



PROYECTOS DE DIGITALIZACIÓN Y REALIDAD VIRTUAL EN EL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO. EL CASO DEL YACIMIENTO DE LA MOTILLA DEL AZUER EN DAIMIEL (CIUDAD REAL)

DIGITIZATION AND VIRTUAL REALITY PROJECTS IN ARCHAEOLOGICAL HERITAGE. THE CASE OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE OF MOTILLA DEL AZUER IN DAIMIEL (CIUDAD REAL)

Miguel Torres Mas^{a,*} , Víctor Manuel López-Menchero Bendicho^b , Julio López Tercero^c, Juan Torrejón Valdelomar^d , Herbert Maschner^b 

^a Motilla del Azuer, Ayuntamiento de Daimiel, Plaza de España, 1, 13250 Daimiel (Ciudad Real), España. motilladelazuer@aytodaimiel.es

^b Global Digital Heritage, Estados Unidos/España. victor.lopez-menchero@gmail.com; hmaschner@gmail.com

^c Myou Software, 13170, C/ Alarcos, 31 Puerta Izquierda, Miguelurra, Ciudad Real, España. myousoftware@gmail.com

^d Torrejón Estudio, C/ Cruz del Sur, 2, Bloque 5, 2ºE, 13005 Ciudad Real, España. j.torregon.valde@gmail.com

Destacados:

- Este artículo presenta un proyecto que está permitiendo avanzar en la interpretación y difusión del yacimiento arqueológico de la Motilla del Azuer.
- Apuesta por la incorporación de las nuevas tecnologías en la gestión del patrimonio arqueológico y cultural.
- Desarrollo de una experiencia provechosa para favorecer la accesibilidad al patrimonio e impulsar la democratización cultural a través de su proyección.

Abstract:

This article presents the virtualization project of the Motilla del Azuer archaeological site in Daimiel (Ciudad Real, Spain). This project is using new and unique tools for the research, documentation, interpretation and dissemination carried out in this important prehistoric site. The incorporation of digital documentation and Virtual Reality (VR), advanced technological tools in the archaeological and cultural heritage fields, open new ways for managing cultural legacies. Modern advances in 3D digitization and VR allow the application of these techniques on a wide range of cultural assets with different characteristics and chronologies, opening a broad spectrum of new possibilities in research, education, and public outreach. This is an expanding area of heritage management which creates a positive impact on the economic, cultural and social activities of local communities and regions. Because of these positive impacts, more and more stakeholders such as institutions, administrations, and heritage organisations are taking an active interest in this sector of technological development. In the case of the Motilla del Azuer archaeological site, the digitization and virtualization work undertaken, along with other dissemination activities, have provided critical products for the presentation, interpretation, and promotion of this monument.

La Motilla del Azuer is one of the most unique archaeological sites in Spain. Dating from the Bronze Age, it is a fortification with a central plan, formed by three lines of concentric walls distributed around a central tower (Fig. 2). Inside, the labyrinthine shape of the access systems is remarkable, made up of narrow corridors, stairs, ramps... This defensive enclosure allowed the protection and control of essential products for the people of the Bronze Age. Its true uniqueness is that it encloses a monumental water well which is over 15 m deep.

La Motilla del Azuer is open to the public and receives thousands of visitors each year. But for conservation reasons, the number of people who can access the site is highly controlled. Likewise, due to its defensive nature and its age, it is a space where circulation is difficult, so it is impossible to visit for people with reduced mobility. For these and other reasons, the Daimiel City Council, in collaboration with the US non-profit entity Global Digital Heritage and the Spanish company Myou Software, has developed a project to digitize the archaeological site and make it accessible through an installed VR system, located permanently in the Daimiel Museum, the interpretation centre for the site (Fig. 10). This facility is designed to be used both by people in wheelchairs or with reduced mobility, as well as by all visitors to the museum; it provides a realistic virtual tour of the site. To achieve this level of realism, a detailed 3D digitization of the site using photogrammetry, laser scanning, and 3D spherical photography was undertaken, and a VR installation based on the use of an HTC Vive Pro device that has motion controllers for hands (HTC Vive controllers) and feet (HTC Vive Trackers) was created. The primary software is called Myou Engine, an open-source 3D engine compatible with XR, developed by the Myou Software company. In order to increase the immersiveness as much as possible, the Myou Software company has also designed a control system called Natural Locomotion that works by moving the arms and legs (Fig. 11).

* Corresponding author: Miguel Torres Mas, motilladelazuer@aytodaimiel.es



The final result of the project has allowed the implementation of an innovative VR space that increases accessibility to the archaeological site, represents a new tourist attraction for the town, and promotes new ways of managing and enjoying archaeological heritage.

Keywords: archaeological heritage; virtual archaeology; digitization; virtual reality (VR); diffusion; heritage tourism

Resumen:

Este artículo tiene como objetivo presentar el proyecto de virtualización del yacimiento arqueológico de la Motilla del Azuer, en la localidad de Daimiel (Ciudad Real, España). En líneas generales, esta actividad está posibilitando obtener unos beneficios interesantes en torno a la investigación, documentación, interpretación y divulgación de este enclave prehistórico. La incorporación de herramientas tecnológicas en el campo del patrimonio arqueológico y cultural, como la documentación digital y la Realidad Virtual (RV), están constituyendo un impulso relevante para favorecer la gestión de este legado. Los avances experimentados en áreas como la digitalización 3D y la RV permiten desarrollar estas técnicas sobre una amplia tipología de bienes culturales, de diferentes características y cronologías, abriendo un considerable abanico de posibilidades. En este sentido, las valoraciones que está ofreciendo la aplicación de estos instrumentos, en virtud de los resultados alcanzados en diversos lugares, están significando una experiencia positiva para cualquier territorio: útil para aproximarse a su pasado y atractivo desde el punto de vista económico, cultural y social. Es por ello que cada vez son más las instituciones y entidades interesadas en este sector. En el caso del yacimiento arqueológico de la Motilla del Azuer, las labores de digitalización y virtualización emprendidas, junto con otras actividades de difusión, han generado productos de gran utilidad para el conocimiento y promoción de este monumento. Como se expone en las siguientes páginas, la correcta combinación de la digitalización 3D y la RV está suponiendo una dinamización de sus contenidos, un estímulo para disfrutar plenamente de la riqueza de sus vestigios y una mayor accesibilidad hacia los mismos.

Palabras clave: patrimonio arqueológico; arqueología virtual; digitalización; realidad virtual (RV); difusión; turismo patrimonial

1. Introducción: la incorporación de las nuevas tecnologías en el patrimonio arqueológico y cultural

En los últimos años, las actividades en torno a la digitalización y reproducción virtual del patrimonio arqueológico y cultural están experimentando avances interesantes en áreas como el trabajo de campo, la metodología aplicada y la presentación de sus resultados.

Debido a este impulso, estas acciones se están extendiendo cada vez más sobre un mayor número de bienes, abarcando amplias tipologías y realidades: desde el estudio de objetos arqueológicos hasta el de imponentes yacimientos monumentales. Por tanto, en su proyección se recoge todo un amplio catálogo de expresiones materiales.

