

ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA DOCUMENTACIÓN DEL ARTE RUPESTRE. EN BUSCA DE LAS TÉCNICAS MÁS ADECUADAS

ANALYSIS OF THE METHODOLOGIES FOR THE DOCUMENTATION OF ROCK ART. IN SEARCH OF THE MOST SUITABLE TECHNIQUES

Vicente Expósito Gil¹

Recibido: 23/10/2023 · Aceptado: 29/11/2023
DOI: <https://doi.org/10.5944/etfi.16.2023.38690>

Resumen

Este artículo aborda varias lagunas en la documentación del arte rupestre, como la falta de una metodología estandarizada. Se realiza un breve resumen sobre los principales métodos de documentación que se han utilizado, en el estudio de yacimientos con arte rupestre hasta nuestros días. Se estudia su funcionamiento, se analizan sus principales características y se observan y describen las ventajas e inconvenientes que presentan. El objetivo de este análisis descriptivo y comparativo es, identificar aquellas metodologías que pueden resultar más idóneas a la hora de documentar estos enclaves, dependiendo de la finalidad de nuestro estudio. Teniendo siempre presente la premisa ineludible de la conservación y no alteración de los yacimientos.

Palabras clave

Arte rupestre; arte prehistórico; metodologías documentación; técnicas documentación; yacimientos; nuevas tecnologías

Abstract

This article addresses several gaps in rock art documentation, such as the lack of a standardized methodology. A brief summary is made of the main documentation methods that have been used in the study of rock art sites to the present day. Their operation is studied, their main characteristics are analyzed and the advantages and disadvantages they present are observed and described. The objective of this descriptive and comparative analysis is to identify those methodologies that may

1. Doctor en Prehistoria. Correo electrónico: vicenteexpositogil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1025-9780>

be most suitable when documenting these enclaves, depending on the purpose of our study. Always keeping in mind the unavoidable premise of conservation and non-alteration of the sites.

Keywords

Rock art; prehistoric art; documentation methodology; documentation techniques; sites; new technologies

.....

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de la documentación del arte rupestre, va ligada al desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías de estudio. Lo que nos han permitido mejorar y perfeccionar el registro de los yacimientos. Algo que ha supuesto una preocupación constante por parte de los investigadores, optimizando los procesos, tratando de eliminar la subjetividad y avanzando en la no alteración de los yacimientos.

El objetivo principal era la obtención de las imágenes representadas, obviando el estudio de los soportes que las sustentan, como si no formaran parte del conjunto artístico. En casos aislados encontramos otras indicaciones, como el tipo de superficie sobre el que se sitúan.

Este proceso de registro ha evolucionado con el tiempo, primero en las figuraciones pictóricas, incorporando a continuación el soporte rocoso, la planimetría del abrigo o yacimiento, su entorno inmediato, hasta llegar a espacios territoriales mucho más amplios.

Para optimizar los resultados debemos analizar cuáles son los objetivos que deseamos alcanzar, así como establecer las premisas previas en cuanto a procesos y metodologías. Nuestro primer objetivo suele ser el registro e identificación de las figuras, para su posterior estudio histórico-académico (análisis estilístico, cronología, cultura a la que pertenece, posible significado, etc.). Un segundo objetivo es la optimización de las medidas a tomar para mejorar su conservación. Y por último, avanzar en la difusión de la información.

El arte parietal no es una entidad que podamos estudiar como aislada en un espacio-tiempo definido. Se realizó con técnicas y significados diferentes, en un espacio concreto, en un soporte previamente elegido, con condiciones diferenciadas en cada caso, y por supuesto en tiempos históricos diferentes. Por lo que cada imagen o conjunto de las mismas son únicos. El paso del tiempo ha modificado su estado inicial, lo que dificulta su registro, estudio e interpretación.

El arte rupestre es un importante componente del patrimonio cultural de la humanidad, y como tal trasciende a cualquier investigación científica. Por lo que la documentación que realicemos, no debe afectar en medida alguna a su delicado equilibrio. Debe ser tratado como el resto de los elementos del patrimonio arqueológico, con el mismo cuidado, cautela, y precisión. Es muy importante realizar una documentación fidedigna y exacta de los motivos a estudiar. Esto resulta imprescindible si queremos eliminar la subjetividad en nuestro trabajo. Un registro inadecuado inevitablemente nos conducirá a resultados inexactos y a conclusiones carentes de rigor.

La acción antrópica es la principal amenaza para su conservación. Habitualmente se trata de actos vandálicos, aunque en ocasiones también involuntarios. Históricamente, se han utilizado diversos métodos de registro, y en muchas ocasiones ha primado la investigación sobre la no alteración de los paneles. La mayor parte de estos procedimientos eran de reproducción directa, lo que inevitablemente producía tanto un deterioro del motivo, como una modificación del entorno.

