



MODELIZACIÓN 3D DE ESTRUCTURAS Y DEPÓSITOS ARQUEOLÓGICOS COMO MÉTODO DE DOCUMENTACIÓN Y DIVULGACIÓN: EL CASO DEL CONJUNTO ARQUEOLÓGICO DE SAN ESTEBAN (MURCIA, ESPAÑA)

3D MODELLING OF ARCHAEOLOGICAL STRUCTURES AND DEPOSITS AS A METHOD OF DOCUMENTATION AND DISSEMINATION: THE CASE OF SAN ESTEBAN ARCHAEOLOGICAL SITE (MURCIA, SPAIN)

José Ángel González Ballesteros^a , José Gabriel Gómez Carrasco^a, Alicia Hernández-Robles^b , Jorge Alejandro Eiroa Rodríguez^b 

^a Proyecto San Esteban, Facultad de Letras, Universidad de Murcia, Campus de La Merced, 30001 Murcia, España. arqueo@outlook.es; joseggc@icloud.com

^b Departamento de Prehistoria, Arqueología, Historia Antigua, Historia Medieval y CC. y TT. Historiográficas, Facultad de Letras, Universidad de Murcia, Campus de La Merced, 30001 Murcia, España. alicia.hernandez5@um.es; jorgeir@um.es

Lo más destacado:

- Metodología y procedimientos fotogramétricos tridimensionales (3D) para el levantamiento topográfico de alta precisión de un yacimiento.
- Modelización 3D del conjunto de estructuras arqueológicas que forman parte de la zona arqueológica para su registro y como herramienta de divulgación.
- Secuenciación de los distintos contextos deposicionales arqueológicos mediante su registro 3D que permite una mejor comprensión espacial y formativa.

Extended Abstract:

The research project carried out between 2018 and 2020 at San Esteban archaeological site (Murcia, Spain), under the agreement signed between the University of Murcia and the Murcia Townhall, was developed by a series of archaeological excavation campaigns in different parts of this enclave. Of the sectors involved, we have chosen the four most relevant ones: the buildings known as "Recinto I" and "Recinto II, the "Oratory" and the cemetery or *Maqbara* (Fig. 1). The research project objectives were the review and diagnosis of the state of conservation, the interdisciplinary study, the consolidation measures implementation and the temporary exposure of the sectors involved (Eiroa et al., 2019; 2021).

San Esteban archaeological site is located within the current urban centre of the city of Murcia. It is a good example of medieval Islamic urban design in a part of the old suburb of *Arrixaca*, a neighbourhood outside the walls of the city that seems to have been formed during the 11th century.

The graphic record in archaeology has been an intrinsic part of the discipline since its inception (Caballero, 2006). Photography and archaeological drawing have been the main ways of documenting an archaeological excavation with the double objective of achieving a topographical reconstruction and ordering the material remains by means of a stratigraphic sequence. Photogrammetry has become one of the main techniques in archaeology and is a great support in the topographic and planimetric survey of high precision and graphic representation. Drones or unmanned aerial vehicles (UAV) (Korumaz & Yildiz, 2021), high-resolution digital cameras and the appropriate software have enabled their application in numerous cases, generating extensive quality records; this can be seen in the field of medieval archaeology (Enríquez et al., 2020; García-Molina, González-Merino, Rodero-Pérez & Carrasco-Hurtado, 2021; Ruiz, Gallego, Peña, Molero & Gómez, 2015) or in the study of medieval buildings.

In the fieldwork at San Esteban archaeological site, a series of topographic instruments and photogrammetric software in a 4D sequence have been used; this has allowed both the documentation in the plan of the archaeological structures, as well as the location of the deposits in a stratified sequence. For the generation of these diachronic three-dimensional (3D) models, the Agisoft Metashape software was used, based on the SfM (Structure from Motion) technique of geometric analysis of clusters of pixels from photographic perspectives with different parallaxes. This technique has become an important methodological dynamic in the archaeological record (Maldonado, 2020: 196-203), improving the work of topography in the geomatics field (Marín, 2020).

* Corresponding author: José Ángel González Ballesteros, arqueo@outlook.es



The authors created also a vector plan of the documented structures; the registration through the SfM photogrammetry was also carried out (Fig. 6), together with the depositional process of the sectors involved (Charquero, 2016; Semeraro, 2008). As an example of this methodology, a practical case within the building known as “Recinto I” is highlighted (Fig. 7). This exercise, developed in the *Espacio 4*, has made it possible to measure the excavation process by continuously recording the activity at a specific point of the site. Also, a detailed delimitation of the extension and volumetric shape from the contact surfaces of a stratigraphic unit has been made, reflecting the physical aspects of the deposit itself at a visual level (Fig. 9). This method emphasises the documentation of the depositional process from a 3D and orthophotographic perspective of the strata (Montalvo, Dyrdaahl, Cantisani, Fabirriis, & Vinci, 2020; Orengo, 2013), allowing greater detail in the delimitation and shape of the excavated stratigraphic units and assemblages, either synchronously or diachronically.

All this graphic evaluation work allows for new possibilities in relation to the processes of data management of an archaeological intervention. Their implementation in a geographic information system (GIS), being the graphic base in a vectorised digital format, opens the possibility of creating environments where interrelated information of their virtual recreation is available, from the 3D models obtained during the archaeological excavation. All this makes 3D models versatile products for use in archaeological heritage research and dissemination. From the latter approach, it is the geometric basis for the subsequent development of virtual surveys and 3D recreations or their reproduction in models at variable scales of the whole or a part of them, in greater detail, using 3D printers.

Keywords: archaeological heritage; documentation; 3D modelling; photogrammetry; archaeological stratigraphy

Resumen:

El conjunto arqueológico de San Esteban se localiza en el actual centro urbano de la ciudad de Murcia. Se trata de un amplio espacio de origen andalusí que formaba parte del antiguo arrabal de la Arrixaca, un barrio extramuros que parece conformarse durante el siglo XI y que constituyó una parte importante de la ciudad medieval de Murcia. El proyecto de investigación realizado entre los años 2018 y 2020 en el conjunto arqueológico de San Esteban, bajo el convenio firmado entre la Universidad de Murcia y el Ayuntamiento de Murcia, conllevó una serie de campañas de excavación arqueológica en diferentes puntos de este enclave. Se intervino en cuatro sectores que se mostraban especialmente relevantes desde el punto de vista funcional y de la articulación urbana de este entramado: los edificios conocidos como “Recinto I” y “Recinto II”, el “oratorio” y la *maqbara*. El proyecto fue concebido desde una perspectiva interdisciplinar, jugando un papel clave la incorporación de nuevas tecnologías en el proceso de documentación de la excavación. La metodología llevada a cabo se basó en los procedimientos fotogramétricos de alta precisión y de seguimiento diacrónico de la intervención arqueológica, teniendo como objetivo la elaboración de un registro gráfico que afectaba tanto al plano bidimensional (2D) como al tridimensional (3D). Para su correcta elaboración se combinó el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) y de instrumental topográfico. Como resultado, este registro permitió confeccionar toda una serie de planimetrías vectoriales, ortomosaicos y recursos 3D de cara a su posterior análisis y de divulgación arquitectónica y material de los elementos arqueológicos intervenidos. Este trabajo desarrolla los procedimientos metodológicos llevados a cabo, una serie de propuestas de análisis y los resultados obtenidos en el marco de aplicación de las nuevas tecnologías en el campo de la arqueología.

Palabras clave: patrimonio arqueológico; documentación; modelado 3D; fotogrametría; estratigrafía arqueológica

1. Introducción

La práctica arqueológica para la investigación analítica de cualquier yacimiento conlleva todo un proceso de documentación a partir del método estratigráfico. Dado que su proceso supone necesariamente la destrucción definitiva de esa estratigrafía, implica un alto grado de responsabilidad la aplicación de unos procesos de intervención lo más adecuados posibles para obtener el máximo de datos e información del registro arqueológico.

Las técnicas de documentación arqueológica se han visto impulsadas por el proceso de transformación tecnológica ocurrido en las últimas décadas, en línea a los cambios que ha sufrido la sociedad actual, inmersa en el ámbito de la revolución digital. El uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (Korumaz & Yildiz, 2021), cámaras digitales de alta resolución y el *software* adecuado han permitido su aplicación en numerosos casos, generando un amplio registro de calidad, como se observa en el ámbito de la arqueología medieval peninsular (Enríquez et al., 2020; García-Molina, González-Merino, Roderopérez & Carrasco-Hurtado, 2021; Ruiz, Gallego, Peña, Molero & Gómez, 2015); jugando un papel importante otras técnicas adicionales de documentación aplicadas al estudio de edificios que forman parte del patrimonio cultural en general en su análisis arqueológico (García-

Gómez, Fernández & Mesanza, 2011; León-Bonillo et al., 2022; Martín, 2014). Este hecho ha afectado tanto a la propia excavación como al tratamiento de los datos obtenidos en su fase de archivo. En este proceso se han eliminado algunos soportes tradicionales hacia una digitalización de la información, con la generación de bases de datos interrelacionales, aunque de manera gradual y no siempre alcanzando objetivos efectivos y satisfactorios en su operatividad y versatilidad. Los recursos de un proyecto de investigación y su capacidad técnica, tanto en lo que respecta a los instrumentos como al equipo humano, siguen siendo los principales factores en la capacitación de esta transición.

La documentación gráfica (fotografías, dibujos, planimetrías, mapas, etc.), en especial la referida al dibujo arqueológico, ha supuesto, y lo sigue haciendo, una base fundamental en cualquier registro arqueológico y para el desarrollo de toda excavación (Caballero, 2006). Existe una amplia tradición gráfica que trata de reproducir, de forma objetiva –cuanto más, mejor– las características de un yacimiento. Plantas y secciones forman parte sustancial de una intervención arqueológica en el proceso de individualizar la estratigrafía en unidades y en la documentación de estructuras, ya sea mediante procedimientos analógicos convencionales o con los (ya no tan) nuevos dispositivos digitales. Estos últimos métodos y técnicas

a la hora de elaborar la documentación gráfica son los que precisamente están transformando, enriqueciendo y aumentando la calidad de la información recogida. Lo que no cambia es el objeto de investigación y los objetivos en torno a los cuales ha orbitado la documentación gráfica.

