por medio de la reconstrucción de los fósiles, especialmente los craneales (Gunz *et alii*, 2009), campo en el que destaca por su importancia la reconstrucción virtual realizada al famoso cráneo OH5 de la Garganta de Olduvai (Benazzi *et alii*, 2011). Evidentemente, todos estos mismos principios son aplicables a los restos faunísticos con los mismos fines o para otros distintos como por ejemplo, para crear colecciones de referencia de cualquier especie (Niven *et alii*, 2009).

También el mundo del arte rupestre paleolítico ha sufrido una verdadera revolución mediada la década de los 2000 gracias a la introducción de las técnicas tridimensionales, tanto que hay quienes llegan a decir que son “essential in our researches” (Bourdiel, Fuentes y Pinçon, 2015: 140). No en vano, las posibilidades que ofrecen estilística y cronológicamente son de gran importancia, abarcando desde la reconstrucción volumétrica de las cuevas (Lerma *et alii*, 2013), hasta la documentación y representación de las representaciones como complemento de dibujos y calcos (Gutiérrez Alonso, Farjas Abadía y Domínguez Gómez, 2014). Así, el escaneado tridimensional de los paneles con arte es especialmente útil en el caso de los grabados puesto que permite un avance de la investigación en varios sentidos (Güth, 2012). En primer lugar, la reconstrucción de la morfología de las paredes grabadas –y también las pintadas-, sirve para comprender mejor la relación entre los motivos figurativos y las superficies sobre las que se asientan, especialmente en aquellos casos en los que la accesibilidad era complicada o limitada. En segundo término, el estudio a escala micro de las superficies, puede permitir tanto el reconocimiento de nuevas representaciones –por ejemplo, en sitios recónditos o aquellas realizadas con trazos más sutiles-, como indagar en las técnicas utilizadas, discerniendo patrones diferentes en los trazos (Plisson y Zotkina, 2015). Además, el reconocimiento perfecto de los volúmenes, trazos y formas permite determinar posibles relaciones de anterioridad y posterioridad entre las representaciones superpuestas, y realizar comparaciones estilísticas más precisas dentro de un mismo conjunto pudiendo calcular el grado de similitud entre los diferentes grabados y, con ello, poder aproximarse a una cuestión tan esquivada

como la de la autoría (Bourdiel, Fuentes y Pinçon, 2015). Como es lógico, toda esta dinámica de trabajo es igualmente aplicable a todo el arte rupestre sea cual sea su época, encontrando así interesantes trabajos relativos al arte postpaleolítico (Díaz Andreu, 2013; Domingo *et alii*, 2013).

Por último, y desde el punto de vista de la divulgación, está en auge la creación de plataformas y museos virtuales, y entre ellas queremos destacar una galería en concreto por estar relacionada con nuestro ámbito de actuación: la arqueología africana referida a la evolución humana. Se trata de *africanfossils.org*, que como dice en su introducción es un auténtica “digital collection of animals, human ancestors, as well as ancient stone tools” procedentes principalmente de los yacimientos paleoantropológicos del Lago Turkana (Kenia y Etiopía). En la práctica, es una herramienta que permite, a través de los modelos 3D, explorar e interactuar con las piezas pudiendo descargar los modelos para imprimirles tridimensionalmente o comentar sobre alguna pieza en su foro. De este modo, hay en la actualidad (25 de enero de 2016), unas 150 piezas con su correspondiente descripción: yacimiento, historia del hallazgo, cronología, adscripción cultural, etc..., conjunto que se va actualizando conforme se producen nuevos descubrimientos. Por ejemplo, en ella podemos ver ya algunas piezas del yacimiento de Lomekwi 3 (Kenia), cuyos hallazgos han servido para acuñar no sin controversia un nuevo tipo de industria datada en 3,3Ma. y, por ende, anterior al *olduvayense*: el *lomekwiense* (Harmand *et alii*, 2015).

4. Aplicación práctica de las técnicas 3D al Paleolítico inferior africano

1. Estudiando las industrias *achelenses*

1.1. Motivación del estudio

La génesis de la industria *achelense* constituye un verdadero hito en la historia evolutiva humana debido a los avances tecnológicos que introdujo frente al periodo *olduvayense* anterior, entre ellos la producción de grandes lascas (las denominadas *large flake Acheulian*, ≥ 10 centímetros), y la aparición de herramientas de gran formato con una morfología estandarizada (los llamados *large cutting tools*, LCT). Ahora bien, a pesar de su importancia, aún son muchas las incógnitas que existen sobre su gestación en África Oriental hace 1,76 millones de años (Ma.), de modo que para tratar de arrojar luz sobre el tema, en los últimos años se ha comenzado a aplicar una metodología de estudio centrada en las vertientes tecnológica y funcional de los conjuntos. En este sentido, resultan especialmente significativas, por sus posibilidades, dos propuestas que, tomadas de la tradición investigadora francesa, se complementan a la perfección: los análisis diacríticos y los estudios morfo-potenciales/tecnofuncionales. Los primeros, tratan de reconstruir el

proceso tecnológico a partir de la observación de las superficies de las piezas, lo que implica identificar las extracciones, reconocer sus direcciones y determinar su ordenamiento cronológico en términos de anterioridad y posterioridad (Baena y Cuartero, 2006); y los segundos intentan aproximarse al funcionamiento y la función de los útiles al analizar la capacidad de una morfología a penetrar en la materia, distinguiendo en función de la medición de sus ángulos, partes pasivas destinadas al agarre, y partes activas cuyo fin es actuar para realizar una acción -cortar, raspar, pinchar...- (Geneste y Plisson, 1996).

Sin embargo, ambas metodologías pueden presentar ciertas complicaciones o problemáticas a la hora de su aplicación. Desde el punto de vista del diacrítico, la identificación de las extracciones, que conlleva su precisa delimitación y el reconocimiento de sus direcciones, no siempre resulta sencilla mediante una observación visual y directa de las superficies. Por el contrario, hay ciertas materias primas que, por sus características físicas como son el brillo y la textura, pueden presentar graves complicaciones al ojo humano, algo especialmente significativo en el caso del cuarzo. Además, y en toda clase de materiales, el estado de conservación de las piezas (alteraciones por craquelación, pérdida de masa superficial, fracturas, alto grado de rodamiento...) pueden condicionar también el examen de la topografía de los objetos líticos y, con ello, su interpretación, dando lugar a controversias sobre su naturaleza antrópica o natural. En este sentido, no son pocos los debates que suscitan los análisis de algunas piezas, siendo un buen ejemplo las importantes diferencias observadas entre los estudios publicados por de la Torre (Torre, 2002) y los realizados por Diez Martín (Diez-Martín *et alii*, 2012) acerca de los núcleos y los modelos de explotación presentes en los yacimientos achelenses de la Sección Tipo de Peninj (Lago Natrón, Tanzania).

Desde el punto de vista morfo-potencial, la medición manual de los ángulos a través de goniómetros convencionales es, a menudo, muy imprecisa por las propias irregularidades de las piezas (resaltos, accidentes de talla, aristas, depresiones y concavidades propias de las extracciones, rugosidades y forma de fracturación de las materias primas...), que hacen que se tomen medidas aproximadas pero que, en la práctica, están lejos de la exactitud (Dibble y Bernard, 1980). En otras palabras, que dependiendo de cómo se coloque el instrumento sobre la pieza, y puesto que éste es rígido y no se adapta a la topología de los objetos, se puede llegar a obtener un amplio intervalo de grados en la medición de un mismo ángulo.

Finalmente, y puesto que ambos análisis se plasman en esquemas y representaciones gráficas que muestran la ordenación de las extracciones y las secciones de la pieza con la medida de sus ángulos, hay que aludir al dibujo arqueológico, que en este caso debe combinar los criterios puramente tecnológicos (delimitación de extracciones, agrupamiento en series mediante colores, numeración cronológica y flechas de dirección), con las texturas propias

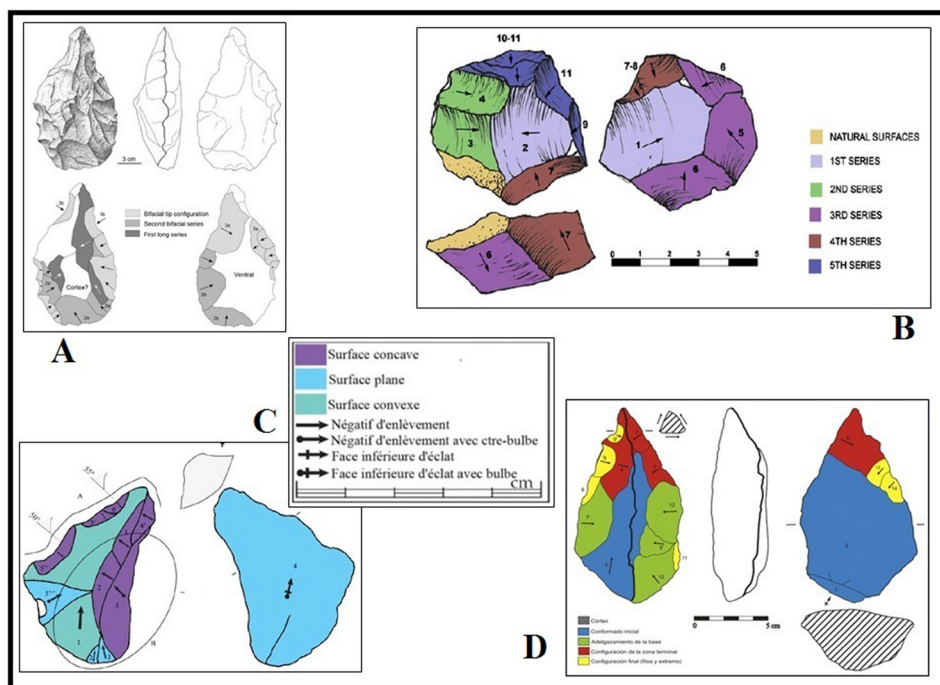


Fig. 2. Muestra de la variabilidad gráfica a la hora de representar los estudios diacríticos según los ejemplos mencionados en el texto. Imágenes tomadas de: A) Diez-Martín *et alii*, 2014: 255, figura 20; B) Baena *et alii*, 2010: 48, figura 2c; C) Rocca, 2013: 168, figura 114; y D) Jiménez Cobos, 2012: 27, figura 4.

de la pieza (concavidades y convexidades) de la manera más fidedigna y simple posible. Así, a menudo resulta difícil la inserción de los esquemas diacríticos, con la información tecnológica, en los dibujos tradicionales, puesto que los convencionalismos que tales figuras llevan consigo (sombreados, ondas, rayas o puntos según el caso), pueden complicar la comprensión de tales esquemas. De esta forma, y aunque hay ejemplos en los que se emplea con éxito esta conjunción de dibujo arqueológico tradicional, que proporciona las formas volumétricas de las piezas, con esquemas tecnológicos superpuestos (Baena *et alii*, 2010), la problemática planteada se hace especialmente evidente al repasar la bibliografía, donde se observa una enorme variabilidad de modelos a la hora de plasmar gráficamente los estudios diacríticos (Fig. 2).