Estudiando los principales métodos de documentación empleados en los yacimientos con arte rupestre, analizando sus principales ventajas e inconvenientes,

podremos tratar de identificar aquellos que pueden resultarnos más idóneos, teniendo en cuenta también nuestro objetivo final de investigación. Ya que no existe ningún tipo de consenso ni criterios comunes de actuación por parte de la comunidad científica, a la hora de realizar este tipo de trabajos.

2. EVOLUCIÓN METODOLÓGICA DE LA DOCUMENTACIÓN DEL ARTE RUPESTRE.

2.1. LOS DIBUJOS A MANO ALZADA O CROQUIS

Procedimiento históricamente empleado en la investigación del arte rupestre. Se trata posiblemente del método más rápido y que menos medios precisa. Utilizado especialmente para aquellas representaciones que se consideraban más frágiles, o que necesitaban una mayor protección debido a su delicado estado de conservación. A menudo con el apoyo de una cuadrícula para facilitar la situación de los motivos, poder escalarlos, y evitar en lo posible la subjetividad.

Algunos investigadores, como el abate Breuil, mejoraron la fidelidad utilizando una Cámara Lúcida, superponiendo ópticamente el original sobre una superficie para su transferencia directa.

Esta metodología no representa ninguna amenaza para la conservación del arte parietal, al ser un procedimiento no invasivo. Pero en cambio su principal desventaja es el alto grado de subjetividad. Ya que factores como la interpretación mental, la posición frente al motivo, la iluminación, la experiencia, el material, etc., afectan en gran medida a los resultados. Por lo que no se generan imágenes de segundo orden, o iguales a las originales. Sino que resultan imágenes de tercer orden o subjetivizadas. (Montero Ruiz *et al.* 1998).

Estas imperfecciones se han intentado solventar con expertos dibujantes, como Porcar, Benítez Mellado, etc., realizando trabajos dignos de exposición. Pero a pesar de la alta calidad de las copias y de los dibujantes, no se ha podido evitar el importantísimo problema de la subjetividad, la cual es una característica inseparable de todas las percepciones del ser humano.

Otro de los inconvenientes que presenta, es lo laborioso que resulta y el tiempo que ocupa, desde su elaboración in situ hasta el retoque en laboratorio. Debido a ello y a la ya nombrada caga de subjetividad hacen que no sea el sistema de documentación más adecuado.

A pesar de la creciente opinión de que las fotografías son más eficientes para la recopilación inicial de información, no podemos obviar la capacidad humana para percibir detalles, relaciones y escenas, que no es posible recabar rápidamente de otro modo. Por lo que este procedimiento debemos valorarlo como un primer paso informal de contacto con el yacimiento y de confección de fichas de registro.

2.2. LOS CALCOS DIRECTOS

Método de documentación muy común hasta principios del siglo XXI, pero planteando diversas cuestiones conceptuales, metodológicas y de utilidad. No existiendo un procedimiento estandarizado en la comunidad científica, se han empleado varias técnicas, siendo el copiado de los contornos con algún elemento traslúcido lo más común.

En un principio se empleaban pliegos de papel encerado con escasa transparencia, obteniendo unos resultados muy poco exactos, ya que el investigador muchas veces se inventaba las figuras. Siendo una técnica utilizada por investigadores como el abate Breuil. (Ripoll López 2006-2009).

Hasta los años cincuenta no comienza el uso de plásticos transparentes y de lápices grasos. Y ya en los años ochenta se comienza a utilizar pliegos de papel de celofán y rotuladores indelebles. Se podría decir, que se ha utilizado casi cualquier tipo de material que se tuviera más a mano, desde el papel de calco hasta hojas de libros arrancadas. (Rogerio Candellera 2007). A partir de los años ochenta fue surgiendo una seria preocupación por parte de los investigadores y de la administración, por la conservación del pigmento y del soporte.

Aunque es un procedimiento económico y accesible, el calco directo exige habilidad y tiempo, y las características de las figuras pueden ser poco perceptibles. La reproducción en el laboratorio puede distorsionar la realidad del motivo, generando interpretaciones subjetivas y errores. En los resultados obtenidos interviene más o menos la fortuna, la habilidad, y el tiempo y esfuerzo invertidos por el investigador, que prácticamente se convierte en un dibujante. (San Nicolás del Toro 2012).

El principal problema es el alto grado de afectación sobre los paneles, ya que existe un contacto directo sobre la superficie. Puede alterar muy negativamente a la conservación de las figuras, ya que suele ocasionar un daño mecánico sobre las mismas y sobre su soporte, produciéndose erosiones y desconchados. (Rogerio Candellera 2011). En cambio se trata de un procedimiento muy económico, utiliza unos materiales de fácil acceso, no requiere ni una alta formación ni unos equipos muy complejos, y puede aclarar dudas en cuanto a los trazos y superposiciones.

