

# Técnicas de digitalización, reconstrucción y visualización 3D aplicadas a los moldes de *terra sigillata* del yacimiento romano de Los Villares de Andújar (Municipio Isturgitano). Las posibilidades en la difusión, estudio y conservación del patrimonio arqueológico

Digitization, reconstruction and 3D visualization techniques applied to the molds of *terra sigillata* of the Roman site of Los Villares de Andújar (Isturgi). Possibilities in the dissemination, study and conservation of the archaeological heritage

ALEXIS MALDONADO RUIZ

Universidad de Granada. Departamento de Prehistoria y Arqueología  
Campus de la Cartuja, Calle del Prof. Clavera, s/n, E-18011 Granada  
amaru@ugr.es

MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ GARCÍA

Universidad de Granada. Departamento de Prehistoria y Arqueología  
Campus de la Cartuja, Calle del Prof. Clavera, s/n, E-18011 Granada  
mifernan@ugr.es

La innovación y el fuerte desarrollo en torno a las herramientas de digitalización y modelado 3D que venimos experimentando en los últimos años, así como su aplicación dentro del campo de la arqueología han supuesto beneficios más que evidentes de cara al estudio, la conservación y, muy especialmente, en el ámbito de la difusión del patrimonio arqueológico en general. En las siguientes líneas expondremos las posibilidades de aplicar de manera conjunta técnicas fotogramétricas, pos-procesos de restauración 3D y análisis digital sobre moldes de *terra sigillata* hispánica del yacimiento romano de Los Villares de Andújar (Jaén).

## PALABRAS CLAVE

*TERRA SIGILLATA, LOS VILLARES DE ANDÚJAR, FOTOGRAFÍA SFM, ARQUEOLOGÍA VIRTUAL*

Innovation and the strong development around the digitalization tools and 3D modeling softwares in recent years, as well as its application within the field of Archeology, has represented obvious benefits for the study, conservation and, very especially, within the area of the dissemination of archaeological heritage. In the following lines we will expose the possibilities of applying jointly photogrammetric techniques, 3D restoration post-processes and digital analysis on *terra sigillata hispánica* molds from the Roman site of Los Villares de Andújar (Jaén).

#### KEYWORDS

TERRA SIGILLATA, LOS VILLARES DE ANDÚJAR, SFM PHOTGRAMMETRY, CYBER-ARCHAEOLOGY

## Contexto histórico: Los Villares de Andújar

Las investigaciones efectuadas en el centro de producción de *terra sigillata* hispánica vinculado a la antigua ciudad de *Isturgi* (Los Villares de Andújar, Jaén) han puesto en evidencia un complejo artesanal de gran envergadura. Desde que fuera dado a conocer en 1971 por M. Sotomayor en el XII Congreso Nacional de Arqueología (Sotomayor, 1973) se han desarrollado tres proyectos de investigación sistemática. Al primero, denominado «Romanización del Alto Guadalquivir», dirigido por M. Sotomayor Muro entre 1972 y 1979, y por M. Roca Roumens entre 1981 y 1989, le siguieron los proyectos «*Isturgi* romana y su territorio: la producción de *terra sigillata* y su difusión» entre 1995 y 2011 y el «Proyecto *Isturgi*. Otro indigenismo y otra romanización: la configuración del artesanado romano y de los fenómenos productivos en las áreas periféricas del Alto Guadalquivir» (iniciado en 2012 y aún vigente), ambos dirigidos por M.I. Fernández García.

A lo largo de todos estos años, nos hemos adentrado en el engranaje productivo, que posibilitó el auge de esa clase cerámica, favorecido por una serie de condicionantes. En este sentido, a las canteras de arcilla, los cursos naturales de agua y los bosques, elementos que habían propiciado con anterioridad la creación de una producción alfarera en la zona, se unen otros dos factores. Por una parte, el eje viario creado por Augusto benefició el núcleo isturgitano, puesto que un ramal secundario conectaba con la Vía Augusta. Por otra, el *Baetis*, a los pies del barrio artesanal, como vía fluvial a través de la cual se recibían influencias y, a su vez, se canalizaban influjos propios. Estas circunstancias permiten comprender el auge experimentado por la *terra sigillata* que, cuando irrumpió en el ciclo productivo isturgitano, desbanca absolutamente las anteriores manufacturas que siguen elaborándose, pero en una proporción bastante inferior (Fernández, 2013). Producciones para las que se ha ido perfilando, poco a poco, una secuencia cronotipológica consecuencia de estudios previos sobre las *sigillatae* isturgitanas (Roca, 1976; Sotomayor *et al.*, 1979; Fernández, 1988). En este sentido, se han establecido tres generaciones de alfareros productores de *terra sigillata* hispánica (época julio-claudia, flavia y fines del siglo I e inicios del siglo II), cada una con sus propias peculiaridades formales y ornamentales que permiten identificar sin problema cada una de las etapas (Fernández, 1988, 2013).

Paralelamente se ha trabajado en las estructuras de producción, de las que conocemos algunos espacios físicos conformadores de estos alfares (Fernández, 2012: 379-389, 2013; Ruiz, 2014). Igualmente, nos hemos adentrado en la estructuración del artesanado que hizo posible que el ciclo productivo llegara a buen término. En relación con esto, se ha recuperado una serie de moldes, instrumentos imprescindibles, para la elaboración de los ejemplares decorados de *terra sigillata* isturgitana (Fernández y Serrano, 2013). El desarrollo de las nuevas tecnologías con toda una serie de herramientas que permiten profundizar en otros aspectos productivos, hasta hace algunos años impensables, ha contribuido a un mayor conocimiento, en nuestro caso, de aspectos relativos a las manufacturas sobre las que venimos trabajando desde hace muchos años. En este sentido, nos adentramos en un aspecto tan importante como la cantidad de arcilla que empleaban los productores de moldes en la ejecución de los cuerpos de los ejemplares decorados, a los que habría que añadir el borde, el pie y, en caso de tenerlas, las asas. A ello dedicamos esta aportación que ha contado con el apoyo del proyecto de I+D «Producción y adquisición de cerámicas finas en el proceso de configuración de las comunidades cívicas de la Bética y la Hispania Meridional durante el Alto Imperio Romano (HAR2016-75843-P)», Ministerio de Economía del Gobierno de España.

Asimismo, el análisis de las estructuras humanas de producción constituye uno de los objetivos de nuestro proyecto de investigación. En el estado actual de la investigación, mediante el estudio del contingente humano que efectuó las manufacturas en *terra sigillata* obtenemos información valiosa sobre la situación socioeconómica de ese artesanado, inserto en un marco jurídico concreto. En ello desempeñan un papel fundamental los *sigilla*, unos *artífices* que, en definitiva, eran responsables en mayor o menor medida del proceso productivo. Si bien los ejemplares lisos no presentan complejidad en su elaboración, no sucede lo mismo con los productos decorados. En estos, para la obtención del resultado final, se ha de pasar por tres estadios productivos: fabricantes de punzones, de moldes y, finalmente, de vasos decorados. Los dos primeros son los auténticos responsables de unas composiciones de calidad, ya que tanto punzones, en mayor medida, como moldes son instrumentos que posibilitan la calidad del ejemplar ornamental. En el complejo isturgitano, hasta el presente solo se han recuperado moldes, quizá porque los punzones eran custodiados por los mismos artesanos en sus dependencias, dado su valor como elemento decorativo.

Al igual que en los productos en *terra sigillata*, los moldes podían rubricarse. Según la disposición de la marca, se aludía al propio fabricante de este instrumento o, sencillamente, al maestro alfarero productor del ejemplar en *sigillata*. A este correspondía la inserción de la marca intradecorativamente. Por el contrario, el fabricante del molde deja constancia de su trabajo en el fondo interno, bajo la decoración e incluso en la pared externa. Dicha disposición, totalmente intencionada, implicaba que la marca alusiva al productor de moldes no apareciese al elaborar el vaso decorado (Fernández, 1999: 37-42). En los alfares isturgitanos se han recuperado moldes que cumplen las dos funciones antes expuestas, así como otros carentes de firma.

