



PATRIMONIO HISTÓRICO MILITAR: DIGITALIZACIÓN 3D DE LA ESPADA NAZARÍ ATRIBUIDA A ALI ATAR

HISTORICAL MILITARY HERITAGE: 3D DIGITISATION OF THE NASRI SWORD ATTRIBUTED TO ALI ATAR

Margot Gil-Melitón^{a,*} , José Luis Lerma^b 

^a IngHeritag3D, Francisco Ortiz 10, 45005 Toledo, Spain. margot@ingheritag3d.com

^b Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. jllerma@cgf.upv.es

Lo más destacado:

- Se adapta la fotogrametría multi-imagen de objeto cercano al proceso de documentación de una espada de manufactura andalusí del s. XV.
- Se describe un flujo de trabajo optimizado para documentar un objeto complejo: espada histórico-nazarí recubierta de metales y materiales preciosos.
- La digitalización 3D puede contribuir a la democratización de los museos gracias a la diseminación web de su contenido de una manera personalizada.

Extended Abstract:

Ali Atar, Warden of Loja and Lord of Zagra, was born around 1393. He was one of the principal military leaders of the Nasrid period and came to join the Grenadine Royal House by marrying his daughter Moraima with Boabdil, the last King of Granada. He died in the battle of Lucena in 1483, where one of the magnificent jineta swords of Andalusí manufacture was snatched, which is now conserved and located in the collection of the Toledo Army Museum (MUSEJE). The MUSEJE collections house important scientific, technical, historical and artistic heritage. The historical military heritage needs for its protection, preservation and valorisation the adaptation of new resources and benefit from the usage of new digital technologies. The physical conservation is no longer enough for a resource as valuable as cultural heritage; it needs to be complemented with a comprehensive digital preservation in all its forms, being essential and necessary for its proper safeguard. The virtual era currently emphasizes its presence in the digital documentation, preservation and dissemination of our cultural heritage. In particular, we have oriented and activated it on the historical military heritage, knowledgeable and narrator of our history, of its treasures, and of their relationship within the society as important representations of social and dynastic status. This paper is centred in the 3D digitisation by means of digital photogrammetry and 3D modelling of a historical military weapon. Aided by photogrammetry and information and communication technologies (ICT), we will achieve precise geometric documentation and 3D models that are geared towards research, education, diffusion and the preservation of heritage as important and unknown as is historical military heritage. Photogrammetry gives us the opportunity to bring to light the Ali Atar's sword, one of the most relevant artistic manifestations belonging to the Nasri armament (Fig. 1, Table 1). The multi-view close-range photogrammetry is key to virtualise this jewel and also to contribute to the democratisation of the museum through the web dissemination of its content in a personalized way.

Materials such as metals and precious stones, and gold techniques present in the Andalusian weapon required a particular photogrammetric data acquisition using a light booth and polarizing filter (Fig. 10), as suggested for the latter by (Guidi, Gonizzi, & Micoli, 2014). This setup brought a substantial improvement when dealing with highly reflective materials such as the metallic blade of Ali Atar's jineta sword. The use of the polarising filter attenuated the light that affects and reflects in the piece, benefiting both data acquisition and processing to deliver 3D models. We offered some results ready to safeguard, preserve and disseminate the jineta sword as a high-quality 3D model (Fig. 17), with submillimetre precision from which to obtain all the necessary metric deliverables. From the dense point cloud, two meshes were delivered: i) a homogeneous high resolution mesh keeping all the original features for archiving, conservation and research, and ii) a medium resolution mesh for web-based visualisation and dissemination. The aim was to achieve a detailed geometric documentation as well as complete and accurate 3D models for web repositories (<https://skfb.ly/ZzzA>), orthoimages (Figures 31 and 32) that allow us to plot from CAD programs all the ornamental and decorative information of the piece (Figures 33 and 34). In addition, we present some results related to monitoring and evaluation of changes in the state of conservation of the piece (Figs. 35, 36 and 37), extending the survey to preventive conservation studies.

This research proves the value of geometric documentation techniques for the democratisation of museums. It contributes to improving the research processes, opening a new line of study. From this point we can rebuild the past

* Corresponding author: Margot Gil-Melitón, margot@ingheritag3d.com



through the virtuality, being able to mark and confirm historical hypotheses. These techniques offer the chance to give value to relevant and singular pieces in and out of museums. Both heritage and virtual archaeology are fundamental pillars to delve into the future of education and knowledge.

Keywords: virtual heritage; bladed weapon; photogrammetry; 3D model; plotting; web visualisation

Resumen:

Ali Atar, alcaide de Loja y señor de Zagra, nació hacia el año 1393. Fue uno de los principales jefes militares del periodo nazarí y llegó a emparentar con la Casa Real Granadina al casar a su hija Moraima con el mismo Boabdil, último Rey de Granada. Falleció en la batalla de Lucena en 1483, donde se le arrebató una de las magníficas espadas jinetas de manufactura andalusí conservada y localizada en los fondos del Museo del Ejército de Toledo (MUSEJE). Un recurso tan valioso como es el patrimonio cultural ya no se conforma con una conservación física; debe complementarse de una preservación digital exhaustiva en todas sus formas, siendo básico y necesario para su adecuada salvaguarda. Este artículo se centra en la digitalización tridimensional (3D) a partir de la fotogrametría digital y el modelado 3D de esta pieza de armamento histórico militar. Apoyándonos en la fotogrametría y en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), vamos a obtener una documentación geométrica de precisión y unos modelos 3D orientados a la investigación, educación, difusión y preservación de un patrimonio tan importante y desconocido como es el patrimonio histórico militar. Esta investigación demuestra la importancia de las técnicas de documentación geométrica para la democratización de los museos. Contribuye a mejorar los procesos de investigación, abriendo una nueva línea de estudio, a partir de la cual, podemos reconstruir el pasado a través de la virtualidad, pudiendo así marcar y confirmar hipótesis históricas. Estas técnicas ofrecen la posibilidad de poner en valor piezas relevantes y singulares dentro y fuera de los museos.

Palabras clave: patrimonio virtual; arma blanca; fotogrametría; modelo 3D; restitución; visualización web

1. Introducción

La era digital nos ofrece la posibilidad de construir el pasado a través de la virtualidad. Esto es posible aplicando la tecnología digital como catalizador (Forte, 2010; Forte, 2011). La tecnología es un instrumento al servicio de la investigación y de la educación, y por tanto, debe estar en el lugar adecuado, ya que es un medio realmente eficaz para la información, el conocimiento y, por supuesto, la divulgación.

El avance tecnológico ha ayudado a la generación de un gran número de proyectos en pro de la arqueología y el patrimonio virtual. Proyectos centrados en el campo del patrimonio cultural mueble y algunos de ellos, en el del patrimonio histórico militar internacional (Sikh-Museum, 2017).

El objetivo principal de estas iniciativas es el de memorar elementos pertenecientes a diferentes herencias patrimoniales, facilitando su comprensión y acercándolas más al público a través de juegos y modelos 3D interactivos, entre otros.

Las acciones futuras van orientadas a ofrecer soluciones geomáticas de vanguardia que faciliten las labores de difusión y preservación del patrimonio histórico militar, sin que este, esté limitado al material armamentístico (Gil-Melión & Lerma, 2016).

La investigación que a continuación se muestra está centrada en la documentación geométrica, el modelado y la reconstrucción 3D a partir de la fotogrametría digital. Estos procesos se han aplicado sobre una de las piezas más emblemáticas localizada en los fondos del Museo del Ejército de Toledo (MUSEJE), la espada jineta de Ali Atar (Fig. 1). Una joya del s. XV; una de las magníficas espadas de manufactura andalusí que se conservan en España (Tabla 1).

Afrontamos técnicas innovadoras sobre unos materiales tan complejos como son los metales, consiguiendo una

serie de resultados aptos para dotar al Bien de Interés Cultural (BIC) de una información tanto 3D como histórico-documental completa para su correcta salvaguarda.

Queremos vincular a la pieza toda su información relevante. Estos metadatos nos describirán las características de nuestro objeto que lo dotarán de toda la información necesaria que lo ayude a identificar, descubrir y valorar. Una información extraordinaria para campos tan necesarios como la educación, la investigación, su preservación y difusión.