Presenta dos inconvenientes importantes como son, el alto grado de subjetividad en las copias realizadas, y el deterioro por contacto que se produce en las figuras al ser altamente invasivo. Su lentitud y laboriosidad en el yacimiento y el laboratorio

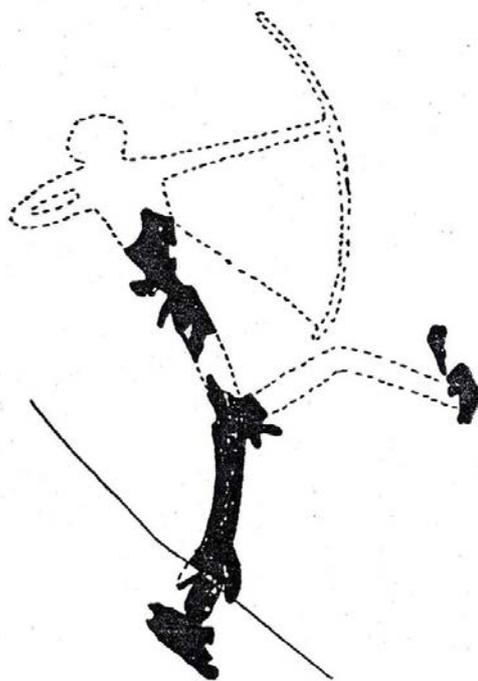


FIGURA 1. LA ARAÑA. CALCO DE UN «ARQUERO» SEGÚN BENÍTEZ MELLADO (HERNÁNDEZ PACHECO, 1924). RECONSTRUCCIÓN A PARTIR DE UNOS RESTOS BASTANTE EXIGUOS. (TOMADO DE MONEVA MONTERO 1993)

también son desafíos significativos. En general, se cuestiona su idoneidad para la conservación y el futuro de las representaciones rupestres.

2.3. LOS CALCOS POR FROTACIÓN

Procedimiento muy empleado principalmente en grabados, sobre todo en la primera mitad del siglo XX, aunque se sigue utilizando. También conocido como *frottage*, implica realizar frotados directos sobre la roca para obtener la copia de los motivos. Semejante al descrito en el apartado anterior, pero que se diferencia en la forma de obtener la reproducción del motivo.



FIGURA 2. MÉTODO DE FROTTAGE SOBRE PETROGLIFO EN LA ACTUALIDAD. MUNICIPIO DE GUASCA, CUNDINAMARCA (COLOMBIA). (TOMADO DE CAMARGO TUTA ET AL. 2015)

Metodología muy común en el mundo anglosajón y en el norte de Europa. Se realiza colocando un papel sobre el soporte, y frotando un carboncillo, lápiz, o papel carbón, se extraen las figuras a documentar. Algunas variaciones como la aplicación de tintas o de tiza que remarcan el perfilado de las figuras, producen un daño aún mayor, ya que además de humedecer los motivos y la roca, se aplican sustancias químicas y aumentamos el grado de inexactitud.

Esta metodología resulta altamente invasiva, produciendo daños irreparables y permanentes, añadiendo agentes biológicos que pueden alterar y destruir los motivos a registrar. Otro de los inconvenientes es que necesitamos realizar previamente una limpieza general del panel (Rogerio Candellera 2007), retirando la pátina que

recubre los motivos, eliminando mucha información relevante para otro tipo de estudios arqueológicos.

Una variante utilizada es la denominada Tactigrafía, que consiste en colocar una tela o papel humedecidos sobre el soporte y extender tinta con un rodillo, obteniendo una impresión en positivo. Aunque con ello reducimos la abrasión, puede generar tanto daños físicos como alteraciones químicas. (Rogerio Candellera 2011).

Este procedimiento resulta económico, al no requerir ningún tipo de formación ni material muy especializado, y no precisa mucho tiempo de realización. En cambio, presenta muchos factores que potencian la subjetividad. Resulta difícil valorar positivamente la exactitud de la copia recabada. Y por último su carácter invasivo puede causar daños mecánicos y químicos, comprometiendo la conservación de las representaciones rupestres.

2.4. REGISTRO A TRAVÉS DE MOLDES

Metodología utilizada desde los primeros estudios para el registro de grabados rupestres, debido a su simplicidad y capacidad de demostrar y autenticar el hallazgo. Humedeciendo unas hojas especiales con adherente tipo cola, se introducen en los huecos de los surcos, y al secarse se retiran obteniendo una especie de molde de estas representaciones. (Rogerio Candelera 2007). Otra variación es su realización con silicona dental.

Algunos autores lo consideran un método apropiado, indicando que con una correcta selección de materiales y un adecuado uso, no perjudica las superficies. El uso de arcilla humedecida ha sido propuesto como una variante menos perjudicial, aunque también presenta interacciones con las superficies rocosas.

Se ha propuesto el uso de siliconas, de látex y otro tipo de productos elaborados con caucho. Pero su aplicación provoca a largo plazo problemas químicos y biológicos, como la ionización y la ulterior aparición de microorganismos, o problemas de variaciones por gelificación por el agua añadida.