A lo largo de la historia productiva, los artesanos de moldes reflejan los gustos y prioridades en las demandas de las *sigillatae* en los mercados a corta, media y larga distancia. En este sentido, en época julio-claudia (primera generación de alfareros productores de *sigillata isturgitana*), sobre los moldes se constata una variabilidad ornamental. Se plasma un auténtico cosmos en el que figuras humanas, deidades, héroes, conviven con elementos de carácter fitomorfo, zoomorfo, circular y/o vertical, bien formando parte de unidades mínimas decorativas o bien insertándose en unidades máximas (Fernández, 2011, 2015: 58-59). Hasta el presente, en los moldes de esta etapa las marcas aluden a los fabricantes de vasos decorados. Es una generación con poca variabilidad formal en los productos decorados en comparación con los lisos, pero abundante si los cotejamos con los tipos de las etapas siguientes con predominio de la forma 37. Parece haber un cambio en los artesanos de moldes en la segunda generación, de época flavia. Decae un poco la variedad de las unidades mínimas y/o máximas ornamentales y aumentan considerablemente los productores de moldes que rubrican sus instrumentos. Frente a las marcas epigráficas (*A, CAP, DAI, IAAE, LA, L.C.A, LMF, P, P.N.V, QNL, (...)AF* junto a otras de difícil interpretación o fragmentadas) se añaden otros que signan anepígrafamente mediante motivos vegetales principalmente, aunque también están presentes otros motivos varios (Fernández y Serrano, 2013: 95-98; Serrano, 2013: 235-236, 2015: 133-160). Finalmente, en los últimos años del siglo I y durante el siglo II, coincidiendo con la tercera generación, las marcas sobre moldes desaparecen y las ornamentaciones pierden en variedad y calidad. En definitiva, los artesanos responsables de la ejecución de los moldes forman parte importante de la cadena productiva sobre cuya situación sociojurídica, en función de sus marcas, seguimos trabajando en la actualidad.

## Las herramientas de digitalización y las nuevas posibilidades

Si existe algún rasgo o característica que podamos resaltar dentro de la disciplina arqueológica, es sin duda alguna su capacidad de adoptar y adaptar innovaciones creadas por otras disciplinas y emplearlas en su propio beneficio. Herramientas pensadas para un fin específico que terminan convirtiéndose, gracias a la naturaleza multidisciplinaria de la arqueología, en instrumentos básicos e imprescindibles de su corpus metodológico. Todo ello permite, hablando obviamente desde un punto de vista conceptual muy general, trasladar nuestro conocimiento del pasado a una sociedad en constante evolución.

En este contexto, surge a principios de la década de los años noventa la denominada «arqueología virtual» (Reilly, 1990, 1992) o «ciberarqueología», como años más tarde la rebautizaría Maurizio Forte (2011, 2014). Una rama íntimamente ligada a la evolución y las innovaciones informáticas que van, poco a poco, adquiriendo un peso cada vez mayor en nuestra disciplina.

La normalización del empleo de técnicas como la fotogrametría *SfM*, el láser escáner de luz estructurada o los programas de modelado 3D es solo la punta de lanza de una nueva manera de hacer y entender la arqueología. Un influjo cada vez más frecuente que llega para quedarse (Rocchini *et al.*, 2001; Pires *et al.*, 2006; Remondino, 2006; Pletinckx, 2011; Stanco *et al.*, 2011; Pereira, 2013; McCarthy, 2014; Remondino y Campana, 2014; Shott, 2014; Olson y Caraher, 2015; Reinhard, 2015; Benavides, 2017).

Mientras que hace apenas una década la aplicación de este tipo de herramientas era una realidad extraña a la arqueología, hoy en día casi cualquier estudio que busque cierta relevancia académica (y, por qué no, social), se ve en la obligación de integrar este tipo de procedimientos.

Obviamente, a efectos patrimoniales el uso de técnicas no invasivas como estas aporta innumerables ventajas en la gestión del registro arqueológico pre, peri y postexcavación. De acuerdo con los principios estipulados en la *Carta de Londres* (Denard, 2009) y los *Principios de Sevilla* (López-Menchero y Grande, 2011; López-Menchero, 2013), la digitalización de los bienes patrimoniales aporta a corto, medio y largo plazo beneficios importantísimos que no debemos pasar por alto:

1. Limita el carácter destructivo inherente a las excavaciones arqueológicas.
2. Conseguimos reducir considerablemente la fragmentación de los restos arqueológicos recuperados, tanto muebles como inmuebles.
3. Aporta datos cada vez más precisos y de más fácil obtención que las herramientas tradicionales de registro.
4. Permite trazar clasificaciones mucho más rigurosas mediante comparaciones de tipo digital.
5. Proporciona innumerables ventajas en términos de difusión, divulgación y accesibilidad (réplicas tiflológicas).
6. Favorece la «arqueología a distancia», como quizás podríamos denominar esta nueva tendencia. Al superar las obvias restricciones impuestas por la distancia y la bidimensionalidad, podemos analizar objetos y estructuras con un alto grado de precisión y en prácticamente cualquier parte del mundo.

Obviamente, no todo son ventajas, y la aplicación de estos nuevos procedimientos supone a veces lidiar con ciertos contratiempos. La obsolescencia de los formatos digitales (Williamson, 2005; Rosenthal, 2010), el excesivo coste de algunas de estas técnicas, la fuerte inversión de tiempo que aún precisan muchos de estos trabajos o la inexistencia de un corpus de actuación homogéneo son algunos de esos obstáculos.

Sin embargo, el alcance de estos problemas puede limitarse permitiendo la convivencia, al menos temporal, de las nuevas técnicas de registro con las viejas. Es decir, garantizar una transición gradual que asiente firmemente los pilares que sustentarán el futuro de nuestra disciplina.

## Metodología

En ese sentido, la incorporación de software y hardware cada vez más potentes ha beneficiado ampliamente la optimización de flujos de trabajo como en el que pretendemos enmarcar nuestro breve ensayo.

A grandes rasgos, la metodología propuesta para digitalizar y restituir la colección de moldes de *terra sigillata* del yacimiento de Los Villares de Andújar sigue las líneas básicas que respaldan cualquier trabajo de estas características. No obstante, también aportaremos elementos propios, sobre todo durante la aplicación de las reconstrucciones totales o parciales de las piezas cerámicas.

En conjunto, el proceso es una compleja combinación de diferente software (tanto de libre acceso como comercial) de diseño 2D y edición fotográfica (*Adobe Photoshop®*, *Adobe Lightroom®*), fotogrametría (*Agisoft Photoscan®*), modelado 3D (*Blender®*, *Z-Brush®*) y procesamiento de los modelos digitales (*Meshlab®*, *Cloud Compare®*, *Instant Meshes®*). La idea de este procedimiento es generar modelos 3D idénticos al objeto original, pero en un entorno totalmente digital. En consecuencia, podemos aplicar posteriormente análisis de tipo digital gracias a software como *Meshlab* o herramientas internas de *Blender*.

Todo este proceso arranca con un aspecto tan básico como esencial: el escaneado o captura de las fotografías que vayan a componer nuestros modelos tridimensionales. En un trabajo fotogramétrico de laboratorio es importantísimo controlar correctamente tanto la iluminación como los parámetros de disparo. Para dicha tarea se emplea una cámara fotográfica réflex *Canon EOS 600 D* y un objetivo adaptado al tamaño de cada pieza. En nuestro caso utilizamos de manera sistemática un focal fijo *Yongnuo* de 35 mm, dada la relativa homogeneidad en el tamaño de las piezas elegidas. La cámara y el objetivo irán montados ambos sobre un trípode estándar que garantice la estabilidad del disparo. Del mismo modo, empleando una caja de luz y un sistema de iluminación básico de tres focos, creamos un ambiente de luz controlado donde eliminar sombras o brillos indeseados. Por último y con el objetivo de no perder la mínima información posible, pero intentando siempre optimizar al máximo todo el procedimiento, establecimos un margen de entre 50 y 70 disparos por cada uno de los moldes.