El uso de la fotogrametría en arqueología ha experimentado un gran avance en estos últimos años y ha hecho olvidar el empleo de otros soportes más tradicionales que, si bien son básicos en cuanto a material, coste y con sus propias limitaciones (Charquero, 2016), siguen siendo valiosos, versátiles y complementarios en sus objetivos y resultados durante la práctica de campo, siendo compatibles con la aplicación de esta técnica. No hay que olvidar que estas tecnologías también tienen sus limitaciones (accesibilidad, autonomía, espacio de almacenamiento, necesidad de interacción en el proceso digitalizador, etc.) y lo que implica en coste e inversión. Sobre estos aspectos también hay que debatir a la hora de implementar una tecnología y de la financiación que reciben los proyectos para poder emplearla.

La intervención programada en el conjunto arqueológico de San Esteban (Murcia) conllevó una investigación integral de cuatro sectores (Fig. 1) (Eiroa *et al.*, 2019; 2021): el "Recinto I" (un edificio de grandes dimensiones interpretado como un *funduq* islámico u hospedería de los siglos XII y XIII); el "Recinto II" (un gran edificio de tipo residencial); el "oratorio" (erróneamente interpretado como una mezquita mudéjar); y el cementerio islámico, (una *maqbara* de los siglos XII y XIII de la que se conocían apenas unas pocas tumbas).

Para la ejecución del proyecto se contó con una serie de medios y herramientas que facilitaron todo el proceso de registro gráfico. Se combinaron métodos más tradicionales, pero con el objetivo de su informatización, junto con la aplicación de procedimientos mediante técnicas avanzadas del registro y documentación. Este uso fue tanto en lo referente a las estructuras como a los depósitos exhumados. Los métodos de trabajo, las aplicaciones desarrolladas y los resultados son el tema central de este trabajo y se exponen en los siguientes apartados.

2. El levantamiento topográfico y planimétrico de alta precisión y resolución: metodología, recursos y representación gráfica

Desde el punto de vista documental, el proyecto de investigación en el conjunto arqueológico de San Esteban tiene su antecedente en la excavación arqueológica preventiva realizada en el jardín de San Esteban en el año 2009, que puso al descubierto un amplio sector de la Murcia andalusí (Robles, Sánchez & Navarro, 2011). Posteriormente, los distintos trabajos menores realizados se destinaron a la protección de los restos tras su declaración como bien de interés cultural (BIC), siendo el área mejor documentada por su extensión (10000 m²) del arrabal medieval de la Arrixaca.

Cuando el equipo de la Universidad de Murcia inició los trabajos, en el otoño de 2018, se hizo necesario valorar toda esa documentación técnica precedente aportada por las empresas Arqueotec (2009) y ARPA (2010), que



Figura 1: Fotografía aérea cenital con la identificación de los sectores intervenidos durante los trabajos de campo en el conjunto arqueológico de San Esteban (Murcia). Fotografía de José G. Gómez Carrasco.

habían realizado las intervenciones arqueológicas preventivas y de mantenimiento en el conjunto arqueológico esos años atrás, cuya documentación fue facilitada por el Ayuntamiento de Murcia y la Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Se dispuso de dos documentos planimétricos digitales incluidos en sus correspondientes memorias técnicas: uno, el de Arqueotec, bastante completo y con buen grado de detalle en su representación arqueológica; y otro, el de ARPA, con un grado de representación inferior y que ofrecía importantes desviaciones topográficas respecto al primero. Siendo imposible la comprobación general de errores mediante un procedimiento estadístico topográfico, dado que el solar se encontraba cubierto y había desaparecido la señalización de vértices de estacionamiento utilizados nueve años antes, se decidió acometer un registro propio que se ceñía exclusivamente a las áreas o sectores que habrían de excavarse. Su representación planimétrica se superpuso a la preexistente, mejorándola y dotándola de referencias proyectivas absolutas según el sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). Así, una vez desenterrados superficialmente los restos en las zonas de intervención, se realizó un levantamiento de comprobación con estación total y sistema global de navegación por satélite con cinemática en tiempo real (GNSS RTK por sus siglas en inglés) sobre elementos de obra de fábrica permanentes, siendo arrojados errores aceptables de escasos centímetros por la planimetría digital de Arqueotec, la cual había sido confeccionada mediante vectorización del dibujo arqueológico clásico con apoyo topográfico de estación total en un sistema de coordenadas local.

2.1. Metodología y recursos instrumentales

La metodología de trabajo elegida fue el levantamiento fotogramétrico con seguimiento diacrónico de la excavación arqueológica –comúnmente llamado modelo 4D (Dell'Unto, Landeschi, Apel & Poggi, 2017)– a partir de tomas fotográficas en alta resolución sobre las estructuras, apoyadas con instrumentación topográfica. Este método de trabajo permitiría obtener modelos geométricos evolutivos del yacimiento con gran precisión y representación fotorrealista de texturas. Para la generación de estos modelos 3D diacrónicos se utilizó el programa informático de Agisoft Metashape, basado en la técnica SfM (*Structure from Motion*) de análisis geométrico de clústeres de píxeles desde perspectivas fotográficas con diferentes paralajes. Sirviéndonos de ellos, se procesaron los ortomosaicos y modelos digitales del terreno (MDT) necesarios para la vectorización precisa del dibujo arqueológico estructural bajo una aplicación de diseño asistido por computadora (CAD) (Korumaz & Yıldız, 2021). Esta técnica se ha convertido en una importante dinámica metodológica del registro arqueológico (Maldonado, 2020: 196-203), mejorando el trabajo de la topografía arqueológica en el campo de la geomática (Marín, 2020).

Para los trabajos de campo se contó con el siguiente instrumental topográfico y fotogramétrico:

- Estación total Leica TCR407 de medición dual infrarrojo/láser (IR/RL) de 2-3 mm + 2 ppm de precisión en medición de distancias y 7" de desviación estándar en medición angular, para la radiación de los puntos de apoyo fotogramétricos y la compensación de bases.
- GNSS RTK Leica GS18T enlazado a multiconstelación satelital *Global Positioning System* (GPS) + Glonass + Galileo + Beidou y Red Geodésica Activa de Murcia (REGAM) de correcciones de 1.5 cm de precisión lineal, para la georreferenciación de la red de bases topográficas, las cuales fueron fijadas en el terreno mediante clavillas de hierro corrugado.¹
- RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) cuadricóptero DJI Mavic 2 Pro dotado con cámara Hasselblad de 20 Mpix de resolución y focal de 28 mm, para el registro fotogramétrico de estructuras en una altura máxima de 15 m.
- Mástil y monopie telescópicos de 12 y 2 m respectivamente dotados con cámara DSLR Canon 5DSR de 50 Mpix de resolución en formato completo y focales de 50 y 26 mm, para el registro fotogramétrico en altura de elementos arqueológicos a gran detalle.

Por otra parte, para los trabajos de gabinete se utilizó el *software* fotogramétrico anteriormente referido, junto con otras aplicaciones de edición de imágenes (Photoshop CS8) y de CAD (Autocad 2018), instalado sobre un sistema informático de gran rendimiento Mac Pro con procesador de 3 GHz 8-Core Intel Xeon E5. En definitiva, la elección de esta metodología e instrumentación topográfica se basó en la necesidad de obtener una representación completa de la totalidad de los elementos arqueológicos: geométrica y fotográfica, precisa y resolutive, consistente y neutra, instantánea y secuencial, constituyéndose en un auténtico clon digital de respaldo de los elementos arqueológicos excavados.

Todo el trabajo fotogramétrico se integró en un único fichero .psx de Agisoft Metashape, nombrando cada bloque de escaneo por el conjunto arqueológico más la fecha de toma de datos, a fin de poder analizar por superposición ordenada los modelos evolutivos de excavación, produciendo en cada uno de ellos la nube de puntos dispersa optimizada, la nube de puntos densa, el modelo 3D texturizado, el modelo digital de elevaciones (MDE) y los ortomosaicos en vista cenital y lateral, todos procesados en calidad alta.

2.2. El registro fotogramétrico de los recintos I y II

Dada la geometría rectangular de las estructuras de los recintos I y II, las pasadas fotográficas con RPA siguieron itinerarios paralelos y ortogonales en vistas cenitales y oblicuas enfrentadas (Fig. 2), con solapamientos entre el 70 y el 80 %, manteniéndose un esquema similar en todos los escaneos y variando el rango de alturas de 8 a 15 m, para un número de tomas que osciló entre 63 y 535 sobre áreas que van desde 150 a 800 m². El número de puntos de apoyo leídos con instrumentación topográfica varió entre cuatro y seis, introducidos sus valores de

¹ Dado que la precisión GPS es inferior a la obtenida por la estación total, las coordenadas de la red de bases se

establecieron georreferenciando dos puntos con GPS y el resto ajustándose por mínimos cuadrados con mediciones de estación total.