Aunque obtenemos un alto grado de exactitud en cierto tipo de grabados, siendo un método sencillo y relativamente rápido; resulta altamente invasivo, produciendo cambios químicos, biológicos y físicos en los grabados. Además, es costoso y no es adecuado para grabados finos o de poca profundidad. En general, se considera una metodología poco apropiada para documentar el arte rupestre.

2.5. LA FOTOGRAFÍA ANALÓGICA

Su aplicación en el estudio de yacimientos arqueológicos supuso un avance muy significativo. Permitiendo la reproducción tanto de los motivos artísticos como de los soportes sobre los que se asentaban. Herramienta imprescindible hoy en día en cualquier tipo de trabajo arqueológico, ya sea prehistórico, protohistórico, clásico, medieval o industrial.

La fotografía, siendo imprescindible en el registro del arte rupestre, está condicionada por diversos factores técnicos y limitaciones que determinan nuestra aproximación a la realidad, como el material que empleemos, la formación del fotógrafo, el equipo utilizado, las condiciones del yacimiento, visibilidad de las figuras, iluminación, sombras, color, y otros elementos. (San Nicolás del Toro 2012).

Con el tiempo los equipos fotográficos mejoraron, se volvieron más asequibles, ligeros y fáciles de transportar, convirtiendo a la fotografía en la metodología más fiable para la documentación. Sin embargo, la fotografía analógica presenta deficiencias notables que es importante señalar. El principal de estos problemas es la deformación geométrica que resulta al tomar las imágenes de una superficie rocosa. La mejor forma de paliarlo es realizarlo con trípode y de forma ortogonal a la superficie rocosa. Aunque debido a las frecuentes inclinaciones e irregularidades de la misma resulta bastante dificultoso.



FIGURA 3. EQUIPO DE FERNANDO GIL CARLES EN CUEVA GRANDE DEL PUNTAL (BARRANCO DE LA VALLTORTA, CASTELLÓN, OCTUBRE DE 1973). (TOMADO DE GIL ESTEBAN *ET AL.* 2005)

Estas distorsiones son el resultado de la proyección cónica de las imágenes, generando anamorfosis que afectan las relaciones geométricas del objeto real en comparación con la imagen final. Además, las aberraciones ópticas, como las cromáticas y esféricas, junto con las dificultades relacionadas con la iluminación, la posición de la cámara y la morfología del objeto a documentar, contribuyen a una inexactitud inherente en los resultados obtenidos mediante fotografía analógica. (Rogerio Candelera 2011).

La fotografía, que en un principio podemos considerar objetiva, no está exenta de subjetividad. El investigador no puede evitarlo, ya que debe interpretar visualmente las imágenes, identificando características, contornos y detalles. Factores ambientales, condiciones de iluminación, humedad, y la elección de equipos afectan los resultados finales, cuestionando la validez científica de la documentación basada en fotografía analógica. (Montero Ruiz *et al.* 1998; Rogerio Candelera 2007).

La fotografía analógica evita el contacto directo con los paneles y los motivos rupestres,

permite un registro más rápido y posibilita reflejar ambos en un solo documento. En cambio, surgen problemas como la degradación del color, dificultades con la iluminación, deformaciones y aberraciones antes expuestas, necesidad de equipos especializados, costosos y cierto nivel de pericia en su manejo y revelado.

Aunque la fotografía analógica ha sido un recurso valioso para la documentación de arte rupestre, sus limitaciones en términos de precisión y objetividad deben ser consideradas, en la interpretación y análisis de los resultados obtenidos mediante este método.

2.6. LA FOTOGRAFÍA DIGITAL

Las técnicas digitales propiciaron a partir de la década del 90 del siglo XX un gran salto cualitativo. Ampliando nuestras posibilidades de reproducción y combinación de archivos, así como su revisión y corrección. (Domingo Sanz *et al.* 2013). Facilita el intercambio de imágenes y la preservación de las manifestaciones artísticas para futuros estudios. (Mas Cornellá *et al.* 2013).

Obtenemos las imágenes con mayor rapidez al no precisar revelado, suponiendo también un ahorro económico. Podemos efectuar cuantas tomas queramos con

diversos dispositivos, seleccionar las más idóneas, realizar modificaciones, así como difundidas con facilidad. Registramos mucha información útil, sobre el lugar, modo y momento en que las realizamos.