Una vez realizadas las fotografías, empleamos programas de edición fotográfica como *Adobe Lightroom*. Con ello conseguimos dar el formato correcto a cada imagen y corregir posibles errores. Aquí, el uso de *Adobe Photoshop* también es interesante a la hora de crear máscaras de capa individuales, algo muy útil si queremos agilizar el proceso fotogramétrico posterior y obtener réplicas 3D mucho más precisas.

Para generar los modelos 3D propiamente dichos se utilizó el software comercial *Agisoft Photoscan*, una herramienta fotogramétrica muy potente y estable que permite la creación de modelos tridimensionales de manera semiautomatizada (fig. 1). La parametrización del procesamiento de los modelos es realmente sencilla en las nuevas versiones del programa, por lo que el resultado final dependerá casi exclusivamente de la correcta ejecución de las fotografías (Benavides, 2017; Bruno *et al.*, 2010).

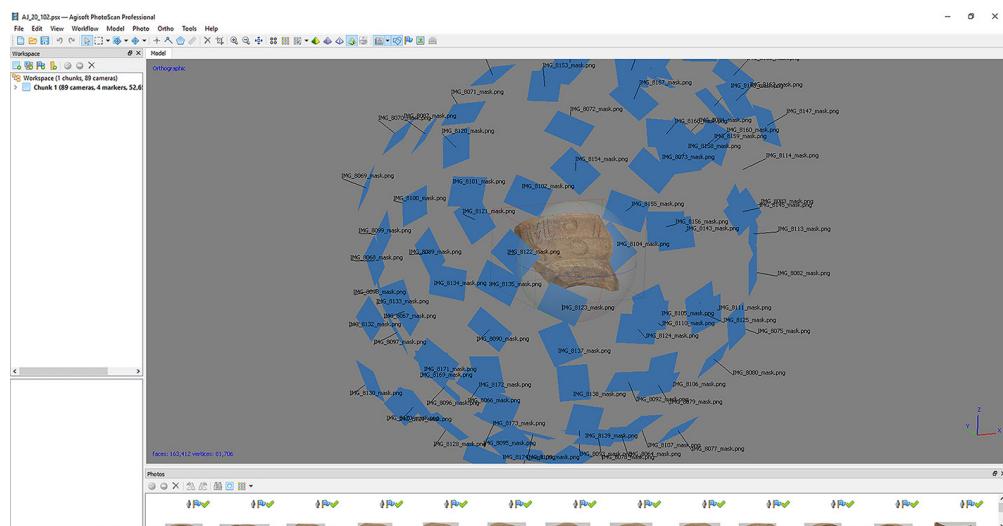


Figura 1. Proceso de creación del modelo fotogramétrico del molde de *terra sigillata* hispánica AJ20102 mediante el software fotogramétrico Agisoft Photoscan.

En ese mismo orden de ideas, si lo que buscamos son mediciones precisas de determinadas características morfométricas de nuestras piezas, los modelos habrán de realizarse con la máxima precisión geométrica posible. Esto se traduce en una mayor carga de trabajo para nuestro hardware. Solo de esta manera garantizaremos la máxima afinidad de nuestro modelo tridimensional con respecto a la pieza real. En nuestro caso, al trabajar con piezas que raramente superaban las 80 fotografías, no tuvimos problemas para generar objetos de alta precisión geométrica.

Este modelo digital producido mediante *Agisoft Photoscan*, una vez está correctamente escalado y orientado, se exporta en formato .obj o .ply con el objetivo de maximizar su compatibilidad y facilitar así su traslado e importación a programas de modelado 3D y herramientas de análisis digital (Cosmas *et al.*, 2003; Gruber, 2015; Heath, 2015; Garstky, 2017).

Para el posprocesado de los modelos 3D usamos principalmente *Blender*, un programa multiplataforma gratuito. Este software de modelado digital es una herramienta tan potente que las posibilidades de actuación sobre piezas digitales quedan casi completamente limitadas por el tiempo del que realmente dispongamos.

Es importante aclarar también que, dentro del mismo *Blender*, optamos por emplear el motor de renderizado *Cycles* (en su versión 2.79b), en lugar de *Blender Render*; mucho más potente en cuanto a renderización, se adaptaba más a los propósitos de nuestro trabajo. Así, gracias a su aplicación y a una consulta bibliográfica previa, pudimos llevar a cabo las restituciones totales o parciales de cada una de las piezas (fig. 2). Llegados a este punto, sería preciso aclarar que decidimos diferenciar claramente la pieza real de aquella parte que había sido restaurada, basándonos para ello en los criterios establecidos en la *Carta Internacional*



Figura 2. Restauración virtual del molde de *terra sigillata* hispánica AJ1532.

para la Gestión del Patrimonio Arqueológico, elaborada por ICOMOS (AA.VV., 1990: 4). Por ello, determinamos aplicar una textura que se diferenciese perfectamente de la parte real.

Con las réplicas digitales ya restituidas, pudimos aplicar un análisis volumétrico de tipo digital que nos permitiese estimar el volumen de material empleado en la fabricación de este tipo de piezas cerámicas.

Conjuntamente con las tareas de restauración o análisis digital, se fijó también una línea de optimización coherente. Esto es, lo que en arqueología virtual conocemos como «retopología» y que analizaremos más adelante. Para ello, decidimos combinar las herramientas internas de *Blender* con programas adicionales como *ZBrush* o *Instant Meshes* (Jakob *et al.*, 2015).

El último paso de nuestro flujo de trabajo atiende a los aspectos relacionados con la difusión y divulgación de los resultados. En primer lugar, gracias a *Blender*, nos es posible generar renderizados fotorrealistas con proyección ortográfica u ortogonal de cada modelo. Este tipo de vista presupone una menor distorsión de las dimensiones reales de la pieza, lo que la hace especialmente útil para estudiar cualquier tipo de material arqueológico en formato bidimensional. Junto con ello, también empleamos plataformas de visualización online como *Sketchfab®*, en que, una vez importados nuestros modelos fotogramétricos, cualquier persona con acceso a Internet puede manipular e interactuar con las réplicas tridimensionales.

## Resultados

Con el fin de presentar unos resultados coherentes, se decidió realizar una selección de 24 piezas (tablas 1 y 2) sobre las que llevar a cabo sistemáticamente procedimientos fotogramétricos de digitalización, reconstrucción y análisis digital. Este es un número que