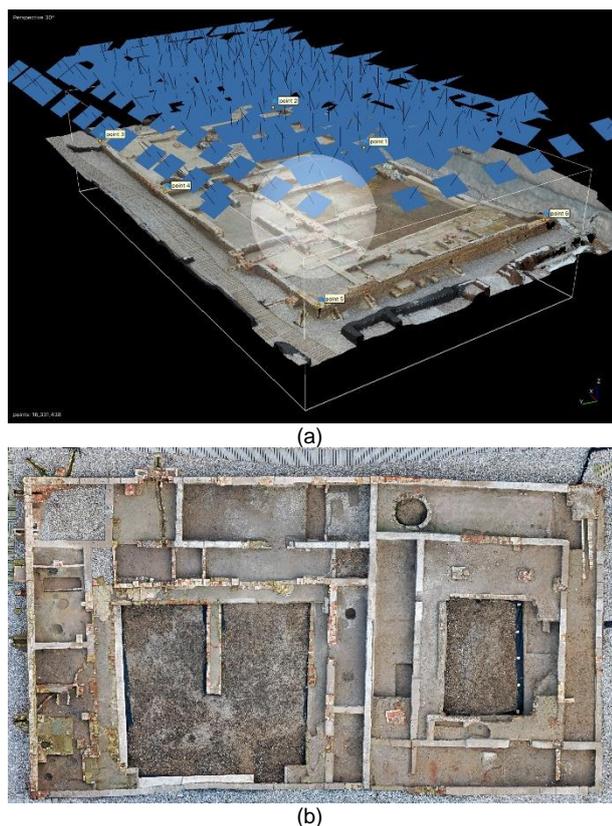


Figura 2: a) Disposición de las tomas fotográficas de los recintos I y II desde la aplicación fotogramétrica; b) Ortomosaico en plano cenital obtenido de los recintos con una resolución de 2.49 mm/px.

coordenadas rectangulares UTM como locales y con errores cercanos a 1 cm (en la orientación de cámaras de Metashape). Por otro lado, los ortomosaicos cenitales se generaron a un tamaño de 16384 píxeles de dimensión máxima, y su resolución se guardó en el rango de 1-2.5 mm/pix. Por último, hay que apuntar que las sesiones fotogramétricas se realizaron siempre a primera hora de la mañana con el yacimiento en sombra,² lo que, si bien obligó a trabajar con parámetros de cámara en baja velocidad de obturación y alta apertura de diafragma, nos permitió la ecualización fotométrica de los motivos, sin zonas solarizadas de fuerte contraste. De esta manera se pudo generar una documentación ortofotográfica secuencial de gran calidad, bajo una luz natural calibrada, muy importante para la identificación correcta de las fábricas constructivas de tapial y ladrillo de los edificios islámicos, las cuales adoptan, según su composición, pequeñas variaciones tonales en gamas de color cálido. Los barridos fotográficos se llevaron a cabo a intervalos de una a cuatro semanas, dependiendo del avance de la excavación en función de los depósitos y procesos secuenciales detectados y de la organización del trabajo, que nunca ocupó más de una hora por sesión.

2.3. El registro fotogramétrico del “oratorio” y la *maqbara*

Al oeste de los recintos I y II, datados en época almorávide y almohade, las intervenciones de 2018 y 2019 se ocuparon también de documentar el edificio rectangular

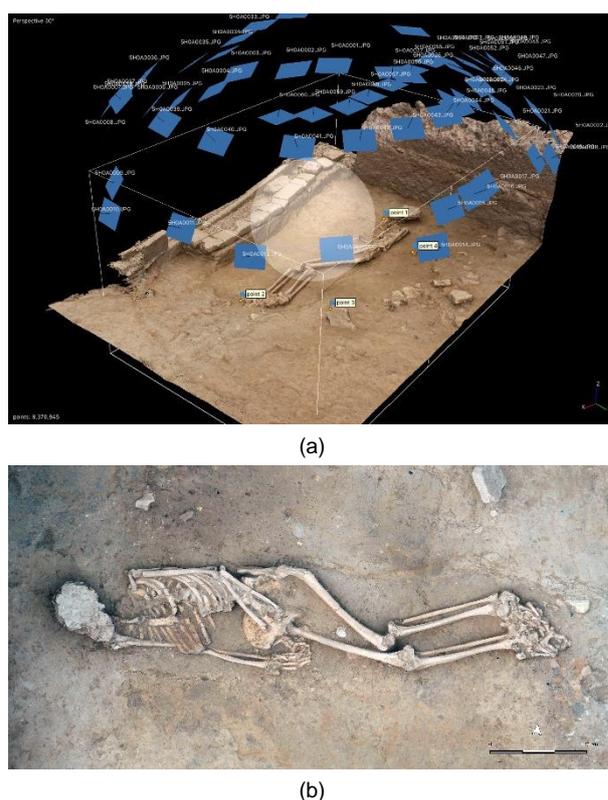


Figura 3: a) Disposición de las tomas fotográficas correspondientes a la tumba 27 sobre la nube de puntos densa con una cobertura fotográfica a modo de casquete esférico adaptada a la forma del motivo central; b) Ortomosaico obtenido de la tumba con una resolución de 0.17 mm/px.

conocido como “oratorio” y un pequeño cementerio anexo (*maqbara*), con enterramientos coetáneos a los recintos I y II.

El registro fotogramétrico siguió las mismas pautas procedimentales que en el caso anterior, tanto en los trabajos de campo como en los de gabinete, barriendo un área aproximada de 400 m². Pero esta vez, además de realizarse la secuencia de levantamientos fotogramétricos estructurales con RPA, se ejecutaron otros individuales a mayor resolución con mástil/monopié. Afectaron a cada sepultura de la *maqbara* en el momento de ser destapados todos los restos óseos correspondientes al enterramiento (Fig. 3). Dado que la excavación de las tumbas por el equipo de antropología para su registro varió en diferentes ambientes lumínicos diurnos, se optó por fotografiar, en los casos de luz solar directa, bajo un toldo portátil de 3 m, cuya sombra cubrió completamente las inhumaciones. Las pasadas se llevaron a cabo con una cámara profesional de 50 Mpix, siguiendo un itinerario cenital y otros dos oblicuos, ovales y equidistantes, alrededor de la sepultura y a baja altura. Las tomas, en un número variable de posiciones desde 24 (tumba 26) hasta 91 (conjunto de tumbas 28-29-32), permitieron procesar ortomosaicos en planta de hasta 0.11 mm/pix de resolución. Los puntos de apoyo o referencias se tomaron sobre elementos significativos utilizando la estación total en su función como distanciómetro láser, a fin de no alterar con el peso del prisma IR los elementos sensibles de la tumba. El error no superó así el milímetro.

² En horario invernal de 8/9 AM a 9/10 AM.

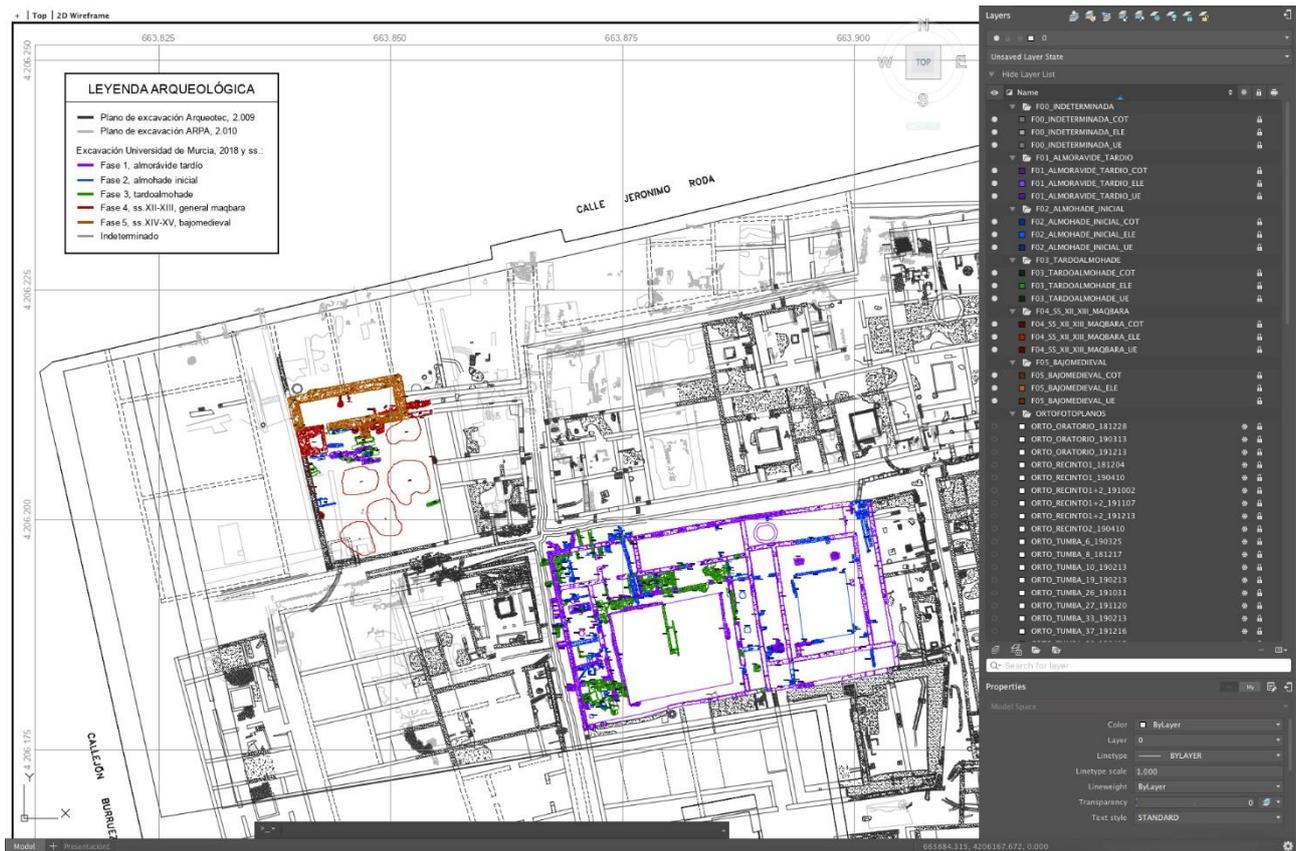


Figura 4: Estructura de capas por fase cultural y representación del plano topográfico vectorizado en la aplicación CAD.

2.4. La edición del plano vectorial y su representación gráfica

La elaboración de la planimetría digital corrió a cargo del *software* de CAD, mediante restitución gráfica por vectores de los contornos del aparejo constructivo, dibujado de manera superpuesta a los ortomosaicos cenitales de alta resolución procesados por la aplicación fotogramétrica (Fig. 4).

