



USO COMBINADO DE LA FOTOGRAFÍA DIGITAL NOCTURNA Y DE LA FOTOGRAMETRÍA EN LOS PROCESOS DE DOCUMENTACIÓN DE PETROGLIFOS: EL CASO DE ALCÁZAR DE SAN JUAN (CIUDAD REAL, ESPAÑA)

COMBINED USE OF DIGITAL NIGHTLIGHT PHOTOGRAPHY AND PHOTOGRAMMETRY IN THE PROCESS OF PETROGLYPHS DOCUMENTATION: THE CASE OF ALCÁZAR DE SAN JUAN (CIUDAD REAL, SPAIN)

Víctor Manuel López-Menchero Bendicho^{a,*}, Ángel Marchante Ortega^b, Matthew L. Vincent^c, Ángel Javier Cárdenas Martín-Buitrago^a, Jorge Onrubia Pintado^a

^a Universidad de Castilla-La Mancha, Instituto de Desarrollo Regional, Laboratorio de Arqueología, Patrimonio y Tecnologías Emergentes (LAPTE), Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, Spain. victor.lopezmenchero@uclm.es; javicardenas33@hotmail.com; jorge.onrubia@uclm.es

^b G.I. Tarha, Departamento de Ciencias Históricas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, c/ Pérez del Toro, s/n, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, Spain. angel.marchante@ulpgc.es

^c Universidad de Murcia, ITN-DCH Fellow, Centro de Estudios de Arqueología Virtual, Campus de Espinardo, 30001 Murcia, Spain. matt@averails.com

Abstract:

For decades, the documentation of rock art has been the backbone of the research on this cultural practice. However, traditional techniques used for this purpose have proved to be imprecise and subjective. With the advent of the digital age there has been a revolution in the field of rock art documentation in general and in particular for petroglyphs. Techniques such as digital nightlight photography or three-dimensional (3D) photogrammetry have opened a world of possibilities. In the case of nightlight photography, its use goes back to the second half of the 20th century. However, in recent years the emergence of high-power digital cameras along with new lighting systems unthinkable decades ago, such as tactical flashlights, have rejuvenated a technique that seems incombustible. After the numerous tests carried out by the DIPAR (Integral Rock Art Documentation System) project team, it has become evident that, correctly employed, this technique still has immense potential in the field of rock art documentation, especially if we take into consideration its low cost and ease of use. Photogrammetry, on the other hand, is shown as the perfect complement to the records obtained through digital nightlight photography. The possibility of applying filters or shaders that increase the visibility of the digitized petroglyphs, within a metric scheme, is a great advance in their documentation. This paper explores the advantages associated with these techniques with a case study: unpublished petroglyphs of Alcázar de San Juan (Spain).

Key words: digital photography, 3D, archaeological heritage, rock art, photogrammetry, documentation

Resumen:

Durante décadas la documentación del arte rupestre ha constituido la columna vertebral de las investigaciones relativas a esta manifestación cultural. No obstante, las técnicas tradicionales empleadas para ello han demostrado ser imprecisas y subjetivas. Con la llegada de la era digital se ha producido una auténtica revolución en el campo de la documentación del arte rupestre en general y de los petroglifos en particular. Técnicas como la fotografía digital nocturna o la fotogrametría tridimensional (3D) han abierto un mundo de posibilidades. En el caso de la fotografía nocturna su uso se remonta a la segunda mitad del siglo XX. No obstante, en los últimos años la aparición de cámaras digitales de gran potencia junto con nuevos sistemas de iluminación impensables hace décadas, como las linternas tácticas, han rejuvenecido una técnica que parece incombustible. Tras las numerosas pruebas realizadas por el equipo de trabajo del proyecto DIPAR (Sistema de Documentación Integral del Patrimonio Rupestre) ha quedado de manifiesto que, correctamente empleada, esta técnica sigue teniendo un potencial inmenso en el campo de la documentación de grabados rupestres, especialmente si tomamos en consideración su bajo coste y facilidad de uso. La fotogrametría por su parte, se muestra como el complemento perfecto a los registros obtenidos mediante la fotografía digital nocturna. La posibilidad de aplicar filtros o *shaders* que aumentan la visibilidad de los petroglifos digitalizados, dentro de un esquema métrico, supone un gran avance en su documentación. El presente trabajo explora las ventajas asociadas a estas técnicas con un caso práctico: los grabados rupestres inéditos de Alcázar de San Juan (España).

Palabras clave: fotografía digital, 3D, patrimonio arqueológico, arte rupestre, fotogrametría, documentación

* Corresponding author: Víctor Manuel López-Menchero Bendicho, victor.lopezmenchero@uclm.es



1. Introducción

El municipio de Alcázar de San Juan (Fig. 1) se encuadra geográficamente en la cuenca alta del río Guadiana, en pleno centro de La Mancha (Castilla-La Mancha, España). Posee un extenso término municipal, lo que favorece la presencia de un vasto y rico patrimonio arqueológico, legado de las distintas culturas y civilizaciones que a lo largo de la Historia se han asentado en estas tierras (Vaquero et al., 1984). Entre ese patrimonio, algunos investigadores han localizado, en los últimos años, al menos tres estaciones rupestres, a saber: Pozos de Navarro, Pozo del Empego y Pozo de Tello. Todas ellas inéditas y carentes, por tanto, de ningún tipo de documentación o investigación al respecto.

En todos los casos se trata de estaciones con grabados rupestres, presumiblemente de época histórica, realizados sobre rocas en disposición horizontal o ligeramente inclinada. A diferencia de lo que ocurre con las pinturas rupestres, localizadas generalmente en abrigos, cuevas o covachas, como es el caso del cercano abrigo de La Rendija en Herencia (Almodóvar, 1994; 2008), estos grabados se encuentran en superficies totalmente expuestas al aire libre, lo que contribuye a su progresivo deterioro (Fig. 2). De hecho, hoy día, la erosión pero también la creación de pátinas más o menos homogéneas, junto con diferentes colonias de microorganismos sobre la superficie de la roca, impiden poder distinguir a simple vista la mayoría de estas manifestaciones rupestres, cuando en origen, suponemos sería relativamente sencillo distinguir estos grabados bajo cualquier condición lumínica gracias al contraste cromático producido por los impactos e incisiones.

Nos encontramos, por tanto, ante un patrimonio sensible y frágil que demanda de acciones urgentes de documentación integral capaces de asegurar su supervivencia, aunque sea en formato digital, para las



Figura 2: Pozos de Navarro (Alcázar de San Juan). El deterioro es constante dado el grado de exposición de los paneles rupestres.

generaciones venideras (Bertilsson, 2003). En este contexto, la Universidad de Castilla-La Mancha ha trabajado de forma intensiva en la documentación de estos grabados. Dichos trabajos se enmarcan dentro de un proyecto de I+D+i titulado “Sistema de Documentación Integral del Patrimonio Rupestre (DIPAR)” que, patrocinado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (POII-2014-005-P), ha diseñado, desarrollado y testado una metodología integral de registro del arte rupestre, tanto pintado como grabado, a partir de la aplicación de nuevas tecnologías (Marchante et al., 2016; López-Menchero et al., 2016).