Un grupo opta por un esquema sumamente sencillo en el que únicamente se preocupa del esquema tecnológico de las piezas prescindiendo de la representación de las texturas, lo que conlleva a nuestro juicio un grave problema: el empleo de los colores para diferenciar las superficies planas, cóncavas y convexas de cada pieza, lo que impide agrupar las extracciones en series diferenciadas; es decir, que en

este caso la sencillez provoca que quede incompleta la representación del propio estudio tecnológico (Rocca, 2013). Por este motivo, y con el fin de ahondar en el objetivo tecnológico, otro conjunto de autores varía el modelo anterior utilizando los colores para aunar las extracciones en series, lo que hace que no se pierda ninguna información sobre la tecnología de cada pieza (Jiménez Cobos, 2012). Ahora bien, el problema en este caso estriba en que aunque tecnológicamente está completo, el esquema no presenta ninguna información acerca de las texturas de la pieza, quedando como una representación eminentemente plana. Para solventar este problema, se observa una cuarta propuesta que consiste en presentar en una misma figura, pero por separado, los dibujos arqueológicos de las piezas, con sus convencionalismos, y los esquemas diacríticos planos con la información tecnológica, de tal manera que en los primeros se observan los volúmenes y texturas, mientras que en los segundos aparecen las agrupaciones de las extracciones, sus direcciones y su ordenamiento (Diez-Martín *et alii*, 2014). Por lo tanto, es un modo de representación que, en este caso sí, permite plasmar toda la información del objeto de estudio sin perder datos volumétricos y tecnológicos, si bien es cierto que supone duplicar el trabajo y el espacio dedicado a cada figura.

Ante esta situación, la elección de las técnicas de digitalización tridimensional como la herramienta adecuada para superar los problemas metodológicos hasta ahora planteados parece ser la adecuada tal y como muestran algunos trabajos precedentes. Por ejemplo, para el caso del mencionado debate acerca de los modelos de explotación presentes en la Sección Tipo del Lago Natrón, especialmente visible en piezas concretas como ST₄-16, y frente al dibujo esquemático de la misma realizado por el primer investigador (Torre, 2002: 201), el segundo optó por realizar un escáner tridimensional de la pieza mediante el láser escáner Konica Minolta Vi 910 (Diez-Martín *et alii*, 2012: 277) con un objetivo: tratar de superar los prejuicios interpretativos que pudieran estar en relación con la visualización directa de la pieza. No menos interesantes resultan los trabajos de mejora de la precisión en la toma de medidas (Mozas Calvache *et alii*, 2011), o los ya comentados con respecto a la representación gráfica de las colecciones líticas mediante imágenes basadas en el 3D (Clarkson, Jones y Harris, 2012; Haslam *et alii*, 2012 (a); Haslam *et alii*, 2012 (b); Shipton *et alii*, 2013; Diez-Martín *et alii*, 2015).

1.2. Metodología y resultados

Ante el contexto general descrito, con el fin de superar los problemas metodológicos expuestos anteriormente, y a tenor de los precedentes enumerados, se decidió aplicar las técnicas tridimensionales como una metodología sistemática

de trabajo previa a los análisis diacríticos y morfopotenciales que se realizan a los objetos líticos de gran formato. De este modo, hasta el día de hoy se han realizado los modelos tridimensionales de 266 objetos líticos achelenses que incluyen grandes lascas, *large cutting tools* (bifaces, hendedores, triedros, cuchillos...) y núcleos procedentes principalmente de cinco yacimientos tanzanos: Escarpe Norte, Escarpe Sur y Sección Tipo dentro del complejo arqueológico de Peninj, y FLK-W y SHK dentro de la Garganta de Olduvai. Para ello, el flujo de trabajo se divide siempre en tres fases semejantes: toma o adquisición de los datos tridimensionales, edición del modelo en tres dimensiones, y presentación de los resultados tras su estudio detallado. Ahora bien, puesto que la toma de datos se ve siempre condicionada a las características volumétricas de los objetos, la primera fase del trabajo se realiza mediante dos técnicas diferentes según la naturaleza de las piezas: el escaneado láser, que a través del modelo de la compañía Next Engine permite la digitalización de la mayoría de los materiales, siendo así el método más utilizado con diferencia; y la fotogrametría, destinada en exclusiva a aquellos objetos que por sus dimensiones y peso son difíciles de escanear sin problemas, cuando no imposibles. Así, una vez obtenidos los datos y los modelos tridimensionales, la presentación de los resultados se realizan ya a través del mismo cauce, paso en el que la utilización de software libre resulta de vital importancia, destacando en este sentido el empleo de Blender.

El escáner para escritorio de la compañía Next Engine, por su bajo coste con respecto a otros escáneres –unos 3.000 dólares incluyendo el software de edición-, se ha convertido en uno de los más populares en el mundo de la investigación, encontrando así múltiples trabajos que centran su atención en calibrar sus posibilidades, campo en el que destacan los proyectos de fin de carrera/fin de grado dirigidos por la profesora Mercedes Farjas Abadía desde la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid⁵ (Ávila Roldán, 2015; Pantoja Lorenzo, 2014; Ruiz Marín, 2013; Solera Arganda, 2012). El equipo, está formado por tres componentes básicos: a) la unidad del escáner principal, que dotado de un sistema multi-láser de precisión de 650 nanómetros (nm) de longitud de onda, sensores de imagen CMOS de 3.0 megapíxeles e iluminadores de luz blanca, es la que se encarga de capturar en forma de puntos la geometría y las texturas del objeto a digitalizar; b) el autoposicionador, que es un plataforma giratoria sobre la que se coloca las piezas posibilitando su rotación en los 360°; y c) el software de edición ScanStudio HD. De esta forma, la captura de los objetos en tres dimensiones y a color se realiza siguiendo el principio de la triangulación óptica, que hace alusión a la figura geométrica que forman los tres elementos que participan en el proceso

⁵ http://oa.upm.es/cgi/search/simple?q=mercedes+farjas&_action_search=Buscar&_action_search=Search&_order=bytitle&basic_srctype=ALL&_satisfyall=ALL



Fig. 3. Equipo de escaneo NextEngine trabajando con sus componentes básicos.

de escaneo: el objeto a digitalizar, el emisor láser y los sensores de imagen. Así pues, cuando el láser se proyecta sobre el objeto, la superficie de éste deforma y refleja el rayo láser, cuya señal es capturada de inmediato por los sensores de imagen, que calculan con ello las coordenadas x,y,z de posición de cada punto tomado, así como sus medidas (Tucci, Cini y Nobili, 2011; Zvietcovich Zegarra, 2011: 11-13). Para poder soportar la carga del software, se emplea un ordenador Thosiba provisto del sistema operativo Windows 8.1 de 64 bits, un procesador Intel Core 2.40 GHz, una RAM de 16 GB y una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 640M (Fig. 3).

La toma de datos, con una velocidad de captura de 50.000 puntos por segundo, comienza con un trabajo de previo que tiene la finalidad de preparar las piezas para el escaneo. En este sentido, es de especial importancia que las piezas estén perfectamente limpias de concreciones y adherencias, puesto que si sus superficies, y con ello sus características topográficas, están cubiertas por cualquier tipo de sedimento, no tiene ningún sentido escanear los objetos de acuerdo a nuestros objetivos. Además, y tras un lavado concienzudo de los artefactos, hay que tener la precaución de aplicar polvos de talco que la propia compañía suministra junto al equipo, a aquellos materiales realizados en materias primas reflectantes tales como el cuarzo, pues de lo contrario el láser puede generar grandes errores. Asimismo, y puesto que el soporte no ha sido diseñado para sostener objetos líticos, se emplea la plastilina como método de sujeción alternativo al del aparato, del todo insuficiente. Una vez solventadas estas tres cuestiones, el escaneo se puede realizar de dos maneras diferentes: desde el rango de precisión “*macro*”, que posee un campo de visión de 130x97mm, una

resolución y densidad de puntos de 400 puntos por pulgada (dpi), y una precisión de $\pm 0,127$ mm; y desde el rango de precisión “wide”, que cuenta con un campo de visión aproximado de 330x257mm, una resolución y densidad de puntos de 150 dpi, y una precisión de $\pm 0,381$ mm. La elección de uno u otro rango de escaneo dependerá principalmente del tamaño del objeto a escanear, pues si los objetos pequeños se pueden colocar a una distancia de unos 165mm de la unidad principal del escáner, los más grandes deben colocarse a unos 430 mm para que el campo de visión abarque la totalidad del objeto.

Ahora bien, una vez colocado el objeto en el soporte, es evidente que si se realiza un único escaneo de la pieza, hay partes de la misma que no se exponen al láser, caso de la parte inferior embutida en el soporte, de ahí que al menos haya que realizar dos tomas completas a cada pieza: una con la pieza colocada en el soporte verticalmente y otra con la pieza colocada en el soporte horizontalmente, de modo que las partes ocultas en las bases se alternan y son distintas en cada toma consiguiendo con ello que se recoja la información de toda la superficie del objeto. A partir de aquí, hay que seleccionar los parámetros de escaneo poniendo especial atención en tres de ellos: 1) el modo de escaneo, que determina la superficie a escanear: una sola vista del objeto, la mitad de su volumen en un giro de 180° o la totalidad de la pieza haciendo girar el soporte 360°, que es la elección preferente; 2) el número de divisiones, que determina el número de puntos de vista desde los que el escáner realiza la toma de datos y, por ende, el número de vistas de las que se compondrá cada toma, normalmente entre nueve y doce; y 3) la velocidad, de cuyas propiedades depende la calidad del modelo tridimensional, de ahí que siempre lo ubiquemos en la posición más alta del modo *high definition* (HD), lo que a su vez aumenta el tiempo de escaneo –en torno a media hora por familia- y el peso de cada modelo, que varía mucho dependiendo de las características del propio objeto. Por lo tanto tenemos una toma jerárquica de datos a base de dos tomas como mínimo (llamadas A y B respectivamente), cada una de ellas compuesta por entre nueve y doce vistas parciales (A1, A2, etc... y B1, B2, etc...) (Fig. 4).