**Tabla 1.** Relación de moldes, sus medidas y las estimaciones volumétricas llevadas a cabo sobre ellos

FICHA	MOLDE	DIMENSIONES MOLDE RECONSTRUIDO	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ARCILLA EMPLEADO	CAPACIDAD VOLUMÉTRICA
Nº1	C_182	Diámetro: 17.5 cm * Altura: 7.3 cm	0.318 litros / 318 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 350 cm <sup>3</sup> )	863 cm <sup>3</sup> )
Nº2	AJ_23_25_6	Diámetro: 14.6 cm * Altura: 5.9 cm	0.154 litros / 154 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 169 cm <sup>3</sup> )	436 cm <sup>3</sup> )
Nº3	AJ_60_19	Diámetro: 14.7 cm * Altura: 6.3 cm	0.228 litros / 228 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 240 cm <sup>3</sup> )	412 cm <sup>3</sup> )
Nº4	AJ_20_28_2	Diámetro: 18.5 cm * Altura: 6.8 cm	0.344 litros / 344 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 378 cm <sup>3</sup> )	828 cm <sup>3</sup> )
Nº5	AJ_35_21	Diámetro: 15.7 cm * Altura: 8.7 cm	0.371 litros / 371 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 408 cm <sup>3</sup> )	722 cm <sup>3</sup> )
Nº6	AJ_71_09_1	Diámetro: 17.6 cm * Altura: 8.8 cm	0.323 litros / 323 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 355 cm <sup>3</sup> )	1179 cm <sup>3</sup> )
Nº7	AJ_23_16	Diámetro: 19.8 cm * Altura: 8.9 cm	0.618 litros / 618 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 680 cm <sup>3</sup> )	1261 cm <sup>3</sup> )
Nº8	AJ_20_45_2	Diámetro: 15 cm * Altura: 8.2 cm	0.290 litros / 290 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 319 cm <sup>3</sup> )	631 cm <sup>3</sup> )
Nº9	AJ_81_47_1	Diámetro: 14.9 cm * Altura: 7.6 cm	0.296 litros / 296 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 323 cm <sup>3</sup> )	402 cm <sup>3</sup> )
Nº10	AJ_23_36	Diámetro: 18.3 cm * Altura: 8.6 cm	0.348 litros / 348 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 383 cm <sup>3</sup> )	936 cm <sup>3</sup> )
Nº11	AJ_42_21	Diámetro: 20 cm * Altura: 8.3 cm	0.492 litros / 492 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 541 cm <sup>3</sup> )	1156 cm <sup>3</sup> )
Nº12	AJ_75_62	Diámetro: 16 cm * Altura: 6.1 cm	0.207 litros / 207 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 227 cm <sup>3</sup> )	523 cm <sup>3</sup> )
Nº13	AJ_21_11_1	Diámetro: 15.5 cm * Altura: 6.4 cm	0.163 litros / 163 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 179 cm <sup>3</sup> )	553 cm <sup>3</sup> )
Nº14	AJ_15_32	Diámetro: 14.4 cm * Altura: 6.3 cm	0.249 litros / 249 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 274 cm <sup>3</sup> )	518 cm <sup>3</sup> )
Nº15	AJ_23_27	Diámetro: 14.4 cm * Altura: 5.6 cm	0.158 litros / 158 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 174 cm <sup>3</sup> )	420 cm <sup>3</sup> )
Nº16	AJ_81_33_3	Diámetro: 15.3 cm * Altura: 6.3 cm	0.286 litros / 286 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 315 cm <sup>3</sup> )	527 cm <sup>3</sup> )
Nº17	AJ_24_43	Diámetro: 11.4 cm * Altura: 6.6 cm	0.142 litros / 142 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 156 cm <sup>3</sup> )	340 cm <sup>3</sup> )
Nº18	AJ_70_66_7	Diámetro: 13.5 cm * Altura: 6.6 cm	0.231 litros / 231 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 254 cm <sup>3</sup> )	491 cm <sup>3</sup> )
Nº19	AJ_20_102	Diámetro: 11.9 cm * Altura: 5 cm	0.122 litros / 122 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 134 cm <sup>3</sup> )	246 cm <sup>3</sup> )
Nº20	AJ_81_02_1	Diámetro: 16.1 cm * Altura: 6.7 cm	0.291 litros / 291 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 320 cm <sup>3</sup> )	553 cm <sup>3</sup> )
Nº21	AJ_90_86	Diámetro: 13.2 cm * Altura: 5.7 cm	0.183 litros / 183 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 201 cm <sup>3</sup> )	348 cm <sup>3</sup> )
Nº22	AJ_20_15_2	Diámetro: 16.2 cm * Altura: 6.8 cm	0.304 litros / 304 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 334 cm <sup>3</sup> )	601 cm <sup>3</sup> )
Nº23	AJ_20_101	Diámetro: 15.7 cm * Altura: 6.6 cm	0.234 litros / 234 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 257 cm <sup>3</sup> )	538 cm <sup>3</sup> )
Nº24	AJ_20_32_4	Diámetro: 15.2 cm * Altura: 5.6 cm	0.220 litros / 220 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 242 cm <sup>3</sup> )	474 cm <sup>3</sup> )

consideramos suficiente de cara a una buena representación de la variedad tipológica que encontramos en Los Villares de Andújar y, a su vez, es un número de piezas que puede gestionarse con relativa facilidad mediante un equipo de trabajo reducido. Igualmente, en un conjunto de estas dimensiones, no solo podemos aplicar diferentes estrategias de tratamiento digital, sino que podríamos obtener además datos de cierta relevancia.

Como se ha esbozado en las líneas anteriores, las muestras seleccionadas para este estudio presentan ciertos elementos comunes. Obviamente, junto al hecho de que todos son moldes destinados a la fabricación de la conocida como *terra sigillata* his-

**Tabla 2.** Relación de las posibles piezas extraídas de cada uno de los moldes (tabla 1), sus medidas y las estimaciones volumétricas llevadas a cabo sobre ellas

FICHA	MOLDE DE ORIGEN	DIMENSIONES PIEZA RECONSTRUIDA	VOLUMEN DE ARCILLA EMPLEADO	CAPACIDAD VOLUMÉTRICA
Nº1	C_182	Diámetro: 15.7 cm * Altura: 7 cm	0.168 litros / 168 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 185 cm <sup>3</sup> )	700 cm <sup>3</sup>
Nº2	AJ_23_25_6	Diámetro: 13.6 cm * Altura: 5.6 cm	0.105 litros / 105 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 115 cm <sup>3</sup> )	330 cm <sup>3</sup>
Nº3	AJ_60_19	Diámetro: 13.3 cm * Altura: 5.2 cm	0.106 litros / 106 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 116 cm <sup>3</sup> )	337 cm <sup>3</sup>
Nº4	AJ_20_28_2	Diámetro: 17.2 cm * Altura: 5.7 cm	0.168 litros / 168 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 184 cm <sup>3</sup> )	679 cm <sup>3</sup>
Nº5	AJ_35_21	Diámetro: 14 cm * Altura: 7.6 cm	0.148 litros / 148 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 162 cm <sup>3</sup> )	548 cm <sup>3</sup>
Nº6	AJ_71_09_1	Diámetro: 16.4 cm * Altura: 7.8 cm	0.210 litros / 210 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 231 cm <sup>3</sup> )	979 cm <sup>3</sup>
Nº7	AJ_23_16	Diámetro: 19.2 cm * Altura: 8.1 cm	0.241 litros / 241 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 265 cm <sup>3</sup> )	1228 cm <sup>3</sup>
Nº8	AJ_20_45_2	Diámetro: 13.6 cm * Altura: 6.3 cm	0.131 litros / 131 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 144 cm <sup>3</sup> )	500 cm <sup>3</sup>
Nº9	AJ_81_47_1	Diámetro: 12.7 cm * Altura: 6.3 cm	0.099 litros / 99 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 109 cm <sup>3</sup> )	300 cm <sup>3</sup>
Nº10	AJ_23_36	Diámetro: 17 cm * Altura: 8.2 cm	0.197 litros / 197 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 217 cm <sup>3</sup> )	861 cm <sup>3</sup>
Nº11	AJ_42_21	Diámetro: 17.7 cm * Altura: 7.5 cm	0.204 litros / 204 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 224 cm <sup>3</sup> )	942 cm <sup>3</sup>
Nº12	AJ_75_62	Diámetro: 14.3 cm * Altura: 5.5 cm	0.121 litros / 121 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 133 cm <sup>3</sup> )	425 cm <sup>3</sup>
Nº13	AJ_21_11_1	Diámetro: 14.6 cm * Altura: 6 cm	0.139 litros / 139 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 152 cm <sup>3</sup> )	458 cm <sup>3</sup>
Nº14	AJ_15_32	Diámetro: 13.3 cm * Altura: 5.7 cm	0.122 litros / 138 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 152 cm <sup>3</sup> )	387 cm <sup>3</sup>
Nº15	AJ_23_27	Diámetro: 13.4 cm * Altura: 5.3 cm	0.104 litros / 104 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 114 cm <sup>3</sup> )	350 cm <sup>3</sup>
Nº16	AJ_81_33_3	Diámetro: 14.2 cm * Altura: 5.3 cm	0.121 litros / 121 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 133 cm <sup>3</sup> )	413 cm <sup>3</sup>
Nº17	AJ_24_43	Diámetro: 10.4 cm * Altura: 6.1 cm	0.087 litros / 87 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 96 cm <sup>3</sup> )	258 cm <sup>3</sup>
Nº18	AJ_70_66_7	Diámetro: 11.9 cm * Altura: 5.6 cm	0.105 litros / 105 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 115 cm <sup>3</sup> )	314 cm <sup>3</sup>
Nº19	AJ_20_102	Diámetro: 10.7 cm * Altura: 4.4 cm	0.071 litros / 71 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 78 cm <sup>3</sup> )	182 cm <sup>3</sup>
Nº20	AJ_81_02_1	Diámetro: 14.6 cm * Altura: 5.8 cm	0.131 litros / 131 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 144 cm <sup>3</sup> )	473 cm <sup>3</sup>
Nº21	AJ_90_86	Diámetro: 11.7 cm * Altura: 5 cm	0.089 litros / 89 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 98 cm <sup>3</sup> )	263 cm <sup>3</sup>
Nº22	AJ_20_15_2	Diámetro: 14.4 cm * Altura: 5.8 cm	0.150 litros / 150 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 165 cm <sup>3</sup> )	468 cm <sup>3</sup>
Nº23	AJ_20_101	Diámetro: 14.3 cm * Altura: 5.9 cm	0.122 litros / 122 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 134 cm <sup>3</sup> )	441 cm <sup>3</sup>
Nº24	AJ_20_32_4	Diámetro: 13.9 cm * Altura: 5 cm	0.114 litros / 114 cm <sup>3</sup> (+ 10 % = 125 cm <sup>3</sup> )	390 cm <sup>3</sup>