Para el caso concreto de los grabados, la metodología de trabajo propuesta se divide en siete fases sucesivas e interrelacionadas entre sí que abarcan desde la prospección superficial, tanto diurna como nocturna, hasta el análisis e interpretación final de los grabados (Fig. 3). En el marco de esa metodología, la documentación fotográfica nocturna y la documentación terrestre 3D forman el núcleo duro de este sistema de registro.

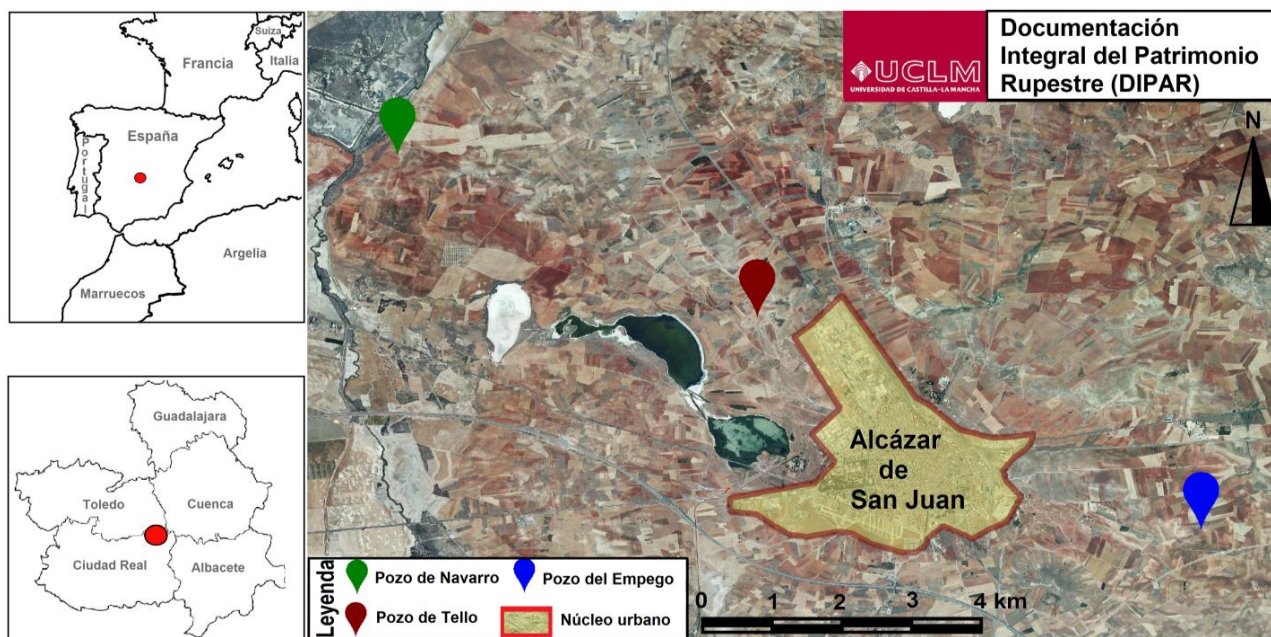


Figura 1: Mapa de localización de las estaciones rupestres de Alcázar de San Juan (Ciudad Real).

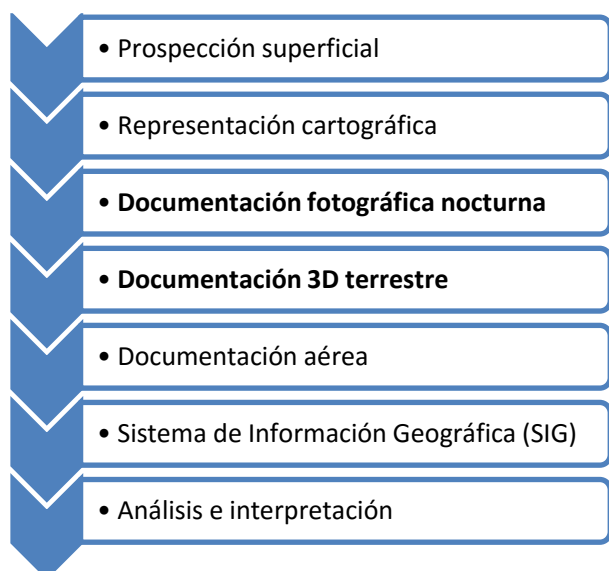


Figura 3: Metodología diseñada por el proyecto DIPAR para la documentación integral de estaciones rupestres con grabados.

2. La documentación de petroglifos

Hasta la fecha, los sistemas tradicionales de documentación de arte rupestre han tenido como fin último la obtención de calcos de los motivos representados, al objeto de facilitar su correcta visualización y consecuentemente su interpretación (Moneva, 1993). Resulta evidente que la correcta visualización de los motivos es esencial para acometer su posterior interpretación con unas mínimas garantías. Precisamente por ello, un calco incompleto o impreciso puede conducir a interpretaciones erróneas por parte de su descubridor pero también por parte de aquellos otros investigadores que consulten esos mismos calcos en su búsqueda de paralelos con los nuevos motivos y estaciones que poco a poco se van estudiando (Tufte, 1999, pp. 72-73; Bustamante, 2005). En este sentido, podemos afirmar que en el caso del arte rupestre el error en los calcos realizados y publicados, siempre tiene un efecto multiplicador que acrecienta las consecuencias del error cometido y que, a largo plazo, supone un lastre en la resolución de los múltiples enigmas que acompañan a este tipo de manifestaciones culturales. A su vez, una documentación detallada y minuciosa, puede ofrecer datos cruciales para la investigación (Ledo, 2016). Como ha puesto de manifiesto recientemente Bertilsson (2015), un pequeño matiz puede ser clave para interpretar correctamente un grabado, su significado y cronología.

Tradicionalmente, incluso hoy día, se ha apostado por el uso de pinturas, tiza u otros componentes para resaltar los motivos antes de realizar la toma fotográfica ya que permiten mejorar la visibilidad de los petroglifos resaltando su interior o su contorno (Royo & Gomez, 1996, pp. 18-20; Seoane-Veiga, 2006, pp. 36-37; Antczak & Antczak, 2007; Rey & Eiroa, 2009-2010; Falcón, 2013). En otras ocasiones se ha perseguido conseguir el calco directo del original mediante técnicas invasivas como el *frotage* o el calco sobre plástico (Seoane-Veiga, 2005; Cortón, 2011, pp. 163-165). Las desventajas e inconvenientes mostrados por todos estos procedimientos ya han sido suficientemente tratados por diversos autores, que han centrado sus críticas en la falta de objetividad o fidelidad de estas técnicas y en el

deterioro que muchas de ellas provocan en los grabados (Bednarik, 1979; 2001; Rogerio, 2007; 2009; San Nicolás, 2012, pp. 29-30). Así por ejemplo, la técnica del tizado altera las proporciones de calcio e impide la datación mediante ratios-caciones de los petroglifos. Similar situación parecen provocar los calcos realizados con lapiceros o puntas de grafito. Incluso el uso de moldes de látex o la eliminación de líquenes pueden estar provocando alteraciones irreversibles. El problema de base es la introducción de alteraciones químicas o físicas en la roca de consecuencias impredecibles. Es por ello que algunos autores como Loendorf (2001, pp. 55-58) apuestan por adoptar posiciones tendentes a la cautela, con objeto de evitar acciones que podrían tener unas consecuencias definitivas.