Para la ordenación de las entidades se adoptó el criterio de fase cultural por capa (FCC), y no el utilizado por algunos investigadores de unidades de excavación por capa (UEC), como asumían las planimetrías anteriores. Este sistema, tan utilizado a menudo en las planimetrías arqueológicas digitales, complica la estructura del fichero CAD y se aleja del verdadero propósito de interpretación cronológica que debería imperar en la representación topográfica de los restos. El uso de uno u otro criterio no afecta de ningún modo a la representación topográfica individual de elementos, ya que en ambos casos las entidades arqueológicas se plasman de manera objetiva. Junto a la representación topográfica de los elementos arqueológicos, el principal valor del plano arqueológico es la interpretación cronológica de los restos exhumados registrados. Es fundamental acompañar al diseño planimétrico una interpretación cronológica, asignando los elementos estructurales a capas de fase cultural discriminadas por color y designadas por sus objetos lineales, sombreados y textos que se integran en grupos. Este proceso puede ser provisional durante la edición CAD, pudiendo generarse capas temporales pendientes en la definición cronológica hasta su interpretación final a partir de los datos recopilados en los trabajos de campo.

Una organización por UEC no parece interferir en la arquitectura del archivo cuando se realiza una intervención de pequeñas dimensiones, como un sondeo. Además, el programa informático de CAD cuenta con herramientas de filtrado que permiten crear grupos de capas que facilitan su clasificación. Ante este sistema, la estructura del archivo puede verse comprometida frente a grandes divisiones de los datos y su fragmentación en capas, por lo que el método de diseño mediante FCC ofrece varias ventajas técnicas:

- Simplifica la estructura de codificación gráfica del archivo CAD y su manipulación en la interfaz, mejorando considerablemente el rendimiento de trabajo. Este hecho afecta de manera singular a los grandes yacimientos que producen numerosas unidades de excavación.
- Permite un intercambio sencillo de elementos vectoriales para otros programas SIG, de edición 3D o de ilustración.
- Predispone la unificación e integración con otros ficheros planimétricos que hayan sido caracterizados también cronológicamente bajo la misma nomenclatura de fase en estudios de grandes conjuntos urbanos.
- Permite la caracterización de los yacimientos multiseuenciales desde el punto de vista cronológico en un mismo espacio físico.

La caracterización de una unidad supone un dato en bruto sujeto a un registro independiente normalizado en una ficha, alejándose de la función de una planimetría arqueológica como visión de conjunto, sobre todo en lo que se refiere a complejos arquitectónicos. Precisamente, una

de las labores interpretativas del arqueólogo atiende a la capacidad de integrar todas estas unidades individuales en una visión más global y su secuenciación temporal expresada en un plano topográfico. Por tanto, el criterio FCC supone la mejor vía de consecución para un resultado final de representación basado en hipótesis contrastadas con los datos arqueológicos obtenidos en un proceso de excavación (estratigrafía, dataciones radiocarbónicas, estudios de materiales, etcétera).

Siguiendo el criterio FCC, una vez interpretadas cronológicamente las estructuras y los demás elementos, estos iban siendo insertados en capas unívocas de fase cronológica según su fundación constructiva que, una vez agrupadas, discriminaban a su vez entre entidades y textos asociados (cota altimétrica y número de UE), sin perjuicio de que, a medida que avanzase la excavación y mejorase la interpretación cronológica, las entidades de dibujo pudieran ser trasladadas de fase/capa. Además, se acordó aislar en dos capas independientes el dibujo arqueológico antiguo creado por las empresas antes referidas. Tanto a estas capas como a las de plano urbano actual, se les asignó la gama de grises, reservando todo el espectro de color para las fases dentro de la excavación del proyecto, como forma de diferenciar gráficamente la autoría del trabajo topográfico y arqueológico realizado. Se discriminaron cinco fases o conjuntos culturales desde el periodo almorávide tardío hasta época bajomedieval en sentido amplio, numerándose desde F01 a F05, más un grupo denominado F00 donde dar cabida a todo aquello que aún no podía ser interpretado o estaba pendiente de adscripción cronológica. El sistema de coordenadas universales (SCU) del fichero se asimiló a la cuadrícula UTM, encajando el dibujo vectorial antiguo con el obtenido por el proyecto, sobre la base de las referencias absolutas medidas en los sectores de intervención. Finalmente, tanto los ortomosaicos cenitales secuenciados como los puntos de apoyo topográfico fueron insertados en capas ordenadas por fecha y agrupadas para su mejor manipulación.

3. Otras aplicaciones de la fotogrametría SfM en el conjunto arqueológico de San Esteban

A partir de este trabajo, se generó una base gráfica de modelos 3D que van más allá de la tradicional representación arqueológica 2D y que son capaces de contener y proporcionar características dimensionales y propiedades físicas y materiales, facilitando operaciones de clasificación, medición y valoración de cara al cumplimiento de un primer nivel de representación, como se produce en otros casos de gestión arqueológica (Angulo, 2012; Pansini, 2022).

De este modo, junto al levantamiento planimétrico del sitio, la documentación 3D de los individuos en su forma esqueletizada y, fundamentalmente, la generación de un modelo 3D (Fig. 5); la aplicación de esta metodología de trabajo permitió completar la documentación gráfica arqueológica de los diferentes sectores intervenidos. Se compuso la representación fotogramétrica del alzado de las estructuras y la documentación del proceso deposicional arqueológico resultante, generando secciones acumulativas secuenciales de cualquier parte de la intervención.

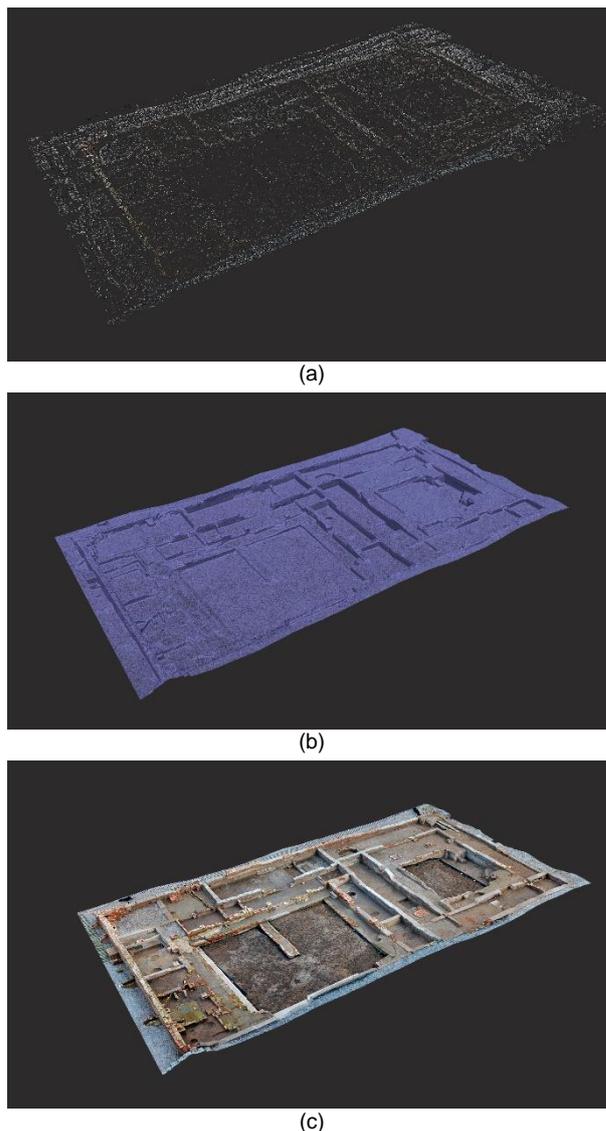


Figura 5: Modelado tridimensional de los recintos I y II mediante fotogrametría SfM: a) Nube de puntos; b) Modelo de malla de alambre; c) Resultado final con la obtención del modelo texturizado para una base gráfica 3D.

3.1. Alzado de las estructuras

A diferencia de otros métodos de ortorrectificación 2D de fotografías para la obtención de ortoimágenes, la generación del modelo 3D de las estructuras emergentes supone un avance en la creación de otro tipo de planos de carácter vertical de las estructuras arqueológicas. Este método es muy útil cuando hablamos de alturas de alzado de pocas dimensiones (1 o 2 m) y longitudes extensas que afectan con frecuencia a los yacimientos arqueológicos, como se observa en algunos casos de estudio (Ruiz *et al.*, 2015).

En el caso del conjunto arqueológico de San Esteban, se pudo comprobar la eficacia de este procedimiento de fotogrametría multimagen o SfM en el registro gráfico y su versatilidad. Al contar con muros y estructuras de grandes longitudes, pero de escasa altura, la captura en mosaico frontal 2D suponía un problema de acumulación de errores, muy costoso de resolver en un procesamiento posterior y las interferencias del propio terreno a nivel de suelo.

MODELIZACIÓN 3D DE ESTRUCTURAS Y DEPÓSITOS ARQUEOLÓGICOS COMO MÉTODO DE DOCUMENTACIÓN Y DIVULGACIÓN: EL CASO DEL CONJUNTO ARQUEOLÓGICO DE SAN ESTEBAN (MURCIA, ESPAÑA)

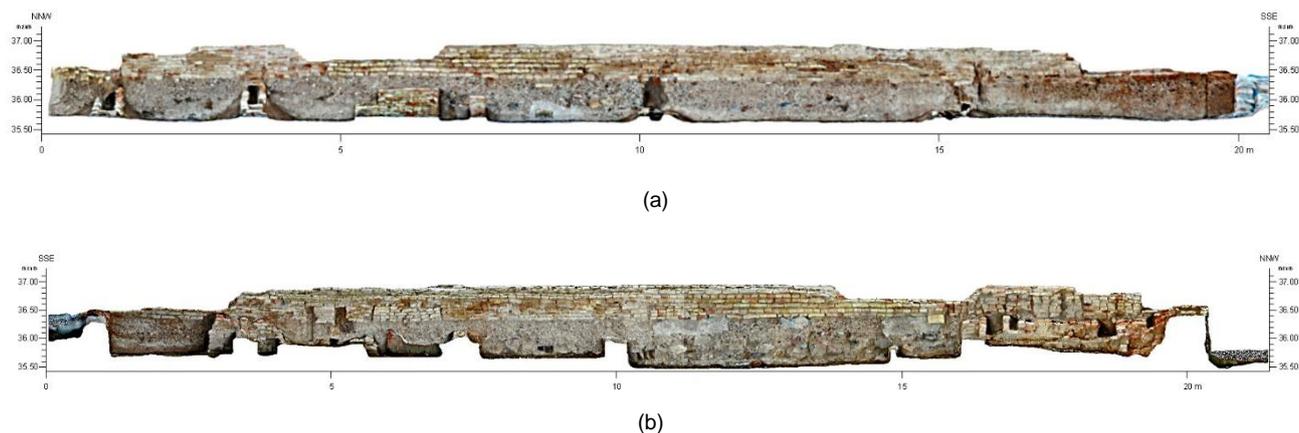


Figura 6: a) Ortomosaico del alzado exterior del cierre occidental (UE 7003W) del “Recinto I” a partir de su modelo 3D mediante técnica fotogramétrica SfM; b) Ortomosaico del alzado interior del cierre occidental (UE 7003E) del “Recinto I” a partir de su modelo 3D mediante técnica fotogramétrica SfM.