A partir de aquí, y mediante el software *ScanStudio HD*, se procede a la edición del modelo en tres dimensiones, que se centra en tres acciones: alinear, cortar y fusionar. El proceso de alineación (*align*), consiste en integrar las vistas parciales de cada toma en un único modelo que se denomina “familia” para, a continuación, unir las diferentes familias consiguiendo con ello el modelo tridimensional final. Para ello, se localizan en las vistas o en las familias –dependiendo de lo que se vaya a alinear-, al menos tres puntos homólogos, si bien es cierto que es recomendable identificar siempre nueve, algo para lo cual resulta verdaderamente útil el color de las piezas, las marcas de las extracciones o en general cualquier elemento que permita emparejar y relacionar los puntos coincidentes. Evidentemente, con la

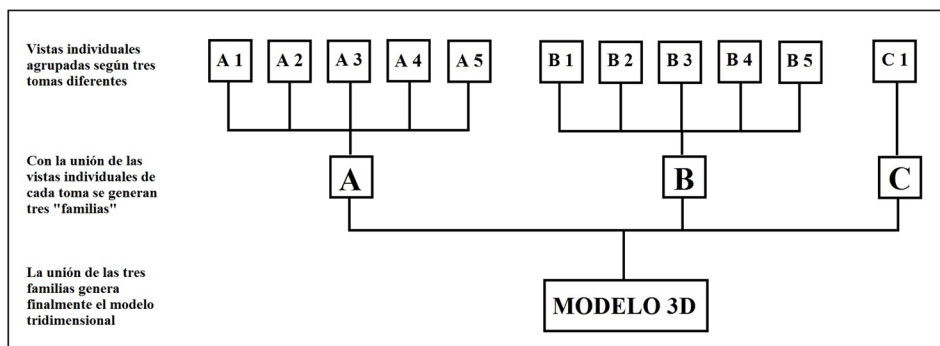


Fig. 4. Modificado de Ruiz Marín, 2013: 22, imagen 3.10. Diagrama explicativo de la toma jerárquica de los datos: vistas, familias y modelo final. De acuerdo a nuestro procedimiento, la familia A representa a la toma con la pieza colocada verticalmente; la familia B a la toma con la pieza colocada horizontalmente; y la familia C, a una posible toma adicional para recoger los datos previamente no recogidos.

obtención del modelo se observa si, efectivamente, se ha conseguido tomar los datos de toda la superficie o, si por el contrario, han quedado partes sin escanear y, por lo tanto, existen agujeros; en dicho caso, sería necesario proceder a una nueva toma (toma C). Por su parte, el proceso de cortado (*trim*), consiste en suprimir todas aquellas partes ajenas a nuestra pieza que han sido escaneadas junto a ella, caso de los soportes de sujeción. Finalmente, se procede a fusionar (*fuse*) el modelo, que consiste en compilar el modelo final en una única malla coherente y simplificada. Una vez obtenido así nuestro modelo, que puede visualizarse de cuatro maneras diferentes (nube de puntos, malla geométrica, superficie a color y superficie sólida), éste se puede refinar con otro tipo de acciones como el remallado (*remesh*), y con todo exportarlo en un formato acorde al programa que queramos utilizar posteriormente para estudiar la pieza y presentar los resultados, siendo los archivos .obj y .stl los más utilizados por su universalidad.

Ahora bien, aunque el escáner no tiene ninguna limitación, como hemos dicho previamente hay piezas que presentan complicaciones a la hora de escanear, principalmente de dos tipos: aquellas que no se pueden asegurar en una sujeción adaptada al escáner de manera fiable (por lo que se prefiere no arriesgar su integridad); y aquellas tan pesadas que resultan verdaderamente difíciles de mover y maniobrar (por ejemplo, algunos núcleos de grandes lascas). Para estos casos, se decidió optar por la fotogrametría como metodología complementaria, técnica que utiliza imágenes fotogramétricas y puntos o medidas de referencia para obtener información métrica. Consiste en proyectar en forma ortogonal sobre un plano de referencia, la imagen registrada en una fotografía, la cual ha sido proyectada sobre el dispositivo mediante la proyección central que es la usada por las lentes. Con este soporte teórico, las piezas que presentan problemas ante

el escáner son dispuestas sobre una base adecuada al tipo de objeto lítico según sus características en cuanto a la forma, volumen o peso. Siempre que se pueda, la superficie sobre la que se asiente la pieza para el proceso de fotografiado debe ser móvil, a fin de poder rotar la pieza cómodamente para fotografiarla sin tocarla. Es necesario que el soporte sea de un color homogéneo para que el software de procesado 3D solo alinee los puntos de la pieza y no se vea entorpecido por agentes externos, lo que llamamos ruido y que distorsiona el modelo.

Una vez preparada la pieza, tiene lugar la toma de fotografías (que en este caso han sido tomadas con una cámara réflex Nikon D3200 y objetivo AF-S DX 18-55 mm) y la ayuda de un trípode. El proceso fotogramétrico para piezas consiste en tomar fotos del objeto creando diferentes anillos alrededor de la pieza en función de lo alto, lo grande o lo compleja que sea la geometría de la pieza con la que estamos tratando, moviendo el soporte de la pieza con giros muy cortos a pocos grados para que se produzca solape entre las fotos. Se realizan tantos anillos de fotos como sean necesarios, repitiendo el proceso del revés, para fotografiarla al completo (aquí tenemos que tener en cuenta la morfología de la pieza, pudiendo realizar las fotos en horizontal o sobre algún tipo de soporte como puede ser plastilina o gluta). Se hacen también fotos cenitales y de detalle (Fig. 5). Las fotos se descargan en un ordenador (se utiliza el mismo que con el escáner) y se procesan con el software comercial Agisoft Photoscan, cuyo funcionamiento veremos más adelante ya que es el mismo que se sigue al

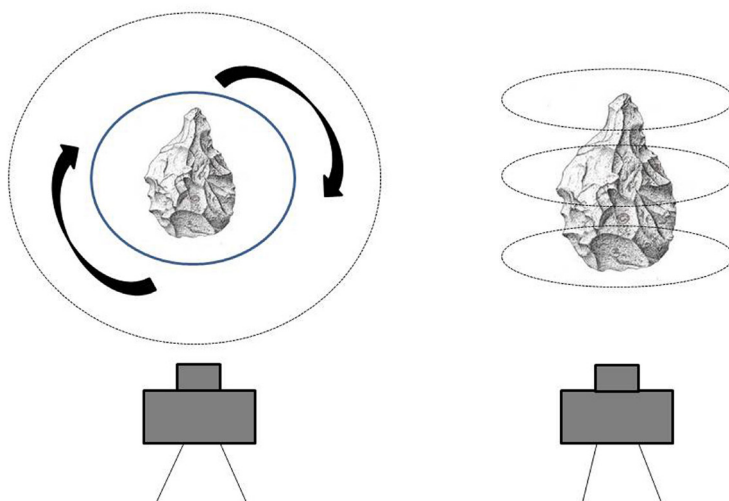


Fig. 5. Estrategia de captura de fotos para la adquisición de modelos tridimensionales de objetos mediante fotogrametría.

realizar las planimetrías de los yacimientos. Los modelos conseguidos con este procedimiento pueden exportarse en diferentes formatos para poder ser tratadas con otro tipo de programas.

Obtenidos los archivos .obj bien mediante el escáner Next Engine, bien a través de la fotogrametría, Blender (en su versión v2.72) es el software elegido para visionar y presentar los resultados por dos razones principales. En primer lugar, porque es un software libre y gratuito, desarrollado y promocionado como un proyecto de código abierto basado en la comunidad de usuarios⁶, lo que permite encontrar gran información sobre sus comandos y su manejo en la red. Y en segundo término, porque tiene una enorme versatilidad que permite a) visualizar las superficies, identificando el número, la forma y la dirección de extracciones, las zonas corticales no transformadas y los atributos tecnológicos como bulbos o puntos de impacto; b) obtener ortofotos en dos dimensiones, eligiendo cualquier vista del modelo, introduciendo una escala de referencia métrica y seleccionando el color con el que se edita la imagen -por lo que posteriormente se puede trabajar con programas de edición de imagen como Gimp-; c) extraer secciones longitudinales y transversales de cualquier parte del modelo, por lo que sus ángulos pueden ser medidos mediante programas informáticos de diseño, caso de AutoCAD; y d) exportar los modelos para insertarlos, bien directamente, bien a través de programas con capacidad para importar y exportar en una amplia gama de formatos (como MeshLab), tanto en visores on-line como en pdf 3d a fin de fomentar la divulgación tal y como se puede ver en este enlace en el que hemos colgado uno de nuestros modelos: <https://p3d.in/KsUqQ/spin> (Figs. 6 y 7).

2. Documentando el proceso de excavación

2.1. Motivación

A la hora de planificar el trabajo de campo en un yacimiento paleolítico, las nuevas técnicas 3D están suponiendo una revolución, sobre todo a la hora del registro como ya hemos visto (De Reu *et alii*, 2013; 2014). Excavar es destruir, por ello debemos ser conscientes de que el registro seguido a la hora de abordar los trabajos arqueológicos sea el más completo posible, y por ello, la adquisición de modelos tridimensionales de las superficies excavadas y las secuencias estratigráficas es el medio más óptimo del que disponemos en la actualidad.

Actualmente las excavaciones se desarrollan en un período de tiempo corto, y una vez finalizada la misma, la cata arqueológica se suele cerrar. Es por ello que la creación de modelos tridimensionales es la forma más fidedigna de conservar la reconstrucción de la cata para posteriores estudios. Pero no solo eso, sino

⁶ <https://www.blender.org/foundation/history/>

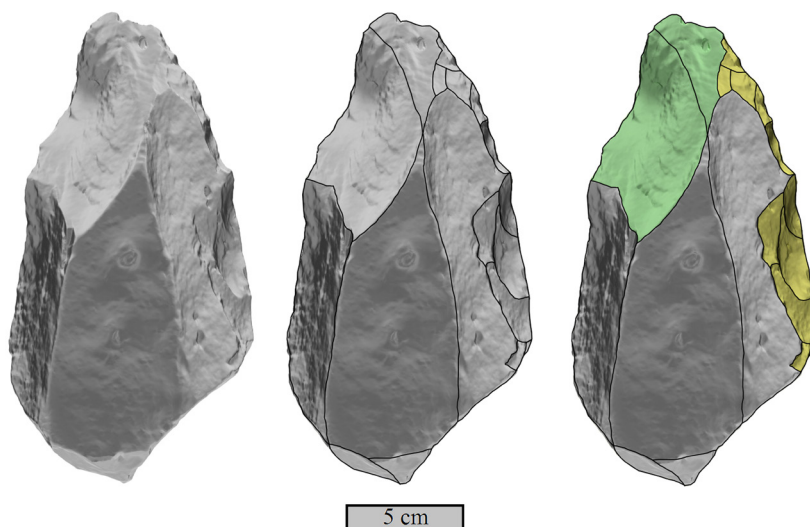


Fig. 6. Proceso de presentación de resultados: a la izquierda, ortofoto del modelo tridimensional sin retocar; en el centro, modelo tridimensional con el dibujo de las extracciones; y a la derecha, modelo tridimensional en colores según las pautas tecnológicas.

que agilizamos el trabajo en el campo. En nuestro caso y, debido al limitado tiempo y presupuesto del que disponemos a la hora de abordar las excavaciones de nuestro equipo, hemos optado por el registro en campo de las superficies excavadas mediante la técnica de la fotogrametría. Ésta, nos aporta la comodidad de solo tener que transportar una cámara de fotos y un trípode al campo, así como la facilidad del postprocesado de las imágenes en el laboratorio con un ordenador. La rapidez que un modelo tridimensional aporta frente al tedioso trabajo del dibujo y la representación fidedigna más completa que la de una fotografía, compensan en gran medida los trabajos fotogramétricos.