Por consiguiente, resulta prioritario elaborar una metodología de trabajo que minimice esos riesgos al tiempo que incremente los niveles de objetividad de la información obtenida. Para ello proponemos centrar nuestra atención en lo que algunos han denominado imágenes de segundo orden, es decir “aquellas inducidas por la imagen fuente en un sensor” (Montero *et al.*, 1998, p. 156; Martín, 2006, p. 134). Entre las múltiples técnicas que se están testando para conseguir alcanzar ese objetivo (Gutiérrez *et al.*, 2014), en el presente artículo nos detendremos únicamente en dos, la fotografía digital nocturna y el registro tridimensional terrestre, pues consideramos que la combinación de ambas puede ofrecer unos resultados adecuados a las necesidades de documentación de muchas estaciones rupestres.

3. Fotografía digital nocturna

Uno de los mayores problemas a los que debemos enfrentarnos en el arduo proceso de documentar grabados rupestres es su falta de visibilidad. Muchos de ellos han sufrido un proceso de erosión tal que resultan prácticamente imperceptibles al ojo humano en las horas centrales del día, tornándose visibles únicamente al amanecer y especialmente al atardecer, cuando la luz incide en ellos de forma rasante (Bustamante, 2005). Este fenómeno natural puede ser reproducido de manera controlada por la noche mediante el uso de luz artificial. Desde hace décadas diversos investigadores han podido constatar las bondades que el trabajo nocturno ofrece en las tareas de documentación de grabados rupestres gracias a la posibilidad de controlar las condiciones lumínicas (Walker *et al.*, 1979; Wainwright, 1985, p. 32; Sanger y Woodward, 1990; Bednarik, 1990; Soto y Rey, 1996; Domingo *et al.*, 2004; Domingo *et al.*, 2007, pp. 357-359; Villaverde, 2007, pp. 360-361; Burke *et al.*, 2008; Balme y Paterson, 2009, pp. 63-64; Cortón, 2011, pp. 165-166; Ugalde, 2011, pp. 33-34; Mas *et al.*, 2015, p. 23). Incluso algunos autores han reivindicando su utilidad frente a técnicas mucho más modernas, pero también mucho más costosas y complicadas como sucede con el escáner laser 3D (Cassen *et al.*, 2013). No obstante, la metodología más adecuada de trabajo para la toma de fotografías nocturnas apenas ha sido objeto de discusión por parte de la comunidad científica, lo que ha limitado el alcance de esta técnica. Así por ejemplo, el Grupo de Trabajo de Noruega para la conservación del arte rupestre mencionaba su uso en *La guía para la documentación, gestión, presentación y seguimiento del arte rupestre noruego*, pero concluía en un tono bastante pesimista que “los resultados de la fotografía con luz artificial no

siempre son igualmente predecibles”. Dicho informe afirmaba también que como regla general, “proporcionan una información más pobre sobre texturas que muestran trazas del uso de herramientas y que requieren de una buena iluminación natural” (Bjelland & Helberg, 2007, pp. 48-49). Por otro lado, el uso de luz rasante artificial aumenta la subjetividad del motivo percibido pues según el ángulo, la potencia y la dirección de la fuente de luz, se realzan unas zonas en detrimento de otras, generando a veces formas que pueden resultar engañosas (Moya-Maleno & Hernández, 2015, p. 1986). Otros autores han señalado algunas limitaciones en lo que se refiere a la documentación de paneles completos, en lugar de motivos aislados, ya que la necesidad de posicionar la fuente de luz artificial en un solo punto hace prácticamente imposible obtener fotografías de conjunto de todas las figuras que puede albergar un mismo panel, pues por lo general la fuente de luz o no puede iluminar el panel completo o no puede iluminar correctamente cada una de las figuras que componen el panel, dada la irregularidad que suele presentar la superficie de muchas rocas (Seoane-Veiga, 2009, p. 37). Pese a estas limitaciones, que deberían haber abierto un debate en el seno de la comunidad científica internacional, en los últimos tiempos el discurso se ha reducido a mencionar simplemente la utilización de esta técnica, sin entrar en detalles. De hecho, resulta paradójico que se le prestara más atención y páginas a esta técnica en los años ochenta y noventa cuando las posibilidades de la fotografía eran mucho más limitadas, que a partir de la democratización de la fotografía digital.

Para suplir todas estas debilidades el equipo de trabajo ha desarrollado una metodología propia cuyos resultados consideramos son satisfactorios y reproducibles por otros grupos de investigación. Para ello se ha empleado únicamente una cámara réflex Nikon D90 con 2 objetivos (objetivo NIKKOR 18-105 mm VR + objetivo Tamron F004N SP AF 90 mm F/2.8 Di VC USD MACRO 1:1), una linterna LED táctica (con zoom, XM-L de 1600 lúmenes) y un trípode.

Tras probar el uso de diversos sistemas de iluminación, como fluorescentes o linternas tradicionales de diversa índole y potencia, la linterna táctica se ha mostrado como el sistema de luz artificial más adecuado dada su potencia, versatilidad, resistencia, durabilidad y precio. Especialmente si tenemos en consideración que durante la toma fotográfica será necesario mover, siguiendo una órbita parabólica, el punto de luz alrededor del motivo o panel que se quiere fotografiar. Para documentar paneles completos es necesario configurar la cámara sin flash, en enfoque manual, con una apertura del diafragma que puede oscilar entre $f/22$ y $f/36$ al objeto de lograr una mayor profundidad de campo, una sensibilidad 100 ISO que permite lograr una mayor nitidez, y un tiempo de exposición que según el tamaño del panel puede oscilar entre los 6 y los 10 s, suficiente para que entre una cantidad de luz adecuada y para poder mover la fuente de luz artificial alrededor del petroglifo. Cuando se trabaja con tiempos de exposición de 10 s es posible reducir la apertura del diafragma hasta valores cercanos al $f/36$, mientras que cuando el tiempo de exposición es menor, en torno a los 6 s, la apertura del diafragma debe estar cercana al $f/22$. La documentación de los motivos de pequeño y mediano tamaño permite trabajar con aperturas de diafragma y tiempos de exposición menores, habiéndonos dado un

buen resultado el uso combinado de una apertura de diafragma de $f/25$ con un tiempo de exposición de 4 s (Fig. 7). Lógicamente estos valores son aproximados y dependen del tipo de cámara y objetivo empleados. Sea como fuere, en ambos casos, dado el tiempo de exposición seleccionado, cualquier ligero movimiento de la cámara, por muy sutil que sea, provocará que la fotografía salga trepidada por lo que el disparo se debe efectuar bien con el temporizador de la propia cámara o bien con un disparador remoto, siendo en cualquier caso el uso del trípode imprescindible. El hecho de trabajar de noche, cuando las temperaturas son más bajas, reduce los niveles de ruido en las fotografías ya que el calor afecta negativamente al sensor de la cámara. Para evitar el efecto de sombras duras y desiguales se ha optado por mover la linterna en órbita parabólica de 180° alrededor de los paneles y de unos 90° alrededor de los motivos, a unos 10-20 cm de altura respecto a la superficie del soporte durante el tiempo que dura la exposición (Fig. 4). Este procedimiento evita las típicas oclusiones en las zonas que quedan totalmente en sombra en la fotografía nocturna convencional como consecuencia de la proyección de las propias paredes del grabado o de alguna irregularidad en la superficie de la roca (Fig. 6). Además permite documentar paneles completos de más de 1 m de diámetro usando como fuente de iluminación una simple linterna (Fig. 5).