Con estos métodos, y siendo fieles a la Carta de Londres (Denard, 2009; London-Charter, 2017), documento internacional de referencia en los campos del patrimonio cultural y las TICs, y a los Principios de Sevilla (Principios-Sevilla, 2016; López-Mencheró, 2013) cumplimos los principios de complementariedad, autenticidad y transparencia científica.

La digitalización 3D puede contribuir a la democratización de los museos a través de la diseminación web de su contenido de una manera personalizada.

Apostamos por una cultura que nos prepare para investigar, y desde este proyecto vamos a demostrar lo que la investigación puede aportar a la sociedad. Para ello creemos en la puesta en valor del talento en beneficio del legado arqueológico y patrimonial.



Figura 1: Espada jineta de Ali Atar. Imagen tomada en los talleres del MUSEJE. Febrero de 2016.

Tabla 1: Características de la espada jineta de Ali Atar. Información cedida por el MUSEJE.

Nivel de protección	Bien de interés Cultural (BIC)
Número de inventario	ME (CE) 22904
Institución	Museo del Ejército de Toledo
Ejército	Ejército de Tierra
Estatus del fondo	Original
Estado de Conservación	Bueno
Cronología	S. XV
Fecha Histórica	1480
Fecha de producción	1450-1483
Justificación de producción	Datación por obras publicadas
Lugar de Producción	Granada (España)
Cultura/Estilo	Hispano musulmana/Nazarí
Materiales	Acero, oro, marfil
Técnicas	Forjado, dorado, eboraria, troquelado
Decoraciones	Ataurique, epigráfica, lacería
Dimensiones	Longitud total 98.5 cm Longitud de la hoja 81 cm
Peso	947 g

2. Reseña histórica

2.1. Biografía

Ali Atar o Alatar nació hacia el año 1393 y murió en Lucena en 1483. Su verdadero nombre es desconocido. Algunos autores creen que su patronímico era de Ibrahim y que su nombre Ali Atar viene de una degeneración del apodo que le dieron de Alhatar o Alatar que en árabe significa “vendedor de perfumes, comerciante de drogas o droguero”, apodo que le dieron por ser este su primitivo oficio que desempeñó en su juventud, si bien otros afirman que fue vendedor de agua o aguador.

En plena juventud parece que se dedicó a la carrera de las armas, llegando a distinguirse en esta profesión de un modo notable. A pesar de su origen humilde llegó por su valor a ocupar los primeros puestos de la milicia; venció en numerosos encuentros cristianos, siendo su victoria más importante la que alcanzó en Loja en 1482, en la que pereció el gran maestro Calatrava.

Al año siguiente su yerno Boabdil, que se había proclamado Rey por consejo suyo, salió a la campaña contra los cristianos sufriendo el desastre de Lucena, luchando él mismo a la edad de noventa años y muriendo como consecuencia de esta batalla (Makariou & Bernus-Taylor, 2000; Torres, 1949).

2.2. Descripción del fondo

Fue la primera de las espadas hispanoárabes en ingresar en las colecciones del MUSEJE. Pertenece al escaso conjunto de espadas jinetas conservadas en el mundo.

Esta espada jineta se piensa que pudo pertenecer a Ali Atar, alcaide de Loja y señor de Zagra. Este fue uno de los principales jefes militares del periodo nazarí y llegó a emparentarse con la casa real granadina al casar a su hija Moraima con el propio Boabdil, último Rey de Granada. Ali Atar falleció en el mismo combate en el que fue hecho prisionero su yerno Boabdil, en la batalla de Lucena (21 de abril de 1483), y la espada le fue arrebatada, tras caer muerto entre unas rocas del río Genil, por Lucas Hurtado, quien se la regaló al señor de Palma.

La espada, que carece de vaina, posee una hoja ancha y larga con dos filos corridos y vaceo central hasta la mitad de la hoja. Este vaceo presenta restos de un punzón (Fig. 2a). En su parte final tiene una marca formada por dos círculos concéntricos en cuyo interior aparecen varias letras prácticamente imperceptibles, que parecen ser de origen árabe. Por lo tanto, nada lleva a pensar que la hoja de la espada no sea la original y de procedencia peninsular, ya que, por otra parte, eran tenidas en gran consideración, ante, por ejemplo, las realizadas en la zona egipcia. La punta está partida y perdida (Dueñas, 2014).

Su empuñadura, la clásica en este tipo de espadas nazarís, está formada por tres secciones. La primera la forma un pomo con forma de cúpula bulbosa dorada (Fig. 2b). La segunda es un puño tripartito (Fig. 2c), en cuya parte central aparecen en bandas caladas, diferentes epigrafías y decoraciones a base de palmetas, atauriques y cordones de la eternidad. Las inscripciones que aparecen en el puño fueron traducidas por F. Fernández y González como (Dueñas, 2007):

El imperio perpetuo

La gloria permanente

La tercera parte de la empuñadura (Fig. 2d), está formada por un arriaz dorado curvo, propio de este tipo de espadas, rematado en cabezas de elefantes adornadas en la parte exterior de las trompas con veintidós placas caladas. El uso de cabezas de animales rematando los arriaces es un elemento presente en empuñaduras orientales ya desde el siglo XIII. El escudete del arriaz aparece pentalobulado y con decoración a base de atauriques y lacerías, todo también dorado (Dueñas, 2007).

No es mucho lo que se sabe sobre este tipo de armas que utilizaban los ejércitos de la última dinastía árabe hispana. Se tiene claro algunos aspectos; el mundo hispanoárabe y el cristiano se influenciaban mutuamente produciéndose fenómenos de aculturación mutuos. Esto quiere decir que en muchas ocasiones las armas usadas por ambos bandos no diferían en exceso.

Una segunda influencia, en la forma y materiales de las espadas granadinas, hay que buscarla en el propio ámbito político-religioso en el que estaba inmersa la dinastía nazarí. Los flujos de población procedentes de otras zonas del imperio árabe, especialmente del norte de África, y las relaciones comerciales con otras zonas situadas más al oriente, aportaron formas de combatir y con ello diferentes tipos de armas (Dueñas, 2007).

La mayor fuente de información que se posee sobre espadas granadinas procede de la escasa decena de ejemplares que han llegado hasta nuestros días. Algunas de ellas se encuentran fuera de España, como por ejemplo en el *Staatliche Kunstsammlung* de



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2: Imágenes de detalle de la espada tomadas en los talleres del MUSEJE (febrero de 2016): a) Imagen del punzón marcado en el reverso de la hoja; b) Pomo bulboso de la empuñadura; c) Empuñadura; d) Arriaz de la empuñadura.

Kassel, el *Metropolitan Museum* de Nueva York y el *Cabinet de Medailles de la Bibliothèque Nationale* de París. En nuestro país son tres los museos que tiene la suerte de albergar entre sus fondos este tipo de piezas: el MUSEJE –único que posee dos ejemplares–, el Museo Arqueológico Nacional (Madrid) y el Museo de San Telmo en San Sebastián (Dueñas, 2007).

2.3. Procedencia de la pieza y su ingreso en el MUSEJE

Esta pieza, como se ha documentado anteriormente, pertenecía, al parecer, al Señor de Palma Don Luis de Portocarrero, quién la donó al monasterio cordobés de San Jerónimo de Valparaíso. De allí salió cuando la comisión provincial desamortizadora se incautó de dicha espada, y la entregó a la comisión de Ciencias y Artes, quienes la depositaron en el Colegio de Humanidades de la Ascensión de Córdoba. Su entrada en el entonces Museo de Artillería se debió a las gestiones que ante el Ministerio de Gobernación realizó el coronel director del Museo de Artillería D. Santiago Piñeiro, quien conocía la existencia de dicha espada (Dueñas, 2007).

3. Metodología

Se entiende por geomática el conjunto de ciencias que integran los medios para la captura, procesamiento, análisis, tratamiento, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital geoespacial o localizada. La topografía clásica, los sistemas de navegación satelital, el georradar, los sistemas de escaneado láser, la teledetección, la fotogrametría, etc., son esenciales tanto para la observación del territorio como para la gestión de riesgos naturales. Si tenemos en cuenta el sentido pragmático de estas técnicas que actúan a diferentes escalas y en diferentes medios, reforzadas permanentemente por las TIC, puede comprobarse que son totalmente aptas, necesarias e imprescindibles para documentar, gestionar y evaluar el patrimonio cultural (Stylianidis & Remondino, 2016; Iturbe, Cachero, Cañal, & Martos, 2018).