Asimismo, las posibilidades que ofrecen estas técnicas, en virtud de los resultados obtenidos, están significando una experiencia positiva para el desarrollo de los territorios en los cuales se emplazan: útiles para conocer su pasado y beneficiosos desde el punto de vista económico, cultural y social. En la última década se han puesto en marcha diversos proyectos y equipamientos de Realidad Virtual (RV) aplicada al gran público, tanto en espacios patrimoniales como en ámbitos específicamente arqueológicos. Son los casos de *Galicia Dixital* en Santiago de Compostela (Hernández *et al.*, 2008), la Cueva de Santimamiñe en Cortézubi (Barrera & Baeza, 2010), *Etruscanning 3D* en Amsterdam (Pietroni & Adami, 2014), *Livia's villa reloaded* en Roma (Pietroni, Forlani, & Rufa, 2015), *Past View* en Sevilla (Gisbert, 2019, pp. 139-140), *Ullastret 3D* en la provincia de Girona (Codina, de Prado, Ruiz, & Sierra, 2017), el teatro romano de Cartagena, etc.

Por todas estas razones, la incorporación de las nuevas tecnologías se ha convertido en un tema que despierta un interés creciente de todos aquellos agentes involucrados, de una manera u otra, en la gestión del legado patrimonial.

La valorización de cualquier elemento patrimonial tiene que ostentar una dimensión social en su misión, siendo el incentivo de estrategias que favorezcan su interpretación y exposición una consideración imprescindible sobre el mismo. Del mismo modo, debe impulsar dinámicas que estimulen procesos de democratización cultural: promocionando la accesibilidad de la población hacia vestigios que forman parte de su identidad y vida cotidiana y generando un bienestar socioeconómico y cultural.

Por otra parte, dentro de las funciones contempladas en la tutela de cualquier legado patrimonial, las campañas de investigación y protección son prioritarias en su misión. En este sentido, corresponden con manifestaciones que poseen unas coordenadas espaciales y temporales que las convierten en únicas, por lo que en todo momento se deben adoptar medidas para preservar la representación de los múltiples significados y particularidades que comprenden (López-Menchero, 2012, p. 11). *Stricto sensu*, cada intervención sobre ellas supone un reto en su planteamiento y ejecución, implicando la aplicación de directrices y pautas adecuadas y precisas.

La singularidad asociada a estos bienes los convierte en activos destacados, despertando un interés elevado en la población para su comprensión y disfrute. No obstante, este aliciente lleva aparejado ciertas limitaciones en su explotación. Así, el tránsito por su perímetro causa un impacto sobre sus componentes, situación que si no es controlada convenientemente puede alterar los valores que atesoran, degradando aquellos aspectos que los convierten en únicos.

De igual manera, por sus características se trata de conjuntos principalmente expuestos al aire libre, circunstancia que comporta una vulnerabilidad frente a unas condiciones ambientales ineludibles (Angulo, 2018, p. 34), produciéndose un deterioro constante por agentes erosivos externos, sobre todo ambientales y biológicos.

En definitiva, la originalidad que atesora para su explotación se convierte en la misma medida en fragilidad para su estabilidad; por lo que es necesario diseñar fórmulas que sean sostenibles con respecto a testimonios que por sus particularidades son irrepetibles y no renovables.

A este respecto, las herramientas vinculadas con la digitalización y reproducción virtual del patrimonio están facilitando la introducción de mejoras en los procesos de conservación y documentación. Un registro exhaustivo puede resultar indispensable para asegurar su mantenimiento y valorización futura, ante amenazas de deterioro, desaparición o traslado.

Además, tal y como quedó reflejado en los Principios de Sevilla (Principios Internacionales de la Arqueología Virtual, ratificados por la 19ª Asamblea General del ICOMOS celebrada en Nueva Delhi en 2017): “la documentación detallada del patrimonio arqueológico es extremadamente importante no solo para su registro, análisis y difusión, sino también para su propia gestión” (López-Menchero, 2013, p. 279).

Por otra parte, estas perspectivas también están ofreciendo nuevos modelos en los procedimientos habilitados para visitar los sitios patrimoniales; promoviendo opciones alternativas en los itinerarios. Estas propuestas están llegando incluso a prescindir de la presencia física en los recintos, por lo que esta disposición está activando un abanico muy amplio de posibilidades. Igualmente, en virtud de su capacidad de adaptación cuenta con un potencial más efectivo para responder a las demandas heterogéneas de segmentos diferentes de público. De manera concreta, es el caso que está protagonizando la RV y su aplicación en la gestión del patrimonio arqueológico y cultural.

La aplicación de estas técnicas de RV en el campo del patrimonio está integrando nuevas pautas en su proyección, estimulando avances en su estudio, protección y divulgación. En los mismos términos, está logrando una mayor involucración de la sociedad hacia estos trabajos, estableciendo cauces interesantes de interactividad.

En relación al proceso de excavación arqueológica, exponer la reconstrucción de un hallazgo o unidad arqueológica posee gran valor pedagógico, ya que ayuda a comprender las cuestiones surgidas en torno a los datos obtenidos, las valoraciones inferidas y la toma de decisiones. Como enuncian Joan Santacana & Nuria Serrat (2005, p. 92) explicar de forma transparente cómo se ha llegado a determinadas conclusiones no solo facilita la comprensión de la realidad expuesta, sino que además aumenta el conocimiento de los potenciales visitantes. De todos modos, la compleja realidad de las acciones comprendidas, y la necesidad de desarrollar un análisis exhaustivo, implican que estos proyectos deban estar guiados por los siguientes principios esenciales: interdisciplinariedad, finalidad, complementariedad, autenticidad, rigor histórico, eficiencia, transparencia científica, formación y evaluación; a fin de obtener resultados de cierta calidad que optimicen la actividad perfilada (López-Menchero, 2013).

Asimismo, estas labores deben ser abordadas desde la visión, aportación y cooperación de un conjunto amplio de especialistas, de tal manera que la contribución de cada uno de ellos produzca un enriquecimiento

completo de toda la actuación (López-Menchero, Flores, Vicent & Grande, 2017). Una adecuada participación de profesionales pertenecientes a diversos sectores ofrecerá una mayor excelencia científica en la investigación.

En el caso del modelo virtual de la Motilla del Azuer se ha planteado una experiencia basada, fundamentalmente, en tres objetivos principales: desarrollar un registro exhaustivo de este enclave prehistórico; garantizar su conservación preventiva, y potenciar la interpretación y divulgación del mismo. Los resultados alcanzados en esta estrategia están permitiendo combinar de manera eficaz la oferta real del monumento como destino físico con su oferta virtual: fomentando su reconocimiento como recurso patrimonial y turístico de primer orden.

2. La Motilla del Azuer

La Motilla del Azuer (Fig. 1), localizada en el término municipal de Daimiel (Ciudad Real, España), constituye el mejor representante de una tipología de asentamientos singulares dentro de la prehistoria universal como fueron las motillas, peculiares dentro del horizonte crono-cultural definido como Edad del Bronce en La Mancha (2200-1500 a.n.e.) (Nájera & Molina, 2004; Torres, 2016; Sánchez-Meseguer & Galán, 2019).



Figura 1: Localización y vistas de la Motilla del Azuer.

Las motillas reciben esta denominación puesto que su abandono configuró unos montículos cónicos artificiales que destacan en la llanura manchega; siendo recogidos bajo esta designación en la toponimia regional y local. Debido a las características y particularidades que atesoran estos enclaves poseen un notorio valor científico y atractivo turístico.