La tecnología nos permite conservar desde un registro en 2D, como pueden ser los planos, dibujos de perfiles o fotografías), a un registro 3D, que otorga una mejor comprensión, precisión e interpretación de los datos obtenidos (De Reu *et alii.*, 2014). Registrar digitalmente las superficies excavadas tiene como objetivo simplificar y agilizar el trabajo en el campo, ya que realizar los dibujos conlleva más esfuerzo, tiempo y además depende de la pericia artística del dibujante. Las imágenes, en 2D, ya por sí solas ofrecen información, pero si además las convertimos en un modelo 3D completo de la cata arqueológica, el cual podemos georreferenciar, obtendremos un registro mucho más completo y fiable, con el que podemos trabajar de forma cómoda desde un ordenador.

Tenemos dos métodos de adquisición de los modelos 3D: mediante escáneres láser que se transportan al campo (Campana *et alii.*, 2014; Aragón Galera, 2012) o

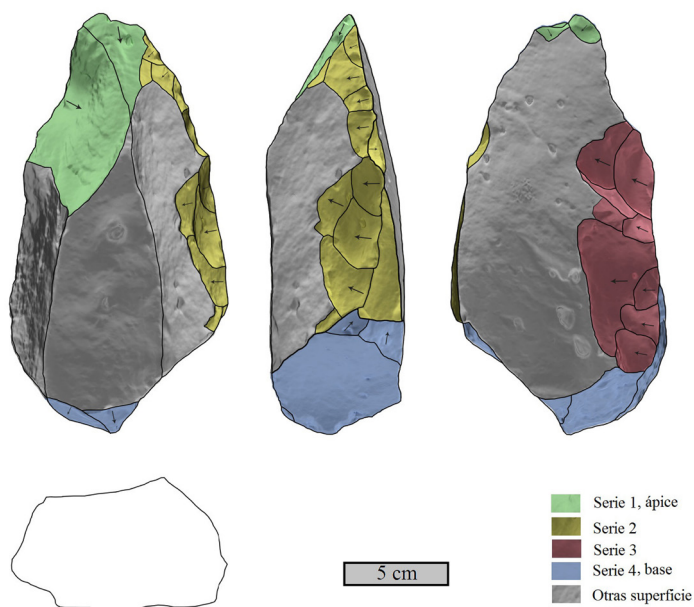


Fig. 7. Acabado final del esquema tecnológico de la pieza ST-46, A-174 a través del modelo 3D. Se muestran las ortofotos de tres vistas diferentes de la pieza (a color y con escala), y con una sección longitudinal.

mediante fotogrametría (de la Torre *et alii*, 2014). Los láseres escáner nos otorgan una mayor calidad del registro, pero en detrimento, tienen un coste mayor, no se pueden transportar a todos los yacimientos y, en algunos casos, su uso debe ser complementado con el uso de la fotogrametría en lugares de acceso especial (Lambers *et alii*, 2007; Lerma *et alii*, 2010).

Por otro lado, contamos con la fotogrametría, que puede describirse como una técnica pasiva que nos ofrece medidas precisas y realistas a través de fotografías o imágenes, o lo que es lo mismo el arte de convertir imágenes en modelos 3D (Barsanti, Remondino y Visintini, 2012: 3). La adquisición de las imágenes puede hacerse de diversas maneras (terrestre, aérea, satélite), lo único que hay que tener en cuenta es la superposición de las imágenes para la reconstrucción 3D. Las ventajas de la fotogrametría sobre el uso de escáneres láser terrestres son sobre todo económicas, pero también hay que tener en cuenta que la fotogrametría nos permite más autonomía de movimientos. En contraposición, la calidad es mucho menor que la de los escáneres. La técnica fotogramétrica está considerada como permite más autonomía de movimientos. En contraposición, la calidad es mucho menor que la de los escáneres. La técnica fotogramétrica está considerada como

Software	Tipo de software	Características	Bibliografía
<i>PhotoModeler Scanner</i>	Comercial	Capaz de medir modelar objetos y escenas reales a través del uso de fotografía Interfaz intuitiva que crea modelos 3D a partir de imágenes calibradas.	PhotoModeler EOS System Inc, 2008; Barsanti <i>et al.</i> , 2012; Raof <i>et al.</i> , 2015)
<i>Agisoft Photoscan</i>	Comercial	Disponible desde 2010, es capaz de crear contenido 3D a partir de imágenes alineadas. Proceso automático, aunque el usuario puede intervenir en cada uno de los pasos.	Agisoft. 2012; Verhoeven, 2011
<i>Arc3D</i>	Libre	Funciona vía web: s usuarios mandan las imágenes al programa que las transforma en una primera nube de puntos, que por sí sola no sirve para la reconstrucción 3D. La nube de puntos debe ser tratada posteriormente con otro tipo de programas como Meshlab.	Dellepiane <i>et al.</i> , 2012
<i>Phyton Photogrammetry Toolbox (PPT)</i>	Libre	Permite crear una nube de puntos densa que debe ser posteriormente procesa con otro tipo de programas como Meshlab. A diferencia de Arc3D, la interfaz y la consola de PPT se instalan en el ordenador aunque la creación de la malla se desarrolla de forma automática.	Moulon y Bezzi, 2011.
<i>Meshlab</i>	Libre	Permite generar geometrías y texturas de nuestros modelos sacados de PPT o Arc3D. Permite editar, limpiar y transformar mallas.	Dellepiane <i>et al.</i> , 2012; <i>meshlab.sourceforge.net</i>

Tabla II. Comparación entre diferentes softwares utilizados en fotogrametría para la creación de modelos tridimensionales.

“*low cost*” por el bajo precio que conlleva con respecto al precio de un escáner láser pero también porque en la actualidad disponemos de un número cada vez más elevado de softwares libres, aunque también comerciales, que nos permiten el postprocesado de imágenes. En el lado de los software comerciales tenemos algunos ejemplos como son PhotoModeler Scanner o Agisoft PhotoScan; mientras que softwares libres tenemos PPT, Meshlab o Arc3D (Tabla II).

2.2. Metodología y resultados

El levantamiento tridimensional de los yacimientos excavados por nuestro equipo en la Garganta de Olduvai (FLK-W y SHK) se desarrolla en tres partes: por un lado la adquisición de imágenes; en segundo lugar el postprocesado de las mismas; y en tercer lugar el levantamiento topográfico de las piezas con ayuda de ortofotos generadas a partir del modelo tridimensional.

1. Adquisición de imágenes: En primer lugar, mencionar que los levantamientos fotogramétricos se producen cuando se dispone de una manta de materiales arqueológicos sobre la cata a fin de economizar el tiempo. Todas las imágenes han sido tomadas con una cámara réflex Nikon D3200 y objetivo AF-S DX 18-55 mm, utilizándose un trípode cuando ha sido necesario. Hay que tener en cuenta el solapamiento entre al menos dos imágenes para el postprocesado, por lo que para mantener un orden se diseñan unas pautas de captura fotográfica en las que toda la superficie excavada sea fotografiada ayudándonos de una cinta métrica que nos sirve de referencia. Debido a las inclemencias climáticas, las imágenes son tomadas al atardecer cuando el sol ya no incide sobre la superficie



Fig. 8. Dos ejemplos de la adquisición de fotografías en campo para la creación de modelos planimétricos tridimensionales. Fuente: Fernando Diez Martín.

a fotografiar la luz es la adecuada. Antes de realizar las fotografías es necesario limpiar la superficie excavada para una visión óptima de las piezas. Hay que tener en cuenta que debemos poner al menos 3 guías o dianas para georreferenciar nuestro modelo: bastaría con cuatro clavos en las esquinas cuyos puntos deben ser tomados con la estación total (Fig. 8).

2. Postprocesado de imágenes: Una vez tomadas las fotografías se descargan en un ordenador y se comprueba que todas ellas sean óptimas. En nuestro caso utilizamos el software comercial Agisoft PhotoScan (profesional edition versión 1.2.3.) desarrollado por Agisoft LCC. Este software nos proporciona la generación del modelo 3D de forma automática en cuatro pasos, pudiendo intervenir en cada uno de ellos: 1) Alineación de las imágenes y creación de la nube de puntos inicial; 2) Creación de la nube de puntos densa; 3) Creación de la malla; y 4) Creación de la textura. Es posible también, aunque solo en la versión profesional, georreferenciar el modelo introduciendo las coordenadas GPS de los puntos de control (o dianas) establecidos a la hora de tomar las fotos. Todo este proceso se realiza durante la noche, al volver del campo para disponer del mismo al día siguiente, en un ordenador Toshiba con sistema operativo Windows 8.1 de 64 bits, procesador Intel Core 2.40 GHz, RAM de 16 GB y tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 640M (Fig. 9). Si bien es cierto que los modelos tridimensionales se procesan en calidades bajas (Photoscan dispone de cuatro opciones de calidad: baja, media, alta y muy alta), para que el proceso sea rápido (tarda en torno a unas cuatro horas a esta calidad). De esta manera, podemos tener completo el modelo,

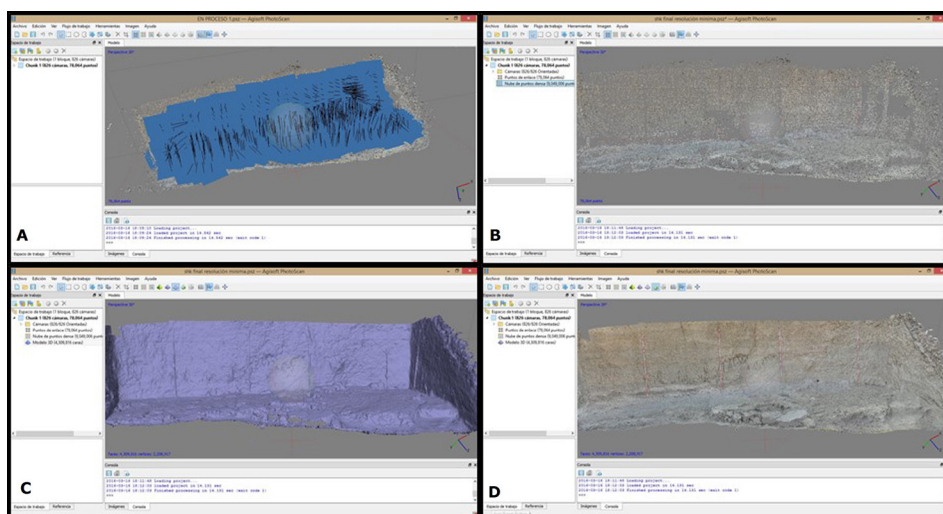


Fig. 9. Proceso de trabajo en Agisoft Photoscan: A) Alineación de imágenes y creación de la nube de puntos inicial; B) Creación de la nube de puntos densa; C) Creación de la malla; D) Creación de la textura.



Fig. 10. Comparación entre el dibujo manual y ortofotos derivadas del modelo planimétrico tridimensional.

como hemos dicho, al día siguiente. Al disponer de las imágenes almacenadas, siempre es posible repetir el modelo en calidades altas (por ejemplo para su publicación) una vez terminados los trabajos en el campo.

3. Levantamiento topográfico de las piezas: El modelo 3D se divide en ortofotos que son impresas en el laboratorio y se llevan al campo para señalar sobre ellas el número que le otorga la estación total a cada pieza, que es debidamente etiquetada y guardada en bolsas individuales para su posterior transporte al laboratorio (Fig. 10).