La incorporación de actividades multidisciplinares en este proceso, nos descubre un patrimonio vivo, interactivo, práctico y abierto al mundo. Estas técnicas geomáticas son un merecido soporte para la puesta en valor y difusión del patrimonio histórico militar.

En concreto, esta investigación se ha apoyado en la fotogrametría digital (Slama, Theurer, & Henriksen, 1980), una de las técnicas de documentación avanzada que nos ofrece la posibilidad de obtener productos vinculados con la representación patrimonial.

La fotogrametría puede utilizarse en múltiples escenarios y con múltiples propósitos (Lodeiro, 2010). Dependiendo de la finalidad del proyecto, los resultados pueden ser variados (Lerma, Cabrelles, Navarro, & Seguí, 2011), tendiendo en la última década a la generación de modelos 3D (Historic England, 2017; Remondino & El-hakim, 2006; Nex & Remondino, 2014; Chiabrandino, D'Andria, Sammartano, & Spanò, 2018).

Queremos un método seguro, con precisión submilimétrica y que posea un grado de comportamiento frente a texturas y materiales, lo más alto y fiable posible. Las reglas 3 x 3 adaptadas

inicialmente a la fotogrametría arquitectónica (Waldhäusl, Ogleby, Lerma, & Georgopoulos, 2013) han marcado un procedimiento fotográfico básico para la documentación patrimonial. Estas reglas 3 x 3 adoptadas por CIPA (Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica, actualmente Comité Científico Internacional ICOMOS/ISPRS para la Documentación del Patrimonio Cultural). No obstante, se recomienda consultar las últimas tendencias en cuanto al registro, la documentación y la gestión de la información 3D en el campo de la conservación patrimonial (Stylianiadis & Remondino, 2016).

4. Toma de datos en el MUSEJE

El Museo del Ejército, localizado en el Alcázar de Toledo (Fig. 3), tiene expuestas aproximadamente una sexta parte del total de sus fondos. La mayoría de las piezas están localizadas en los almacenes y en muy pocas ocasiones han sido mostradas al público. La digitalización 3D les da vida a las piezas mostrándolas al mundo exterior y abriendo nuevas vías de investigación.



Figura 3: Alcázar de Toledo. Alberga en su interior el MUSEJE.

Con el uso y la aplicación de tecnologías innovadoras y sin contacto se irán obteniendo modelos 3D de las piezas objeto de estudio, obteniendo una documentación geométrica adecuada, tanto para la elaboración y puesta en marcha de su ficha documental 3D con fines de investigación, difusión, preservación y educación, como para mostrar y poner en conocimiento del MUSEJE un amplio abanico de resultados, aplicables a la espada jineta de Ali Atar e incluso a otras piezas de sus fondos.

4.1. Proceso fotogramétrico

La toma fotogramétrica de la pieza a estudio se ha realizado en el interior de los talleres del MUSEJE (Fig. 4).

La pieza se fija sobre una cama de material no contaminante (Fig. 5), y se coloca sobre la superficie de trabajo. Expertos en la materia, nos informan acerca de la historia de la pieza, su uso, y detalles que podrían ser interesantes localizar y documentar geométricamente en la actualidad o en posibles investigaciones futuras. Confirmamos que cualquier movimiento, giro o desplazamiento de la pieza tiene que ser realizado por los conservadores, restauradores o personal cualificado para ello.

La digitalización 3D se ha realizado con fotogrametría digital a partir de la toma exhaustiva de múltiples imágenes digitales, con recubrimiento elevado.



Figura 4: Taller de metales del Museo del Ejército.



Figura 5: Imagen de la espada colocada para la toma de datos. Taller del Museo del Ejército.

Para evitar excesos a la hora de manipular la pieza, se ha realizado parte del procesado fotogramétrico en los talleres del MUSEJE. El programa utilizado en la etapa de procesamiento fue Agisoft PhotoScan Pro v. 1.1.6. No procedemos a la retirada de la pieza hasta que no se obtiene una correcta orientación de las imágenes y una vez comprobada la nube densa de puntos. De esta manera, el trabajo de toma de datos se ralentiza bastante ya que tanto el procesado de orientación como la obtención de la nube densa de puntos conllevan varios días de trabajo.

Habitualmente, se recomienda matizar superficies reflectantes para evitar brillos. Nosotros hemos evitado la aplicación de productos sobre las piezas por el efecto que esta acción podría conllevar sobre el BIC.

Se realizó un estudio previo y planificación de la toma fotogramétrica de manera que se garantizara la precisión deseada en los eventuales modelos 3D resultantes. Para ello, se analizó la dimensión de la pieza, el solape ideal (entre el 60 y el 90%), el tamaño del píxel sobre el objeto (también identificado en inglés por las siglas GSD, *Ground Sampling Distance*), la distancia principal y los ángulos de visión fotográficos. Con todo ello, se calcularon los valores necesarios para la toma de datos fotogramétrica.

Las diferentes comprobaciones y pruebas realizadas en esta investigación nos llevan a concretar que en el caso de los metales el elemento fotografiado debe aparecer

en un elevado número de fotografías y con el máximo solape posible. De esta manera evitamos el ruido generado por los efectos de la luz sobre la pieza. Conseguimos así un pixel estable y seguro a la hora de construir una nube densa de puntos firme que nos aporte un correcto modelo 3D y una documentación geométrica de alta calidad. Esto nos facilita el trabajo a la hora de buscar continuidad entre imágenes.

La distancia de muestreo (GSD) nos determina la resolución del modelo que vamos a crear. Nos define cuánto mide un píxel sobre el objeto. En este proyecto se fijó un GSD máximo de 0.1 mm (100 μ m). Además, para conseguir una precisión submilimétrica trabajaremos con un elevado solape y varias pasadas lo que nos facilitará un correcto resultado final. La escala se fijará a partir de las mediciones realizadas con un calibre calibrado con lectura de 0.05 mm.

Para una distancia principal de 16 mm (24 mm equivalente en formato completo –*Full Frame*, FF), se estableció una distancia cámara-objeto de 30 cm. También se calculó para una distancia principal de 24 mm (36 mm equivalente FF) obteniendo una distancia cámara-objeto de 50 cm.

Se ha trabajado con el dato más desfavorable, consiguiendo así un mayor número de imágenes que nos asegura una mejor geometría. De esta manera también aprovechamos más los píxeles de la cámara y evitamos que el modelo 3D en estado sólido, sin textura, aparezca con un aspecto rugoso o de piel de naranja.

Teniendo en cuenta estos datos, adoptamos para la ejecución del proyecto una distancia cámara objeto de 35 cm para una distancia principal (f) de 24 mm, de esta manera, al disminuir la distancia cámara-objeto de 50 a 35 cm, incrementamos el número de imágenes con solape o recubrimiento correcto, consiguiendo así una exactitud a priori de entre 0.2 - 0.3 mm.

Así, se estableció para la pieza con una longitud media de 1 m, 34 fotos por pasada (con separación entre tomas de 3 cm), manteniendo un solape de 91% longitudinal; la distancia transversal entre pasadas se estableció de 2 cm, lo que equivale a un recubrimiento transversal del 92 %. Por lo tanto, se estimó para las caras principales de la espada un bloque de 5 pasadas y 34 imágenes por pasada en cada una de ellas (anverso y reverso). Para cubrir los laterales de la espada se establecieron dos bloques; el primero destinado a la empuñadura (25 cm de longitud) donde se realizaron 3 pasadas y 10 imágenes por pasada en cada lateral. El segundo bloque destinado a los filos de la hoja se determinó en 2 pasadas de 30 imágenes por pasada para cada lado. Finalmente se tomaron imágenes con recubrimiento para cubrir el extremo del pomo bulboso, la punta de la espada y zonas ocultas de la espada.

Se calcularon los mínimos giros de la pieza para asegurar también una mínima manipulación de la misma por la persona responsable.