La trascendencia de la Motilla del Azuer se debe en buena medida al considerable número de actividades arqueológicas que se han emprendido en su interior desde que comenzaron en el año 1974 (Nájera & Molina, 2004; Jiménez Brobeil, Al-Oumaoui, Nájera & Molina, 2008; Nájera, Jiménez, Molina, Delgado, Laffranchi., 2012; Torres, 2016; Angulo, 2018; Nájera, Molina, Cámara, Afonso & Spanedda, 2019). Estos trabajos han permitido generar una sustancial documentación arqueológica, visible en la actualidad en buena parte de su perímetro; puesto que junto con las intensas campañas de excavación se han desarrollado tareas de restauración y valorización (Martín, Molina,

Blanco & Nájera, 2004; Angulo, 2018; Torres, Angulo, Álvarez & Rodríguez, 2021).

Grosso modo, estos estudios han permitido describir a este conjunto como una fortificación de planta central, formada por tres líneas murarias concéntricas distribuidas en torno a una torre central (Fig. 2). En su interior es destacable la forma laberíntica de los sistemas de accesos, formados por pasillos estrechos, escaleras, rampas, puertas acodadas, o pasillos en zig-zag.

Este recinto defensivo permitió la protección y control de productos esenciales para las gentes del Bronce: el almacenamiento de grano, especialmente cereales a través de potentes silos; la estabulación ocasional del ganado, sobre todo ovicápridos, suidos, bóvidos y équidos; estancias productivas con hornos de combustión, y salas para el acopio de diferentes artículos artesanales. Entre los elementos estratégicos gestionados en la fortificación tuvo un papel capital el abastecimiento de agua, a través de una estructura hidráulica ubicada en el sector oriental que permitió el acceso al nivel freático del subsuelo. Esta infraestructura, por sus dimensiones y complejidad constructiva, constituye el punto icónico de todo el espacio.

Al exterior del sistema defensivo se situaba el poblado, con casas de planta heterogénea, erigidas con zócalo de mampostería, alzado de barro y techumbres con especies vegetales del entorno. Buena parte de los enterramientos se situaban en este lugar, participando de un patrón muy extendido en la península ibérica durante esta etapa (Jiménez *et al.*, 2008, p. 59).



Figura 2: Vista general de la Motilla del Azuer. Fotografía Ayuntamiento de Daimiel.

La arquitectura monumental evidenciada en sus paramentos, junto con la riqueza de su cultura material y la excepcionalidad de estas manifestaciones prehistóricas han convertido a la Motilla del Azuer en un recurso potencial para su valorización y explotación turística. Asimismo, se encuentra catalogado desde 2013 como Bien de Interés Cultural.

En virtud de esta relevancia, en el año 2014 el Ayuntamiento de Daimiel diseñó una experiencia *ad hoc* con el objetivo de promocionar el bien a través de recorridos guiados por su interior. Estos itinerarios, reservados a través de la página web www.motilladelazuer.es, tienen su inicio en el Museo

Comarcal, emplazado en pleno casco urbano de la localidad, lugar desde el que los visitantes son desplazados en minibus a la Motilla del Azuer. Una vez completado el trayecto por el yacimiento arqueológico, los visitantes vuelven al punto de partida (Torres, 2020). Por lo tanto, los usuarios comienzan y terminan en el núcleo urbano, pudiendo disfrutar de otros recursos turísticos del municipio. El éxito de este modelo está incentivando que multitud de personas hayan participado en esta organización, disfrutando de las riquezas de este enclave patrimonial; así como otros existentes en sus alrededores.

En líneas generales, esta fórmula está tratando de aprovechar las ventajas materiales que ofrece la Motilla del Azuer mediante una experiencia satisfactoria para los visitantes, que a su vez está generando beneficios sugerentes para la sociedad más próxima.

En suma, las iniciativas emprendidas en la gestión del monumento tienen como finalidad promover el estudio, preservación y proyección de un conjunto emblemático y fascinante. Sin embargo, ciertas problemáticas existentes en este sistema, especialmente asociadas al tránsito por estructuras prehistóricas o al mantenimiento de los vestigios al aire libre, originan el deterioro de sus componentes, por lo que la aportación desde el campo de las nuevas tecnologías puede entrañar soluciones eficaces para garantizar una preservación efectiva a largo plazo.

En la misma medida, estas herramientas impulsan notablemente su divulgación, al representar una proyección a nivel global a cambio de una inversión relativamente reducida. A este respecto, su activación estimula una promoción accesible desde cualquier lugar; creando un espacio virtual muy atractivo para este tipo de recursos.

3. Campaña de digitalización de La Motilla del Azuer

La primera fase para el desarrollo de este proyecto consistió en la realización de una campaña de digitalización 3D del yacimiento, adquiriendo un modelo fotogramétrico y fotografías 360° de toda el área arqueológica. Fue un paso importante dentro de todo el proceso trazado, puesto que la calidad del modelo 3D generado ha sido esencial para obtener unos resultados óptimos.

Para la realización del modelo fotogramétrico se utilizó el software comercial Reality Capture v. 1.0.2. que permite procesar un gran número de imágenes en un tiempo relativamente reducido, al menos en comparación con otros programas similares. De todos modos, este modelo 3D no ha sido empleado exclusivamente para la creación de la visita virtual a la Motilla del Azuer, sino que además se encuentra disponible de manera gratuita en la plataforma Sketchfab, estando abierto para cualquier usuario que desee su manejo (Fig. 3).

Por otro lado, al objeto de complementar los trabajos de digitalización 3D desarrollados (Fig. 4), se llevó a cabo una campaña de fotografía esférica 360°, mediante el uso de una cámara profesional Insta360 Pro, dotada con 6 lentes. Este equipamiento ha elaborado una cantidad importante de imágenes de 360° de alta calidad. Estas fotografías presentan un carácter complementario



Figura 3: Imagen de la Motilla del Azuer en plataforma Sketchfab: <https://sketchfab.com/3d-models/la-motilla-del-azuer-daimiel-spain-750c1dc950274be39705545f4a492bd9>.

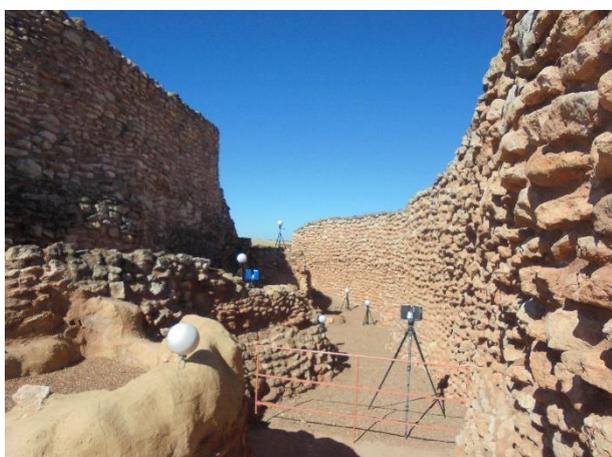


Figura 4: Labores de escaneado digital en el interior del monumento.

respecto a la representación fotogramétrica 3D obtenida, ya que permiten registrar todo el paisaje circundante al emplazamiento, ofreciendo una información contextual imposible de mostrar únicamente con el modelo 3D.

A este respecto, la posibilidad incorporada por la cámara Insta360 Pro de adquirir fotografías adaptadas para su visualización tridimensional (3D) ha facilitado su integración en el sistema de RV.

Estas labores de digitalización han quedado integradas con lo dispuesto en el artículo 5.4 de los Principios de Sevilla, relativo a la rigurosidad histórica. En este sentido, técnicas como la fotogrametría o los escáneres láser pueden servir para aumentar la calidad de la investigación científica, puesto que “cuanto mejor sea la documentación del patrimonio arqueológico realizada mayor será rigurosidad histórica obtenida” (López-Menchero, 2013, 279).