En cuanto a las cámaras fotográficas, las réflex digitales son el formato más semejante a las antiguas cámaras analógicas. La imagen obtenida presenta una mayor relación señal/ruido, y pueden capturar en formatos de mejor calidad, como JPEG de baja compresión y formato en bruto o RAW, archivos que permiten un posterior procesamiento. El formato denominado JPEG, es el más extendido debido a su alto grado de compresión. El formato en bruto o RAW suele ser el más comúnmente utilizado por los profesionales. Posibilita alteraciones posteriores para arreglar posibles defectos o errores en la toma, sin reducir la resolución radiométrica de la cámara, permitiendo almacenar 10 bits/canal, incluso 14 o 16 bits/canal las de alta resolución; frente a los 8 bits/canal que proporciona el JPEG. Con programas de retoque fotográfico podemos modificar los archivos digitales, corrigiendo distorsiones geométricas y aberraciones, y alterando a posteriori la exposición, el equilibrio de blancos, la saturación, el tipo de color, contraste y resolución. Obteniendo una imagen de mayor calidad científica.

Con la fotografía digital podemos capturar imágenes de alta calidad y definición, con las llamadas fotografías gigapixel. Aglutinando en un solo archivo decenas, centenares o miles de imágenes. Obtenemos una imagen panorámica y continua de elevadísima resolución, de gran utilidad tanto para el estudio de los motivos, como para su difusión al público. Otra de las opciones es la fotografía esférica o inmersiva, muy semejante a la fotografía panorámica, pero pudiendo abarcar los 360° tanto en vertical como en horizontal. Incluso 360°-3D realizando dos panoramas, uno para cada ojo. Resultando un recurso divulgativo muy interesante o como parte de recorridos virtuales.

La iluminación es otro de los factores determinantes. No siempre es preferible la iluminación natural, debido a su variabilidad de intensidad, y puede producir destellos o sobras. Por lo que se ha de esperar el momento oportuno, o incluso en ocasiones es preferible trabajar de noche con iluminación artificial. Para ello y en interiores tenemos básicamente dos opciones principales, la luz LED y la luz flash. Con el primer tipo de iluminación (utilizado principalmente con las pinturas), es recomendable posicionar al menos dos focos de luz fría. Uno de los focos debemos colocarlo en posición frontal respecto al motivo a documentar, y el otro en una posición lateral de unos 45° para resaltar el volumen. En la iluminación con luces flash (imprescindibles para la fotografía de grabados finos), colocaremos los focos sobre trípodes y posicionados de forma rasante respecto a la pared (lo que facilita su visualización). (Gárate Maidagan 2018).

Uno de los retos más difíciles es realizar un registro correcto del color. Tradicionalmente se describían las tonalidades con terminologías subjetivas. La tecnología digital trajo consigo la posibilidad de restituir el color de una imagen, a través de la introducción de una carta de color en la escena capturada, y la posterior adecuación del archivo. La primera en generalizarse y que ha tenido un enorme éxito es la escala IFRAO. Hoy en día es conocida su falta de precisión, y existen otros procedimientos para realizar una adecuada calibración del color, como el uso

del espectroradiómetro o espectrocromatómetro, con un precio muy elevado, por lo que de uso escaso. En ambientes con un flujo de trabajo y una luz controlada, y la inclusión de una carta de color, se pueden establecer condiciones adecuadas para el correcto registro del color y la tonalidad. Posteriormente con programas de edición podremos obtener buenos resultados. Señalar que con este tipo de trabajos también se puede controlar la degradación o deterioro de las representaciones.

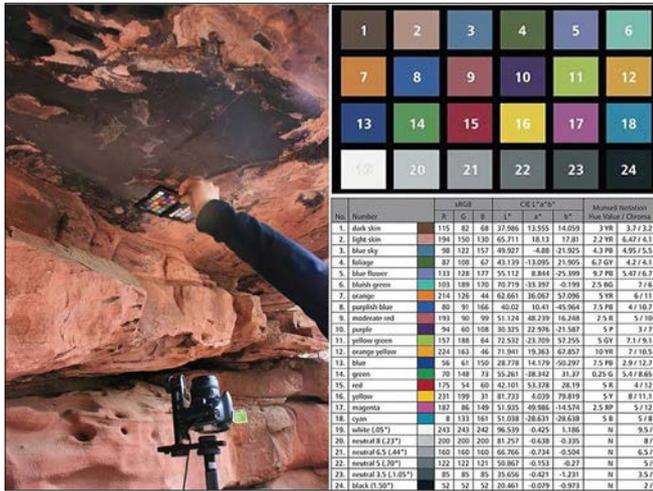


FIGURA 4. METODOLOGÍA EN LA CALIBRACIÓN DEL COLOR, MEDIANTE UNA CARTA ESTANDARIZADA EN EL PROCESO DE DOCUMENTACIÓN. (TOMADO DE ANGÁS PAJAS Y BEA MARTÍNEZ 2014)