Obtenida la correcta toma fotogramétrica compuesta en este caso de 539 imágenes digitales a color, procedemos al tratamiento de toda la información.

Se empleó para la toma fotogramétrica la cámara digital Sony Alpha A6000 Exmor® CMOS

de 24.3 Mpx efectivos, (6000 x 4000 píxeles; relación 3:2), sensor APS-C (23.5 x 15.6 mm), objetivo 16/50 mm estabilizado, y un tamaño del pixel de 3.9 μ m. La cámara se calibró con tal de alcanzar la máxima precisión en la obtención del modelo fotogramétrico. Las diferentes tomas se realizaron con la misma abertura (F/13), tiempos de exposición de 5 s y enfoque manual.

La calibración se realizó inicialmente con Agisoft Lens con los 11 parámetros adicionales reflejados en la Figura 6; la Figura 7 muestra la curva de distorsión radial.

Agisoft PhotoScan permite calibrar de forma semiautomática a través de la información EXIF de cada una de las imágenes, o a partir de una calibración previa (formato XML resultante de Agisoft Lens), como es nuestro caso (Fig. 6). Pero esta calibración no deja de ser una estimación de los parámetros adicionales en el momento de la calibración, que pueden diferir (con seguridad) de los estimados en el momento de la toma. La Tabla 2 muestra los nuevos parámetros adicionales alcanzados tras la calibración de la cámara realizada durante el proyecto, y que serán los que se utilicen en el proceso de orientación de las 539 imágenes que componen el proyecto; se considera únicamente una distancia principal ($f_x = f_y$), las coordenadas del punto principal (c_x, c_y), y tres parámetros de distorsión radial (k_1, k_2 y k_3).

Parameter	Value	Std Error
Image width	6000	
Image height	4000	
Focal length (x)	6205.11	3.40555
Focal length (y)	6206.43	3.35313
Principal point (x)	2968.33	1.35235
Principal point (y)	1938.24	1.15132
Skew	0.161851	0.156469
Radial K1	0.0163215	0.00412762
Radial K2	-0.186507	0.0493228
Radial K3	0.946922	0.232793
Radial K4	-1.35596	0.141343
Tangential P1	-0.00279562	4.82059e-05
Tangential P2	-0.000269694	7.11697e-05

Figura 6: Parámetros de calibración estimados procedentes de Agisoft Lens para una distancia principal (f) de 24 mm

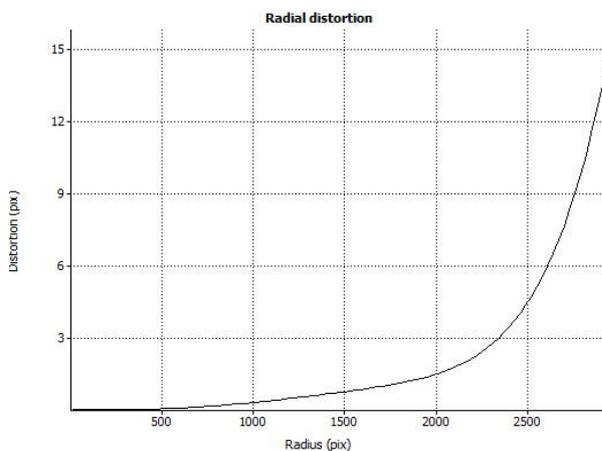


Figura 7: Curva de distorsión radial calculada durante el proceso de calibración de la cámara, $f = 24$ mm.

Tabla 2: Valores obtenidos en la calibración durante el proyecto con Agisoft PhotoScan.

Parámetro	Valor inicial	Valor ajustado
fx	6205.11	6201.91
fy	6206.43	6201.91
cx	2968.33	2964.82
cy	1938.24	1978.9
k1	0.0163215	0.00462936
k2	-0.186507	0.0221627
k3	0.946922	0.0261118
k4	-1.35596	0
p1	-0.00279562	0
p2	-0.000269694	0
Skew	0.161851	0

4.2. Inconvenientes y soluciones encontradas

El principal inconveniente del proceso de documentación se deriva de los materiales de los que está fabricada esta fabulosa espada jineta. Estos materiales y el reflejo de la luz sobre ellos no nos permitían mantener una configuración adecuada de toma que cumpliera con las normas fotogramétricas. Adicionalmente, las limitaciones de movimiento de la pieza complicaron sustancialmente la etapa de toma fotogramétrica.

La reflexión de la luz depende del grado de rugosidad de la superficie donde incide la luz. Hay dos tipos de reflexiones:

- Reflexión especular: ocurre cuando la luz incide sobre una superficie lisa, como el espejo o el metal pulido.
- Reflexión difusa: ocurre cuando la luz se refleja sobre una superficie rugosa; es la más común.

El metal refleja las fuentes de luz como si de un espejo se tratara. Las luces se reflejan opuestamente a la dirección a la que inciden. Debido a esto, para cumplir las normas fotogramétricas anteriormente definidas y siguiendo las recomendaciones de (Guidi, Gonizzi, & Micoli, 2014), se trabajó con filtro polarizador (Fig. 8), y bajo una cabina de luz (Fig. 9) fija al trípode con un brazo articulado, de manera que, además de controlar los reflejos producidos por la luz, las tomas fotogramétricas cumplieran las condiciones ideales.

En nuestro caso, como vemos en la Figura 10, el uso de filtro polarizador matiza bastante la luz que incide y se refleja en la pieza objeto de estudio. Los filtros de polarización ayudan mucho a mejorar la calidad de la

**Figura 8:** Filtro polarizador circular PL- Kenko 40.5 mm.**Figura 9:** Cabina de luz.

(a)

(b)

Figura 10: Zona aislada de la hoja de la espada: a) Imagen capturada sin filtro polarizador; b) Imagen con filtro polarizador.

imagen sobre todo en materiales cerámicos (Guidi et al., 2014); en nuestro caso, se produjo un cambio sustancial en las imágenes obtenidas con el filtro polarizador, lo que evidencia una mejora en materiales claros y altamente reflectantes como es la hoja metálica de la espada. De esta manera, conseguimos digitalizar tridimensionalmente la pieza minimizando los errores, obteniendo así una documentación geométrica fiel.

Otro de los inconvenientes a la hora de obtener el modelo fotogramétrico 3D fue el filo de la hoja de la espada. Inicialmente, se escogió la opción de trabajar con todas las imágenes obtenidas (539 fotografías) y así lograr el modelo 3D completo de la espada.

Al procesar todas las imágenes se obtenía una buena orientación de la mayoría de ellas. En cambio, cuando procedimos a construir la nube densa de puntos

apreciamos una falta de fusión entre las dos partes de la hoja, llegando a cruzarse a la altura del final del vaceo central de la misma (Fig. 11). El filo de la espada dificultó notablemente el proceso de reconstrucción 3D. Teniendo en cuenta estos resultados, el trabajo se planificó el realizar el procesamiento por partes.



Figura 11: Modelo 3D resultante (no final) de la espada en el que se aprecia el error de fusión derivado (cruce de las dos caras de la hoja).

La finalidad era lograr tanto una documentación geométrica detallada como unos modelos 3D completos y precisos. Para ello decidimos realizar varios modelos fotogramétricos de diferentes partes de la pieza:

- El modelo 3D de la empuñadura aislada. Esto facilita la obtención de unos resultados más precisos, ya que el ordenador trabaja con menos imágenes que en origen y ofrecemos mejores resultados, una mejor calidad para su posterior estudio y capacidad de investigación.
- La obtención de un modelo que contuviera la empuñadura y una sección de la hoja donde se lograra mantener su geometría, sin que esta se fundiera o se perdiera, ya que en esta sección de la espada el filo de la hoja tiene un mayor espesor. Para conseguir esto, se realizaron una serie de estudios en varias partes de la hoja para comprobar hasta donde podíamos mantener el filo constante y con una geometría correcta, dependiendo de su espesor.

Para cubrir la espada al completo, se realizaron dos modelos adicionales:

- Empuñadura completa + anverso de la hoja.
- Empuñadura completa + reverso de la hoja.