Una de las ventajas que se han podido registrar en campo es que con este sistema solamente hacen falta dos personas para poder ejecutar el trabajo a buen ritmo, siendo posible, incluso, poder llevarlo a cabo un único investigador. La ligereza del equipo, al no utilizar complicados sistemas de iluminación, permite una gran libertad de movimientos lo que redundará en tiempos de ejecución más cortos con menos personal. En el caso que nos ocupa, donde ha sido necesario documentar más de 40 paneles y 150 motivos distribuidos a lo largo de tres estaciones rupestres distintas, esta clase de aspectos son fundamentales en aras de una mayor eficacia y eficiencia en los procesos de trabajo.



Figura 4: Al objeto de conseguir una iluminación uniforme el foco de luz debe moverse describiendo una órbita parabólica de 180° alrededor del panel. El haz dejado por la linterna debe quedar fuera del encuadre de la fotografía. En este caso se mantiene el rastro dejado por la linterna al objeto de mostrar la órbita exacta seguida para documentar este panel. Estación rupestre de Pozos de Navarro.

En lo que concierne al registro de las trazas que nos pueden ayudar a determinar la técnica empleada para realizar el grabado, consideramos que la luz artificial rasante con posición fija es la más apropiada para proceder a su documentación, pues dada su dureza resalta cualquier irregularidad de la roca. Para obtener

un resultado óptimo es imprescindible, por un lado, pegar el punto de luz a la roca de forma que la luz incida sobre el grabado lo más rasante posible y, por otro, el uso de un objetivo macro que permita recoger todos los detalles resaltados por la iluminación (Fig. 8). Lógicamente en este caso se puede trabajar con

tiempos de exposición mucho más reducidos, en torno a los 2 o 3 s. De esta forma ambas técnicas, tanto aquella que utiliza luz artificial rasante en posición fija como la que la usa en movimiento, proporcionan resultados complementarios, válidos y útiles en el proceso de documentación de grabados.



Figura 5: La técnica empleada permite iluminar paneles de varios metros de longitud, como el que se muestra en la imagen, de forma rápida y sencilla. Estación rupestre de Pozos de Navarro.

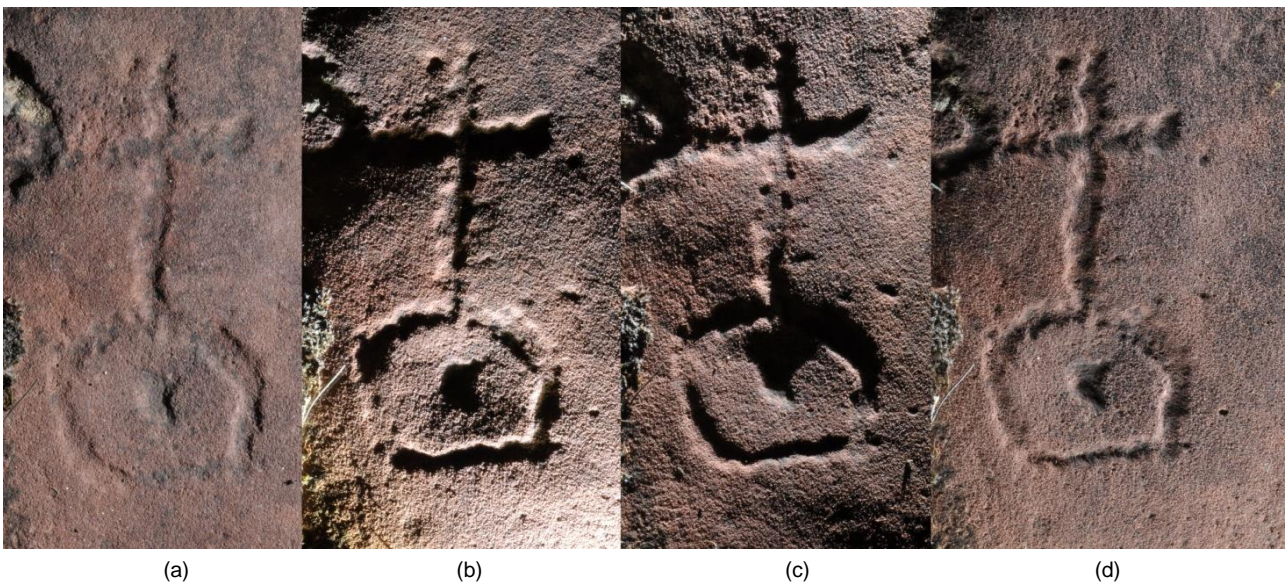


Figura 6: La fotografía a) muestra el motivo iluminado con una luz plana lo que elimina muchos matices de la forma. Las imágenes b) y c) han sido tomadas con luz artificial rasante aumentando la sensación de relieve del grabado pero ocultando algunas zonas del mismo en función de la posición de la luz. La imagen d) es fruto de una iluminación artificial homogénea rasante conseguida gracias al movimiento del foco de luz en el tiempo que dura la exposición de la cámara. Estación rupestre de Pozo del Empego.



Figura 7: La fotografía a) muestra el aspecto del petroglifo con una luz plana, acorde con el nivel de visibilidad diurno que suele presentar. La fotografía b) muestra los resultados obtenidos tras aplicar la metodología de iluminación y registro desarrollada por el equipo de trabajo. Estación rupestre de Pozo del Empego.



Figura 8: La fotografía tomada con luz artificial rasante de posición fija permite discernir perfectamente dos de las técnicas empleadas en la realización de los petroglifos de Pozo del Empego. En la parte de la izquierda de la imagen se puede apreciar la técnica del piqueteado más abrasión que permite obtener líneas claras y continuas. En la zona central y derecha de la imagen por el contrario vemos la técnica del piqueteado disperso que obliga al espectador a unir los puntos mentalmente para poder obtener el contorno de la figura. Como se aprecia en la fotografía la utilización de esta técnica permite resaltar, no solo los motivos, sino en general toda la textura de la roca. Fotografía tomada con objetivo macro 90 mm.