Las herramientas tecnológicas están cobrando un protagonismo esencial en los últimos tiempos gracias a la trazabilidad de su uso, los resultados conseguidos y el bajo coste de su funcionamiento. Al fin y al cabo, la documentación 3D forma parte de los cimientos del edificio de la gestión integral del patrimonio arqueológico, siendo paso previo imprescindible para avanzar en el ámbito de la conservación y difusión de

dicho legado. La digitalización 3D no solo ha servido de base al proceso de RV habilitado, sino que, como se ha podido comprobar en los resultados de este proyecto, ha contribuido a reducir los gastos asociados a este tipo de intervenciones, al tiempo que ha incrementado los niveles de rigurosidad y precisión.

De igual manera, durante el trabajo de campo se ha tratado de emplear un método de captura lo más sostenible posible con el ámbito arqueológico, de tal forma que durante la documentación de los espacios estas tareas han implicado un impacto mínimo sobre la construcción prehistórica.

4. Trabajos de Realidad Virtual (RV)

La RV se encuentra englobada dentro del concepto de realidades extendidas (*‘eXtended Reality’* o XR). En términos generales, una XR es una combinación de imágenes y sonidos del mundo real con figuras artificiales generadas por un ordenador. Para ello, es imprescindible que los diferentes gráficos proyectados se encuentren integrados y alineados con el entorno y los movimientos del espectador tengan el menor retardo posible, con el objetivo de que el espectador sea capaz de comprenderlos como entidades reales.

El empleo de la fotogrametría y la reconstrucción virtual para la construcción de realidades 3D de enclaves arqueológicos, como ha ocurrido en este caso, posibilita recrear estas manifestaciones con un alto grado de eficacia. Estas técnicas cuentan con amplias posibilidades para su estudio, protección y difusión, al implicar una visualización más natural, intuitiva e inmersiva.

En una experiencia XR en tiempo real es necesario que los movimientos de la cámara recogidos de las figuras naturales sean registrados y procesados de forma precisa, para que así los gráficos artificiales sean dibujados con exactitud desde el mismo punto de vista.

Dependiendo de la proporción que exista entre los gráficos reales y artificiales se adquieren diferentes niveles que van desde la mencionada RV, con representaciones generadas completamente por un ordenador, pasando por la Realidad Aumentada (RA), que combina elementos artificiales con naturales, hasta la Realidad Disminuida (RD), sistema por el que a través de técnicas digitales se hace desaparecer componentes de la imagen real.

El grado de inmersión varía en función del dispositivo elegido. El uso de dispositivos tradicionales puede ocasionar problemas para apreciar las escalas o dimensiones del modelo creado. De la misma forma, la interacción a través de elementos como pantallas táctiles, teclados y ratones, pueden resultar incómodas, poco inmersivas o imprecisas, al establecer discordancias sobre la manipulación de los objetos o los movimientos de las personas en el mundo real.

Para la Motilla del Azuer se estimó oportuno elegir aquella opción más inmersiva de RV, debido a que se producía un ajuste más riguroso a la realidad existente en el yacimiento. Concretamente, se ha utilizado un visor RV acompañado de un equipamiento informático de alta gama, con la pretensión fundamental de sumergir al espectador completamente en el recinto a pesar de encontrarse físicamente en otro emplazamiento. El dispositivo

utilizado fue el denominado HTC Vive Pro (<https://www.vive.com/mx/product/vive-pro/>), que cuenta con controladores por movimiento para las manos (HTC Vive controllers) y los pies (HTC Vive Trackers). Este dispositivo está dotado de un sistema de lentes fresnel y pantallas de alta resolución que permiten un campo de visión de aproximadamente 100°, mostrando una calidad de imagen muy elevada. Además, tanto el visor como los controladores disponen de sensores de posicionamiento espacial con precisión submilimétrica que registran los movimientos de la cabeza, manos y pies del usuario con la máxima exactitud, dentro de una latencia menor a 20 ms.

Como software base ha sido utilizado el definido Myou Engine (<https://github.com/myou-engine/myou-engine>), un motor 3D de código libre compatible con XR desarrollado por la empresa Myou Software (<https://www.myousoftware.com>). Gracias a este motor se ha podido dibujar en tiempo real y en RV toda el área arqueológica: resultando un contorno con millones de triángulos, texturas de altísima resolución y efectos avanzados de iluminación y sombreado (Fig. 5). Estos efectos han estado basados en la técnica de renderizado PBR (*‘physically based rendering’*), que posibilita la representación de materiales metálicos y dieléctricos con reflejos y transparencias con refracción (Fig. 6). El modelo Myou Engine también permite la programación de las mecánicas de locomoción e interacción con el entorno y los elementos de la interfaz necesarios.

Por su parte, el sistema de locomoción constituye la mecánica más importante para desarrollar una visita RV, ya que permite al usuario desplazarse por el espacio virtual. En este caso, debido a las peculiaridades del enclave, se ha optado por una alternativa que proporcione un desplazamiento ágil pero que a la vez supere el marco físico en el que se encuentra la persona participante. Para solucionar este problema, el equipo de trabajo diseñó un procedimiento basado en el teletransporte, por el que a través de un controlador por movimiento el protagonista elige el punto donde quiere transportarse sin que ello suponga atravesar posibles paredes o “lugares vacíos”. Una de las características del movimiento fue la preferencia por una opción calificada tipo “suave”, empleando para ello el panel táctil de los controladores.

Este sistema permite elegir la dirección y velocidad del desplazamiento virtual, tratándose de una alternativa más inmersiva y precisa que otros. Sin embargo, puede provocar la aparición de un trastorno denominado “mareo por movimiento artificial”. Esta alteración está causada por la disociación sensorial creada al simular un desplazamiento visual sin que se produzca el estímulo correspondiente y esperado en el sistema vestibular (Akiduki *et al.*, 2003). De hecho, como se ha podido comprobar en ocasiones, este mareo puede llegar a producir náuseas intensas no solo durante la propia experiencia sino incluso después de la misma. Estas sensaciones son similares a las producidas por cinetosis (Gavgani, Walker, Hodgson & Nalivaiko, 2018).

Debido a esta circunstancia, y también para incrementar la inmersividad del programa, Myou Software desarrolló un sistema de control denominado Natural Locomotion (https://store.steampowered.com/app/798810/Natural_Locomotion/) que requiere que la persona balancee los brazos como si estuviera caminando. Concretamente,



Figura 5: Detalle de imagen obtenida durante el procesamiento de los datos recogidos en la fase de campo para generar el modelo fotogramétrico. Perspectiva perteneciente a la entrada noroccidental al entramado fortificado.



Figura 6: Modelo 3D fotogramétrico final correspondiente al acceso de la puerta noroccidental.

este movimiento se traduce a un desplazamiento virtual con una escala 1:1, de tal manera que si el usuario orienta el brazo unos 10 cm con una dirección y velocidad concreta se producirá un movimiento de locomoción virtual de exactamente 10 cm con la misma dirección e intensidad. Este gesto provoca que el participante sea capaz de predecir la cantidad de deslizamiento virtual producida, que sumado a los pequeños movimientos de la cabeza al mover las extremidades superiores, disminuyen la percepción del sistema vestibular, reduciendo los posibles efectos perniciosos del mareo (Weech, Moon & Troje, 2018).