5. Flujo de trabajo

Se concretó desde el inicio de la investigación la relevancia de lograr una alta calidad en el modelo 3D definitivo. A partir de esta condición y habiendo profundizado en el estudio de los diferentes inconvenientes, establecimos nuestro propio flujo de trabajo, que se describe a continuación.

Construiremos una nube de puntos densa en alta calidad, posteriormente marcaremos unos valores para poder obtener las diferentes mallas 3D variando el número de caras y por tanto su densidad. En este caso:

- Malla de calidad alta.
- Malla de calidad media.
- Malla de calidad baja.

En la malla construida en calidad alta, la superficie aparece más homogénea respecto a la pieza original y

por tanto aporta una correcta documentación geométrica (Fig. 12a). En cambio, en el caso de la malla calculada en calidad baja está demasiado facetada y se aprecian los vértices de cada una de las caras: es un modelo muy pobre desde un punto de vista geométrico (Fig. 12b). Calcular una malla de calidad media fue determinante a la hora de seleccionar el modelo 3D adecuado para cargarlo en una plataforma web, que a su vez sea fácil de manejar e interactuar con él y capaz de llegar a los usuarios.

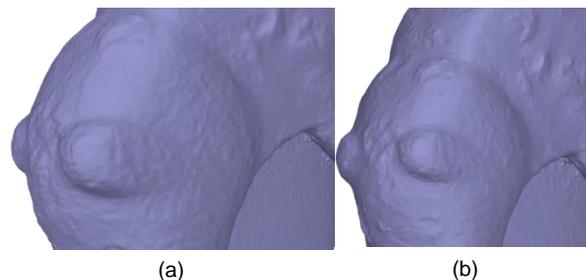


Figura 12: Detalle del modelo 3D del arriaz de la espada: a) Calidad alta (1567965 caras); b) Calidad baja (174218 caras).

Se calcula una única textura en alta calidad, común para cada uno de los modelos 3D calculados, que estará formada por el mismo número de imágenes y compartirán parámetros de construcción (Fig. 13).



Figura 13: Mapa de textura en alta calidad perteneciente a la espada.

El proceso de escalado del modelo 3D se realizó a partir de diferentes mediciones tomadas sobre la pieza objeto de estudio, durante el proceso previo de toma de datos. Estas mediciones se realizaron con el apoyo de un calibre calibrado, modelo Vogel Germany de precisión 0.05 mm (Fig. 14).

Se realizó una toma de distancias destinadas al proceso de escalado, obteniendo un error en PhotoScan de 0.351 mm, y otra serie de mediciones adicionales con fines de comprobación. En el proceso de comprobación entre las distancias medidas con calibre y sobre el modelo 3D los errores fueron inferiores a 0.6 mm.



Figura 14: Calibre calibrado propiedad del MUSEJE utilizado en la toma de medidas destinadas al escalado de la pieza.

Los flexómetros y escalas gráficas utilizados en las Figuras 15 y 16, respectivamente, permiten dar sensación del tamaño de la espada.



Figura 15: Imagen destinada a referenciar objeto.



Figura 16: Imagen tomada durante la toma fotogramétrica con apoyo de la escala gráfica utilizada exclusivamente para indicar magnitudes del objeto.

6. Resultados

A continuación se muestran los modelos 3D generados incluyendo los detalles de las distintas partes de la espada, y los productos creados a partir de ellos, como son los modelos 3D para su visualización online, las ortoimágenes, las planimetrías obtenidas por restitución fotogramétrica, y la localización de zonas con pérdida de material.

6.1. Modelos 3D

6.1.1. Empuñadura

La Figura 17 muestra el modelo 3D texturizado de la empuñadura aislada de la espada, construido en alta calidad.



Figura 17: Empuñadura de la espada. Modelo 3D a partir de malla en alta calidad.

6.1.2. Pomo de la empuñadura

La Figura 18 muestra en detalle el pomo bulboso y dorado de la empuñadura de la espada a partir de un modelo 3D sólido (Fig. 18a) y un modelo 3D texturizado (Fig. 18b), construidos en alta calidad.

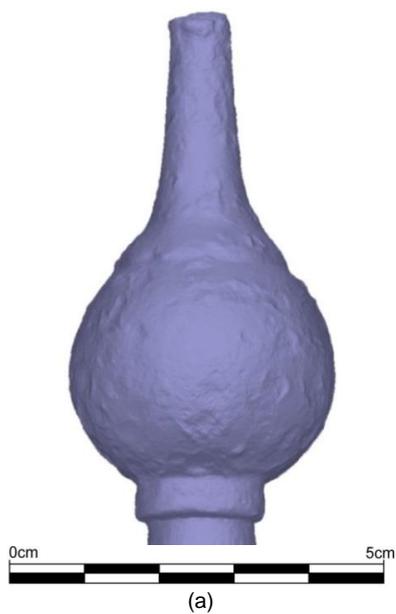
Podemos apreciar con precisión submilimétrica, el desgaste y la pérdida de material de la zona del pomo bulboso de la empuñadura en el modelo 3D (Fig. 18a). Estas zonas de desgaste coinciden con la falta de material que se observa en el modelo 3D texturizado (Fig. 18b).

6.1.3. Zona central del puño tripartito

Lograr productos como el que se aprecia en el detalle del puño tripartito de la espada jineta de Ali Atar, trabajar en la construcción de modelos 3D en alta calidad (Fig. 19), facilitan una apuesta por la educación y la investigación interactiva, además de ser beneficioso para la preservación y divulgación del patrimonio histórico militar.

6.1.4. Arriaz dorado

El proceso de escalado del modelo 3D de la pieza nos ofrece la posibilidad de controlar cada una de las zonas deterioradas o simplemente la medición de cualquier detalle que se quiera documentar y/o investigar (Figs. 20 y 21).



(a)



(b)

Figura 18: Modelo 3D en alta calidad del pomo de la espada: a) modelo 3D sólido; b) modelo 3D texturizado.



(a)



(b)

Figura 19: Detalles extraídos del modelo 3D en alta calidad de la zona central del puño tripartito de la empuñadura de la espada: a) modelo 3D en modo sólido; b) detalle texturizado extraído del modelo 3D.



Figura 20: Detalle del arriaz de la empuñadura. Modelo 3D texturizado.



Figura 21: Detalle de medidas sobre el arriaz dorado de la empuñadura. Modelo 3D texturizado.

En los detalles adjuntos del arriaz de la empuñadura (Figs. 21 y 22), podemos localizar algunas de las mediciones realizadas sobre el modelo fotogramétrico (Tabla 3).

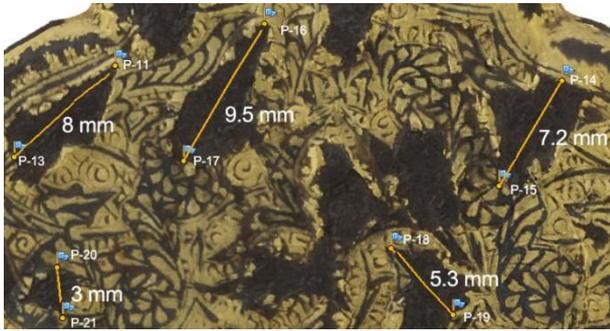


Figura 22: Detalle de medidas sobre el arriaz dorado de la empuñadura. Modelo 3D sólido.

Tabla 3: Medidas tomadas sobre el anverso del arriaz dorado.

Segmento	Distancia (mm)
P11–P13	8
P14–P15	7.2
P16–P17	9.5
P18–P19	5.3
P20–P21	3

Se demuestra por tanto la importancia y la validez de la digitalización 3D y, por tanto, de la documentación geométrica de precisión. Esta documentación facilita una profunda investigación manipulando virtualmente la pieza todo lo necesario. De no ser por la facilidad del estudio digital, en la mayoría de los casos no sería posible debido a la difícil o imposible manipulación de estas obras de arte.

La vista del detalle del arriaz en modo sólido sin textura (sombreado monocromático), nos facilita la percepción y el estudio del desgaste del material (Fig. 23). En muchas ocasiones es imposible un estudio exhaustivo sobre la pieza física debido a que la textura oculta el verdadero relieve, y llega a limitar el seguimiento y la evaluación de los cambios producidos, ya sea por agentes externos o por el paso del tiempo.