4. El registro 3D

A pesar de la utilidad y del potencial de la fotografía digital nocturna, debemos ser conscientes de sus limitaciones como sistema de registro por sí solo, en la medida que todo grabado posee una naturaleza 3D que la fotografía no es capaz de captar. La posibilidad de documentar de forma métrica en tres dimensiones aquello que posee 3 dimensiones es fundamental a la hora de alcanzar unas cotas óptimas de información registrada.

La dificultad de acceso que presentan muchas estaciones rupestres, así como la necesidad de implementar sistemas de documentación de bajo coste que permitan documentar a gran escala el inmenso número de motivos y paneles que existen en España, nos induce a apostar por la fotogrametría como técnica de documentación 3D prioritaria. Su uso ha sido testado

por multitud de investigadores en los últimos años, especialmente desde la aparición de programas informáticos como Agisoft PhotoScan que automatizan hasta el extremo el proceso con excelentes resultados (Plets et al., 2012; Plisson & Zotkina, 2015; Williams & Twohig, 2015; Bertilsson, 2015).

Para llevar a cabo los trabajos de documentación fotogramétrica de los grabados se ha utilizado una cámara réflex Sigma SD1 Merrill con un objetivo fijo Sigma 50 mm f/1.4 EX DG HSM, montada sobre un trípode Manfrotto de fibra de carbono MT057C4-G. La estabilidad de la cámara está directamente relacionada con la nitidez de las fotografías, por lo que el uso de un trípode de calidad, ligero, estable y con capacidad para superar los 2 m de altura extendido se ha revelado como algo esencial. Durante el proceso de toma de fotografías en campo se ha podido concluir que las recomendaciones dadas por Meijer (2015) para fotografiar petroglifos, resultan eficaces. Desde trabajar al atardecer cuando la luz incide en ángulo oblicuo sobre los grabados, hasta evitar las sombras fuertes pasando por trabajar preferentemente cuando la superficie de la roca está seca o usar objetivos de focal fija de 50 mm. En líneas generales, cuanto mayor sea la calidad de las fotografías (resolución, ruido...) mejor resultará el modelo 3D.



Figura 9: El nivel de visibilidad de muchos petroglifos es prácticamente nulo. La zona señalizada con un recuadro esconde la figura de un antropomorfo. Estación rupestre de Pozos de Navarro.

Las fotografías obtenidas han sido procesadas en Agisoft Photoscan Professional Edition (v. 1.2.4) al objeto de obtener el modelo 3D de los paneles y motivos. Para trabajar con toda la información recogida en campo se ha utilizado una workstation Titanium-Mountain, que permite procesar gran cantidad de datos en poco tiempo.

Una vez obtenidos los modelos 3D es necesario exportarlos, en nuestro caso en formato OBJ., para posteriormente trabajar sobre ellos en Meshlab. El software gratuito Meshlab incorpora una opción que permite aplicar filtros o *shaders* que aumentan la visibilidad de los petroglifos digitalizados (Vergne *et al.*, 2011; Vilas-Estevez *et al.*, 2016; Carrero-Pazos *et al.*, 2016). Concretamente se trata del *shader* de *Radiance Scaling*, que reproduce, en cierta medida, los resultados que podríamos obtener con la metodología de *Reflectance Transformation Imaging* (RTI), pero sin el proceso complicado que implica la adquisición RTI (Mudge *et al.*, 2006; Duffy, 2010; Echevarría & Nieves, 2014). La utilización de *shaders* en Meshlab no reviste ningún tipo de complejidad, pues únicamente es necesario marcar la opción correspondiente (*Labertian Radiance Scaling* o *Lit Sphere Radiance Scaling*) y automáticamente el programa muestra los cambios sobre el modelo 3D.

Para asegurar una correcta conservación de los datos, todos los archivos del proyecto han sido transferidos a una unidad de almacenamiento Synology DiskStation DS713+. Dada la constante mejora en los programas de fotogrametría, no solamente se ha procedido a preservar el resultado final 3D, sino también todas las fotografías utilizadas para generar los modelos. Las fotografías digitales constituyen la materia prima de nuestro trabajo, siendo una fuente de documentación de primer nivel. Su correcto almacenamiento puede permitir en el futuro emplear este material con nuevos programas mucho más potentes que los actuales, lo que podría permitir alcanzar cotas de detalle inimaginables en la actualidad. Además, de esta forma, en caso de que en el futuro los paneles o los motivos resulten dañados o desaparezcan será posible contar con una valiosa fuente de información.

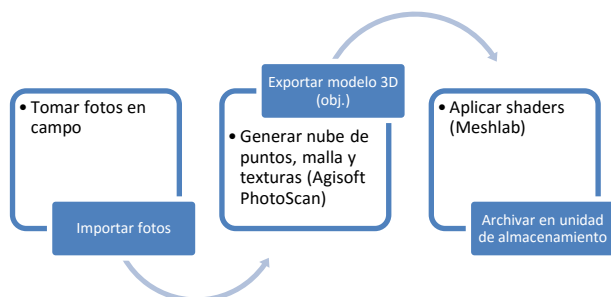
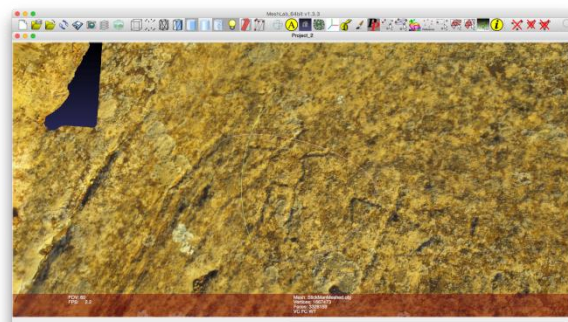
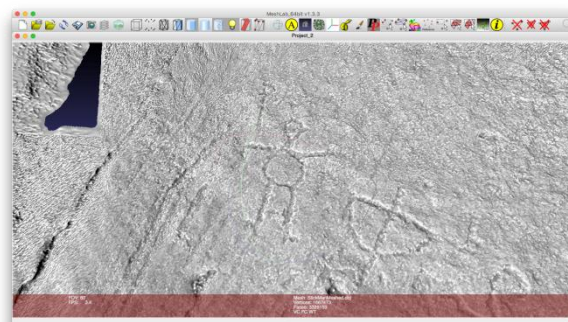


Figura 10: Flujo de trabajo en el registro 3D.

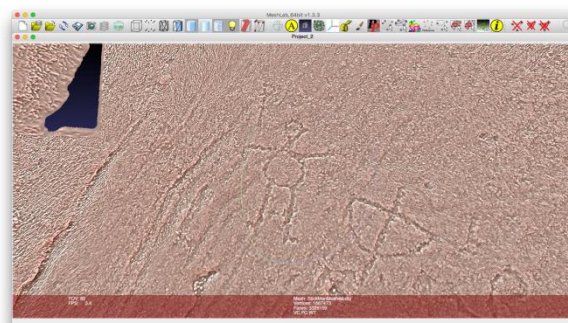
Para ejemplificar la utilidad de este procedimiento de trabajo (Fig. 10), la Figura 11 ilustra los resultados obtenidos en un caso especialmente complejo dado el nivel de erosión y la falta de visibilidad del motivo. Como se puede apreciar, con esta técnica es posible distinguir sin ninguna dificultad la figura humana que está grabada en la roca y que, sin embargo, apenas resulta visible durante el día como muestra la Figura 9.