Con este proceso, conseguimos evitar el tedioso proceso de dibujo que además, no siempre es del todo fiable, así como generamos unos modelos realistas de la superficie excavada que pueden ser procesados o estudiados durante el trabajo de laboratorio una vez cerrada la cata arqueológica. Además, las ortofotos pueden ser integradas en programas de georreferenciación (GIS) para estudios de espacialidad.

5. Discusión y conclusiones

La metodología de digitalización consiste básicamente en pasar del objeto físico al modelo digital 3D del mismo, a fin de utilizarlo con múltiples objetivos. En este sentido, el doble caso de aplicación aquí presentado, amén de continuar la tendencia generalizada de utilización de las técnicas tridimensionales en las labores arqueológicas, supone la profundización en cuatro aspectos principales: el estudio de las superficies de los objetos líticos; la toma de ciertas medidas de las piezas; la representación gráfica del material arqueológico; y el registro y documentación del proceso de excavación de los yacimientos.

El estudio de las superficies líticas, con su topografía y sus atributos tecnológicos, resultan de vital importancia para los estudios funcionales tal y

como se ha mostrado en los casos de aplicación de los SIG a algunas piezas de percusión. Pero no es menos importante a la hora de profundizar en el estudio tecnológico de las piezas que, bien por sus características físicas de brillo o luminosidad (caso de los cuarzos), bien por un pobre estado de conservación (materiales excesivamente rodados), pueden presentar graves complicaciones de identificación al ojo humano. De este modo, la obtención de modelos tridimensionales sin la coloración natural de las superficies, y con la reproducción de la geometría exacta de los artefactos, permite la eliminación de los problemas que complican ese reconocimiento directo y visual, pudiendo realizar así la delimitación de las extracciones de un modo más seguro. Eso sí, la eliminación de tales problemas a la hora de la interpretación, no significa que dichas características de brillo o luminosidad no provoquen inconvenientes a la hora de su digitalización. Por el contrario, debemos reconocer que en el caso de las materias primas reflectantes y, por ende, más costosas de analizar, son las que también presentan mayores complicaciones a la hora de obtener los modelos tridimensionales: “shiny, translucent, and overly homogeneous materials can be difficult to capture in 3D format” (Thi Porter, Roussel y Soressi, 2016: 77). Sin embargo, tales complicaciones en la toma de datos siempre son superables teniendo ciertas precauciones, de modo que en la práctica resulta beneficioso su empleo ya que al final se consigue el objetivo perseguido: reconocer los atributos tecnológicos con mayor facilidad y fiabilidad. Igualmente resulta de gran eficacia a la hora de solucionar los problemas de medición ángulos, pues a partir de los modelos tridimensionales de las piezas líticas, se pueden extraer sus secciones con total precisión para, a continuación, proceder a su medición exacta (Zaidner y Grosman, 2015: 182). De este modo, se mejora la cuantificación de un parámetro fundamental a la hora de realizar estudios morfopotenciales.

Por su parte, la cuestión de la renovación de los métodos de representación gráfica de los materiales arqueológicos y, en concreto, de las industrias líticas, viene de lejos. Ahora, la posibilidad de captar la textura y rugosidad de las propias materias primas (puesto que se observan variaciones en el acabado de las superficies de los objetos realizados sobre diferentes rocas), la naturaleza natural o antrópica de sus planos (ya que se pueden apreciar variaciones en las texturas de una misma pieza que indican su estado inalterado o modificado) y los propios atributos tecnológicos (negativos, bulbos de percusión, plataformas de golpeo, ondas...), ha convertido a las imágenes tridimensionales en el método favorito de representación de algunos investigadores. No obstante, y a pesar de todas sus bondades (captación de la textura volumétrica sin necesidad de convencionalismos, mayor rapidez, facilidad o autosuficiencia en aquellos casos en los que no se pueda contar con un dibujante), nos cuesta aseverar que se trate de representaciones totalmente objetivas, pues aun reconociendo una menor

subjetividad, el dibujo, siga la técnica que siga, no deja de ser una interpretación.

Muchas menos dudas nos genera la documentación en campo, puesto que en este caso el registro 3D de los planos y secciones bien mediante fotogrametría (como aquí proponemos), bien con cualquiera de las otras técnicas enumeradas, ha resultado ser el método idóneo para registrar y visualizar los hallazgos realizados en las catas de los yacimientos. No en vano, rapidez, precisión y practicidad son los tres rasgos que mejor definen a esta forma de trabajo que permite la supresión total de los errores generados mediante los dibujos a manos y, sobre todo, la lentitud de los mismos. Además, la posibilidad de referenciar espacialmente con coordenadas geográficas el modelo tridimensional, permite situar en el espacio los hallazgos de la excavación logrando así una mayor eficacia a la hora de estudiar el significado *intra-site* de cada uno de los yacimientos así documentados.

Ahora bien, las técnicas 3D no solo ayudan a solucionar los problemas aquí expuestos, sino que a su vez generan otra serie de beneficios a tener en cuenta, por ejemplo, en el caso de piezas con un estado de conservación precario (agrietamientos), cuyo manejo puede suponer la descomposición de los propios materiales; en este sentido, la digitalización de tales artefactos permite su estudio sin poner en peligro la integridad de los mismos. Destacable también es la vertiente divulgativa, a través de la inserción de los modelos tridimensionales en las páginas web de museos, equipos de investigación o instituciones a fin de acercar los avances al público en general de una manera atractiva. De este modo, queda de manifiesto la importancia de la nueva “arqueología virtual” en las actividades de documentación, investigación y difusión del patrimonio y, con ello, en todos los sectores intervinientes en la práctica arqueológica.

Agradecimientos

J.D.M. es beneficiario de un contrato FPU del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. S.D.F.R. es beneficiaria de un contrato predoctoral de la Junta de Castilla y León y el Fondo Social Europeo. Queremos agradecer a Fernando Díez Martín (UVa) por sus consejos y revisiones a la hora de realizar este artículo.

Bibliografía

- ABEL, R. L., PARFITT, S., ASTHON, N., LEWIS, S. G., SCOTT, B. y STRINGER, C. (2011): “Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT”. *Computers & Graphics*, 35, pp. 878-884.
- ADAMS, L. T., STRGANAC, C., POLCYN, M. y JACOBS, L. L. (2010): “High Resolution Three-Dimensional Laser-Scanning of the Type Specimen of *Eubrontes (?) glenrosensis* Shuler, 1935, from the Comanchean (Lower Cretaceous) of Texas: Implications for Digital Archiving and Preservation”. *Paleontologia Electronica*, 13.
- AGISOFT LLC. (2012): Agisoft Photoscan User Manual: Professional Edition. Versión 0.9.0 Agisoft LLC.
- ALSHAWABKEH, Y. (2006): *Integration of laser scanning and photogrammetry for heritage documentation*. Universität Stuttgart. Tesis doctoral inédita.
- ALTANTSETSEG, E., MURAKI, Y., CHIBA, F. y KONNO, K. (2011): “3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine”. *The International Journal of Virtual Reality*, 10 (1), pp. 37-43.
- ÁLVAREZ VICENTE, A. (2012): *Modelo de Plan Integral de Conservación Preventiva para el conjunto escultórico que integra la Procesión General de la Sagrada Pasión del Redentor de Valladolid*. Disponible en http://www.jcssva.org/almacen/Indice_y_Desarrollo_PICP.pdf, consultado el 10 de marzo de 2016.
- ARAGÓN GALERA, I. (2012): *Levantamiento a escala 1: 200 de los yacimientos del Calvero de la Higuera de Pinilla del Valle con equipos láser escáner 3D*. Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto fin de carrera inédito.
- ÁVILA ROLDÁN, D. (2015): *Representación tridimensional de vainas de bala de la batalla del Jarama de la Guerra Civil Española, mediante utilización de tecnología escáner láser 3D*. Universidad Politécnica de Madrid, Proyecto Fin de Carrera inédito.
- BAAB, K.L. y McNULTY, K.P. (2009): “Size, shape, and asymmetry in fossil hominins: The status of the LB1 cranium based on 3D morphometric analyses”. *Journal of Human Evolution*, 57, pp. 608-622.
- BAENA, J. y CUARTERO, F. (2006): Más allá de la tipología lítica: lectura diacrítica y experimentación como claves para la reconstrucción del proceso tecnológico. En J. M. Maillou, y E. Baquedano (eds.), *Miscelánea en homenaje a Victoria Cabrera, Zona Arqueológica*, 7 (I), pp. 144-161.
- BAENA, J., LORDKIPANIDZE, D., CUARTERO, F., FERRING, R., ZHVANIA, D., MARTÍN, D., SHEILA, T., BIDZINASHUILI, G., ROCA, M. y RUBIO, D. (2010): “Technical and technological complexity in the beginning: The study of Dmanisi lithic assemblage”. *Quaternary International*, 223-224, pp. 45-53.
- BARSANTI, S.G., REMONDINO, F. y VISINTINI, D. (2012): Photogrammetry and laser scanning for archaeological site 3D modeling – some critical issues. En L. Frozzati y V. Roberto (eds.), *NTA 2012. The new technologies for Aquileia. Proceedings of the*

- 2nd workshop on the New Technologies for Aquileia. Aquileia, Italy, June 25, 2012.* CEUR Workshop Proceedings vol. 948, pp. 1-10.
- BENAZZI, S., BOOKSTEIN, F. L., STRAIT, D. S. y WEBER, G. W. (2011): "A new OH5 reconstruction with an assessment of its uncertainty". *Journal of Human Evolution*, 61, pp. 75-88.
- BENITO-CALVO, A., CARVALHO, S., ARROYO, A., MATSUZAWA, T. y DE LA TORRE, I. (2015): "First GIS Analysis of Modern Stone Tools Used by Wild Chimpanzees (*Pan troglodytes verus*) in Bossou, Guinea, West Africa". *Plos ONE*, 10 (3).
- BOURDIEL, C., FUENTES, O. y PINÇON, G. (2015): "Contribution of 3D technologies to the analysis of form in late palaeolithic rock carvings: The case of the Roc-aux-Sorciers rock-shelter (Angles-sur-l'Anglin, France)". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2, pp. 140-154.
- BRETZKE, K. y CONARD, N. J. (2012): "Evaluating morphological variability in lithic assemblages using 3D models of stone artifacts". *Journal of Archaeological Science*, 39, pp. 3741-3749.
- CAMPAÑA, I., GONZÁLEZ-NAVARRO, L., LÓPEZ-HURTADO, D., ORTEGA, A.I. y BENITO-CALVO, A. (2014): "Aplicación del escáner láser 3D en el levantamiento de secciones estratigráficas en yacimientos arqueológicos. El ejemplo de los yacimientos de Trinchera (Sierra de Atapuerca, Burgos)". En F.J. González de la Fuente, E. Paniagua Vara y P. de Inés Sutil (coords), *Investigaciones Arqueológicas del Valle del Duero, del Paleolítico a la Antigüedad Tardía: actas de las III Jornadas de Jóvenes Investigadores del Valle del Duero*. Salamanca 20, 21 y 22 de noviembre de 2013. Vol, 3, pp. 45-50.
- CANALS I SALOMÓ, A; RODRÍGUEZ, J. y SÁNCHEZ, R. (2008): "The 3COORsystem for data recording in archaeology". *Journal of Anthropological Science*, 86, pp. 133-141.
- CANALS I SALOMÓ, A. y GUERRA-RODRÍGUEZ, D. (2011): "Yacimientos arqueológicos de la sierra de Atapuerca: un sistema inalámbrico computerizado de registro de datos de campo". *Virtual Archaeology Review*, 2 (4), pp.147-150.
- CARDENAL ESCARCENA, J., MATA DE CASTRO, E., PÉREZ GARCÍA, J. L., MOZAS CALVACHE, A., FERNÁNDEZ DEL CASTILLO, T., DELGADO GARCÍA, J. y UREÑA CÁMARA, M. A. (2010): "Técnicas fotogramétricas y de escáner láser terrestre aplicadas a la documentación y valoración del patrimonio histórico". En M. G. Alcázar Molina, F. J. Ariza López, J. L. García Balboa, E. Mata De Castro, S. Ruiz Capiscol y M. A. Ureña Cámara (eds.), *Catastro: formación, investigación y empresa. Selección de ponencias del I Congreso Internacional sobre catastro unificado y multipropósito*. Universidad de Jaén, pp. 459-470.
- CARUANA, M. V., CARVALHO, S., DAVID R. BRAUN, D. R., PRESNYAKOVA, D., HASLAM, M., ARCHER, W., BOBE, R. y HARRIS, J. W. K. (2014): "Quantifying Traces of Tool Use: A Novel Morphometric Analysis of Damage Patterns on Percussive Tools". *Plos ONE*, 9 (11).