Esta pérdida de superficie metálica producida por oxidación y la consecuente falta del sobredorado que devora el arriaz de la empuñadura (Fig. 24), también la encontramos en el pomo bulboso (Fig. 25).

6.1.5. Empuñadura y sección de la hoja

Las Figuras 26 y 27 muestran el modelo 3D texturizado de la empuñadura y una sección de la hoja construido en alta calidad, donde logramos mantener su geometría.

6.2. Modelos 3D preparados para web

Los visores online nos permiten compartir de manera pública e interactiva los modelos 3D obtenidos con distintas técnicas de trabajo. Compartir en redes sociales y/o profesionales e incluso insertar nuestros modelos 3D enlazados en una serie de documentos son varias de las capacidades que nos ofrecen estos visores en línea.

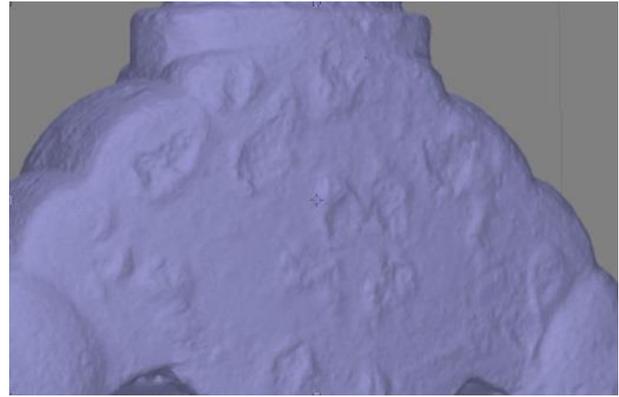


Figura 23: Vista en perspectiva de la zona del arriaz dorado de la empuñadura. Modelo 3D sólido.

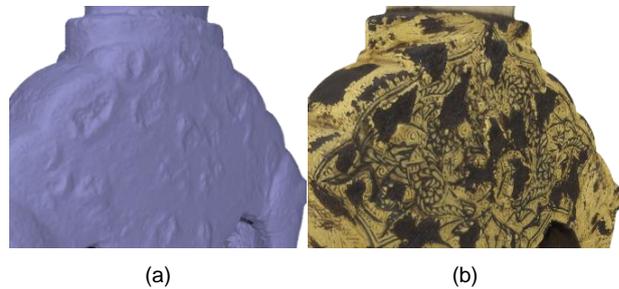


Figura 24: Detalles del estado de conservación del arriaz: a) Modelo 3D sombreado sin textura donde se aprecia la pérdida de superficie metálica; b) El detalle del modelo 3D texturizado nos muestra la falta de sobredorado.



Figura 25: Detalles del estado de conservación del pomo bulboso de la espada: a) Modelo 3D en estado sólido (sombreado) donde se aprecia la pérdida de superficie metálica; b) Modelo 3D texturizado que muestra la falta de sobredorado.



Figura 26: Empuñadura y sección de la hoja de la espada. Modelo 3D a partir de la malla (calidad alta).



Figura 27: Modelo 3D texturizado (calidad alta). Detalle del filo de la hoja de la espada.



POMO
Pomo de hierro dorado, con forma de cúpula bulbosa .

Figura 28: Detalle en Sketchfab con anotación enlazada al pomo dorado de la empuñadura de la espada.



PUÑO DE MARFIL
Puño tripartito en cuya parte central aparecen en bandas caladas, diferentes epigramas cúficas y decoración típica nazarí a base de palmetas, atauriques y cordones de la eternidad.

Figura 29: Detalle en Sketchfab con anotación enlazada al puño de marfil de la empuñadura de la espada.



FIGURAS ZOOMORFAS

El uso de cabezas de animales rematando los arriaces es un elemento presente en empuñaduras orientales ya desde el S. XIII.

Figura 30: Detalle en Sketchfab de anotación enlazada a una de las figuras zoomorfas del arriaz dorado de la empuñadura.

Sketchfab es un visualizador de modelos 3D basado en tecnología WebGL que permite reproducir modelos 3D con textura tanto en páginas web para móviles como de escritorio. A día de hoy, es uno de los visualizadores en línea más extendido. Funciona como un repositorio donde podemos encontrar información que otros usuarios o proyectos comparten. Además, muchos de sus contenidos son gratuitos. Se ha ofrecido al MUSEJE una cuenta básica donde gestionarán las distintas capacidades de los modelos 3D y su repercusión a nivel de difusión.

Sketchfab se está convirtiendo en el principal medio de difusión de modelos 3D en la web, donde los repositorios se encuentran al mismo nivel que en otras instituciones museísticas, como el *British Museum* (British-Museum, 2018) o el Museo Arqueológico Nacional (MAN, 2018; Gant & Rus, 2016).

Como plataforma web es un buen recurso para la publicación de información 3D online, es accesible a cualquier usuario y puede enlazar contenidos directamente en redes sociales o profesionales. Los modelos 3D obtenidos en calidad media se han subido a esta plataforma sin sufrir ningún proceso de simplificación o decimado. Sketchfab nos facilita la visualización de la empuñadura aislada de la espada desde cualquier perspectiva, así como enlazar anotaciones en determinadas zonas relevantes (Figs. 28, 29 y 30). El modelo 3D de la empuñadura de la espada jineta de Ali Atar subido a Sketchfab está accesible a través de la dirección: <https://skfb.ly/ZzzA>

Los textos incluidos en cada una de las anotaciones integradas en los modelos 3D pertenecen a la documentación aportada por el MUSEJE y a diferente bibliografía incluida en el artículo.

6.3. Ortoimágenes

A partir del conjunto de imágenes tomadas se consiguieron reproducciones de alta calidad a escala a partir de la generación de ortoimágenes (Figs. 31 y 32).

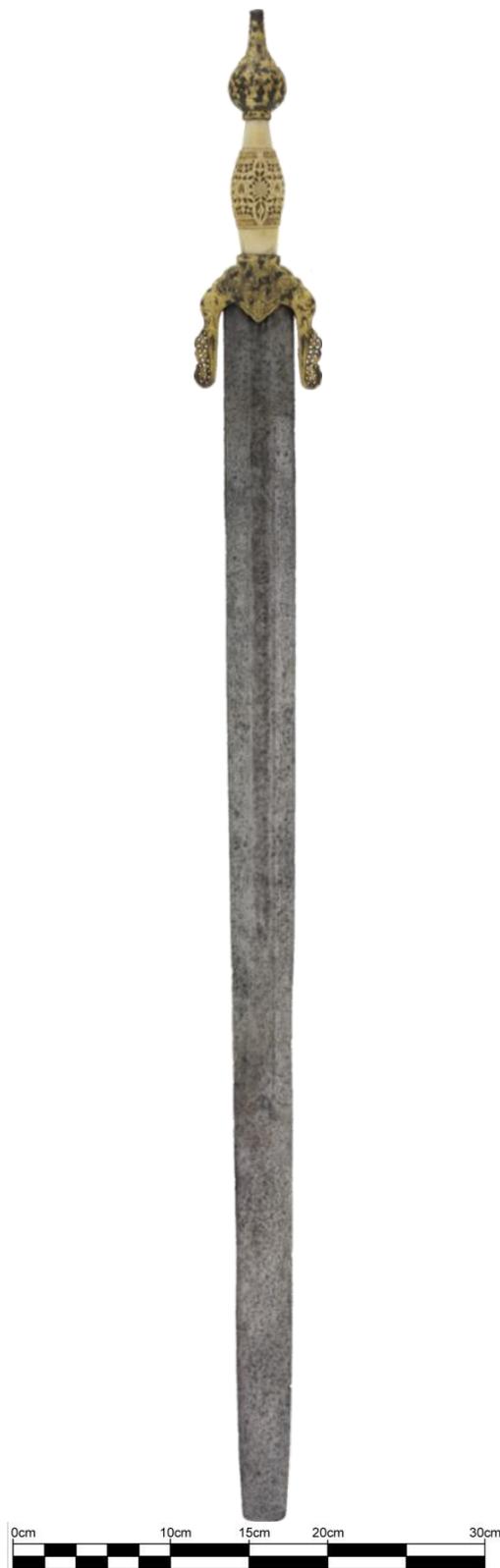


Figura 31: Ortoimagen de la espada completa, anverso.