Esta solución permitió obtener imágenes completas de todos los frentes con una alta calidad de resolución y sin perder una visión general de las longitudes de los alzados y de los elementos que lo componen (Fig. 6).

El resultado muestra una gran precisión métrica y de texturas fotorrealistas, semejantes a los métodos aplicados mediante las técnicas fotogramétricas de la obtención de fotografías terrestres frontales con solapes laterales y ortocorregidas (fotogrametría bidimensional) como se planifican en la generación de secciones estratigráficas (Aguilar, Granado & Barrera, 2013) o en los alzados de cada una de las caras de un edificio histórico (Martín, 2014), permitiendo su posterior análisis e interpretación.

3.2. Reconstrucción del proceso deposicional: el ejemplo del espacio 4 del “Recinto I”

Desde la introducción de la fotografía digital y la generalización de la fotogrametría de bajo coste a principios del siglo XXI en el ámbito peninsular (Antoñanzas, Iguácel, Lopetegui & Valle, 2003), el registro arqueológico se vio acompañado por diversas propuestas sobre la investigación estratigráfica 3D (Barceló, Castro, Travet & Vicente, 2003).

En el marco del proyecto del conjunto arqueológico de San Esteban, la generación de un modelo 4D permitió un seguimiento de todo el proceso de excavación y, por tanto, la posibilidad de ir individualizando las diferentes unidades estratigráficas en su proceso deposicional a partir de una visión 3D desde el comienzo de la intervención. Este método de trabajo se ha puesto en práctica en otros casos como un gran avance en la exhaustividad gráfica del registro arqueológico, permitiendo no solo la representación del contorno de un estrato bidimensionalmente, sino su visualización 3D y texturizada (Charquero, 2016; Semeraro, 2008).

Este sistema de registro está permitiendo que la arqueología cambie hacia un nuevo paradigma en el que el registro de la documentación gráfica ha pasado de tener un enfoque 2D a otro 3D, más cercano a la reconstrucción del proceso deposicional. Este hecho es fundamental, ya que está permitiendo mantener en un entorno virtual la recomposición de lo que en la propia práctica de una excavación arqueológica era inevitable: la destrucción de la estratigrafía, o más bien, la forma en la que los depósitos se iban acumulando y sus relaciones

físicas. Se trata de una de las mejores opciones actualmente existentes para preservar la geometría del contexto arqueológico de un yacimiento y poder retroceder en el propio proceso de excavación, es decir, la cuarta dimensión. Esta documentación permite poder revisar con posterioridad el propio alcance de los contextos arqueológicos que en el momento de la excavación pudieron pasar inadvertidos.

A partir de la técnica fotogramétrica expuesta en el punto anterior, en el marco del proyecto se ha ido desarrollando un método de trabajo para la generación de un modelo 3D acumulativo (MTA) gráfico. Un concepto que articula el contenido del espacio ya desaparecido, permitiendo su restitución digital y alcanzando el objetivo de la reconstrucción topográfica de una excavación en cada una de sus fases (Charquero & López, 2012). Supone un método por el cual se enfatiza la documentación del proceso deposicional desde una perspectiva 3D y ortofotográfica de los estratos (Montalvo, Dyr Dahl, Cantisani, Fabirriis, & Vinci, 2020; Orengo, 2013), permitiendo un mayor detalle en la delimitación y forma de las unidades y conjuntos estratigráficos excavados, ya sea en espacios de manera sincrónica o diacrónica. Proporciona una mayor aproximación al registro del contexto arqueológico desde la virtualidad en el manejo de la reconstrucción de la estratigrafía destruida. De esta manera, facilita la medición de dos aspectos:

- El propio desarrollo de la excavación, al ir realizando un registro continuo de la actividad en un punto concreto del yacimiento.
- La delimitación pormenorizada de la extensión y forma volumétrica a partir de las superficies de contacto de una unidad estratigráfica, reflejando los aspectos físicos del propio depósito a nivel visual.

A partir de estas superficies, se puede generar un segundo paso de conversión hacia un modelado codificado en vóxeles, obteniendo el volumen del conjunto de unidades de la estratigrafía (Barceló et al., 2003; Cattani, Fiorini & Rondelli, 2004; Gavryushkina, 2021; Katsianis, Kotsakis & Stefanou, 2021; Lieberwirth, 2008; Ostrowski, Misk & Winiarska, 2018).

Para exponer este método de registro 3D, se ha tomado como ejemplo práctico la secuencia deposicional del espacio 4 del “Recinto I”. Se localiza en la crujía oeste del edificio, siendo una estancia de planta rectangular, con unas dimensiones de 6.7 m de longitud y una anchura de

4 m, abarcando un área aproximada de 26.5 m². Es una sala orientada en su eje longitudinal N-S, aunque con una ligera desviación. En su lado oriental se delimita el vano de acceso de 0.9 m de luz, mientras que en su parte norte se subdividió en una pequeña alcoba con un tabique de ladrillo, donde apareció una gran concentración de piezas cerámicas y vítreas fracturadas.

En el interior del espacio se documentaron diferentes estratos a partir del nivel de suelo de la última fase de ocupación del edificio, y que fue el nivel dejado por las actuaciones realizadas en el año 2009. Es decir, una parte de los depósitos estratigráficos asociados al edificio ya fueron excavados anteriormente. La intervención realizada en el marco del proyecto de la Universidad de Murcia solo

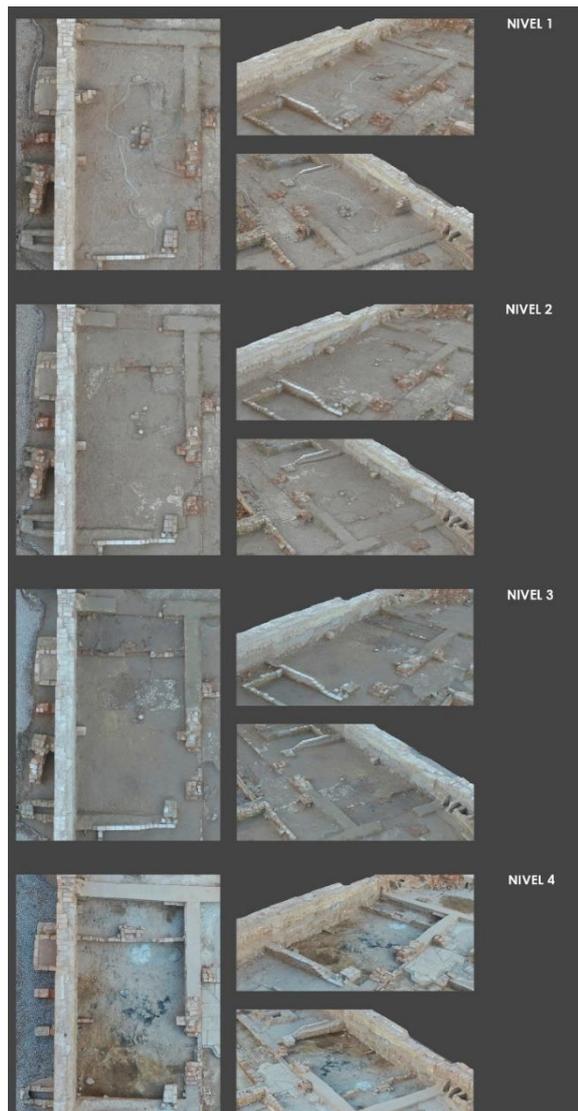


Figura 7: Secuencia deposicional de los cuatro niveles documentados en el interior del espacio 4 del "Recinto I" desde el más moderno (nivel 1) al más antiguo (nivel 4). Diferentes vistas de cada uno de los niveles a partir del registro fotogramétrico SfM de las superficies de las diferentes unidades estratigráficas.

³ Sobre este tema, existen en la actualidad una amplia variedad de programas informáticos o aplicaciones, tanto comerciales como de *software* libre, que son las principales herramientas a la hora de manejar estos modelos 3D en una fase de trabajo de laboratorio. Según los objetivos a alcanzar en el modelado y los

podido registrar los niveles deposicionales con esta metodología a partir de ese pavimento que se extendía por toda la estancia. Se contaba, pues, con un nivel que sellaba los siguientes estratos, facilitando posteriores lecturas de secuenciación cronológica. Desde ahí, las superficies de los depósitos formaron parte del registro fotogramétrico (Fig. 7), pasando a una fase de posprocesamiento y empleando distintos programas informáticos.³ De este modo, sobre cada superficie obtenida mediante la fotogrametría se fue delimitando y aislando para conseguir una capa o equivalente de unidad estratigráfica aislada y georreferenciada (Fig. 8).

El resultado final permite conjugar el tratamiento individualizado de cada uno de los depósitos registrados en una entidad 3D y en su interrelación física y espacial (Fig. 9). De esta manera, permite abrir nuevas posibilidades en la investigación hacia la generación de un registro más exhaustivo y detallado con la incorporación de un modelo de datos relacional de la parte gráfica y la base de datos asociada a la información obtenida de cada contexto estratigráfico: descripción, material recuperado, etc. Todo este soporte documental permite su implementación posterior en una infraestructura de datos espaciales (IDE) (Hernández *et al.*, 2017), un sistema de información geográfica (SIG) clásico o convencional (Laurenza & Putzoli, 2008; Montalvo *et al.*, 2020) o un sistema de información y gestión del patrimonio (SIP) (Angulo, 2012; Fernández *et al.*, 2007).