pánica (Fernández, 1988, 1999, 2011, 2012, 2013, 2015; Serrano, 2013, 2015), nos encontramos con otra realidad constante en estas piezas: la fragmentación. Todos y cada uno de los modelos son fracciones de una pieza original que, a pesar de tener un tamaño variable, suelen conservar la sección completa (base, cuerpo y borde) o, como mínimo, alguna de las partes principales (base o borde). En ese mismo orden de ideas y por motivos meramente prácticos, todos aquellos fragmentos amorfos y de pequeño tamaño fueron inmediatamente descartados. En efecto, la aplicación de este protocolo de selección es imprescindible, si queremos garantizar la realización de reconstrucciones mínimamente lógicas.

Por este motivo y con el objetivo de facilitar la exposición de los resultados, nos limitaremos a presentar en subapartados independientes algunas de las intervenciones más relevantes que se han llevado a cabo sobre dicho conjunto.

## Hacia una reconstrucción virtual veraz. La obtención y corrección de perfiles

Dentro de las posibles actuaciones que nos permite el uso combinado del software mencionado, la restauración virtual y todos los procedimientos que de ella derivan revisten una especial importancia (Aparicio y Figuereido, 2016).

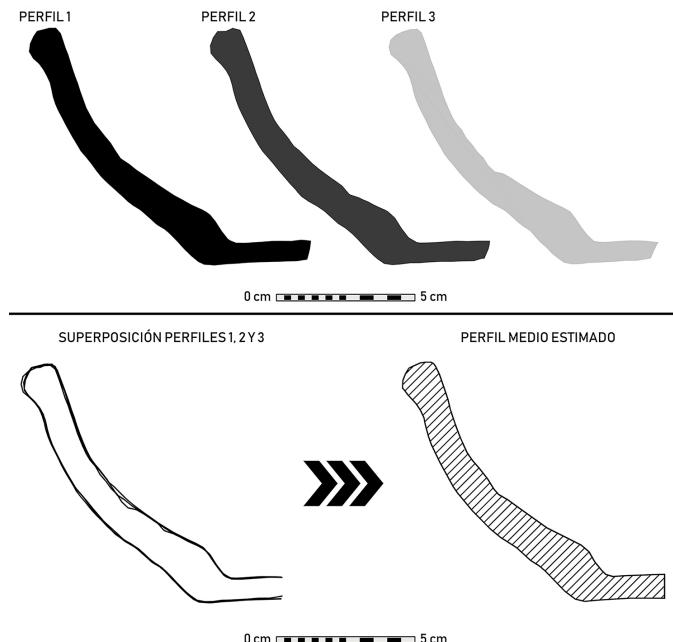
Este tipo de intervención es, sin duda, una de las más útiles. No solo en lo tocante a la difusión patrimonial, permitiendo mostrar una pieza arqueológica completa a partir de un simple fragmento, sino también con fines científicos. Efectivamente, este tipo de procedimientos permite extraer medidas morfométricas y volumétricas reales de partes de la réplica digital obtenida mediante escaneado fotogramétrico. Junto con ello, la restauración de tipo digital puede convertirse en una herramienta de gran utilidad como paso previo a una consolidación física del objeto.

En el caso concreto de la fotogrametría de piezas o fragmentos cerámicos, trabajar con geometrías de gran exactitud permite obtener un perfil de la pieza mucho más ajustado a la realidad, algo importante en un procedimiento de reconstrucción, donde solo conservamos una porción del elemento real y nos basamos «en inferencias comparativas científicamente razonables» (López-Menchero y Grande, 2011: 72) para reconstruir la forma completa del fragmento.

Así, como mostramos en el caso del molde AJ4221 (fig. 3), mediante la comparación de tres secciones extraídas de diferentes partes de la pieza, podemos obtener un perfil medio del modelo fotogramétrico mucho más exacto. En términos generales, las cerámicas romanas suelen producirse mediante torno, lo que hace que posean una regularidad mucho mayor que las cerámicas hechas a mano. Sin embargo, no son piezas totalmente simétricas, y un perfil corregido nos permite crear un objeto digital mucho más exacto (Cohen *et al.*, 2013). Esta será la base sobre la que posteriormente insertemos la réplica fotogramétrica de nuestro fragmento de molde.

De este modo, a pesar de que la reconstrucción tipológica no se corresponde cien por cien a la que hubiera sido la geometría real de la pieza, los cálculos volumétricos aplicados sobre ella pueden aportar datos más que veraces (Gruber, 2015). Más aún, tenemos la ventaja añadida de que, al ser una técnica de «no contacto», la integridad de la pieza original y, en definitiva, la conservación del patrimonio arqueológico están totalmente garantizadas.

Junto a la denominada reconstrucción virtual, mencionaremos, más bien como anécdota, la existencia de intervenciones de anastilosis o restauración digital (López-Menchero



**Figura 3.** Comparativa de las diferencias entre perfiles según la parte del modelo fotogramétrico donde se obtiene y extracción del perfil medio para recrear la forma del molde de *terra sigillata* hispánica AJ4221.

y Grande, 2011: 72). Efectivamente, en el caso de contar con todos o varios de los fragmentos de una misma pieza, podríamos escanearlos por separado y, en un escenario totalmente digital, reintegrar cada pieza en su posición original.

Algo realmente interesante en este tipo de procedimientos digitales, tanto de reconstrucción como de restauración, es su aplicación práctica en el campo de la conservación como disciplina patrimonial. En efecto, junto con su utilidad de cara al análisis digital, este tipo de procedimientos digitales permite proponer hipótesis reconstructivas previas a una consolidación real y definitiva. De este modo podemos abordar la intervención de la mejor manera posible evitando así eventuales fallos irreversibles.

## La obtención de la pieza del molde y el cálculo de la cantidad de arcilla necesaria para producirlo

Una vez correctamente reconstruido nuestro molde, se abren dos líneas de actuación.