- CASCALHEIRA, J., GONÇALVES, C. y BICHO, N. (2014): “Smartphones and the use of customized apps in archaeological projects”. *The SAA Archaeological record*, 2014, pp. 20-25.
- CLARKSON, C. (2013): “Measuring core reduction using 3D flake scar density: a test case of changing core reduction at Klasies River Mouth, South Africa”. *Journal of Archaeological Science*, 40, pp. 4348-4357.
- CLARKSON, C. y HISCOCK, P. (2011): “Estimating original flake mass from 3D scans of platform area”. *Journal of Archaeological Science*, 38, pp. 1062-1068.
- CLARKSON, C., JONES, S. y HARRIS, C. (2012): “Continuity and change in the lithic industries of the Jurreru Valley, India, before and after the Toba eruption”. *Quaternary International*, 258, pp. 165-179.
- CLARKSON, C., SHIPTON, C. y WEISLER, M. (2014): “Determining the reduction sequence of Hawaiian quadrangular adzes using 3D approaches: a case study from Moloka’I”. *Journal of Archaeological Science*, 49, pp. 361-371.
- (2015): “Front, back and sides: experimental replication and archaeological analysis of Hawaiian adzes and associated debitage”. *Archaeology in Oceania*, 50, pp. 71-84.
- CLARKSON, C., VINICIUS, L. y MIRAZÓN LAHR, M. (2006): “Quantifying flake scar patterning on cores using 3D recording techniques”. *Journal of Archaeological Science*, 33, pp. 132-142.
- CORREIA SANTOS, M. J., PIRES, H. y SOUSA, O. (2014): “Nuevas lecturas de las inscripciones del santuario de Panóias (Vila Real, Portugal)”. *Sylloge Epigraphica Barcinonensis*, XII, pp. 197-224.
- DELLEPIANE, M., DELL’UNTO, N., CALLIERI, M., LINDGREN, S. y SCOPIGNO, R. (2012): “Archaeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques”. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (3), pp. 201-210.
- DE REU, J., DE SMEDT, P., HERREMANS, D., VAN MEIRVENNE, M., LALOO, P. y DE CLERQ, W. (2014): “On introducing on image 3D reconstruction method in archaeological excavation practice”. *Journal of Archaeological Science*, 41, pp. 251-261.
- DE REU, J., PLETS, G., VERHOEVEN, G., DE SMEDT, P., BATS, M., CHERRETTÉ, B., DE MAEYER, W., DECONYNCK, J., HERREMANS, D., LALOO, P., VAN MEIRVENNE, M. y DE CLERQ, W. (2013): “Towards a three-dimensional cost-effective registration of archaeological heritage”. *Journal of Archaeological Science*, 40 (2), pp. 1108-1121.
- DÍAZ ANDREU, M. (2013): “La documentación de grabados rupestres en 3D: la experiencia británica”. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, 13-20.
- DIBBLE, H. L. y BERNARD, M. C. (1980): “A Comparative Study of Basic Edge Angle Measurement Techniques”. *American Antiquity*, 45(4), pp. 857-865.
- DIEZ-MARTÍN, F., CUARTERO, F., SÁNCHEZ, P., BAENA, J., DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. y RUBIO, D. (2012). “Testing cognitive skills in Early Pleistocene hominins: An analysis of the concepts of hierarchization and predetermination in the lithic

- assemblages of Type Section (Peninj, Tanzania)". En M. Dominguez-Rodrigo (ed.), *Stone tools and fossil bones. Debates in the 2 archaeology of human origins. Current Debates in the Archaeology of Human Origins*. Cambridge University Press, pp. 245-309.
- DIEZ-MARTÍN, F., SÁNCHEZ YUSTOS, P., GÓMEZ GONZÁLEZ, J. A., LUQUE, L., GÓMEZ DE LA RÚA, D. y DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2014): "Reassessment of the Early Acheulean at EN1-Noolchalai (Ancient RHSMugulud) in Peninj (Lake Natron, Tanzania)". *Quaternary International*, 322-323, pp. 237-263.
- DIEZ-MARTÍN, F., SÁNCHEZ YUSTOS, P., URIBELARREA, D., BAQUEDANO, E., MARK, D. F.; MABULLA, A., FRAILE, C., DUQUE, J., DÍAZ, I., PÉREZ-GONZÁLEZ, A., YRAVEDRA, J., EGELAND, C. P., ORGANISTA, E. y DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2015): "The Origin of The Acheulean: The 1.7 Million-Year-Old Site of FLK West, Olduvai Gorge (Tanzania)". *Scientific Reports*, 5: 17839.
- DOMINGO, I., VILLAVERDE, V., LÓPEZ-MONTALVO, E., LERMA, J. L. y CABRELLES, M. (2013): "Latest developments in rock art recording: towards an integral documentation of Levantine rock art sites combining 2D and 3D recording techniques". *Journal of Archaeological Science*, 40, pp. 1879-1889.
- EREN, M. I. y LYCETT, S. J. (2012): "Why Levallois? A Morphometric Comparison of Experimental 'Preferential' Levallois Flakes versus Debitage Flakes". *PLoS ONE*, 7(1).
- EVANS, A. A. y DONAHUE, R.E. (2008): "Laser scanning confocal microscopy: a potential technique for the study of lithic microwear". *Journal of Archaeological Science*, 35, pp. 2223-2230.
- EVANS, A.A., MACDONALD, D.A., GIUSCA, C.L. y LEACH, R.K. (2014): "New method development in prehistoric stone tool research: evaluating use duration and data analysis protocols". *Micron*, 65, pp. 69-75.
- FIGUEIREDO, C. y APARICIO RESCO, P. (2014): *Escala de Evidencia Histórica/ Scale of Historical Evidence*. Disponible en <https://parpatrimoniointecnologia.wordpress.com/2014/07/21/escala-de-evidencia-historica-scale-of-historical-evidence/>, consultado el 10 de marzo de 2016.
- GARCÍA GÓMEZ, I., FERNÁNDEZ DE GOROSTIZA LÓPEZ DE VIÑASPRE, M. y MESANZA MORAZA, A. (2011): "Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios". *Arqueología de la Arquitectura*, 8, pp. 25-44.
- GARCÍA MOLINA, D. F. y DE PAULA MONTES TUBÍO, F. (2012): "El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje". *Antiquitas*, 24, pp. 277-302.
- GENESTE, J. M. y PLISSON, H. (1996): "Production et utilisation de l'outillage lithique dans le Moustérien du Soud-Ouest de la France: Les Tares á Sourzac, valle de l'Isle, Dordogne". *Quaternaria Nova*, VI, pp. 343-367.
- GILBOA, A., TAL, A., SHIMSHONI, I. y KOLOMENKIN, M. (2013): "Computer-based, automatic recording and illustration of complex archaeological artefacts". *Journal of Archaeological Science*, 40, pp.1329-1339.

- GINGERICH, J. A. M., SHOLTS, S. B., WÄRMLÄNDER, S. K. T. S. y STANFORD, D. (2014): “Fluted point manufacture in eastern North America: an assessment of form and technology using traditional metrics and 3D digital morphometrics”. *World Archaeology*, 46 (1), pp. 101-122.
- GOREN-INBAR, N. (2011): “Culture and cognition in the Acheulian industry: a case study from Gesher Benot Ya‘aqov”. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 366, pp. 1038-1049.
- GOREN-INBAR, N., GROSMAN, L. y SHARON, G. (2011): “The technology and significance of the Acheulian giant cores of Gesher Benot Ya‘aqov, Israel”. *Journal of Archaeological Science*, 38, 1901-1917.
- GOREN-INBAR, N., SHARON, G., ALPERSON-AFIL, N. y HERZLINGER, G. (2015): “A new type of anvil in the Acheulian of Gesher Benot Ya‘aqov, Israel”. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 370, <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2014.0353>.
- GRANDE, A. y López-MENCHERO BENDICHO, V. M. (2012): “The implementation of an international charter in the field of virtual archaeology”. *Actas del III Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación, Arqueológica 2.0.*, pp. 29-32.
- GROSMAN, L., GOLDSMITH, Y. y SMILANSKY, U. (2011): “Morphological Analysis of Nahal Zihor Handaxes: A Chronological Perspective”. *PaleoAnthropology*, 2011, pp. 203–215.
- GROSMAN, L., KARASIK, A., HARUSH, O. y SMILANSKY, U. (2014): “Archaeology in Three Dimensions: Computer-Based Methods in Archaeological Research”. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, 2 (1), pp. 48-64.
- GROSMAN, L., MUNRO, N. D., ABADI, I., BOARETTO, E., SHAHAM, D., BELFER-COHEN, A. y BAR-YOSEF, O. (2016): “Nahal Ein Gev II, a Late Natufian Community at the Sea of Galilee”. *Plos One*, 11 (1).
- GROSMAN, L., SHARON, G., GOLDMAN-NEUMAN, T., SMIKT, O. y SMILANSKY, U. (2011): “Studying post depositional damage on Acheulian bifaces using 3-D scanning”. *Journal of Human Evolution*, 60, pp. 398-406.
- GROSMAN, L., SMIKT, O. y SMILANSKY, U. (2008): “On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts”. *Journal of Archaeological Science*, 35, pp. 3101-3110.
- GUNZ, P., MITTEROECKER, P., NEUBAUER, S., WEBER, G. W. y BOOKSTEIN, F. L. (2009): “Principles for the virtual reconstruction of hominin crania”. *Journal of Human Evolution*, 57, pp. 48–62.
- GÜTH, A. (2012): “Using 3D scanning in the investigation of Upper Palaeolithic engravings: first results of a pilot study”. *Journal of Archaeological Science*, 39, pp. 3105-3114.
- GUTIÉRREZ ALONSO, S. (2007): *Estudio comparativo del láser escáner aplicado al patrimonio*. Universidad del País Vasco. Proyecto fin de carrera inédito.