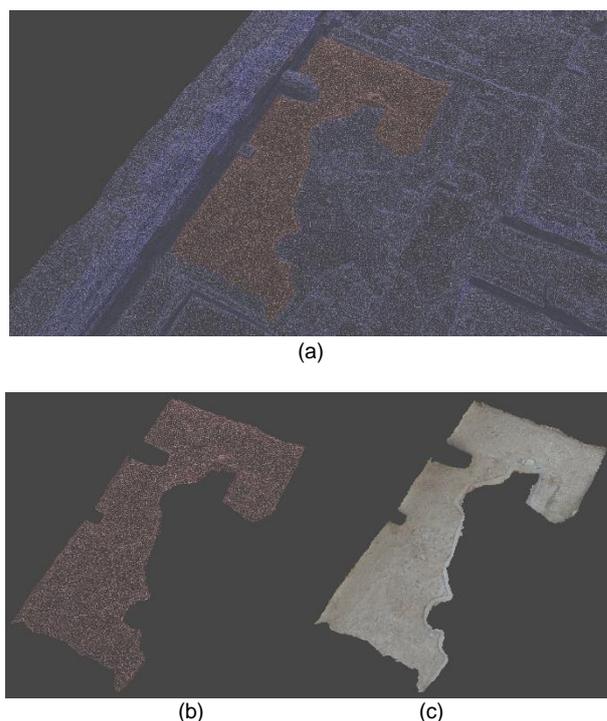


Figura 8: a) Malla de la superficie (interfaz) de un estrato dentro del contexto deposicional del espacio 4; b) Aislamiento de la malla de la superficie de una unidad estratigráfica; c) Superficie texturizada de la unidad estratigráfica.

resultados que se quieran conseguir, suele ser habitual la alternancia de diferentes aplicaciones. En este caso, los programas informáticos Blender y MeshLab fueron las opciones para el esculpido y modelado de cada capa fotogramétrica para el aislamiento y la composición de conjuntos.

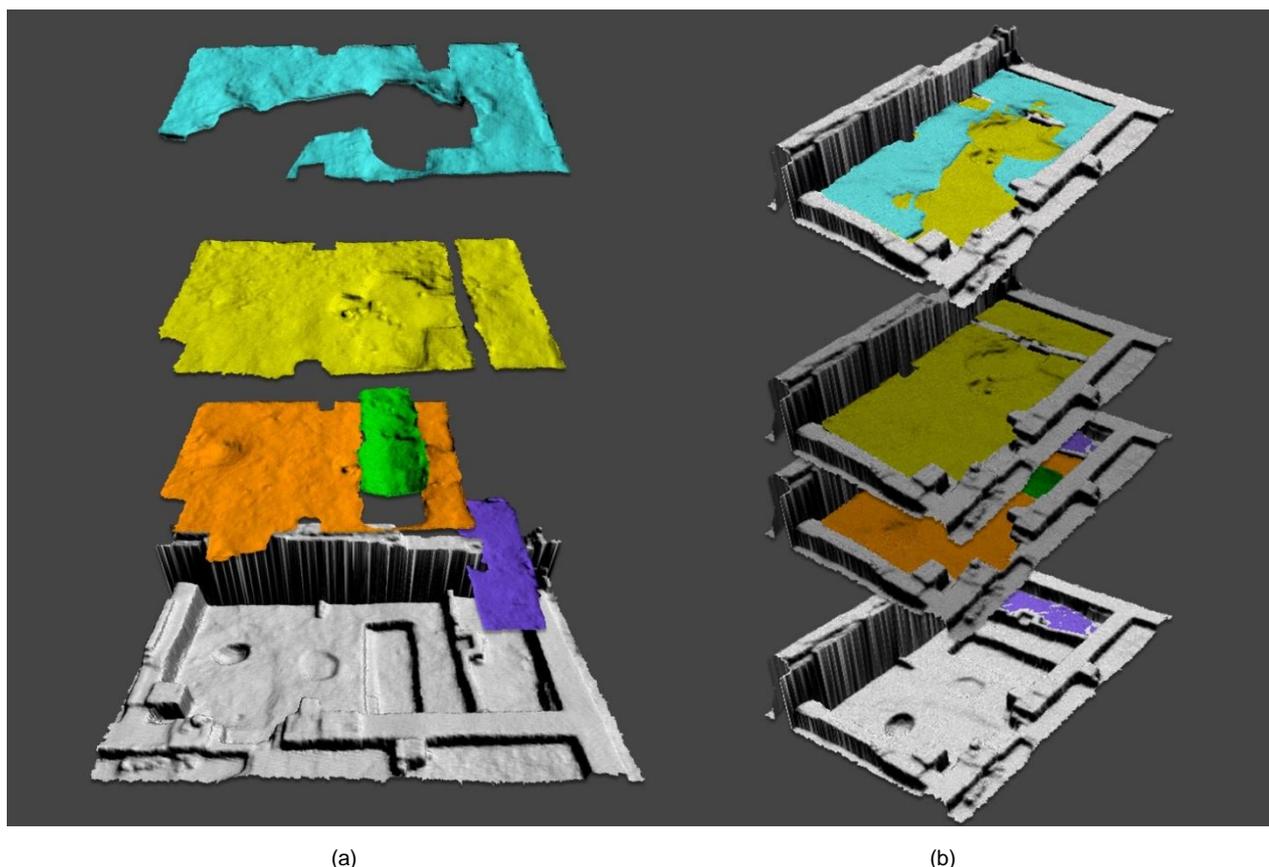


Figura 9: a) Desintegración de las superficies de las unidades estratigráficas del conjunto deposicional documentado en el espacio 4 por colores; b) Secuencia deposicional del conjunto estratigráfico según la localización espacial y dimensional de las superficies de cada unidad estratigráfica (UE) con respecto a los límites del espacio 4.

4. Divulgación

Hoy en día, sobra decir que los productos virtuales y el resultado de la digitalización de la documentación arqueológica ofrecen la posibilidad de saltar al ámbito de la divulgación a partir de su visionado en móviles, ordenadores y tabletas, alcanzando una amplia difusión más allá de los soportes físicos convencionales. Toda esta base gráfica cuenta con amplias posibilidades de divulgación a través de las plataformas vía web con la generación de productos y contenidos, tanto interactivos como audiovisuales.

En la actualidad, el sitio web de Sketchfab supone la principal plataforma privada para el alojamiento y visualización de contenidos en 3D vía web. Permite la descarga de modelos y un entorno donde poder navegar sobre él.

Por el momento, la generación de contenidos audiovisuales se ha limitado a la animación del modelo 3D de los diferentes sectores intervenidos, permitiendo acercar el visionado de este conjunto arqueológico desde una perspectiva didáctica y divulgativa.⁴ Acerca a las características arquitectónicas del sitio, como a la propia dinámica de la excavación con la evolución diacrónica del proceso de intervención.

Por otro lado, supone la base geométrica para el desarrollo posterior de levantamientos virtuales y recreaciones 3D o su reproducción en maquetas a

escalas variables de todo el conjunto o una parte de ellas de mayor detalle a partir del empleo de impresoras 3D. No solo la parte constructiva sería la implicada: también se pueden generar soportes físicos donde se explique la secuencia deposicional y los contextos arqueológicos en asociación al material arqueológico mueble recuperado.

5. Resultados y discusión

La obtención de un modelo fotogramétrico de alta resolución en el conjunto arqueológico de San Esteban ha facilitado la elaboración de ortomosaicos bien definidos geoméricamente, a la vez que supone una exhaustiva representación de la realidad, afectando a las diferentes etapas del proceso de excavación. Estos resultados facilitan el trabajo de laboratorio y de análisis, aun cuando se han de tener en cuenta ciertos inconvenientes en el tiempo de elaboración y en la capacidad de cálculo, factores que son señalados en otros casos (Pansini, 2022). Su creación y posterior manipulación exige contar con un equipo de alto rendimiento gráfico de gran coste económico.

Mediante la técnica fotogramétrica SfM se amplía la calidad de la documentación gráfica a la hora de producir planimetrías en un yacimiento. Esto implica tener un buen conocimiento de estas herramientas si no se quiere bajar el rendimiento y los resultados, estando muy generalizado el uso de procedimientos de optimización del modelo fotogramétrico, en cuanto a calidad, tiempo y

⁴ Este vídeo se puede ver en el siguiente enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=nNatQVN-jCg>

coste, que devalúan la propia documentación gráfica. En este sentido, algunos autores han tratado de establecer algunos protocolos para su aplicación al registro arqueológico, fundamentalmente con el programa Agisoft Metashape (Charquero, 2016; Rosa, Román, Moreno & Ruiz, 2022). La generalización y el uso imperito de este *software* profesional ha supuesto la proliferación de lo que se podría denominar como "fotogrametría de bajo coste", dándose frecuentemente, en nuestra opinión, errores geométricos y de texturización, si no se cuenta con otras herramientas de apoyo (Marín-Buzón *et al.*, 2021), con las consecuencias que eso tiene en la calidad de la documentación gráfica y planimétrica. En otros casos, se establece como parte de la monitorización de un flujo de trabajo de un yacimiento arqueológico (González-Quiñones *et al.*, 2022) en el que se va generando un modelo predictivo sobre los propios ritmos de excavación.

La fotografía y, por tanto, la técnica fotogramétrica, proporciona una imagen realista, pero la obtención de la secuencia arqueológica, la producción de buena parte de la documentación gráfica, la toma de decisiones y la interpretación del registro arqueológico continúa en manos del factor humano. El coste computacional de las aplicaciones fotogramétricas sigue siendo uno de los principales problemas en el que la automatización del proceso es muy relevante, generalizándose la creación de modelos 3D rápidos, de baja resolución y poca precisión que pueden quedarse obsoletos al poco tiempo.

En el caso de los modelos 3D obtenidos por los miembros del proyecto, utilizando equipos portátiles bastante actualizados y sin altas prestaciones de *hardware*, se han podido manipular los modelos 3D una vez que fueron generados según el procedimiento descrito en los apartados anteriores. Con ellos se han podido realizar mediciones, secciones y visionados de elementos en detalle muy prácticos y útiles. También se ha contado con toda una información topográfica secuencial en el momento de revisar la documentación en la fase de laboratorio, siendo ésta una de las principales ventajas. Sobre todo, por su capacidad de cubrir grandes superficies de los recintos que, por sus dimensiones y compartimentación, dificultaban una medición directa en campo, o para el análisis de algún elemento *a posteriori* ya intervenido en el transcurso de los trabajos de campo.