En primer lugar, es posible obtener la que pudiera haber sido la pieza cerámica resultante del uso mismo del molde y, sobre ella, calcular el volumen de arcilla nece-

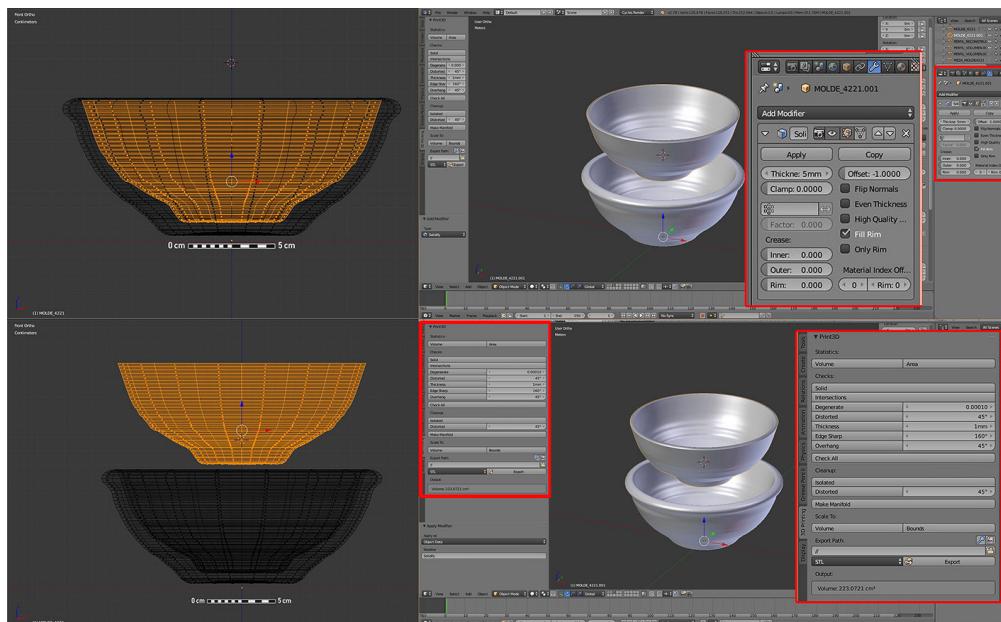


Figura 4. Explicación del procedimiento de aplicación del modificador *solidify* para la reconstrucción de la posible pieza procedente del molde de *terra sigillata* hispánica, a partir del ejemplo del molde AJ4221.

sario para su fabricación. El procedimiento en este caso consiste en duplicar la cara interna del molde y añadirle un grosor determinado (fig. 4). Esto es algo que se realiza de manera semiautomática aplicando el modificador *solidify* e indicando al programa el porcentaje de grosor que queremos que tenga la pieza resultante. En nuestro caso, establecimos un grosor medio para este tipo de cerámicas de unos 0,5 cm en la parte superior (Mezquíriz, 1983; Fernández, 2015; Fernández *et al.*, 2016; Ruiz, 2014; Serrano, 2015), engrosándose proporcionalmente hasta llegar a la base. Hecho esto, podríamos, ahora sí, calcular el volumen aproximado de arcilla que pudiera haber sido empleado tanto para la producción del molde mismo como para la pieza de *terra sigillata* resultante de él.

El cómputo aproximado de este valor se puede obtener en *Bender* gracias a la instalación de un complemento denominado *3D print toolbox*, que permite estimar el volumen de plástico que requeriría una impresión 3D de un modelo tridimensional previamente escalado. Dado que entendemos el volumen «como el espacio que ocupa un cuerpo», la cantidad estimada por el programa puede ser extrapolada a un material de naturaleza completamente diferente como es la arcilla.

Obviamente, la cifra calculada por el software debe ser ajustada a posteriori teniendo en cuenta factores como, por ejemplo, la dilatometría consustancial al proceso de cocción de la arcilla (Carretero *et al.*, 2002). De este modo, dada la temperatura que alcanzaban

los hornos usados para este tipo de cerámica (en torno a los 1000 grados), estimamos en un 10 % el porcentaje en el que la *terra sigillata* reduciría su volumen durante la cocción (Picon, 1998: 106). Así, añadiendo dicho porcentaje a la cantidad previamente calculada por el software, podemos estimar de manera mucho más exacta la medida de arcilla húmeda que hubiera sido necesaria para producir este tipo de piezas. En este sentido, las cantidades (tabla 1 y 2) podrían ajustarse aún más, teniendo en cuenta aspectos adicionales como, por ejemplo, el porcentaje de materia prima perdido durante todo el proceso de modelado o el tipo concreto de arcilla empleado.

La segunda línea de actuación en este caso nos permitiría deducir la cantidad aproximada de arcilla que fue necesaria para la producción del molde mismo. Una vez digitalizado y reconstruido, simplemente habríamos de aplicar el *add-on 3D print toolbox* con las correcciones pertinentes a la cifra (tabla 1).

Gracias a la aplicación de estos métodos, hemos podido observar, en primer lugar, cierta irregularidad en cuanto a la cantidad de materia prima empleada (arcilla en este caso) para la producción de los moldes analizados. Esto se produce incluso en objetos cerámicos de dimensiones similares, como es el caso de los moldes AJ20101, AJ21111 y AJ81333 (tabla 1 y 2). En segundo lugar, debemos resaltar cómo esta heterogeneidad se atenúa levemente en el caso de las piezas derivadas de dichos moldes y durante el cálculo de la capacidad volumétrica.

Por otra parte, convendría mencionar que el molde AJ2316 (de 19,2 cm de diámetro por 8,1 cm de altura) sería el que más cantidad de arcilla demandaría para su producción. Hablamos de unos 680 cm<sup>3</sup> para crear el molde y unos 265 cm<sup>3</sup>, para la elaboración de la pieza de *terra sigillata* resultante de él. Asimismo, las cantidades van descendiendo hasta llegar al molde AJ20102, que tan solo precisaría de unos 134 cm<sup>3</sup> para su producción y apenas 78 cm<sup>3</sup> para obtener una pieza cerámica.

## El cálculo de la capacidad volumétrica de los moldes y las piezas producidas con ellos

Análogamente, podríamos obtener también una cifra bastante aproximada acerca de la capacidad real de los recipientes producidos con este tipo de moldes.

Para ello, seguiremos una dinámica muy parecida a la propuesta para el caso anterior. En este, duplicando la cara interna de la pieza objetivo crearemos un objeto completamente sólido (fig. 5) que se corresponda con el espacio físico real que ocuparía el volumen (o más bien la capacidad para contener un volumen) de ese objeto concreto.

Una vez hecho esto, podríamos nuevamente medir la capacidad mediante el uso de la herramienta *3D print toolbox* ya mencionada. Estas mediciones pueden también llevarse a cabo mediante otro software, como es el caso de *Meshlab*. En nuestro caso, empleamos los dos para cerciorarnos de que la cifra era correcta (tabla 1 y 2).

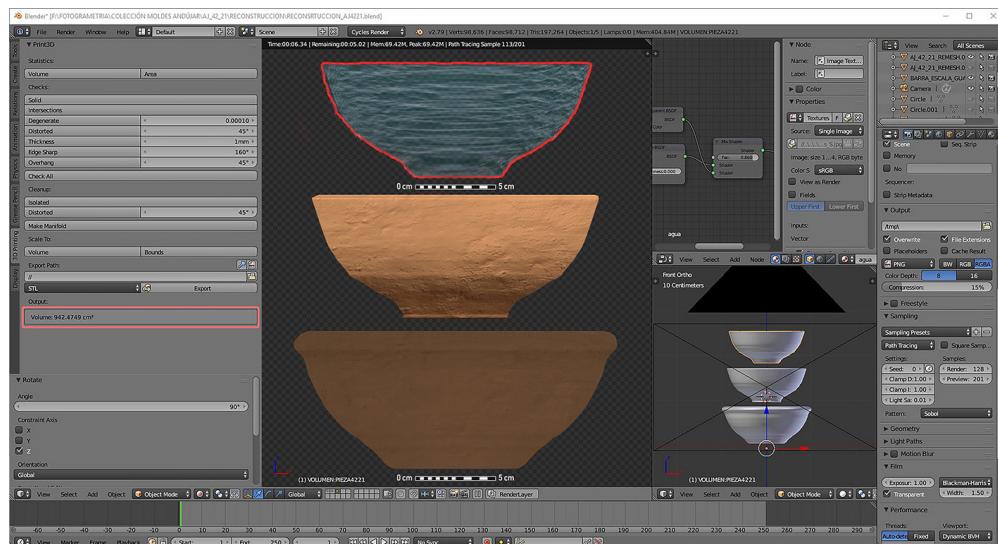


Figura 5. Representación y cálculo de la capacidad volumétrica de una de las piezas que pudieran haberse extraído del molde de *terra sigillata* hispánica AJ4221.