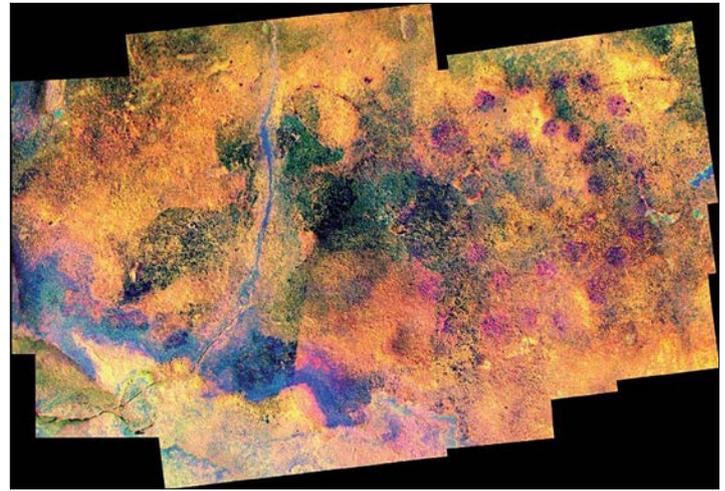


FIGURA 5. MOTIVOS ESQUEMÁTICOS EN MOSAICO FOTOGRÁFICO GIGAPIXEL Y TRATADA CON DSTRETCH. ABRIGO DE RIQUELME (JUMILLA, MURCIA), SEGÚN F. J. MARTÍNEZ COLLADO. (TOMADO DE SAN NICOLÁS DEL TORO 2012)

El análisis de la imagen digital, puede ayudarnos también con la visualización de marcas de realización tanto de grabados como de pinturas (marcas de útiles, trazos, surcos, direcciones, profundidad, etc.). Para la identificación y estudio de partes o totalidad de figuras, más allá del rango de frecuencia observable por el ojo humano, se ha generalizado el uso del plugin DStretch. (Harman 2005). Herramienta informática para el estudio específico de imágenes digitales fotográficas de arte rupestre, con el que se obtienen resultados sorprendentes. Aunque también se utiliza para diferentes análisis en otro tipo de trabajos, como por ejemplo el estudio de tumbas egipcias (Evans and Mourad 2018), o de cerámicas pintadas (Rodríguez González *et al.* 2019), etc.

Tratándose de una ampliación del software ImageJ (el cual por sí solo también decorrela imágenes), procesa de forma automática variables cromáticas que pudieran estar presentes en el archivo digital de estudio. DStretch nos facilita la detección e identificación de pigmentos y grabados cuando estos son muy tenues (Defrasne 2014; Gunn *et al.* 2014; Le Quellec *et al.* 2015), nos ayuda en la definición de la morfología de las figuras, permitiéndonos ampliar nuestro estudio sobre el análisis técnico y estilístico de los motivos. También resulta un elemento valioso para realizar un diagnóstico sobre el estado de conservación o degradación tanto del soporte como de las figuras objeto de estudio. (Martínez Collado *et al.* 2013). Señalar que existen otras alternativas *opensource* para ampliar ImageJ, como Fiji.

Con la fotografía digital podemos combinar en un mismo archivo variados documentos, permite una posterior revisión y corrección de errores o distorsiones, ocupa menos espacio físico, se almacenan los archivos de una forma más segura y sufren menos degradación. Hay una mayor rapidez en la obtención de la imagen al no precisar revelado, podemos repetir tomas o modificar aspectos, seleccionar resoluciones y formatos, son más fáciles de compartir, y se registra mucha más información que puede resultarnos útil con posterioridad. Existen dispositivos muy variados y ocupan poco espacio.

Por otro lado, los equipos suelen resultar caros y los archivos obtenidos ocupan mucha memoria interna y externa. Para la realización de trabajos científicos se precisa formación, o la participación de expertos. Indicar finalmente que a pesar de la mejora de la calidad, seguimos obteniendo las aberraciones y distorsiones antes descritas, ya que seguimos proyectando una imagen tridimensional sobre un plano bidimensional, por lo que no podemos realizar una correcta reproducción de una superficie volumétrica compleja.

2.7. LA FOTOGRAMETRÍA

Este método se describe como un procedimiento para determinar las propiedades geométricas, forma, características, así como la situación espacial, de los objetos, bienes patrimoniales, yacimientos, etc., a través de la toma de una serie de fotografías. Se trata pues de realizar una medición a través de fotos. Si tomamos una única fotografía de un objeto obtenemos solamente una información bidimensional, y con los errores y distorsiones antes comentados. Por otro lado si captamos dos o más fotografías desde diferentes posiciones, logramos lo que se denomina «solape», y con él conseguimos una información tridimensional con la que podemos crear un modelado en tres dimensiones (3D).