Una de las aplicaciones más relevantes ha sido la aplicación de fotogrametría SfM en la excavación de los enterramientos de inhumación de la *maqbara* y en el estudio antropológico de sus restos. Un sistema de registro muy versátil para este tipo de elementos como se ha puesto en práctica en otros casos peninsulares (Romero, Delgado & Martín, 2018). Se obtuvo una documentación gráfica 3D del esqueleto, lo que implicó tener un registro muy preciso de los individuos esqueletizados. Este modelo digital de alta resolución obtenido por parte del proyecto hizo posible analizar posiciones entre los huesos y tomar las dimensiones que en campo no se podían realizar dada la fragilidad de este material o la pérdida de su posición exacta tras su exhumación. Esta última circunstancia ha sido la más relevante aportación de esta técnica, ya que permitió volver a analizarlo como si se encontrara *in situ*, debido a que la extracción implica la alteración completa de su posicionamiento. Con esta técnica se ha mejorado la documentación de las inhumaciones en el proceso de extracción de los restos óseos: permite la determinación taxonómica de las inhumaciones sin perder información

de su posición, a la vez que ayuda a la toma de mediciones en el trabajo de campo.

La generación de ortomosaicos mediante fotogrametría SfM de los alzados de los restos arqueológicos se convierte en la mejor opción con respecto a otros procedimientos, pero atendiendo a las condiciones ambientales para la toma de fotografías (León-Bonillo *et al.*, 2022; Marín-Buzón *et al.*, 2021). Así se ha podido observar en el conjunto arqueológico de San Esteban, donde las estructuras poseen escasa altura, pero una gran extensión longitudinal, convirtiendo esta técnica en una herramienta más versátil, incluso que las propias fotografías ortocorregidas 2D o el escáner láser terrestre (TLS por sus siglas en inglés). El patrimonio cultural inmueble posee, en muchas ocasiones, grandes lienzos o superficies más o menos planas, donde las ortoimágenes bidimensionales juegan un gran papel en la lectura de paramentos, al contrario de lo que suele representar el nivel de conservación de un yacimiento arqueológico. El escaneado general de los sectores intervenidos suma otra ventaja: facilitar diferentes vistas de una manera indiscriminada de los alzados de todo el conjunto arquitectónico.

El modelado de la estratigrafía ha seguido similares métodos de captura para la obtención de las capas individualizadas de las distintas unidades estratigráficas que, como en otros casos, se ha realizado mediante técnicas fotogramétricas o con el empleo del escáner láser (De Reu *et al.*, 2014; Croix *et al.*, 2019; Katsianis *et al.*, 2021; Roosevelt, Cobb, Moss, Olson, & Ünlüsoy, 2015). De este modo, se ha obtenido una capa 3D fototexturizada y un MDT de la superficie del estrato sobre la que partir en las siguientes etapas del flujo de trabajo, de cara a la obtención de un posterior modelo por extrusión o repetición modular mediante diferentes métodos (Gavryushkina, 2021).

A pesar de haber renunciado inicialmente a la obtención del modelo por extrusión, la producción de estas superficies 3D mediante fotogrametría SfM permite una secuencia estratigráfica completa, consiguiendo la generación de perfiles, localizar artefactos asociados a cada contexto y preservar la estratigrafía. También posibilita registrar una microestratigrafía de escasos centímetros con alta precisión y una imagen fotorealista de alta resolución de la superficie de cada interfaz.

En este sentido, según la experiencia obtenida, el método fotogramétrico SfM de registro debe ser entendido como una primera fase de trabajo, versátil y eficaz, para la modelización del proceso deposicional, trasladándolo a un entorno virtual sobre el que operar.

Desde una perspectiva más amplia que afecta al campo de la divulgación, puede entenderse que la digitalización 3D de los objetos y su documentación mediante fotogrametría SfM, tan extendida en el ámbito museístico o en el aula (Martínez, Martínez, González & Flores, 2021) está llegando a los yacimientos. La digitalización de las estructuras y los depósitos arqueológicos, más allá de su implementación en un SIG como herramienta de investigación (Montalvo *et al.*, 2020), permite un acercamiento integral a la realidad de un yacimiento a través de entornos virtuales con el objetivo de su transferencia y socialización. Así, cualquier actor con un compromiso pedagógico de por medio puede acercarse con fines de divulgación científica o educativa para su interactividad, ya sea a través de visores virtuales o con impresiones 3D (Díaz-Navarro & Sánchez, 2021;

Maldonado, Rouco & Martínez, 2021), pudiendo llegar a todo tipo de público. La elaboración de materiales de divulgación del conjunto arqueológico de San Esteban realizados con estas técnicas ha comenzado con la producción de recursos audiovisuales en formato vídeo, difundidos a través de redes sociales, fácilmente accesibles con cualquier tipo de dispositivo de reproducción y conexión a internet.

6. Conclusiones

En estos últimos años, la aplicación de la técnica de la fotogrametría 3D al patrimonio cultural en general y al arqueológico en particular, va más allá de ser simplemente un método de trabajo. Sin embargo, no debería ser una finalidad en sí misma.

Desde el ámbito de la investigación, la aplicación de esta técnica como método y la consecución de otros productos gráficos no debe hacer olvidar la consecución de los objetivos de conocimiento histórico de cualquier proyecto, ya sea mediante métodos tradicionales o con la aplicación de nuevas tecnologías.

Lo mismo ocurre desde la didáctica y la divulgación: ¿qué es lo que se pretende enseñar? No desde su sentido de “mostrar”, sino a partir del concepto educativo de aprendizaje y de lo que se quiere transferir a la sociedad. Se puede considerar que el debate está en el cómo se realiza y las implicaciones de las limitaciones tecnológicas a las que se deriva, pudiendo forzar a cierta segregación en el consumo y manejo de algunos soportes por una parte de la sociedad. A veces se desdeña la parte física o real y solo se atiende a lo virtual.

En el campo de la arqueología han transcurrido ya varios años desde la transformación del anterior registro gráfico 2D en un nuevo paradigma 3D, acelerado por el uso de drones como herramientas de captura fotográfica dentro del registro arqueológico de un yacimiento. Sin embargo, no son muchos los casos donde se detalle este tipo de registro deposicional, ya que la práctica de campo se ve sometida a plazos de ejecución, tiempo y coste que limitan la pausa y la reflexión de una intervención arqueológica en su fase de campo y el empleo de metodologías más exhaustivas.

Los resultados obtenidos dentro del proyecto Fase 0 del conjunto arqueológico de San Esteban reflejan múltiples alternativas en el tratamiento del registro arqueológico digitalizado e informatizado. Una de ellas, que se puede considerar clave, es el procesado de los contextos arqueológicos como base fundamental de un registro gráfico relevante de cara a su posterior posprocesado.

A partir de los procedimientos fotogramétricos SfM de alta precisión, se ha trabajado en una información gráfica precisa y de detalle, lo que implica minimizar el error de proyección geométrico y secuenciar el fenómeno deposicional estratigráfico del sitio, al menos parcialmente.

Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a todo el equipo de trabajo que durante las diferentes campañas ha participado en este proyecto, tanto investigadores y técnicos como estudiantes del Grado de Historia y del Máster de Historia y Patrimonio Histórico de la Universidad de Murcia.

Referencias

- Aguilar Camacho, J., Granado Castro, G., & Barrera Vera, J. A. (2013). Aplicación de técnicas avanzadas para el registro y la documentación estratigráfica en arqueología. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 130-134. <https://doi.org/10.4995/var.2013.4345>
- Angulo Fornos, R. (2012). Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. *Arqueología de la Arquitectura*, 9, 11-25. <https://doi.org/10.3989/arqarqt.2012.10005>
- Antoñanzas, M. A., Iguácel de la Cruz, P., Lopetegui Galarraga, A., & Valle Melón, J. M. (2003). El Sequeral (Calahorra, La Rioja). Investigación fotogramétrica y arqueología. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, 13-16. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2003.19>
- Barceló, J. A., Castro, O. de, Travet, D., & Vicente, O. (2003). A 3D model of an archaeological excavation. In M. Doerr & A. Sarris (Eds.), *The digital heritage of archaeology. CAA 2002* (pp. 85-87). Athens: Hellenic Ministry of Culture.
- Caballero Zoreda, L. (2006). El dibujo arqueológico. Notas sobre el registro gráfico en arqueología. *Papeles del Patal*, 3, 75-95.
- Cattani, M., Fiorini, A., & Rondelli, B. (2004). Computer applications for a reconstruction of archaeological stratigraphy as a predictive model in urban and territorial contexts. In K. Fischer-Ausserer, W. Börner, M. Goriany & L. Karlsruher-Vöckl (Eds.), *Enter the past. The E-way into the four dimensions of cultural heritage. CAA 2003* (pp. 299-303). Oxford: BAR Publishing.
- Charquero Ballester, A. M. (2016). Práctica y usos de la fotogrametría digital en arqueología. *DAMA. Documentos de Arqueología y Patrimonio Histórico*, 1, 139-157.
- Charquero Ballester, A. M., & López Lillo, J. A. (2012). Registro tridimensional acumulativo de la secuencia estratigráfica. Fotogrametría y SIG en la intervención arqueológica de lo Boligni (Alacant). *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 81-88. <https://doi.org/10.4995/var.2012.4529>