- GUTIÉRREZ ALONSO, A., FARJAS ABADÍA, M. y DOMÍNGUEZ GÓMEZ, J. A. (2014): “La ingeniería al servicio de la historia: imágenes invisibles del Paleolítico”. *Virtual Archaeology Review*, 5 (11), pp. 14-19.
- HANKE, K., MOSER, M., GRIMM-PITZZINGER, A., GOLDENBERG, G. y TOECHTERLE, U. (2008): “Enhanced potential for the analysis of archaeological finds based on 3D modeling”. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B5), pp. 187-192.
- HARMAND, S., LEWIS, J. E., FEIBEL, C. S., LEPRE, C. J., PRAT, S., LENOBLE, A., BOES, X., QUINN, R. L., BRENET, M., ARROYO, A., TAYLOR, N., CLEMENT, S., DAVER, G., BRUGAL, J. P., LEAKEY, L., MORTLOCK, R. A., WRIGHT, J. D., LOKORODI, S., KIRWA, C., KENT, D. V. y ROCHE, H. (2015): “3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya”. *Nature*, 521, pp. 310-315.
- HASLAM, M., CLARKSON, C., ROBERTS, R. G., BORA, J., KORISSETAR, R., DITCHFIELD, P., CHIVAS, A. R., HARRIS, C., SMITH, V., OH, A., EKSAMBEKAR, S., BOIVIN, N. y PETRAGLIA, M. (2012a): “A southern Indian Middle Palaeolithic occupation surface sealed by the 74 ka Toba eruption: Further evidence from Jwalapuram Locality 22”. *Quaternary International*, 258, pp. 148-164.
- HASLAM, M., GUMERT, M. D., BIRO, D., CARVALHO, S. y MALAIVITNOND, S. (2013): “Use-Wear Patterns on Wild Macaque Stone Tools Reveal Their Behavioural History”. *Plos ONE*, 8.
- HASLAM, M., HARRIS, C., CLARKSON, C., PAL, J. N., SHIPTON, C., CROWTHER, A., KOSHY, J., BORA, J., DITCHFIELD, P., RAM, H. P., PRICE, K., DUBEY, A. K. y PETRAGLIA, M. (2012b): “Dhaba: An initial report on an Acheulean, Middle Palaeolithic and microlithic locality in the Middle Son Valley, north-central India”. *Quaternary International*, 258, pp. 191-199.
- HASLAM, M., HERNANDEZ-AGUILAR, A., LING, V., CARVALHO, S., DE LA TORRE, I., DE STEFANO, A., DU, A., HARDY, B., HARRIS, J., MARCHANT, L., MATSUZAWA, T., MCGREW, W., MERCADER, J., MORA, R., PETRAGLIA, M., ROCHE, H., VISALBERGHI, E. y WARREN, R. (2009): “Primate archaeology”. *Nature*, 460, pp. 339-344.
- JIMÉNEZ COBOS, F. (2012): “Tecnología y análisis diacrítico. Aproximación al yacimiento del Cortijo del Calvillo (Fuente Camacho, Loja) a través de la colección del Museo de la Alcazaba de Loja (Granada). *Arqueología y Territorio*, 9, pp. 19-32.
- KARASIK, A. y SMILANSKY, U. (2008): “3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory”. *Journal of Archaeological Science*, 35, pp. 1148-1168.
- KUZMINSKY, S. C. y GARDINER, M. S. (2012): “Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research”. *Journal of Archaeological Science*, 39, pp. 2744-2751.
- LAMBERS, K., EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., KUPFERSCHMIDT, D., GAUSECKER, T., SOTOODESH, S. y HANVSCH, T. (2007): “Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of

- Pinchango Alto, Palpa, Peru”. *Journal of Archaeological Science*, 34, pp. 1702-1712.
- LEDOGAR, J. A., SMITH, A. L., BENAZZI, S., WEBER, G. W., SPENCER, M. A., CARLSON, K. B., McNULTY, K. P., DECHOW, P. C., GROSSE, I. R., ROSS, C. F., RICHMOND, B. G., WRIGHT, B. W., WANG, Q., BYRON, C., CARLSON, K. J., DE RUITER, D. J., BERGER, L. R., TAMVADA, K., PRYOR, L. C., BERTHAUME, M. A. y STRAIT, D. S. (2016): “Mechanical evidence that Australopithecus sediba was limited in its ability to eat hard foods”. *Nature Communications*, 7:10596.
- LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M. y VILLAYERDE, V. (2010): “Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case of study”. *Journal of Archaeological Science*, 36 (1), pp. 19-24.
- LERMA, J. L., CABRELLES, M., NAVARRO, S. y SEGUÍ, A. E. (2013): “Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital”. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, pp. 85-90.
- LERMA, J. L. y MUIR, C. (2014): “Evaluating the 3D documentation of an early Christian upright stone with carvings from Scotland with multiples images”. *Journal of Archaeological Science*, 46, pp. 311-318.
- LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M., SEGUÍ, A. E. y HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D. (2013): “Automatic orientation and 3D modelling from markerless rock art imagery”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, pp. 64-75.
- LIN, S. C. H., DOUGLASS, M. J., HOLDAWAY, S. J. y FLOYD, B. (2010): “The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis”. *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 694-702.
- LOBB, M., KRAWIEC, K., HOWARD, A. J., GEAREY, B. R. y CHAPMAN, H. P. (2010): “A new approach to recording and monitoring wet-preserved archaeological wood using three-dimensional laser scanning”. *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 2995-2999.
- LÓPEZ FRAILE, F. J. (2007): “La infografía 3D como sistema de documentación y divulgación”. En J. Morín De Pablos (coord.), *Primer Simposio de la Investigación y Difusión Arqueopaleontológica en el Marco de la Iniciativa Privada*. Madrid, Guadalajara 24 y 25 de octubre de 2007: Primer Simposio AUDEMA. Madrid, Editores de Energía y Medio Ambiente, pp. 429-444.
- (2011): “Dibujos de ayer y hoy, modelos 3D de hoy y mañana. Modelización de materiales prehistóricos”. *Actas de las Quintas Jornadas de Patrimonio Arqueológico en la Comunidad de Madrid (nov. 2007)*. Madrid: Consejería de Presidencia, Justicia y Portavocía del Gobierno - D. G. de Patrimonio Cultural, pp. 333-337.
- LÓPEZ-MENCHERO BENDICHO, V. M. y GRANDE, A. (2011): “Hacia una carta internacional de Arqueología Virtual”. El borrador SEAV”. *Virtual Archaeology Review*, 2 (4), pp. 71-75.

- LYCETT, S. J. y VON CRAMON-TAUBADEL, N. (2013): "A 3D morphometric analysis of surface geometry in Levallois cores: patterns of stability and variability across regions and their implications". *Journal of Archaeological Science*, 40, pp. 1508-1517.
- LYCETT, S. J., VON CRAMON-TAUBADEL, N. y GOWLETT, J. A. J. (2010): "A comparative 3D geometric morphometric analysis of Victoria West cores: implications for the origins of Levallois technology". *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 1110-1117.
- MAGNANI, M. (2014): "Three-Dimensional Alternatives to Lithic Illustration". *Advances in Archaeological Practice* 2 (4), pp. 285-297.
- MALINSKY-BULLER, A., GROSMAN, L. y MARDER, O. (2011): "A case of technotypological lithic variability & continuity in the late Lower Palaeolithic". *Before Farming* 2011/1, article 3.
- MAÑANA BORRAZÁS, P. (2012): *Utilidades do pdf 3D*. Disponible en <http://digital.csic.es/handle/10261/63515>. Consultado el 11 de marzo de 2016.
- MAÑANA BORRAZÁS, P., RODRÍGUEZ PAZ, A. y BLANCO ROTEÁ, R. (2008): "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)". *Arqueología de la Arquitectura*, 5, pp. 15-32.
- MARAMBIO, A. y GARCÍA-ALMIRALL, P. (2006): "Escáner láser: modelo 3D y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa María del Mar en Barcelona". *ACE: architecture, city and Environment*, 2: 178-187.
- MCPHERRON, S. P., GERNAT, T. y HUBLIN, J.J. (2009): "Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds". *Journal of Archaeological Science*, 36 (1), pp. 19-24.
- MESHLAB (2014): Disponible en <http://www.meshlab.sourceforge.net>, consultado el 14 de marzo de 2016.
- MOITINHO DE ALMEIDA, V. (2013): *Towards Functional Analysis of Archaeological Objects through Reverse Engineering Processes*. Universitat Autònoma de Barcelona. Tesis Doctoral inédita.
- MORALES, J. I., LORENZO, C. y VERGÈS, J. M. (2015): "Measuring Retouch Intensity in Lithic Tools: A New Proposal Using 3D Scan Data". *Journal of Archaeological Method and Theory*, 22, pp. 543-558.
- MOULON, P. y BEZZI, A. (2011): "Phyton Photogrammetry Toolbox: A free solution for three-dimensional Documentation". *ArcheoFoss*, pp. 1-12.
- MOZAS CALVACHE, A. T., PÉREZ GARCÍA, J. L., BARBA COLMENERO, V. y LÓPEZ ARENAS, A. (2011): "Estudio geométrico de piezas arqueológicas a partir de un modelo virtual 3D". *Virtual Archaeology Review*, 2 (3), pp. 109-113.