Figura 32: Ortoimagen de la empuñadura. Anverso.



Figura 33: Planimetría de la empuñadura obtenida a partir de la restitución fotogramétrica.

6.4. Restitución fotogramétrica

La obtención de las ortoimágenes permitió la vectorización, a partir de programas de diseño CAD, de la información ornamental en la pieza objeto de estudio.

El resultado del levantamiento mediante restitución fotogramétrica es la planimetría a escala de la empuñadura de la espada (Fig. 33), así como de algunos de sus detalles más importantes, por ejemplo, la parte central del puño tripartito (Fig. 34).



Figura 34: Planimetría de la zona central del puño tripartito de la empuñadura obtenida a partir de la restitución fotogramétrica.

6.5. Estudios exhaustivos de conservación

6.5.1. Seguimiento y evaluación de cambios

Hemos adaptado los resultados obtenidos con tal de ofrecer y mostrar las capacidades de estas técnicas de digitalización, tanto en 3D como en 2D. A continuación se muestra un estudio de seguimiento y evaluación de cambios, a partir de la pérdida de material. Si aislamos las diferentes zonas deterioradas debido a la pérdida de material, conseguimos calcular las superficies en las zonas desgastadas a día de hoy. Este proceso facilita los datos suficientes para futuros estudios de monitorización, seguimiento y evaluación de los cambios en el estado de conservación de la pieza, e incluso para estudios preventivos y de restauración (Figs. 35, 36 y 37).

7. Discusión

El origen del estudio ha estado centrado en la obtención de un modelo 3D a partir de una documentación geométrica de precisión, habilitando así a la pieza de una preservación digital que la dotara de las capacidades para su puesta en valor e investigación. Para ello hemos apostado por un método seguro, un nivel de exigencia máximo y un grado de comportamiento frente a texturas y materiales lo más alto y fiable posible.

Para cumplir con los requisitos deseados a la hora de obtener los resultados, la digitalización 3D y en concreto la fotogrametría digital, han sido los métodos más acordes y que han marcado las pautas en la ejecución del presente proyecto.



Figura 35: Planimetría de la empuñadura obtenida a partir de la restitución fotogramétrica y restitución 2D de zonas afectadas por pérdida de material.

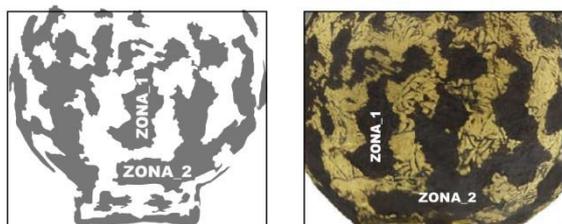
DETALLE DEL POMO BULBOSO
ZONA CON PERDIDA DE MATERIAL

Figura 36: Ampliación de la zona del pomo bulboso de la espada. Localización de las Zonas 1 y 2 donde se aprecia pérdida de material dorado.

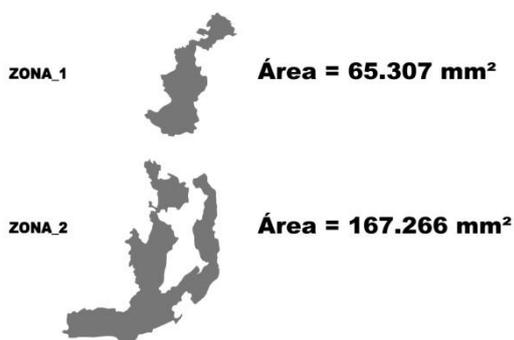


Figura 37: Ampliación de las Zonas 1 y 2 con su correspondiente valor de superficie.

En lo relativo al grado de dificultad en la digitalización 3D de este tipo de piezas, está marcado en todo momento por:

- Los metales y demás materiales que componen este BIC.
- Los efectos provocados por la incidencia de la luz sobre la pieza.
- El filo y el desgaste de la hoja de la espada, ya que impide la correcta reconstrucción 3D de la pieza al completo de una manera directa.

Durante el proceso de obtención del modelo 3D han surgido varias dificultades debido, tanto al comportamiento de los metales frente a la toma de imágenes como a los desgastes en determinadas zonas localizadas. Podemos concretar que para este tipo de materiales como son los metales, se necesita un elevado número de fotografías y un solape muy alto, de esta manera aseguramos una estabilidad del píxel y evitamos la generación de excesivo ruido al construir la nube de puntos densa, lo que deriva en un frágil e incompleto modelo 3D.

La obtención de un correcto modelo 3D es el resultado de trabajar bajo una cabina de luz, el uso de filtro polarizador y el manejo de un elevado número de imágenes. Este método de trabajo basado en fotogrametría multi-imagen de objeto cercano nos ha facilitado un correcto proceso fotogramétrico sobre metales y la eliminación de un alto porcentaje de los efectos producidos por la luz. En líneas futuras integraremos la metodología que utiliza imágenes de alto rango dinámico (HDR) tal como sugiere (Guidi et al., 2014) y (Suma et al., 2016) para obtener una mejora en

la solución fotogramétrica, ya que el uso de imágenes HDR ofrece la posibilidad de superar el problema de la aparición de zonas expuestas y sobrepuestas en cuanto a iluminación se refiere (Suma et al., 2016), sin olvidarnos de abordar la corrección radiométrica y colorimétrica (Iturbe et al., 2018).

Esta herencia patrimonial puede ser mostrada al exterior de una forma interactiva y completa, adaptándose con facilidad a las actuales tecnologías. Nuestra propuesta describe un reto que va más allá del 3D, disponer de herramientas suficientes para la mejora de la puesta en valor del patrimonio histórico militar, y ofrecer capacidades para un exhaustivo análisis con posibles finalidades preventivas, todo esto partiendo de una digitalización 3D.

La digitalización 3D ha demostrado ser una aproximación prometedora que garantiza una precisa reconstrucción de objetos (Santos, Ritz, Fuhrmann, & Fellner, 2017). A diferencia de la solución masiva altamente innovadora que permite abordar la digitalización de grandes volúmenes de piezas, presentada en (Santos et al., 2017), nosotros hemos apostado por una solución fotogramétrica de bajo coste, que resulta eficaz y necesaria para mejorar la digitalización 3D y la obtención de una documentación geométrica precisa, de superficies altamente reflectantes como son los metales. La diferencia en la complejidad de la toma con metales, a pesar del tamaño reducido, con respecto a otras investigaciones presentadas en el ámbito del patrimonio cultural (Barazzetti, Remondino, Scaioni, & Brumana, 2010), (Sapirstein, 2016) y de la arqueología (Ducke, Score, & Reeves, 2011), (Plets et al., 2012), (Doneus et al., 2011), es sustancial, si bien todo proyecto conlleva sus peculiaridades que lo particularizan. Gracias a la documentación geométrica y a partir del modelo 3D podemos apreciar con una mayor precisión dichos cambios producidos por el paso del tiempo y su degradación.

Con el uso de estas tecnologías digitales podemos ofrecer al MUSEJE todo lo necesario para abordar un estudio exhaustivo de conservación, que contemple un correcto seguimiento y evaluación de los cambios que se producen o pudieran producir en la pieza. En el caso del arriaz y del pomo bulboso de la jineta, y con los datos obtenidos a partir de la fotogrametría realizada, se pueden documentar, investigar y por supuesto calcular el volumen de las zonas dañadas, llegando a conseguir un completo estudio preventivo de restauración, que servirá de apoyo para su correcta conservación. Con estos resultados, se pone de manifiesto la necesidad de apostar por una preservación digital multidisciplinar para la correcta salvaguarda del patrimonio histórico militar.

Por último, indicar también que se probaron otras técnicas de digitalización 3D basadas en sensores activos, como es el escáner de luz estructurada de bajo coste DAVID SLS-2 sobre varias piezas modelo con características similares a la pieza objeto a estudio, alcanzando resultados no fiables en cuanto a textura y geometría.

8. Conclusión

La aplicación de métodos y técnicas de documentación geométrica en joyas emblemáticas, como la espada

jineta de Ali Atar, es muy necesaria a la hora de localizar antiguas epigrafías, cambios o modificaciones producidos por la oxidación, daños producidos por el paso del tiempo, pérdida de propiedades y de material, etc. en el patrimonio histórico militar.