(a)



(b)



(c)

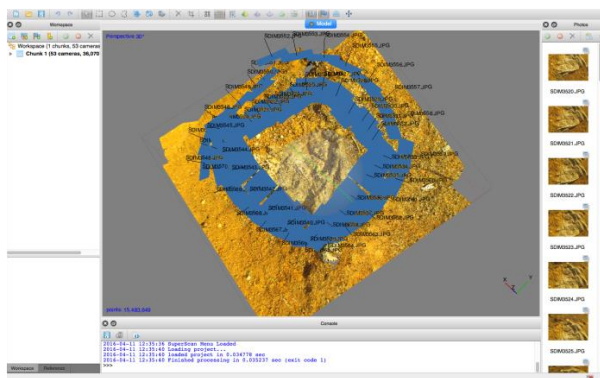
Figura 11: a) Resultado de la digitalización mediante fotogrametría del antropomorfo de los Pozos de Navarro antes de aplicar ningún tipo de *shader*; b) Resultado obtenido tras la aplicación en Meshlab del *Labertian Radiance Scaling*; c) Resultado tras la aplicación del *shader Lit Sphere Radiance Scaling*.

Esta metodología de trabajo también ha dado excelentes resultados en petroglifos realizados con la técnica del vaciado o relieve, en donde el motivo se configura a partir de la extracción del material pétreo que queda en el interior del contorno. La Figura 12 muestra el flujo de trabajo realizado para documentar un panel en el que aparece grabado un calvario completo elaborado con técnica de vaciado.

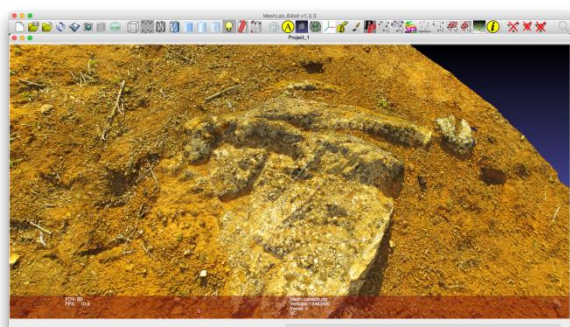
5. Discusión y conclusiones

El arte rupestre es una de las manifestaciones culturales más importantes y extendidas de la Humanidad. En España, este hecho se reconoce en el Artículo 40.2 de la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español, que declara Bienes de Interés Cultural todas las manifestaciones de arte rupestre existentes en territorio español. Sin embargo, como hemos podido comprobar con las estaciones rupestres de Alcázar de San Juan, no siempre la teoría coincide con la práctica.

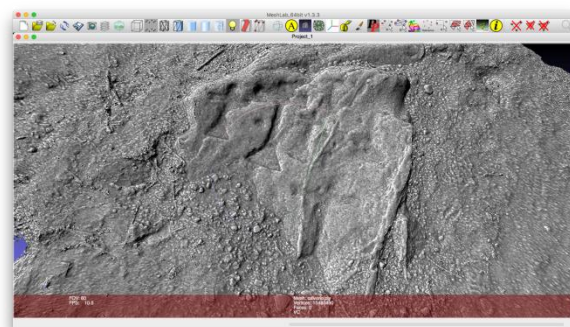
USO COMBINADO DE LA FOTOGRAFÍA DIGITAL NOCTURNA Y DE LA FOTOGRAMETRÍA EN LOS PROCESOS DE DOCUMENTACIÓN DE PETROGLIFOS: EL CASO DE ALCÁZAR DE SAN JUAN (CIUDAD REAL, ESPAÑA)



(a)



(b)



(c)

Figura 12: Resultados del proceso de documentación 3D de un panel trabajado con la técnica de vaciado: a) Generación del modelo 3D en Agisoft Photoscan; b) Importación del modelo 3D a Meshlab en formato OBJ; c) Aplicación del *shader Labertian Radiance Scaling*.

Multitud de enclaves con grabados rupestres, especialmente de época histórica, se encuentran completamente abandonados y en serio peligro de desaparición. Dada su ubicación en zonas apartadas y al aire libre, la mejor manera que tenemos de protegerlos, es documentarlos y darlos a conocer, ya que solo se protege aquello que se valora y solo se valora aquello que se conoce. En este sentido, debemos ser capaces de desarrollar metodologías de trabajo útiles y eficaces, implementables a gran escala, y consecuentemente de bajo coste y relativa sencillez.

Los últimos avances tecnológicos nos permiten desarrollar una amplia gama de técnicas de registro de grabados rupestres sin necesidad de mantener ningún tipo de contacto físico con ellos, lo que sin duda garantiza su mejor conservación a largo plazo. El uso de estas técnicas no invasivas no solo resulta respetuoso con el bien documentado sino que además ofrece unos

resultados mucho más objetivos, a la par que ahorra tiempo de trabajo en comparación con otros sistemas no invasivos de carácter sistemático, como el desarrollado por Bustamante (2005).

Las pruebas llevadas a cabo por el equipo de investigación demuestran que la fotografía nocturna sigue siendo una técnica esencial en el proceso de documentación a gran escala de grabados rupestres, a pesar del tiempo transcurrido desde las primeras pruebas efectuadas en esta dirección durante la segunda mitad del siglo XX. Paradójicamente, el número de publicaciones encaminadas a avanzar en la discusión y consolidación de esta metodología es relativamente escaso. La aparente sencillez de la técnica y su extendida utilización a lo largo del tiempo y el espacio por numerosos investigadores han disipado un debate tan importante como necesario. Así pues, queda todavía mucho espacio para la discusión sobre los sistemas de iluminación, los ángulos de trabajo, la configuración de la cámara, las características técnicas de los equipos, etc.

Por otro lado, todavía existe margen para el debate en lo que concierne a sus posibilidades de aplicación, pues la implementación de esta técnica no resulta eficaz en todos los casos, especialmente en aquellos grabados que fueron realizados como simples incisiones ultrafinas sobre rocas de carácter cuarcítico. La escasa alteración de la superficie de la roca provocada por esta clase de grabados explica la falta de efectividad de este sistema y abre la puerta a otras técnicas que pudieran mostrarse más eficaces en la documentación de este tipo de grabados.

La fotogrametría, por su parte, sirve de complemento perfecto a las imágenes obtenidas mediante la técnica de fotografía digital nocturna. La utilización de *shaders* mejora sustancialmente el nivel de visibilidad de los grabados. Además la gratuidad de Meshlab, unido a su facilidad de uso, puede favorecer la implementación masiva de esta metodología en los procesos de documentación de petroglifos. Resulta altamente significativo que dos equipos de investigación diferentes y sin conexión entre sí, el representado por Vilas-Estevez, Carrero-Pazos y Vázquez-Martínez y el representado por los autores que suscriben estas líneas, hayamos llegado a la misma conclusión en cuanto a la utilidad de los *shaders* de Meshlab. Lo que vendría a corroborar que en verdad supone una línea de trabajo prometedora en el campo de la documentación de petroglifos.