- MULLER, A. y CLARKSON, C. (2014): “Estimating original flake mass on blades using 3D platform area: problems and prospects”. *Journal of Archaeological Science*, 52, pp. 31-38.
- NIVEN, L., STEELE, T. E., FINKE, H., GERNAT, T. y HUBLIN, J. J. (2009): “Virtual skeletons: using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection”. *Journal of Archaeological Science*, 36, pp. 2018-2023.
- NOVOA ÁLVAREZ, P. (2005): *Petroglifos del área de La Acequia, Barinas, Venezuela*. Disponible en <http://www.rupestreweb.info/acequia.html>, consultado el 10 de marzo de 2016.
- Ó FOGHLU, B. (2015): “Irish Iron Age horns, and the conical spearbutt of Navan: a mouthpiece investigation”. *Emaina*, 22, pp. 99-125.
- OLSON, B. R., GORDON, J. M., RUNNELS, C. y CHOMYSZAK, S. (2014): “Experimental three-dimensional printing of a lower palaeolithic handaxe. An assessment of the technology and analytical value”. *Lithic Technology*, 39 (3), pp. 162-172.
- (2015): “Bringing the Past into the Present: Digital Archaeology Meets Mechanical Engineering”. En B. R. Olson y R. Caraher (eds.), *Visions of Substance. 3D imaging in Mediterranean Archaeology*. The Digital Press at The University of North Dakota, pp. 107-112.
- PANTOJA LORENZO, A. (2014): *Obtención del modelo tridimensional de una pieza de terracota mediante tecnología láser escáner 3D*. Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto Fin de Carrera inédito.
- PASTOORS, A. y WENIGER, G. C. (2011a): “Close-range sensing for generating 3D objects in prehistoric archaeology”. En V. Lenz-Wiedemann y G. Bareth (eds.), *Proceedings of the ISPRS WG VII/5 Workshop, 18.-19.11.2011, Cologne*, pp. 103-106.
- (2011b): “Graphical documentation of lithic artefacts traditional hand craft versus 3-D mechanical recording”. En R. Macchiarelli y G. C. Weniger (eds.), *Pleistocene data bases: acquisition, storing, sharing*. Wissenschaftliche Schriften des Neanderthal Museums 4, Mettmann, 2011, pp. 9-17.
- PHOTOMODELER EOS SYSTEM INC. (2008): Disponible en <http://www.photomodeler.com>, consultado el 08 de marzo de 2016.
- PIRES, H., GONÇALVES SECO, L., FONTE, J., CORREIA SANTOS, M. J. y SOUSA, O. (2014): “Morphological Residual Model: A tool for enhancing epigraphic readings of highly eroded surfaces. En S. Orlandi, R. Santucci, V. Casarosa y M. P. Liuzzo (eds.), *Information Technologies for Epigraphy and Cultural Heritage. Proceedings of the First EAGLE International Conference, Roma 2014*, pp. 133-144.
- PLISSON, H. y ZOTKINA, L. V. (2015): “From 2D to 3D at macro- and microscopic scale in rock art studies”. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2, pp. 102-119.

- REILLY, P. (1991): "Towards a virtual archaeology". En K. Lockyear y S. Rahtz (eds.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*. Oxford: British Archaeological Reports, Int. Series 565, pp. 133-139.
- RAOF, A. N. A., SETAN, H., CHONG, A. y MAJID, Z. (2015): "Three dimensional modeling of archaeological artifact using photomodeler scanner". *Jurnal Teknologi*, 75 (10), pp. 143-153.
- RICHARDSON, E., GROSMAN, L., SMILANSKY, U. y WERMAN, M. (2013): "Extracting Scar and Ridge Features from 3D-scanned Lithic Artifacts". En G. Earl, T. Sly, A. Chrysanthi, P. Murrieta-Flores, C. Papadopoulos, I. Romanowska y D. Wheatley (eds.), *Archaeology in the Digital Era. Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Southampton, 26-29 March 2012*. Amsterdam: Amsterdam University Press, pp. 83-92.
- RIEL SALVATORE, J., BAE, M., MCCARTNEY, P. y RAZDAN, A. (2002): "Paleolithic archaeology and 3D visualisation technology: Recent developments". *Antiquity*, 78, pp. 929-930.
- ROCCA, R. (2013) : *Peut-on définir des aires culturelles au Paléolithique inférieur? Originalité des premières industries lithiques en Europe centrale dans le cadre du peuplement de l'Europe*. Université de Paris Ouest Nanterre La Défense. Tesis doctoral inédita.
- RODRÍGUEZ LÓPEZ, F. I. (2014): *Representación 3D de petroglifos: propuesta de metodología de modelización de los grabados del Valle de Tamanart, Marruecos*. Universidad Politécnica de Madrid. Trabajo Fin de Máster inédito.
- RODRÍGUEZ NAVARRO, P. (2012): "La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos". *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 20, pp. 100-111.
- RODRÍGUEZ PÉREZ, S. (2012): *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión del patrimonio cultural. Su aplicación en el estudio arqueológico de la arquitectura vernácula del consejo de Pesoz, Asturias*. Madrid: UAM Ediciones.
- RODRÍGUEZ UNTORIA, S. y LÓPEZ RECIO, M. (2010): "Hallazgos paleolíticos en el campo de Arañuelo, el Arroyo del Molina (Calzada de Oropesa, Toledo)". *Alcalibe: revista Centro Asociado a la UNED Ciudad de la Cerámica*, 10, pp. 45-58.
- ROOSEVELT, C. H., COBB, P., MOSS, E., OLSON, B. R. y Ünlüsoy, S. (2015): "Excavation is ~~Destruction~~ Digitization: Advances in Archaeological Practice". *Journal of Field Archaeology*, 40 (3), pp. 325-346.
- RUBIO GIL, D., MARTÍNEZ RUBIO, J., BAENA PREYSLER, J., FERNÁNDEZ MARTÍN, J. J. y FINAT CODES, J. (2010): "Nuevos métodos para viejas tecnologías: análisis y documentación de los materiales arqueológicos mediante la aplicación de sistemas Láser-escáner 3D". *Virtual Archaeology Review*, 1, pp. 169-173.
- RUIZ MARÍN, J. (2013): *Obtención del modelo tridimensional de dos fragmentos de globos de lava de la erupción volcánica submarina de la isla de El Hierro en*

- 2011, mediante sistemas escáner láser 3D". Universidad Politécnica de Madrid. Trabajo Fin de la Carrera inédito.
- RÜTHER, H., CHAZAN, M., SCHROEDER, R., NEESER, R., HELD, C., WALKER, S. J., MATMON, A. y HORWITZ, L. K. (2009): "Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa". *Journal of Archaeological Science*, 36, pp. 1847-1856.
- SHARON, G., ALPERSON-AFIL, N. y GOREN-İNBAR, N. (2011): "Cultural conservatism and variability in the Acheulian sequence of Gesher Benot Ya'aqov". *Journal of Human Evolution*, 60, pp. 387-397.
- SHARON, G. y BARSKY, D. (2015): "The emergence of the Acheulian in Europe - A look from the east". *Quaternary International*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.108>.
- SHIPTON, C. y CLARKSON, C. (2015): "Flake scar density and handaxe reduction intensity". *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, pp. 169-175.
- SHIPTON, C., CLARKSON, C., BERNAL, M. A., BOVIN, N., FINLAYSON, C., FINLAYSON, G., FA, D., GILES PACHECO, F. y PETRAGLIA, M. (2013): "Variation in Lithic Technological Strategies among the Neanderthals of Gibraltar". *Plos One*, 8.
- SHIPTON, C., PARTON, A., BREEZE, P., JENNINGS, R., GROUCUTT, H. S., WHITE, T. S., DRAKE, N., CRASSARD, R., ALSHAREKH, A. y PETRAGLIA, M. D. (2014): "Large Flake Acheulean in the Nefud Desert of Northern Arabia". *PaleoAnthropology*, 2014, pp. 446-462.
- SHOLTS, S. B., STANFORD, D. J., FLORES, L. M. y WÄRMLÄNDER, S. K. T. S. (2012): "Flake scar patterns of Clovis points analyzed with a new digital morphometrics approach: evidence for direct transmission of technological knowledge across early North America". *Journal of Archaeological Science*, 39, pp. 3018-3026.
- SHOTT, M. J. y TRAIL, B. W. (2010): "Exploring New Approaches to Lithic Analysis: Laser Scanning and Geometric Morphometrics". *Lithic Technology*, 35, pp. 195-220.
- (2012): "New Developments in Lithic Analysis: Laser Scanning and Digital Modeling". *The SAA Archaeological Record*, 12 (3), pp. 12-17.
- SLIZEWSKI, A. y SEMAL, P. (2009): "Experiences with Low and High Cost 3D Surface Scanner". *Quartär*, 56, pp. 131-138.
- SOLERA ARGANDA, A. A. (2012): *Obtención del modelo tridimensional de una vasija precolombina de la cultura Nazca-Perú mediante sistemas láser-escáner 3D*. Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto Fin de Carrera inédito.
- STEMP, W. J. (2014): "A review of quantification of lithic use-wear using laser profilometry: a method based on metrology and fractal analysis". *Journal of Archaeological Science*, 48, pp. 15-25.
- STEMP, W. J. y CHUNG, S. (2011): "Discrimination of surface wear on obsidian tool using LSCM and RelA: pilot study results". *Scanning*, 33, pp. 279-293.

- STEVENS, N. E; HARRO, D. R. y HICKLIN, A. (2010): "Practical quantitative lithic use-wear analysis using multiple classifiers". *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 2671-2678.
- SUMNER, T. A. y RIDDLE, A. T. R. (2008): "A Virtual Paleolithic: Assays in Photogrammetric Three-Dimensional Artifact Modelling". *PaleoAnthropology* 2008, pp. 158-169.
- TEJADO SEBASTIÁN, J. M. (2005): "Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico". *IBERIA*, 8, pp. 135-158.
- TERHUNE, C.E., KIMBEL, W.H. y LOCKWOOD, C.A., 2007. Variation and diversity in *Homo erectus*: a 3D geometric morphometric analysis of the temporal bone". *Journal of Human Evolution* 53, pp. 41-60.
- THI PORTER, S., ROUSSEL, M. y SORESSI, M. (2016): "A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field. Lithic Examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France)". *Advances in Archaeological Practice* 4 (1), pp. 71-86.
- TORRE, I. DE LA (2002): *El Olduvayense de la Sección Tipo de Peninj (Lago Natrón, Tanzania)*. Universidad Complutense de Madrid. Memoria de Licenciatura inédita.
- TORRE, I. DE LA, ARROYO, A., PROFFITT, T., MARTÍN RAMOS, C. y THEODOROPOULOU, A. (2014): "Archaeological fieldwork techniques in Stone Age sites. Some case studies". *Treballs d'Arqueologia*, 20, pp. 21-40.
- TUCCI, G., CINI, D. y NOBILE, A. (2011): "Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum". *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W16, pp.413-420,
- VALERO SANCHO, J. L. (2000): "La infografía de prensa". *Revista Latina de Comunicación Social*. Disponible en <http://www.ull.es/publicaciones/latina/aa2000qjn/99valero.htm>, consultado el 10 de marzo de 2016.
- VARGAS BALBUENA, J. (2010): *Nuevos métodos de medida 3D mediante triangulación activa*. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral inédita.
- VERHOEVEN, G. (2011): "Taking computer vision aloft-Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with Photoscan". *Archaeological prospection*, 18, pp. 67-73.
- VIALET, A., GUIPERT, G., JIANING, H., XIAOBO, F., ZUNE, L., YOUNG, W., TIANYUAN, L., DE LUMLEY, M. A. y DE LUMLEY, H. (2010): "Homo erectus from the Yunxian and Nankin Chinese sites: Anthropological insights using 3D virtual imaging techniques". *C. R. Palevol*, 9, pp. 331-339.
- WEBER, G. W. (2013): "Another link between archaeology and anthropology: Virtual anthropology". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1, pp. 3-11.

- WEBER, G. W., y BOOKSTEIN, F. L. (2011): *Virtual anthropology: a guide to a new interdisciplinary field*. Viena, Londres: Springer.
- Z Aidner, Y. y Grosmán, L. (2015): "Middle Paleolithic sidescrapers were resharped or recycled? A view from Neshar Ramla, Israel". *Quaternary International*, 361, pp. 178-187.
- Zviatcovich Zegarra, J. F. (2011): *Estimación de volumen de lesiones producidas por leishmaniasis cutánea utilizando un escáner láser de triangulación 3D*. Lima: Universidad Pontificia Católica del Perú.