- Croix, S., Deckers, P., Feveile, C., Knudsen, M., Skytte Qvistgaard, S., Sindbæk, S. M., & Wouters, B. (2019). Single context, metacontext, and high definition archaeology: integrating new standards of stratigraphic excavation and recording. *Journal of Archaeology Method and Theory*, 26, 1591–1631. <https://doi.org/10.1007/s10816-019-09417-x>
- De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., & De Clercq, W. (2014). On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*, 41, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.08.020>
- Dell'Unto, N., Landeschi, G., Apel, J., & Poggi, G. (2017). 4D recording at the trowel's edge: using three-dimensional simulation platforms to support field interpretation. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 632-645. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.011>
- Díaz-Navarro, S., & Sánchez de la Parra-Pérez, S. (2021). Impresión 3D y educación inclusiva. Un taller sobre evolución humana en colaboración con la ONCE. In L. Vega-Caro, A. Vico Bosch & D. Recio Moreno (Coords.), *Nuevas formas de aprendizaje en la era digital: en busca de una educación inclusiva* (pp. 532-551). Madrid: Dykinson S. L.
- Eiroa Rodríguez, J. A., Haber Uriarte, M., Vallalta Martínez, P., González Ballesteros, J. A., Hernández Robles, A., Celma Martínez, M. (...), & Molina Campuzano, M. I. (2019). El conjunto arqueológico de San Esteban: aportaciones desde la investigación interdisciplinar. In J. García, P. Collado & A. Iniesta (Coords.), *XXV Jornadas de Patrimonio Cultural. Región de Murcia* (pp. 41-51). Murcia: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Eiroa Rodríguez, J. A., Haber Uriarte, M., Vallalta Martínez, P., González Ballesteros, J. A., Hernández Robles, A., Celma Martínez, M. (...), & Salas Rocamora, S. (2021). Nuevas investigaciones arqueológicas en el arrabal de la Arrixaca (Murcia): el conjunto arqueológico de San Esteban desde una perspectiva interdisciplinar. In M. Retuerce (Ed.), *Actas VI Congreso de Arqueología Medieval Española (España-Portugal)* (pp. 55-62). Ciudad Real: Asociación Española de Arqueología Medieval.
- Enríquez, C., Jurado, J. M., Bailey, A., Callén, D., Collado, M. J., Espina, G. (...), & Ramón Feito, F. (2020). The UAS-Based 3D image characterization of mozarabic church ruins in Bobastro (Malaga), Spain. *Remote Sensing*, 12, 2377. <https://doi.org/10.3390/rs12152377>
- Fernández, J. J., Finat, J., Fuentes, L., Martínez, J., Pérez-Moneo, J. D., San José, J. I., & Tordable, J. (2007). Modelos ampliados digitales para planificación y gestión de intervenciones sobre edificios y entornos urbanos complejos. *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 2(4), 611-621. <https://doi.org/10.5821/ace.v2i4.2392>
- García-Gómez, I., Fernández de Gorostiza, M., & Mesanza Moraza, A. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la Arquitectura*, 8, 25-44. <https://doi.org/10.3989/arqarqt.2011.10019>
- García-Molina, D. F., González-Merino, R., Rodero-Pérez, J., & Carrasco-Hurtado, B. (2021). Documentación 3D para la conservación del patrimonio histórico: el castillo de Priego de Córdoba. *Virtual Archaeology Review*, 12(24), 115-130. <https://doi.org/10.4995/var.2021.13671>
- Gavryushkina, M. (2021). The potential and problems of volumetric 3D modeling in archaeological stratigraphic analysis: a case study from Chlorakas-Palloures, Cyprus. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 21, e00184. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00184>
- González-Quiñones, J. J., Reinoso-Gordo, J. F., Solano-García, J. A., Cámara-Donoso, J. M., León-Robles, C. A., Linares-Matás, G., & Jiménez-Arenas, J. M. (2022). Monitoring an archaeological excavation using photogrammetry and digital elevation models (DEMS): the case study of Barranco León in Orce (Granada, Spain). *SPAL*, 31(2), 10-30. <https://doi.org/10.12795/spal.2022.i31.18>
- Hernández, D., Felipe, B., Quintanilla, A., Belmar, S., Abad, L., Amorós, V. (...), & Martínez, J. C. (2017). Implementación de una infraestructura de datos espaciales de patrimonio arqueológico: Tolmo de Minateda. *Revista Mapping*, 26(186), 28-38.
- Katsianis, M., Kotsakis, K., & Stefanou, F. (2021). Reconfiguring the 3D excavation archive. Technological shift and data remix in the archaeological project of Paliambela Kolindros, Greece. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36, 102857. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102857>

MODELIZACIÓN 3D DE ESTRUCTURAS Y DEPÓSITOS ARQUEOLÓGICOS COMO MÉTODO DE DOCUMENTACIÓN Y DIVULGACIÓN: EL CASO DEL CONJUNTO ARQUEOLÓGICO DE SAN ESTEBAN (MURCIA, ESPAÑA)

- Korumaz, S. A. G., & Yıldız, F. (2021). Positional accuracy assessment of digital orthophoto based on UAV images: an experience on an archaeological area. *Heritage*, 4, 1304-1327. <https://doi.org/10.3390/heritage4030071>
- Laurenza, S., & Putzolu, C. (2008). Dalla terra al monitor: riflessioni e considerazioni sulla gestione digitale dello scavo archeologico. In G. de Felice, M. G. Sibilano, G. Volpe (Coords.), *L'informatica e il metodo della stratigrafia* (pp. 107-122). Bari: Edipuglia.
- León-Bonillo, M. J., Mejías-García, J. C., Martínez-Álvarez, R., Pérez-Romero, A. M., León-Ortíz, C., & Marín-Buzón, C. (2022). SfM photogrammetric techniques applied in the building archaeology works of the old cloister of the monastery of San Francisco from the 16th century (Cazalla de la Sierra, Seville). *Heritage*, 5, 3901–3922. <https://doi.org/10.3390/heritage5040201>
- Lieberwirth, U. (2008). 3D GIS voxel-based model building in archaeology. In A. Posluschny, K. Lambers & I. Herzog (Eds.), *CAA2007 - Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)* (pp. 1-8). Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH.
- Maldonado Ruiz, A. (2020). *La aplicación de la fotogrametría (SfM) y las nuevas tecnologías para la mejora de la documentación, difusión y divulgación del patrimonio arqueológico* (Doctoral thesis, Universidad de Granada, Granada, Spain). <https://hdl.handle.net/10481/62261>
- Maldonado Ruiz, A., Rouco Collazo, J., & Martínez Carrillo, C. (2021). Arqueología, impresión 3D y tifología. La accesibilidad del patrimonio arqueológico como forma de difusión. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 31, 421-441. <https://doi.org/10.30827/CPAG.v31i0.15430>
- Marín Buzón, M. C. (2020). *Aplicaciones de la geomática a la arqueología y ciencias afines* [Geomatics applications to archaeology and related sciences] (Doctoral thesis, Universidad de Almería, Almería, Spain). <https://hdl.handle.net/10835/10884>
- Marín-Buzón, C., Pérez-Romero, A. M., León-Bonillo, M. J., Martínez-Álvarez, R., Mejías-García, J. C., & Manzano-Agugliaro, F. (2021). Photogrammetry (SfM) vs. terrestrial laser scanning (TLS) for archaeological excavations: mosaic of Cantillana (Spain) as a case study. *Applied Science*, 11, 11994. <https://doi.org/10.3390/app112411994>
- Martín Talaverano, R. (2014). Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura*, 11, e011. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2014.014>
- Martínez Sánchez, M., Martínez García, J. J., González Fernández, R., & Flores García, A. (2021). El objeto histórico: del museo a internet a través de la fotogrametría. *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, 40, 379-394.
- Montalvo Puente, C. E., Dyr Dahl, E., Cantisani, M. Fabirriis, L. de, & Vinci, E. (2020). La implementación del SIG de excavación: el caso de estudio de los sitios Las Orquídeas y Huataviro (Imbabura, Ecuador). *Arqueología Iberoamericana*, 46, 34-44. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3969823>
- Orengo, H. A. (2013). Combining terrestrial stereophotogrammetry, DGPS and GIS-based 3D voxel modelling in the volumetric recording of archaeological features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.07.005>
- Ostrowski, W., Misk, Ł., & Winiarska, W. (2018). Three-dimensional stratigraphy reconstruction and GIS-postprocessing issues in archaeological field 3D documentation. *Studies in Ancient Art and Civilization*, 22, 219-240. <https://doi.org/10.12797/SAAC.22.2018.22.10>
- Pansini, R. (2022). Rilievo, documentazione e ricostruzione di un centro monumentale con fotogrammetria e modellazione tridimensionali: il caso della città romana di Sala. *Archeologia e Calcolatori*, 33(1), 239-256. <https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.13>
- Robles Fernández, A., Sánchez Pravia, J. A. & Navarro Santa-Cruz, E. (2011). Arquitectura residencial andalusí y jardines en el arrabal de la Arrixaca. Breve síntesis de las excavaciones arqueológicas realizadas en el jardín de San Esteban, Murcia (2009). *Verdolay*, 13, 205-219.
- Romero Pellitero, P., Delgado Anés, L., & Martín Civantos, J. M. (2018). Digital public mortuary archaeology via 3D modelling: the Pago del Jarafí cemetery (Granada, Spain). *AP: Online Journal in Public Archaeology*, 8(2), 195-220. <https://doi.org/10.23914/ap.v8i2.151>

- Roosevelt, C. H., Cobb, P., Moss, E., Olson, B. R., & Ünlüsoy, S. (2015). Excavation is destruction digitization: advances in archaeological practice. *Journal of Field Archaeology*, 40(3), 325-346. <https://doi.org/10.1179/2042458215Y.0000000004>
- Rosa Henestrosa, A., Román Punzón, J. M., Moreno Alcaida, M., & Ruiz Montes, P. (2022). Implementación de técnicas digitales para la documentación arqueológica en la villa romana de Salar (Granada). *Vegueta*, 22(1), 113-136. <https://doi.org/10.51349/veg.2022.1.07>
- Ruiz Sabina, J. A., Gallego Valle, D., Peña Ruiz, C., Molero García, J. M., & Gómez Laguna, A. (2015). Fotogrametría aérea por drone en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del Campo de Montiel. *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 5-19. <https://doi.org/10.4995/var.2015.4366>
- Semeraro, G. (2008). 'Accedere' allo scavo archeologico. Sistemi (e problemi) di elaborazione dei dati. In G. De Felice, M. G. Sibilano & G. Volpe (Coords.), *L'informatica e il metodo della stratigrafia* (pp. 39-54). Bari: Edipuglia.