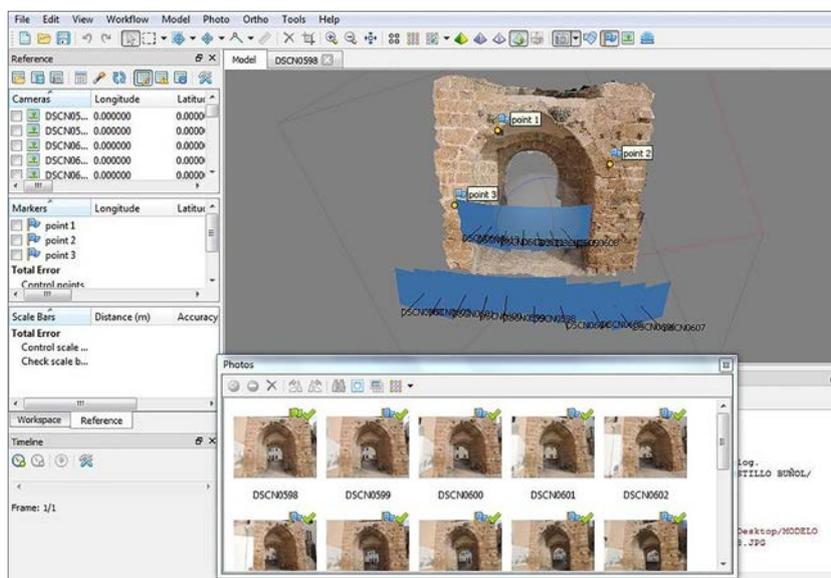


FIGURA 6. MÚLTIPLE TOMA FOTOGRÁFICA DE PUERTA NORTE CASTILLO DE BUÑOL. RECREACIÓN EN 3D CON PHOTOSCAN. (IMAGEN DEL AUTOR)

Literalmente el concepto significa realizar medidas a través de las fotos. Y etimológicamente hablando la palabra fotogrametría proviene de tres palabras griegas, que se traducen como «la medida de lo escrito con luz». (Vozmediano Montoya 2006). Para entender su funcionamiento, vemos como el software fotogramétrico que empleemos detectará automáticamente puntos equiparables, que son los puntos de unión entre las distintas fotografías que hemos tomado (también denominados algoritmos SFM, Structure From Motion). (Pereira Uzal 2013). Para que cada uno de ellos pueda ser incluido en el futuro modelo en 3D, debe aparecer al menos en dos fotografías de forma reconocible por el software. Cuantas más imágenes capturemos, más detallada será la geometría desarrollada, por ello hay que intensificar la toma de fotos de aquello que más nos interese, además de planificar bien la tarea en puntos muertos (aquellos situados en zonas de difícil visibilidad, zonas irregulares, cóncavas, con sombras, etc.). (Gárate Maidagan 2018).

Cuando hablamos de fotogrametría, distinguimos entre la terrestre o de objeto cercano (con tomas convergentes), y la aérea u objeto lejano (con enfoques ortogonales al infinito). El primer tipo o *Close Range Photogrammetry* (más conocida comúnmente), viene a ser la usada en la documentación de yacimientos con arte rupestre. Dependiendo del tipo de estación fotogramétrica que empleemos podemos también distinguir entre la fotogrametría analógica, la analítica y la digital (la más utilizada hoy en día).

Los primeros ejemplos de este procedimiento, así como el surgimiento del término proceden de la segunda mitad del siglo XIX, para la confección de planos a través de fotos. Con lo que se denominó la *Fotogrametría Gráfica*, y con quien es considerado el padre de la fotogrametría Aimé Laussedat. (Cheli 2012). Pero no fue hasta principios del siglo XX, con los avances en la georreferenciación, cuando se consiguieron los primeros resultados con cierta precisión.

Las aplicaciones son muchas y variadas, y no solamente para estudios topográficos, también en varias disciplinas como la cartografía digital, en orto-fotografía, agronomía, medio ambiente, etc. Otro de sus principales usos es el estudio y documentación de los bienes patrimoniales, ya sea en arquitectura, arqueología, y por supuesto la documentación y estudio del arte rupestre, ya se trate de pinturas o de grabados de cualquier tipo (Vavulin *et al.* 2019).

2.7.1. La fotogrametría analógica

Sus primeros pasos y desarrollo surgen a mediados del siglo XIX, y a finales del mismo podemos asistir a la documentación de yacimientos arqueológicos tan importantes como Persépolis (Irán). (Martínez Sánchez y Flores García 2020). Pero su aplicación en el estudio del arte rupestre es bastante reciente. Hasta la segunda mitad del siglo veinte no contamos con los primeros trabajos en este sentido.

Si obtenemos una sola imagen de nuestro objetivo a documentar y además somos conocedores de su centro de proyección, podremos entonces identificar todos aquellos puntos relacionados de la imagen. Si además sabemos el punto exacto referenciado de la cámara en el momento de la toma, podremos situar cada punto

de la imagen captada, y quedará exactamente georreferenciada. (Rogerio Candelera 2011). En el caso de disponer de los datos aportados por varias imágenes, seremos capaces de establecer la posición exacta de cada punto respecto a otro.

Pero este método de documentación precisa un alto grado de especialización, y el coste de los equipos y material necesario es elevado. En su proceso se realiza la documentación del soporte o relieve, y con posterioridad se sitúan manualmente las figuras sobre el modelo obtenido. Todo ello nos puede llevar a imperfecciones, y dejamos abierta la posibilidad de un alto grado de subjetividad en nuestro resultado final. Continuamos pues con los mismos problemas que hemos visto en otras metodologías. Son necesarias también bastantes horas de trabajo, tanto de campo como de laboratorio para obtener los resultados deseados.