La adaptación de la fotogrametría multi-imagen de objeto cercano, de equipos y nuevas tecnologías al patrimonio histórico militar, se nos antoja imprescindible para saber apreciar el valor de estas joyas de la historia, para su correcta documentación, preservación, difusión, investigación y educación.

Este artículo confirma que el acceso a disciplinas tales como el patrimonio virtual nos brinda el poder necesario para una correcta documentación geométrica del patrimonio histórico militar, su preservación y difusión, pudiendo enlazar y activar nuevas líneas de investigación futuras.

Esta investigación demuestra la importancia de las técnicas de documentación geométrica para la democratización de los museos. Contribuye a mejorar los procesos de investigación, abriendo una nueva línea de estudio, a partir de la cual, reconstruiremos el pasado

a través de la virtualidad, pudiendo así marcar y confirmar hipótesis históricas.

Las acciones futuras van orientadas a ofrecer soluciones fotogramétricas de vanguardia que faciliten las labores de difusión y preservación del patrimonio histórico militar, sin que esté limitado al material armamentístico. Para lograr este propósito, y por lo tanto ser fiel a la Carta de Londres y a los Principios de Sevilla, estos proyectos se verán favorecidos por equipos multidisciplinares y espacios colaborativos, fomentando la transparencia y la colaboración, que garanticen el éxito.

9. Agradecimientos

Al Museo del Ejército de Toledo por permitirnos investigar en sus dependencias y facilitarnos toda la información histórica necesaria. A D. Germán Dueñas Beraiz, Conservador Jefe del Departamento de Armas del Museo y al Subteniente Bienvenido Moreno Gálvez, por su confianza, apoyo y orientación en el campo del armamento militar. A todo el personal que se ha visto involucrado en el desarrollo de este trabajo, por su colaboración y toda la ayuda prestada.

Referencias

- Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., & Brumana, R. (2010). Fully automatic UAV image-based sensor orientation. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-Part 5. Retrieved from http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/12/12_02_Paper_75.pdf
- British-Museum. (2018). The British Museum on Sketchfab - Sketchfab. Retrieved May 28, 2018, from <https://sketchfab.com/britishmuseum>
- Chiabrando, F., D'Andria, F., Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey). *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 28. <https://doi.org/10.4995/var.2018.5958>
- Denard, H. (2009). The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage. Preamble Objectives Principles. *The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage*, 13. Retrieved from http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf
- Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, C., Kucera, M., & Neubauer, W. (2011). From deposit to point cloud – A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics FCE CTU*, 6(0), 81–88. <https://doi.org/10.14311/gi.6.11>
- Ducke, B., Score, D., & Reeves, J. (2011). Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series. *Computers & Graphics*, 35(2), 375–382. <https://doi.org/10.1016/J.CAG.2011.01.006>
- Dueñas, G. (2007). Tesoros del Museo del Ejército. In M. Rubio, C. García, & M. Arias (Eds.), *Tesoros del Museo del Ejército* (pp. 191–206). Ollero y Ramos.
- Dueñas, G. (2014). Las Armas del Greco. In G. Dueñas & C. Colis (Eds.), *Las armas del Greco* (p. 197). Retrieved from <https://publicaciones.defensa.gob.es/las-armas-del-greco.html>
- Forte, M. (2010). *Cyber-archaeology*. (M. Forte, Ed.). Oxford, England: Archaeopress.
- Forte, M. (2011). Cyber-Archaeology: Notes on the simulation of the past. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 7–18. <https://doi.org/10.4995/var.2011.4543>
- Gant, M. L., & Rus, F. J. (2016). Atalaya3D: el portal virtual de patrimonio de las universidades andaluzas. *Revista Ph*, 90, 15–16. Retrieved from <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/3809>
- Gil-Melitón, M., & Lerma, J. L. (2016). Nuevas puertas virtuales al mundo de la preservación y difusión del patrimonio histórico militar. Un compromiso por el futuro de la investigación y el conocimiento. In *8th International congress on archaeology, computer graphics, cultural heritage and innovation* (pp. 468–471). Valencia: Universitat Politècnica de València. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/96582>
- Guidi, G., Gonizzi, S., & Micoli, L. L. (2014). Image pre-processing for optimizing automated photogrammetry

- performances. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 145–152. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-145-2014>
- Historic England. (2017). Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice, 128 p. Retrieved from <https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/heag066-photogrammetric-applications-cultural-heritage.pdf>
- Iturbe, A., Cachero, R., Cañal, D., & Martos, A. (2018). Digitalización de cuevas con arte paleolítico parietal de Bizkaia. Análisis científico y divulgación mediante nuevas técnicas de visualización. *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 57–65. <https://doi.org/10.4995/var.2018.7579>
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., & Seguí, A. E. (2011). La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser. *Documentación Gráfica Del Patrimonio*, 108–117. Retrieved from <http://gifle.webs.upv.es/pdfs/DocPatrimonial ImagenLáser2011.pdf>
- Lodeiro, J. M. (2010). La Documentación gráfica en el IPCE. *Documentación Gráfica Del Patrimonio*, 8–17. Retrieved from <https://es.calameo.com/read/0000753358b142b1c934c>
- London-Charter. (2017). The London Charter for the computer-based visualisation of Cultural Heritage. Retrieved April 23, 2018, from <http://www.londoncharter.org/>
- López-Menchero, V. M. (2013). International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles. In C. Corsi, B. Slapšak, & F. Vermeulen (Eds.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics* (pp. 269–283). Cham, Switzerland: Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_16
- Makariou, S., & Bernus-Taylor, M. (2000). *Memorias do imperio Arabe*. Santiago de Compostela: Santiago de Compostela: Auditorio de Galicia.
- MAN. (2018). Museo Arqueológico Nacional on Sketchfab - Sketchfab. Retrieved May 28, 2018, from <https://sketchfab.com/man>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Plets, G., Verhoeven, G., Cheremisin, D., Plets, R., Bourgeois, J., Stichelbaut, B., ... De Reu, J. (2012). The deteriorating preservation of the Altai rock art: Assessing three-dimensional image-based modelling in rock art research and management. *Rock Art Research*, 29(2), 139–156.
- Principios-Sevilla. (2016). Forum Internacional de Arqueología Virtual / International Forum of Virtual Archaeology Borrador Final Forum Internacional de Arqueología Virtual / International Forum of Virtual Archaeology, 10. Retrieved from <http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2016/06/PRINCIPIOS-DE-SEVILLA.pdf>
- Remondino, F., & El-hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., & Fellner, D. (2017). 3D mass digitization: a milestone for archeological documentation. *Virtual Archaeology Review*, 8(16), 1–11. <https://doi.org/10.4995/var.2017.6321>
- Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, 66, 137–145. <https://doi.org/10.1016/J.JAS.2016.01.002>
- Sikh-Museum. (2017). 3D Modelling of Sikh artefacts | Sikh Museum Initiative. Retrieved January 25, 2017, from <http://www.sikhmuseum.org.uk/portfolio/3d-modelling-of-sikh-artefacts/>
- Slama, C., Theurer, C., & Henriksen, W. (1980). *Manual of photogrammetry*. American Society of Photogrammetry.
- Stylianidis, E., & Remondino, F. (2016). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*. (E. Stylianidis & F. Remondino, Eds.). Whittles Publishing. Retrieved from <https://books.google.be/books?id=yLFXawEACAAJ>
- Suma, R., Stavropoulou, G., Stathopoulou, E. K., van Gool, L., Georgopoulos, A., & Chalmers, A. (2016). Evaluation of the effectiveness of HDR tone-mapping operators for photogrammetric applications. *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 54–66. <https://doi.org/10.4995/var.2016.6319>
- Torres, L. (1949). *Ars Hispaniae*. Madrid: Editorial Plus-ultra.
- Waldhäusl, P., Ogleby, C. L., Lerma, J. L., & Georgopoulos, A. (2013). 3 X 3 Rules for Simple Photogrammetric Documentation of Architecture. Retrieved from http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2017/02/CIPA__3x3_rules__20131018.pdf