No obstante, las posibilidades en Meshlab parecen todavía muy limitadas. En este sentido, la falta de más investigación básica en este campo impide obtener mejores resultados. Por otro lado, es importante no perder de vista que la calidad del modelo 3D es esencial para obtener unos resultados óptimos. Los *shaders* de Meshlab mejoran el nivel de visibilidad de los petroglifos en los modelos 3D por lo que cuanto mayor sea la calidad del modelo mejor será el resultado final. No obstante, siempre es deseable encontrar un punto de equilibrio entre la calidad perseguida y el esfuerzo que será necesario realizar para alcanzarla. En esta lógica, las pruebas que hemos llevado a cabo nos inducen a considerar el objetivo de focal fija de 50 mm como el más idóneo para acometer estos trabajos, pues permite documentar tanto figuras aisladas como paneles completos con suficiente nivel de detalle, siempre y

cuando se haga una adquisición adecuada. La utilización de objetivos más potentes, como el macro 90 mm, permite obtener mejores resultados en figuras aisladas, pero resulta poco práctico en la documentación de paneles completos o superficies de mediano tamaño, dada la pequeña extensión que es capaz de cubrir cada fotografía.

Pese a todo, estos avances nos hacen ser optimistas en cuanto al futuro inmediato del arte rupestre, pues abren la puerta a trabajos de documentación rigurosos y masivos. Y es que, solamente si somos capaces de estudiar con rigurosidad el arte rupestre en su conjunto, podremos desentrañar los misterios que aún

permanecen irresolutos en torno a su sentido y significado.

Agradecimientos

La Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del proyecto «Sistema de documentación integral del patrimonio rupestre» (POII-2014-005-P) han hecho posible este trabajo. Deseamos asimismo mostrar nuestro más sincero agradecimiento a los investigadores que nos pusieron sobre la pista de estos enclaves: D. Jesús Lizcano, D. Ángel Vaquero y D. Juan Ángel Ruiz.

Referencias

- Almodóvar, J. (2008). *Arte rupestre en Herencia: La Rendija*. Ayto. de Herencia.
- Almodóvar, J. (1994). Las pinturas rupestres del abrigo La Rendija de Herencia. In *La Edad del Bronce en Castilla-La Mancha: actas del Simposio, 1990*, (pp. 315–332). Toledo, España: Diputación provincial de Toledo.
- Antczak, M. M., & Antczak, A. (eds.) (2007). Los Mensajes confiados a la Roca. Sobre el inventario de petroglifos de la Colonia Tovar de Peter Leitner. Caracas, Venezuela: Editorial Equinoccio.
- Balme, J., & Paterson, A. (2009). *Archaeology in Practice: A Student Guide to Archaeological Analyses*. John Wiley & Sons.
- Bednarik, R. G. (1979). The potential of rock art patination analysis in Australian archaeology. *The Artifact*, (4), 14–38.
- Bednarik, R. G. (2001, 1990). Sobre la práctica de tizar y resaltar petroglifos. *Rupestreweb*, <http://rupestreweb.tripod.com/tizado.html>
- Bertilsson, U. (2003). Rock Art at Risk. In *Heritage at risk: ICOMOS world report 2002/2003 on monuments and sites in danger*. ICOMOS (pp. 236–239). Munich, Alemania: K.G. Saur.
- Bertilsson, U. (2015). Examples of application of modern digital techniques and methods Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) for three-dimensional documentation of rock carvings in Tanum creating new opportunities for interpretation and dating. In F. Troletti (Ed.), *XXVI Valcamonica Symposium 2015. Capo di Ponte (Bs) Italy September 9 to 12, 2015* (pp. 1–6). Capo di Ponte, Italia: Edizioni del Centro.
- Bjelland, T., & Helberg, B. H. (Eds.) (2007). *A guide to the documentation, management, presentation and monitoring of Norwegian rock art*. Norwegian Working Group for Rock Art Conservation. Directorate for Cultural Heritage, Riksantikvaren.
- Burke, H., Smith, C., & Zimmerman, L. J. (2008). *The Archaeologist's Field Handbook: North American Edition*. Lanham, USA: Altamira Press.
- Bustamante Díaz, P. (2005). Relevamiento de sitio arqueológico de Cuz Cuz, IV Región, Chile: Descripción de una experiencia. Parte I. Relevamiento y rescate de los diseños. *Rupestreweb*, <http://rupestreweb.info/bustamante.html>
- Carrero-Pazos, M., Vázquez-Martínez, A., & Vilas-Estevez, B. (2016). AsTrend: Towards a new method for the study of ancient carvings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 105–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.06.044>.
- Cassen, S., Lescop, L., Grimaud, V., Querré, G., & Suner, B. (2013). In search of a representation of the Gavrinis megalithic tomb (Morbihan, France). *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 61–63. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2013.4319>
- Cortón, N. Carrera, F., De La Peña, A., Neira, A., & Bernaldo De Quirós, F. (2011). Avance al estudio de los petroglifos de Peña Fadiel (Filiel, Lucillo de Somoza, León). *Férvedes: Revista de investigación*, (7), 105–114.
- Domingo, R., Guillem, P., Martínez-Valle, R., & Sopena, M. C. (2004). La documentación gráfica: un trabajo en equipo. In P. Utrilla y V. Villaverde (Eds.), *Los grabados levantinos del Barranco Hondo (Castellote, Teruel)*, (pp. 27–36). Zaragoza, España: Gobierno de Aragón.
- Domingo Sanz, I., Burke, H., & Smith, C. (2007). *Manual de campo del arqueólogo*. Barcelona, España: Ariel.