## El uso de la retopología para la optimización de los modelos digitales de cara a su difusión y divulgación

En este último apartado abordaremos de manera muy resumida todas aquellas tareas conducentes a la optimización de los modelos tridimensionales producidos mediante fotogrametría. Aunque han demostrado ser una herramienta eficaz durante las tareas de reconstrucción virtual, este tipo de procedimientos importados de la industria del videojuego son especialmente útiles de cara a la divulgación, pero sobre todo difusión, del patrimonio arqueológico entre el público menos especializado.

Con el objetivo de optimizar las complejas, y normalmente pesadas, geometrías de nuestros modelos 3D, aplicamos estos procesos de «retopología». Gracias a ello podemos reducir su carga poligonal. Sin embargo, la simplificación de la malla tridimensional presupone una inevitable pérdida del detalle real de la pieza, algo que mitigamos en gran parte mediante la aplicación («bakeado») de un correcto mapeado de sus texturas (*normal map*, *ambient occlusion map*, *roughness map*). En definitiva, esta serie de procedimientos nos permite obtener modelos tridimensionales menos pesados, pero mantiene una calidad y resolución altas (fig. 6).

Evidentemente, si lo que queremos es realizar un estudio analítico o métrico preciso a partir de nuestros modelos digitales, esta simplificación geométrica no solo no es necesaria, sino que se convierte en algo contraproducente. Sin embargo, reducir y simplificar la geometría puede ser una muy buena opción si lo que queremos es facilitar el almace-



Figura 6. Comparativa entre un modelo fotogramétrico en bruto y otro optimizado del fragmento de molde *terra sigillata* hispánica AJ1532.

naje o generar replicas virtuales que sean mucho más manejables y accesibles, elementos digitales que pueden ser visualizados desde casi cualquier tipo de dispositivo a través de repositorios en línea como *Sketchfab* (fig. 7).

En definitiva, todo esto se traduce en una mayor y mejor difusión de nuestro material arqueológico, algo necesario si queremos garantizar la transferencia del conocimiento en una sociedad cada vez más informatizada (Rivero, 2011; Webmoor, 2007).



**Figura 7.** Montaje compositivo de la reconstrucción tipológica llevada a cabo sobre el molde de *terra sigillata* hispánica AJ21111. Incluye un código QR que enlaza a *Sketchfab*, por lo que el modelo tridimensional y su reconstrucción pueden ser consultados de manera completa escaneando con nuestro *smartphone* el código QR situado a la derecha. Esto puede hacerse descargando la app gratuita de «Lector de código QR» de Green Apple Studio u otra similar. Este tipo de aplicaciones está disponible en *AppStore* o *Play Store*.

## Conclusiones

La aplicación de las nuevas herramientas de digitalización del patrimonio, y en especial la fotogrametría basada en el *structure from motion*, demuestra tener un enorme potencial para su aplicación en las humanidades digitales. Algo mucho más evidente en el caso de disciplinas que, como la arqueología, necesitan mecanismos de registro cada vez más rigurosos y precisos.

La alta democratización que ha experimentado esta técnica de documentación en los últimos diez años supone además un importante revulsivo para su uso. Gracias a la aparición de hardware y software cada vez más potentes, automatizados y económicos, ha sido posible extender su uso a un grupo de personas progresivamente más amplio. Sin la necesidad de contar con estudios informáticos específicos y con una inversión mínima de material, podemos conseguir resultados realmente exactos.

En el ámbito científico, la comodidad que representa trabajar con este tipo de materiales virtuales, propicia una nueva manera de hacer arqueología. Gracias a su divulgación en línea, el investigador actual puede superar las limitaciones de la bidimensionalidad inherentes al aparato gráfico tradicional, y utilizar modelos tridimensionales totalmente digitales, con un grado de distorsión nimio y que son perfectamente mensurables. Todo

ello sin la necesidad de tener que desplazarse físicamente o afrontar el costoso transporte de las piezas. Como resultado, el intercambio y la comparación de datos entre instituciones, grupos de investigación e investigadores geográficamente separados está experimentando una creciente e interesante mejora.

Sin embargo, como ocurre con otras técnicas de reconstrucción tridimensional, la aplicación de la fotogrametría solo puede alcanzar sus mejores resultados mediante un flujo de trabajo efectivo que combine programas de pre y posprocesado. De entre ellos, son cada vez más habituales los procedimientos analíticos digitales que permiten extraer datos precisos de una réplica fotogramétrica. A este respecto, se evidencia el enorme potencial de *Blender*, un programa multiplataforma de acceso libre que, aplicado al patrimonio arqueológico, permite gestionar, optimizar y analizar nuestros modelos fotogramétricos con un alto grado de precisión. Gracias a ello podemos estimar cantidades de arcillas razonables para, por ejemplo, producir *terra sigillata* hispánica. Así, un complejo alfarero como el de *Isturgi* necesitaría unos 144 cm<sup>3</sup> de arcilla para producir un recipiente de estas características cuyas dimensiones se encuentren entre los 14-15 cm de diámetro y los 5-6 cm de alto.

En este sentido, la capacidad de duplicar y alojar un objeto real en un entorno completamente virtual presupone nuevas alternativas a la conservación más tradicional. En definitiva, la generalización de la restauración virtual como paso previo a restauraciones reales podría ayudar a reducir el riesgo inherente en este tipo de intervenciones que, al fin y al cabo, son profundamente invasivas. Un camino largo y sinuoso, y aún profundamente desconocido, pero con un enorme potencial por explorar.

Por último, la mayor y más importante ventaja que proporciona el uso de la fotogrametría y/o de otras técnicas de reconstrucción 3D similares emana directamente de este nuevo modo de conservación patrimonial y de cómo esta revierte en la sociedad misma. En una sociedad basada cada vez más en el empleo reiterado y masivo de las nuevas tecnologías, la curiosidad patrimonial debe inculcarse a través de estos mecanismos. De este modo, con el empleo de herramientas de digitalización como la fotogrametría *SfM* podemos acercar el patrimonio arqueológico de una manera mucho más clara, atractiva y visual a un sector no especializado de la población que así lo solicita. Un público potencial que garantiza, a la larga, la pervivencia y el sentido propio de una disciplina por naturaleza social.