Además, en la propuesta planteada se optó por mejorar la inmersividad empleando sensores de movimientos en los tobillos, que registran la acción de los pies, produciendo una maniobra virtual similar al mecanismo anterior. Igualmente, esta solución puede llegar a inducir una situación de gran intensidad, provocando incluso la pérdida del equilibrio. Por esta razón, se han incluido

varios sistemas de locomoción dentro del programa de RV, permitiendo elegir al usuario aquella opción que sea considerada más adecuada en todo momento.

De igual forma, en esta experiencia ha sido diseñada una modalidad de locomoción asistida. Esta solución permite ayudar externamente desde la pantalla del ordenador a aquellas personas que cuenten con problemas de movilidad reducida o con algún tipo de dificultad para entender el funcionamiento de los controles. Con esta posibilidad se impulsa una participación más amplia de individuos o colectivos en el conocimiento de este yacimiento arqueológico, facilitando su implicación hacia un activo cultural de su territorio en un formato más accesible.

Por otra parte, para evitar la desorientación del participante y su salida del área delimitada de la RV ha sido incorporada una plataforma de sujeción física delimitada por unas gomas elásticas, dispositivo que permite al usuario situarse dentro de una zona de seguridad. Esta superficie ha sido diseñada por Dualin Racing (<https://www.facebook.com/DualinRacing/>) y Myou Software. Gracias a estos componentes el usuario queda dispuesto dentro de una zona de seguridad. Asimismo, este mecanismo fue adaptado con rampas para facilitar el acceso de personas con movilidad reducida.

Debido a que la estructura de las áreas escaneadas es relativamente extensa, y el modelo 3D obtenido cuenta con una calidad que no origina “huecos” o partes con fallos gráficos producidos por la pérdida de información durante el escaneado del entorno, todos estos espacios son visualizados desde cualquier punto de vista.

Esta posibilidad dota al usuario de gran libertad para la exploración de cualquier sección, resultando una inmersión muy elevada. Por este motivo se ha desarrollado un sistema de interacción física del avatar virtual con el entorno, junto con otro de colisiones, que impiden atravesar estructuras y elementos del escenario virtual, a la vez que regula suavemente con una animación elástica la altura de la cabeza con respecto al suelo. De este modo se pretende evitar desplazamientos bruscos de la cámara debidos a la irregularidad y los desniveles del suelo.

Mientras, para limitar los efectos de movimientos inesperados se ha articulado un procedimiento que cierra la visión con unos párpados virtuales, eliminando la posibilidad de producir hipotéticos impactos que pararían en seco el movimiento. Este fenómeno también podría provocar sensación de mareo, al producirse una disonancia sensorial análoga a la descrita *supra*.

A grandes rasgos, estos sistemas permiten una exploración completa de las zonas escaneadas de forma segura e inmersiva, a la vez que impiden el acceso a ámbitos no recogidos en la experiencia, sin que ello suponga una inconsistencia que reduzca la sensación de presencia en el sitio.

Para la replicación en RV fueron combinados modelos 3D completos, obtenidos a través de fotogrametría aérea y terrestre de muy alta resolución, a partir del empleo de cámaras convencionales (Fig. 7). Como se ha señalado en el punto anterior, el modelo 3D y las imágenes esféricas fueron aportadas durante la fase previa de digitalización. Los resultados fueron reducidos, limpiados y optimizados, pasando de 6400 millones de

polígonos de la malla original a únicamente 6.4 millones. El reajuste de datos proporcionó un volumen de detalles más sencillos para su dibujo, sin que ello haya significado sacrificar la calidad visual final.

Las referencias obtenidas fueron alineadas sobre la fotogrametría y las imágenes esféricas de 360°, utilizando para ello el software Blender v. 2.83. Además, el estudio fotogramétrico ha permitido la elaboración de un modelo 3D a escala 1:100 del conjunto (Fig. 8). Esta cartografía facilita al usuario el reconocimiento del punto preciso donde se encuentra; así como teletransportarse a otro sector de forma rápida mediante la activación de un plano desplegable, similar a la miniatura del escenario de EditorVR (EVR), desarrollado por Amir Ebrahimi, Timoni West y otros para el motor Unity (<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3098333.3098918>).

Por último, también ha quedado habilitado un contenido contextual para descubrir información relativa a los lugares en los que se encuentra el participante. Este proceso se efectúa mediante un giro de muñeca, a modo de “mirar la hora”. Con este gesto se despliega un pequeño panel informativo cuyo contenido varía en virtud del área donde se encuentre la persona (Fig. 9).



Figura 7: Proceso de captura mediante fotografía digital de la estructura hidráulica del patio oriental.



Figura 8: Modelo desplegable con ámbitos de la RV.



Figura 9: Panel con información relativa a los sectores principales del yacimiento. Estos datos se despliegan mediante un giro de la muñeca por parte del usuario.

5. Emplazamiento físico de la RV: Museo Comarcal de Daimiel

El dispositivo físico de RV ha quedado instalado en una de las salas de la primera planta del Museo Comarcal de Daimiel <www.museocomarcaldaimiel.es> (Fig. 10), que se emplaza en el interior del casco urbano de la localidad.

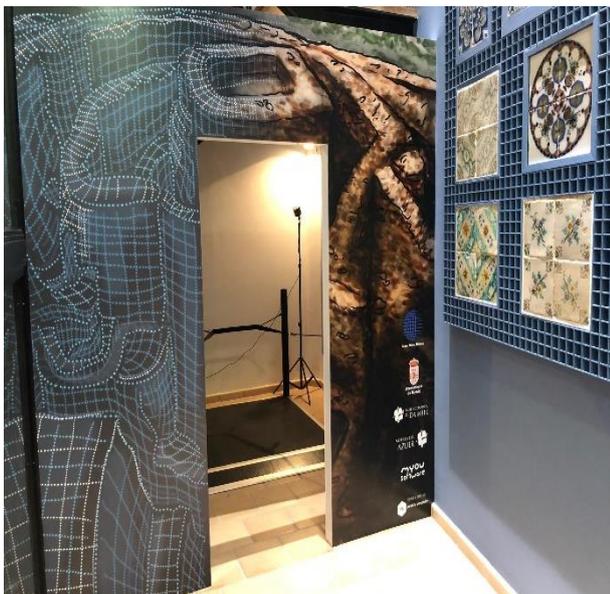


Figura 10: Instalación de RV en el Museo Comarcal de Daimiel.

El Museo Comarcal de Daimiel es una institución que cuenta con un largo recorrido en la interpretación de la historia de este territorio. Ocupa una antigua casa solariega vernácula, exponiendo en su colección interesantes vestigios de interés arqueológico y etnográfico, junto con la obra de personajes ilustres. Asimismo, funciona como Centro de Interpretación de la Motilla del Azuer, por lo que tiene una relación muy estrecha con el propio yacimiento.

Desde el punto de vista logístico es un lugar interesante para la instalación de la RV: siendo fácilmente reconocible al localizarse en pleno centro del núcleo

urbano; así como por cumplir escrupulosamente con todas aquellas normas estipuladas para la accesibilidad de personas, al quedar adaptados sus espacios al tránsito de colectivos con movilidad reducida.

Las previsiones de este proyecto infirieron en su plena operatividad para la primavera del año 2020, estimando entre esos meses su inicio definitivo. No obstante, la situación derivada por la pandemia de la COVID-19 y las limitaciones asociadas a las diferentes normativas y recomendaciones sanitarias aprobadas para la contención de esta enfermedad han provocado que todavía no haya sido posible su activación, esperando que la situación sea más favorable para su puesta en marcha definitiva.