- Duffy, S. M. (2010). Polynomial texture mapping at roughing linn rock art site. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38-5, 213–217.
- Echevarría, G., & Nieves, A. (2014). Análisis con RTI (Reflectance Transformation Imaging) en dos sitios con quilcas del Perú: tecnología, deterioro y conservación. *Arqueología y Sociedad*, (28), 289–304.
- Falcón, N. (2013). Solar eclipse represented in the petroglyphs of Vigerima (Venezuela). *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 155–158. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2013.4357>
- Gutiérrez Alonso, A., Farjas Abadía, M., & Domínguez Gómez, J. A. (2014). Engineering at the service of history: Paleolithic invisible images. *Virtual Archaeology Review*, 5(11), 14–19. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2014.4172>
- Ledo Fernández, F. (2016). Rescate documental de petroglifos y reconstrucción 3D del corredor dolménico de Cubillejo de Lara, Burgos. *Virtual Archaeology Review*, 7(14), 43–52. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.4522>
- Loendorf, L. (2001). Rock Art Recording. In D.S. Whitley (Ed.), *Handbook of Rock Art Research* (pp. 55–79). Walnut Creek, USA: AltaMira Press.
- López-Menchero, V. M., Marchante, Á., Vincent, M., Cárdenas, Á. J., & Onrubia, J. (2016). Trabajos de documentación digital de grabados rupestres en el término municipal de Alcázar de San Juan (Ciudad Real, España). In J.L. Lerma y M. Cabrelles (Eds.), *Proceedings of the ARQUEOLÓGICA 2.0 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation*, (pp. 528–530). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Marchante, Á., López-Menchero, V. M., Ramiro, R., & Onrubia, J. (2016). Nuevas aportaciones al conocimiento y documentación de los grabados rupestres de Alcázar de San Juan. In F. Alía, J. Anaya, L. Mansilla y J. Sánchez (Eds.), *II Congreso Nacional Ciudad Real y su provincia* (pp. 62–74). Ciudad Real, España: Instituto de Estudios Manchegos (CSIC).
- Martín Rodríguez, E. (2006). La aplicación de las nuevas tecnologías al estudio de las manifestaciones rupestres. *Revista Tabona*, (14), 117–148.
- Mas, M., Lemjidi, A., Oumouss, A., Torra, G., Maura, R.... & Gavilán, B. (2015). Proyecto Tamanart 2013-2014. *Informes y Trabajos*, (12), 15–34.
- Meijer, E. (2015). Structure from Motion as documentation technique for Rock Art. *Adoranten*, 2015, 66–73.
- Moneva, M. D. (1993). Primeros sistemas de reproducción de Arte Rupestre en España. *Espacio, tiempo y forma. Serie I, Prehistoria y arqueología*, (6), 413–444.
- Montero Ruiz, I., Rodríguez Alcalde, A. L., Vicent García, J. M., & Cruz Berrocal, M. (1998). Técnicas digitales para la elaboración de calcos de arte rupestre. *Trabajos de Prehistoria*, 55(1), 155–169.
- Moya-Maleno, P. R., & Hernández Palomino, D. (2015). Posibles grabados rupestres en el Cerro Castillón (Villanueva de los Infantes, Ciudad Real): iconografía, arqueología y paisaje. *ARKEOS* (37), 1981–2008.
- Mudge, M., Malzbender, T., Schroer, C., & Lum, M. (2006). New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display. In *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, (pp 195–202). The Eurographics Association. <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST06/195-202>
- Plets, G., Verhoeven, G., Cheremisin, D., Plets, R., Bourgeois, J., ... & De Reu, J. (2012). The deteriorating preservation of the altai rock art: assessing three-dimensional image-based modelling in rock art research and management. *Rock Art Research*, 29(2), 139–156.
- Plisson, H., & Zotkina, L. V. (2015). From 2D to 3D at macro and microscopic scale in rock art studies. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(2-3), 102–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.06.002>
- Rey Castiñeira, J., & Eiroa García, J. J. (2009-2010). Arte de la Edad del Bronce los grabados rupestres de Cova da Bruxa y Laxe das Rodas (Muros, A Coruña): actuación arqueológica y revisión interpretativa. *Anales de prehistoria y arqueología*, (25-26), 77–118.
- Rogerio Candelera, M. A. (2007). *Una propuesta no invasiva para la documentación integral del arte rupestre*. Sevilla, España: CSIC - Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS).
- Rogerio Candelera, M. A. (2009). Análisis de imagen y documentación integral del arte rupestre: una propuesta de futuro. *Estudios de Prehistoria y Arqueología en homenaje a Pilar Acosta Martínez* (pp. 171–186). Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Royo Guillén, J. I., & Gomez Lecumberri, F. (1996). *Los grabados rupestres esquemáticos de Los Pozos Bolletes (Montalbán, Teruel)*. Zaragoza, España: Ayto. de Montalbán.

- San Nicolás, M. (2012). Documentación gráfica del Arte rupestre postpaleolítico para un plan de gestión. In *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial* (pp. 23–43). Huesca, España: Comarca de Somontano de Barbastro.
- Sanger, K., & Woodward, C. (1990). *Discovering prehistoric rock art: a recording manual*. Calabasas, USA: Wormwood Press.
- Seoane-Veiga, Y. (2005). Metodología de reproducción de grabados rupestre en Galicia. Levantamiento de calcos sobre plástico. *Cuadernos de estudios gallegos*, 52(118), 81–115.
- Seoane-Veiga, Y. (2006). Novos petroglifos no Monte de Rego Novo (Amoedo-Pazos de Borbén). *Cuadernos de Estudios Gallegos*, 53(119), 31–52.
- Seoane-Veiga, Y. (2009). *Propuesta metodológica para el registro del Arte Rupestre de Galicia*. CAPA 23 (Cadernos de Arqueoloxía e Patrimonio). CSIC - Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit).
- Soto Barreiro, M. J., & Rey Castiñeira, J. (1996). Una metodología de estudio para petroglifos: resultados en Laxe da Sartaña. *Gallaecia*, (14-15), 197–221.
- Tufte, E. R. (1999). *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press.
- Ugalde Mora, M. F. (2011). Registro de los petroglifos de Catazho (Morona Santiago). In M.F. Ugalde y A. Yépez (Eds.), *Investigaciones arqueológicas en Azuay y Morona Santiago* (pp. 13–45). Cuenca, Ecuador: INPC.
- Vaquero, A., Haro, J., Vela, F., Sereno, I., Aguilar, M. J., Sariñena, Y., Salve, M. S., Padilla, M. L., & Ubeda, D. (1984). *Apuntes e inventario de arqueología de Alcázar de San Juan y su comarca*. Alcázar de San Juan, España: Patronato de Cultura, Ayto. de Alcázar de San Juan.
- Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X., & Shlick, C. (2011). Radiance scaling for versatile surface enhancement. En D. Aliaga y M.M. Oliveira (Eds.), *I3D '10 Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, ACM New York, NY, USA (2010)*, (pp. 143–150). New York, USA: ACM.
- Vilas-Estevez, B., Vázquez-Martínez, A., & Carrero-Pazos, M. (2016). Going Further: (Re)Discovering rock art carvings with photogrammetric techniques in Galicia (North-West Iberian Peninsula). In A. Ippolito, & M. Cigola (Eds.), *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (pp. 175–200). Hershey, PA: IGI Global. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch008>
- Villaverde, V. (2007). Algunas recomendaciones de Valentín Villaverde para la fotografía del arte prehistórico parietal y mueble. In I. Domingo, H. Burke y C. Smith (Eds.), *Manual de campo del arqueólogo* (pp. 360–361). Barcelona, España: Ariel.
- Wainwright, N. M. (1985). Rock art conservation research in Canada. *Bolletino del Centro Camuno di Studi Preistorici*, 22, 15–46.
- Walker, D., Hepplewhite, J., & Dickson, G. (1979). Nightlight petroglyph photography: a photographic technique. In D. Lundy (Ed.), *CRARA '77: Fourth biennial conference of the Canadian Rock Art Research Associates, October 27-30, 1977, Victoria, British Columbia* (pp. 341–364). Victoria: British Columbia Provincial Museum.
- Williams, K., & Twohig, E. S. (2015). From sketchbook to structure from motion: Recording prehistoric carvings in Ireland. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(2-3), 120–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.04.002>