## Bibliografía

- AA.VV., 1990, *Carta Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico de 1990*, ICOMOS, Lausana.
- APARICIO RESCO, P. y FIGUEREIDO, C., 2016, El grado de evidencia histórico-arqueológica de las reconstrucciones virtuales: hacia una escala de representación gráfica, *Revista Otarq* 1, 235-247.
- BENAVIDES LÓPEZ, J. A., 2017, *Nuevas Tecnologías aplicadas a la Documentación Gráfica del Patrimonio: La Alcazaba de Guadix-El Castillo de Píñar*, Universidad de Granada (tesis doctoral inédita).
- BRUNO, F., BRUNO, S., DA SENSI, G., LUCHI, M. L., MANCUSO, S. y MUZZUPAPPA, M., 2010, From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition, *Journal of Cultural Heritage* 11, 42-49.
- CARRETERO, M. I., DONDI, M., FABBRI, B. y RAIMONDO, M., 2002, The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic-chloritic clays, *Applied Clay Science* 20:6, 301-306.
- COHEN, F., LIU, Z. y EZGI, T., 2013, Virtual reconstruction of archeological vessels using expert priors and intrinsic differential geometry information, *Computers & Graphics* 37, 41-53.
- COSMAS, J., ITEGAKI, T., GREEN, D. y JOSEPH, N., 2003, Providing Multimedia Tools for Recording, Reconstruction, Visualisation and Database Storage, en D. ARNOLD, A. CHALMERS y F. NICCOLUCCI (eds.), *4<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage VAST*, The Eurographics Association, Aire-la-Ville, 165-174.
- DENARD, H., 2009, *The London Charter for the computer-based visualisation of cultural heritage. Draft 2.1*. [en línea]. Consulta: 21 de mayo de 2019. Disponible en <<http://www.londoncharter.org>>.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., 1988, *Los diversos estilos decorativos de la Sigillata Hispánica de Andújar*, Microfichas, Universidad de Granada, Granada.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., 1999, Breve introducción al estudio de la *terra sigillata*. *Estructuras de producción y comercialización*, Centro de Estudios Universidad y Progreso, Andújar.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., 2011, Decoración y conceptualización. Una propuesta metodológica, *CVDAS, Revista de Arqueología e Historia* 9-10, 119-136.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., 2012, Estructuras de producción y comercialización de los centros de producción de *terra sigillata* hispánica. La Baetica, *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada* 22, 379-396.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I. (coord.), 2013, *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén (España)*, Quasar, Roma.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., 2015, El centro de producción de *terra sigillata* hispánica de Los Villares de Andújar, Jaén, España, en M.I. FERNÁNDEZ GARCÍA, P. RUIZ MONTES y M.V. PEINADO ESPINOSA (eds.), *Terra Sigillata Hispánica: 50 años de Investigaciones*, Quasar, Roma, 57-84.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I. y SERRANO ARNÁEZ, B., 2013, Estructuras humanas de producción, en M.I. FERNÁNDEZ-GARCÍA (coord.), *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén España*, Quasar, Roma, 91-108.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, M. I., RUIZ MONTES, P. y PEINADO ESPINOSA, M. V., 2016, Alfares y producción de cerámicas (siglos I a.C.- v d.C.), en R. HIDALGO PRIETO (coord.), *Las villas romanas de la Bética*, vol. 1, Universidad de Granada, Granada, 345-388.
- FORTE M., 2011, Cyber-Archaeology: Notes on the simulation of the past, *Virtual Archaeological Review* 2:4, 7-18.
- FORTE, M., 2014, 3D archaeology: new perspectives and challenge: the example of Çatalhöyük, *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies* 2(1), 1-29.

- GARSTKI, K., 2017, Virtual Representation: The Production of 3D Digital Artifacts, *Journal of Archaeology Method Theory* 24, 726-750.
- GRUBER, E., 2015, 3D Models as Analytical Tools, en B. OLSON y W. CARAHER (eds.), *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*, The Digital Press at the University of North Dakota, Grand Forks, 63-72.
- HEATH, S., 2015, Closing gaps with low-cost 3D, en B. OLSON y W. CARAHER (eds.), *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*, The Digital Press at the University of North Dakota, Grand Forks, 53-62.
- JAKOB, W., TARINI, M., PANIZZO, D. y SORKINE-HORNUNG, O., 2015, Instant field-aligned meshes, *ACM Transactions on Graphics* 34:6, 1-15.
- LÓPEZ-MENCHERO BENDICHO, V.M., y GRANDE, A., 2011, Hacia una Carta Internacional de Arqueología Virtual. El Borrador SEAV, *Virtual Archaeology Review* 2:4, 71-75.
- LÓPEZ-MENCHERO BENDICHO, V. M., 2013, International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles, en C. CORSI, B. SLAPSAK y F. VERMEULEN (eds.), *Good practice in archaeological diagnostics. Non-invasive survey of complex archaeological sites*, Springer, Cham, 269-283.
- MCCARTHY, J., 2014, Multi-Image Photogrammetry as a Practical Tool for Cultural Heritage Survey and Community Engagement, *Journal of Archaeological Science* 43, 175-185.
- MEZQUÍRIZ IRUJO, M. A., 1983, Tipología de la Terra Sigillata Hispánica, *Boletín del Museo Arqueológico Nacional* 1.2, 123-131.
- OLSON, B. y CARAHER, W., 2015, *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*, The Digital Press at the University of North Dakota, Grand Forks.
- PEREIRA UZAL, J. M., 2013, Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion, *PH investigación* 1, 77-87.
- PICON, M., 1998, Les mesures, par dilatométrie, des températures de cuisson des céramiques de La Graufesenque : principes et applications, *Annales de Pegasus* 3, 32-40.
- PIRES, H., ORTIZ, P., MARQUES, P. y SÁNCHEZ, H., 2006, Close-range Laser Scanning Applied to Archaeological Artifacts Documentation. Virtual Reconstruction of an xvi<sup>th</sup> Century Ceramic Pot, en M. IOANNIDES, D. ARNOLD, F. NICCOLUCCI y K. MANIA (eds.), *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, Nicosia, 2006, The Eurographics Association, Aire-la-Ville, 1-6.
- PLETINCKX, D., 2011, Virtual Archaeology as an Integrated Preservation Method, *Virtual Archaeology Review* 2:4, 33-37.
- REILLY, P., 1990, Towards a virtual archaeology, en S. RAHTZ y K. LOCKYEAR (eds.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1990*, BAR Int. Series 565, *Tempus Reparatum*, Oxford, 133-139.
- REILLY, P., 1992, Three-dimensional modelling and primary archaeological data, en P. REILLY y S. RAHTZ (eds.), *Archaeology and the Information Age. A global perspective*, Harper Collins, Londres, 147-173.
- REINHARD, A., 2015, Three- and Four-Dimensional Archaeological Publication, en B. OLSON y W. CARAHER (eds.), *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*, The Digital Press at the University of North Dakota, Grand Forks, 43-53.
- REMONDINO, F., 2006, Image-based 3D modelling: a review, *The Photogrammetric Record* 21 (115), 269-291.
- REMONDINO, F. y CAMPANA, S., 2014, *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR Int. Series 2598, Oxford.
- RIVERO, M. P., 2011, La arqueología virtual como fuente de materiales para el aula, *Íber. Didáctica de las Ciencias Sociales, Geografía e Historia* 68, 17-24.
- ROCA ROUMENS, M., 1976, *Sigillata hispánica producida en Andújar*, Instituto de Estudios Giennenses, Jaén.

- ROCHINI, C., CIGNONI, P., MONTANI, C., PINGI, P. y SCOPIGNO, R., 2001, A low cost 3D scanner based on structured light, *Computer Graphic Forum* 20:3, 299-308.
- ROSENTHAL, D. S. H., 2010, Format obsolescence: assessing the threat and the defenses, *Library Hi Tech* 28:2, 195-210.
- RUIZ MONTES, P., 2014, *Romanización y producción de cerámicas finas en las áreas periféricas de la provincia Bética: factores de implantación, comercio y desarrollo técnico en el suburbium artesanal de Isturgi Triumphale (Los Villares de Andújar, Jaén) (siglos I-II d.n.e.)*, BAR Int. Series 2642, Oxford.
- SERRANO ARNÁEZ, B., 2013, Los moldes para la producción de la *terra sigillata* decorada, en M. I. FERNÁNDEZ GARCÍA (coord.), *Una aproximación a Isturgi romana: El complejo alfarero de Los Villares de Andújar, Jaén, España*, Quasar, Roma, 233-245.
- SERRANO ARNÁEZ, B., 2015, *Estructuras humanas y económicas de producción de la Terra Sigillata Hispánica. Los productores de moldes*, Universidad de Granada (tesis doctoral inédita).
- SHOTT, M., 2014, Digitizing Archaeology: A Subtle Revolution in Analysis, *World Archaeology* 46, 1-9.
- SOTOMAYOR MURO, M., 1973, Centro de producción de sigillata de Andújar (Jaén), *XII Congreso Nacional de Arqueología (Jaén, 1971)*, 689-698.
- SOTOMAYOR MURO, M., ROCA ROUMENS, M. y SOTOMAYOR, N., 1979, Los alfares romanos de Andújar. Campañas de 1974, 1975 y 1977, *Noticiario Arqueológico Hispánico* 6, 443-497.
- STANCO, F., BATTIATO, S. y GALLO, G., 2011, *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration and Reconstruction of Ancient*, CRC Press, Boca Raton.
- WEBMOOR, T., 2007, What about 'one more turn after the social' in archaeological reasoning? Taking things seriously, *World Archaeology* 39:4, 563-578.
- WILLIAMSON, A., 2005, Strategies for managing digital content formats, *Library Review* 54:9, 508-513.