A pesar de esta circunstancia, el 3 de diciembre de 2019, dentro de la celebración del "Día Internacional de las Personas con Discapacidad", se pudo efectuar una experiencia piloto con usuarios del centro Vicente Aranda e integrantes de la asociación ADIFISS del municipio. Gracias a esta jornada miembros de estos colectivos realizaron la visita virtual a la Motilla del Azuer. En términos generales, se trató de una experiencia grata y muy satisfactoria para unas personas que en condiciones normales no pueden participar de los itinerarios organizados al enclave. De la misma manera, para el equipo de trabajo constituyó un ensayo positivo para evaluar los procesos habilitados, sirviendo de banco de pruebas, junto con otras efectuadas previamente con otros voluntarios, para perfilar las características del modelo (Fig. 11).

Estas valoraciones, aunque evidentemente subjetivas, han venido a indicar que corresponde con un prototipo estructurado y apto para su utilización, en el que se distingue una gran interactividad con los elementos físicos. Al mismo tiempo, cuenta con un especial reconocimiento por parte de aquellos individuos que han podido participar en el mismo.

En suma, se pudo comprobar que la proyección que dispone esta fórmula genera amplias posibilidades en su organización: llegando a una amplia gama de público, e impulsando un disfrute del recurso desde principios asociados a la sostenibilidad. Por estas razones, esta aplicación se ha considerado como una alternativa a las visitas guiadas que se producen a un monumento que, por sus peculiaridades, cuenta con cupos limitados de visitantes y con la imposibilidad de garantizar el acceso físico al interior del recinto a personas con movilidad reducida. Además, su ubicación supone un estímulo para el tejido productivo local, al atraer potenciales turistas hacia la población.

6. Discusión

Desde el punto de vista del desarrollo de los trabajos, la representación virtual en 3D de este recurso ha implicado un procedimiento exhaustivo en su concepción y praxis, con el objetivo de definir la mayor cantidad de datos posibles y generar una imagen veraz; puesto que cuanto mejor sea su documentación mayor será la rigurosidad histórica alcanzada (López-Menchero, 2013).

En este sentido, para configurar una experiencia XR a tiempo real es necesario que los movimientos recogidos de las figuras sean registrados y procesados de forma pormenorizada, para lograr que los gráficos artificiales sean dibujados con exactitud. De igual manera, la

calidad del modelo 3D es esencial para asegurar la adquisición de unos resultados óptimos. Mientras, la utilización de técnicas como la fotogrametría y la digitalización 3D han sido bastante provechosas: constatando en ellas la viabilidad de ser exportadas a cualquier actividad de carácter arqueológico.



Figura 11: Experiencia piloto previa de un usuario.

No obstante, a pesar de los beneficios que está comportando la incorporación de la RV, esta herramienta se encuentra todavía en una fase inicial en su puesta en marcha como producto comercial, por lo que, como hemos podido comprobar, todavía cuenta con gran margen de mejora. Por un lado, es perceptible el crecimiento que puede experimentar en la calidad de la imagen, sobre todo en las pantallas y lentes manejadas. Es cierto que en la actualidad se están comercializando pantallas con paneles de muy alta resolución, en las que las rejillas de píxeles apenas se hacen evidentes, pero paulatinamente se están introduciendo modelos de mayor resolución, como, por ejemplo, cascos de 2600 x 2600 píxeles. En el caso de las lentes, los estándares tradicionales cuentan con problemas de anomalías cromáticas y geométricas, así como por sus características cuentan con la tesitura de retirar la pantalla de la lente, originando cascos más voluminosos. En virtud de estas causas, y por su precio más económico, se está generalizando el uso de lentes tipo fresnel, aplanadas con curvatura en escalones. Sin embargo, producen distorsiones en la periferia de los objetivos, como halos y reflejos; así como tampoco corrigen completamente las anomalías cromáticas y geométricas de los extremos. Por esta razón, se están estudiando nuevos tipos de lentes, como las *freeform*, que pretenden solucionar de manera efectiva estas limitaciones.

Dentro de la RV, los sistemas de locomoción constituyen uno de los componentes clave al suponer la mecánica que permite al usuario desplazarse por el espacio virtual. En su disposición resulta imprescindible que los gráficos proyectados se encuentren integrados y alineados con el entorno, así como los movimientos del usuario tengan el menor retardo posible. Sin embargo, la locomoción en la RV ostenta diversas dificultades asociadas a su aplicación: la inmersividad programada, la credibilidad del entorno virtual, o incluso la aparición de patologías que pueden afectar a la salud del propio participante. Para solucionarlas se están diseñando medidas bastante aceptables para favorecer su

operatividad. Ha sido el caso del software de esta experiencia, Natural Locomotion, que no requiere el complemento de un hardware extra y consigue reducir los posibles trastornos generados. Por su parte, en otras experiencias se están introduciendo plataformas con arneses y sensores de deslizamiento y peso, pero que conllevan un alto presupuesto. Asimismo, en los últimos tiempos se está experimentado con innovaciones como zapatos deslizantes. Por lo tanto, todavía queda un largo recorrido en este aspecto.

Otro elemento esencial en la RV es la inmersividad. Esta capacidad tecnológica se consigue a través de varios factores capitales: la fidelidad gráfica y sonora, que depende tanto de las capacidades para mostrar las imágenes del visor como de la potencia del ordenador y el nivel de detalle de los modelos, texturas, efectos, animaciones y sonido; la interactividad con el entorno, creando una reacción que sea físicamente creíble; la locomoción, que dispone movimientos que deben ser naturales, y la comodidad de los dispositivos. Con respecto a este campo se están utilizando sistemas avanzados de física para las manos y objetos del entorno virtual: facilitando la interacción entre los elementos y la configuración de una reacción bastante realista. Aunque los productos obtenidos son óptimos, todavía cuentan con un amplio margen de mejora.

En la propuesta virtual de la Motilla del Azuer se ha optado por mejorar la inmersividad empleando sensores de movimiento en los tobillos. Ofrecen una experiencia más intensa, pero, por el mismo motivo, provocan situaciones que, mal entendidas, llegan a producir la pérdida del equilibrio. Por esta razón, se ha considerado la idoneidad de incluir varias fórmulas de circulación que proporcionan la facultad al usuario de elegir aquella que le parezca más oportuna.

El sistema de locomoción Natural Locomotion, que se encuentra a la venta como una aplicación separada en la plataforma digital de distribución de software Steam y que puede utilizarse con una gran cantidad de videojuegos de RV para PC, cuenta con más de 20000 usuarios y un porcentaje de reseñas positivas que alcanza el 90%. También son cuantiosos los comentarios alabando la inmersividad del sistema y la reducción de los efectos de mareo por el movimiento.

Por otra parte, la calidad de los modelos 3D consistentes, junto con variables como las imágenes 360°, el sistema de locomoción de movimientos corporales, las mecánicas de interacción con el entorno, el sistema de colisiones y los elementos intuitivos de la interfaz 3D, vienen a dotar a esta experiencia de una fuerte sensación de presencia. Se trata de un prototipo superior a proyectos similares que se encuentran en el mercado; *verbi gratia*, las incluidas en The Lab (https://store.steampowered.com/app/450390/The_Lab/?curator_clanid=4) y SteamVR Home (https://store.steampowered.com/app/330050/Main_SteamVR/), desarrolladas por Valve o blueplanetVR (<https://blueplanetvr.com/>). En general, son sistemas de locomoción insuficientemente inmersivos, ya que se encuentran basados en el sistema de teletransporte a puntos predefinidos, o bien que solo emplean el posicionamiento del visor sin ningún tipo de locomoción artificial, debido a la segmentación de las referencias que impiden visualizar el entorno desde todos los puntos de vista posibles. Igualmente,

impide la formación de un sistema consistente de colisiones que permita interactuar con las paredes o desniveles del terreno.

En términos generales, los resultados inferidos en esta actuación nos hacen ser optimistas con respecto a las posibilidades de la RV en torno al patrimonio cultural, puesto que ofrecen progresos significativos en labores de documentación, conservación y presentación. Como se ha podido comprobar en las pruebas desarrolladas, la consecución de los escenarios ha generado imágenes de gran realismo que permiten captar una mejor atención por parte de cualquier público. Esta situación ampliará considerablemente el número de personas que disfrutará de los recursos de este legado, potenciando su accesibilidad y estimulando su misión social.

Durante los últimos años se han activado diversos proyectos de RV que han venido a ampliar e impulsar los progresos en este marco. Entre ellos podemos destacar el recorrido virtual habilitado en la iglesia de Panaglia (Triaklia, Grecia) (Moysiadis & Athanasios, 2018); la reconstrucción virtual de una casa histórica en el museo *Alt-Segeberger Bürgerhaus* (Bad Segeberg, Alemania), en la que se ha empleado el sistema HTC Vive, obteniendo resultados significativamente satisfactorios (Kersten, Tschirschwitz, & Deggim, 2017); la *Mannerheim Virtual Experience* (Mikkeli, Finlandia), que permite un trayecto virtual por la oficina de guerra del mariscal finés Carl Gustaf Emil Mannerheim (https://store.steampowered.com/app/1179090/Mannerheim_Virtual_Experience/), o la reconstrucción de la casa de Roald Amundsen (Bunnefjorden, Noruega), en la que además se puede interactuar con objetos de la vida y las expediciones de este famoso explorador (https://store.steampowered.com/app/1435700/Roald_Amundsens_House/). Entre todos los modelos configurados sobresale el proyecto *The Dawn of Art* de la Cueva Chavet (Ardèche, Francia), que incluye tanto una película inmersiva como una visita virtual al interior de este ámbito paleolítico de pinturas rupestres, en los que se puede advertir un gran realismo en las imágenes (https://store.steampowered.com/app/1236560/The_Dawn_of_Art/).

A grandes rasgos, en estas experiencias se pueden distinguir una buena resolución y óptimas características técnicas, aunque, en líneas generales, se constata ciertas limitaciones en la fluidez de la navegación y en la precisión de la fotogrametría. A este respecto, el Motilla Virtual resulta más completo en su proyección, pues se han dedicado importantes esfuerzos en los procesos de locomoción y navegación, constituyendo uno de los aspectos más relevante del sistema, así como ostenta detalles más exhaustivos desde el punto de vista de la calidad gráfica generada.

A pesar de ser conscientes de que todavía se pueden incorporar notables mejoras en su funcionamiento, corresponde con una metodología de trabajo interesante y completamente eficaz para su implementación en yacimientos arqueológicos. Su activación posibilita recrear manifestaciones patrimoniales con alto grado de eficacia, dentro de una inversión no excesivamente elevada y una relativa sencillez en su manejo. Por tanto, cuenta con amplias posibilidades para incentivar el estudio, protección y divulgación de los vestigios del pasado, al implicar una visualización más natural, intuitiva e inmersiva.

7. Conclusiones

La puesta en marcha de la experiencia de RV en el complejo arqueológico de la Motilla del Azuer está impulsando avances ostensibles en campos como su investigación, salvaguarda y presentación; áreas de suma trascendencia en la planificación de la gestión de este tipo de ámbitos. *Grosso modo*, estos trabajos se enmarcan dentro de la apuesta por parte del Ayuntamiento de Daimiel por impulsar la valorización de un bien cultural emplazado dentro de su término municipal, y que ha supuesto la llegada de un número importante de visitantes; personas que están pudiendo conocer los recursos que atesora este lugar (Torres, 2020).

Como se está pudiendo comprobar en esta propuesta de gestión, el patrimonio se está configurando como un motor de dinamización territorial que ofrece aspectos potenciales para su explotación. Por un lado, supone beneficios para la propia entidad patrimonial, entrañando un mayor disfrute de sus bienes o generando ingresos directos por su explotación. Por otra parte, permite la incorporación de otras ventajas positivas para el entorno, como factor de vitalización económica que incide en el tejido productivo de la localidad, así como también favorece su promoción como destino turístico de calidad.

Supone un activo sociocultural capital, al formar parte del legado histórico, de las costumbres y tradiciones de los ciudadanos y estableciendo aquellas señas de identidad que configuran una sociedad. Por estas razones debe ostentar un papel preferencial dentro de las políticas de este campo.

En virtud de estas razones expuestas, la gestión de cualquier expresión patrimonial debe ser abordada por la sostenibilidad en su aprovechamiento y el respeto por las particularidades que atesora.

En este sentido, la incorporación de las nuevas tecnologías está fomentando las dinámicas en la proyección de este legado, representando unas herramientas que se caracterizan por su bajo coste y su vasta repercusión. A grandes rasgos, proporcionan nuevas fórmulas para aproximarnos a la interpretación y conocimiento del pasado. Concretamente, permiten avances en el estudio de los vestigios, a través de una documentación exhaustiva, y favorecen su conservación, al constituir una alternativa viable a la visita *in situ*.

La Motilla del Azuer simboliza un conjunto excepcional, testimonio de las gentes que habitaron este territorio durante la prehistoria y evidencia material de las habilidades, expresiones simbólicas y *modus vivendi* vigentes en este período. En los últimos años, las líneas estratégicas de este monumento han sido dirigidas a impulsar su visibilidad, tratando de optimizar aquellos aspectos que la singularizan, pero a la vez garantizando la salvaguarda de las particularidades que atesora. Igualmente, existe un especial interés por avanzar en su caracterización e investigación.

El diseño que se ha implementado en este enclave de un modelo de RV permitirá disponer de una herramienta valiosa para disfrutar de sus riquezas desde una perspectiva distinta, incrementando el número de personas que pueden conocer el monumento.

A pesar de que la situación sanitaria derivada de la pandemia de la COVID-19 no ha permitido iniciar esta actividad, su proyección y los resultados apreciados hasta este momento nos permiten ser optimistas con respecto a su utilización, puesto que supondrán un empuje notorio para ampliar las perspectivas en torno a la Motilla del Azuer.

De todos modos, y a pesar de las circunstancias adversas actuales, los avances logrados nos hacen ser positivos, puesto que en términos generales han intensificado la documentación y difusión rigurosa sobre este recurso, acentuando la misión social que en él recae.

En definitiva, la gestión integral del patrimonio, debido a los múltiples valores y símbolos que reúne, implica el fortalecimiento de unos contenidos interesantes, siendo un estímulo provechoso para cualquier región o municipio. Es una propuesta que suscita un valor añadido que despierta expectativas favorables en torno al mismo. Dentro de esta perspectiva, la apuesta por las nuevas tecnologías, como se está pudiendo comprobar en este caso, resulta ampliamente beneficiosa para la valorización de cualquier legado patrimonial significativo.

Referencias

- Akiduki, H., Nishiike, S., Watanabe, H., Matsuoka, K., Kubo, T., & Takeda, N. (2003). Visual-vestibular conflict induced by virtual reality in humans. *Neuroscience Letters*, 340(3), 197–200.
- Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Bala'awi, F., & Al-Massarweh, A. (2020). Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, e00133. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133>
- Angulo, M^a. I. (2018). Conservación y restauración en el yacimiento arqueológico de la Motilla del Azuer, campañas 2015 y 2016. In *IV Jornadas de Historia de Daimiel* (pp. 31-44). Daimiel: Ayuntamiento de Daimiel.
- Barrera Mayo, S., & Baeza Santamaría, U. (2010). La Realidad Virtual aplicada a la explotación sostenible del Patrimonio Arqueológico. Un caso éxito: la Cueva de Santimamiñe. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 69-72. <https://doi.org/10.4995/var.2010.4775>
- Codina Falgas, F., de Prado, G., Ruiz, I., & Sierra, A. (2017). El proyecto de reconstrucción virtual de la ciudad ibérica de Ullastret. In *La Ciencia y el arte VI: Ciencias experimentales y conservación del patrimonio* (pp. 246-254). Ministerio de Educación Cultura y Deporte, Subdirección General de Documentación y Publicaciones.
- Galeazzi, F. (2018). 3-D virtual replicas and simulations of the past: “real” or “fake” representations?. *Current Anthropology*, 59(3), 268-286. <https://doi.org/10.1086/697489>
- Gavani, A. M., Walker, F. R., Hodgson, D. M., & Nalivaiko, E. (2018). A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and “classic” motion sickness: Are they different?. *Journal of Applied Physiology*, 125(6), 1670–1680. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00338.2018>
- García Fortes, S., & Flos, N. (2008). *Conservación y restauración de bienes arqueológicos*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Gisbert Santaballa, A. G. (2019). La arqueología virtual como herramienta didáctica y motivadora. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 13, 119-147.
- Hernández, L., Taibo, J., Seoane, A., Jaspe, A., & López, R. (2008). Interfaces naturales para contenidos digitales interactivos en museos. La experiencia de Galicia Dixital. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad la Salle*, 8(29), 37-42. <https://doi.org/10.26457/recein.v8i29.210>
- Jiménez, S. A., Al-Oumaoui, I., Nájera, T., & Molina, F. (2008). Salud y enfermedad en La Motilla del Azuer: una población de la Edad del Bronce en La Mancha. *Revista Española de Antropología Física*, 28, 57-70.
- Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., & Deggim, S. (2017). Development of a virtual museum including a 4d presentation of building history in virtual reality. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 361-368. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017>.
- Leung, A., Davies, S., & Ching, S. (2018). When new technology joins old documents and east meets west: virtually reconstructing the Fisher Island Pagoda Lighthouse (China). *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 12–27. <https://doi.org/10.4995/var.2018.7982>
- López-Menchero Bendicho, V. M. (2012). *Manual para la puesta en valor del patrimonio arqueológico al aire libre*. Gijón: Ediciones Trea.
- López-Menchero Bendicho, V. M. (2013). International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles. In C. Corsi, B. Slapšak, & F. Vermeulen (Eds.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non-invasive Survey of*

Complex Archaeological Sites (pp. 269–283). Cham: Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_16

- López-Menchero, V. M., Flores, M., Vicent, M., & Grande, A. (2017). Digital Heritage and Virtual Archaeology: An Approach Through the Framework of International Recommendations. In M. Ioannides, N. Magnenat-Thalmann, & G. Papagiannakis (Eds.), *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage* (pp. 3-26). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49607-8_1
- Lužnik-Jancsary, N., Horejs, B., Klein, M., & Schwall, C. (2020). Integration and workflow framework for virtual visualisation of cultural heritage. Revisiting the tell of Çukuriçi Höyük, Turkey. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), 63-74. <https://doi.org/10.4995/var.2020.13086>
- Martín, M., Molina, F., Blanco, I., & Nájera, T. (2004). Actuaciones y restauración en la Motilla del Azuer (Daimiel, Ciudad Real). In R. García Huerta & J. Morales Hervás (Coords.), *La Península Ibérica en el II mil. a.C.: poblados y fortificaciones* (pp. 215-232). Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Moysiadis, A. K. (2018). Photogrammetry and interactive 3D virtual tour to the outreach of cultural heritage. the case study of the church of Panagia Episkepsi, Trikala, Greece, In: ICOMOS 19th General Assembly and Scientific Symposium "Heritage and Democracy", 13-14 December 2017, New Delhi, India.
- Nájera, T., & Molina, F. (2004). Las motillas: un modelo de asentamiento con fortificación central en la Llanura Manchega. In R. García Huerta & J. Morales Hervás (Coords.), *La Península Ibérica en el II mil. a.C.: poblados y fortificaciones* (pp. 172-217). Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Nájera, T., Molina, F., Cámara, J. A., Afonso, J. A., & Spanedda, L. (2019). Análisis estadístico de las dataciones radiocarbónicas de la Motilla del Azuer (Daimiel, Ciudad Real). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 29, 309-351. <https://doi.org/10.30827/cpag.v29i0.9780>
- Nájera, T., Jiménez, S. A., Molina, F., Delgado, A., & Laffranchi, Z. (2012). La aplicación de los métodos de la antropología física a un yacimiento arqueológico: la Motilla del Azuer. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 22, 149-182. <https://doi.org/10.30827/cpag.v22i0.2422>
- Noardo, F. (2018). Architectural heritage semantic 3D documentation in multi-scale standard maps. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.009>
- Pietroni, E., & Adami, A. (2014). Interacting with Virtual Reconstructions in Museums: The Etruscanning Project. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2(7), 1-29. <https://doi.org/10.1145/2611375>
- Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Livia's Villa Reloaded: An example of re-use and update of a pre-existing Virtual Museum, following a novel approach in storytelling inside virtual reality environments. In *2015 Digital Heritage, Granada, Spain* (pp. 511-518). <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419567>
- Sánchez Meseguer, J. L., & Galán, C. (2019). La cronología del Cerro de la Encantada: estratigrafía, dataciones radiocarbónicas y paleoclimatología. *Calatrava Estudios. Revista de Estudios Calatavos*, 1, 89-130.
- Santacana, J., & Serrat, N. (2005) (Coords.). *Museografía didáctica*. Barcelona: Ariel.
- Tilden, F. (2009). *Interpreting our heritage*. Chapel Hill: The University of North Carolina Press.
- Torres Mas, M. (2016). De motillas a poblados en altura: el poblamiento de La Mancha Occidental en el II milenio a.n.e. In F. Alía, J. Anaya, L. Mansilla, & J. Sánchez (Coords.), *II Congreso Nacional Ciudad Real y su provincia* (pp. 42-61). Ciudad Real: Instituto de Estudios Manchegos.
- Torres Mas, M. (2020). La Motilla del Azuer y el modelo de gestión del patrimonio cultural del Ayuntamiento de Daimiel 2013-2017. In J. Onrubia, V. M. López-Menchero, D. Rodríguez, & J. Morales (Eds.), *LEGATUM 2.0. Musealización y Puesta en Valor del Patrimonio Cultural: I Congreso Internacional* (pp. 273-284). Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. http://doi.org/10.18239/congresos_2020.22.28
- Torres, M., Angulo, M. I., Álvarez, H., & Rodríguez, D. (2021). El patrimonio de Daimiel a través de la arqueología: investigación, rehabilitación y difusión. In *V Jornadas de Historia de Daimiel* (pp. 267-283). Daimiel: Ayuntamiento de Daimiel.
- Walmsley, A., & Kersten, T. P. (2019). Low-cost development of an interactive, immersive virtual reality experience of the historic city model stade 1620. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 405-411. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-405-2019>
- Weech, S., Moon, J., & Troje, N. F. (2018). Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLoS ONE*, 13(3), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>