Como ventaja principal señalar que no implica un contacto directo ni con los motivos a documentar ni con el soporte, lo que supone un gran avance con las metodologías precedentes, ya que no produce alteraciones ni deterioro en el yacimiento. Y en segundo lugar se obtiene un modelo bastante fiable (aunque no exacto), y en el caso de la documentación del relieve muy aceptable.

2.7.2. La fotogrametría digital

Hay un paso previo entre la fotogrametría analógica y la fotogrametría digital propiamente dicha, la denominada fotogrametría analítica en la segunda mitad del siglo XX. La cual introduce el cálculo electrónico de las primeras computadoras en el proceso. (Lerma García 2002).

La fotogrametría digital la podemos definir, como el uso de la tecnología para la obtención de información geométrica, radiométrica y semántica de objetos tridimensionales, a partir de imágenes digitales en dos dimensiones de los mismos. La fotogrametría digital de objeto cercano es la más popular de las utilizadas hoy en día en el mundo de la arqueología. Debido a muchos motivos, pero principalmente por su accesibilidad y por su buena relación calidad/precio.

Esta metodología se basa en la utilización de fotografías digitales, realizadas con cualquier tipo de cámara digital o dispositivo. Combinadas con software especializado para deducir la posición espacial de puntos homólogos, que son identificados por algoritmos de procesamiento del citado software entre el grupo de imágenes aportadas. Para conseguir esta relación, se necesita que cada punto este integrado en varias imágenes diferentes, y que la inclinación de nuestro plano focal respecto del objeto, no sea superior a 45 grados. Estos puntos homólogos son por tanto detectados y situados en un eje de coordenadas x, y, z. Los valores de las mediciones obtenidas dependerán de los valores de las coordenadas antes indicadas, o de la existencia de puntos de control medidos en una estación de medición total, o manualmente.

El nivel de precisión obtenido en las mediciones, nos indicará la posición geométrica del objeto a documentar. Pero hemos de tener en cuenta las inevitables imperfecciones de una medición o registro realizado manualmente, y no apoyado por otros métodos de registro como los datos aportados por un escaneado láser. (Ruiz López 2019).

Las imágenes digitales obtenidas en el registro, aportan archivos mucho más completos y con más datos que, nos permiten a través de software la creación de modelos en tres dimensiones, ortofotos, cartografía digital, etc. Estas orto-imágenes de alta resolución, permiten a los investigadores analizar desde diferentes perspectivas las superficies, e identificar una diversidad de figuras difíciles de localizar si son examinadas con otras metodologías más tradicionales. (Lerma García *et al.* 2006).

Uno de los principales motivos de la enorme difusión de esta metodología de documentación, es que se trata de un procedimiento relativamente sencillo, teniendo en cuenta una serie de conocimientos y formación mínima. La mayor parte del software actual, se basa en las imágenes tomadas en movimiento de la cámara alrededor del objeto que queremos documentar.

Si el objeto de nuestro estudio es de bulto redondo, las tomas fotográficas se realizarán circulando a su alrededor, pero sí en cambio se trata de una superficie más o menos plana (como suele ocurrir con los paneles de arte rupestre), nuestra toma de fotografías se realizará de forma paralela al mismo, siempre teniendo en cuenta el solape (también llamado *overlap*), y tratando de cubrir todas aquellas imperfecciones o ángulos del soporte.

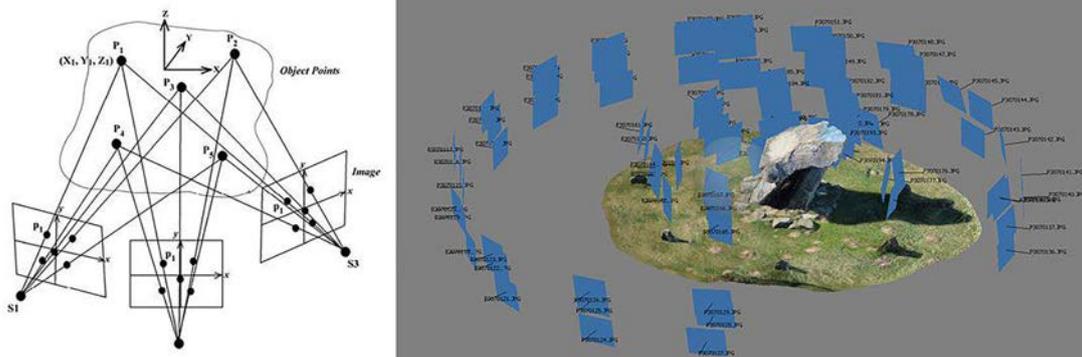


FIGURA 7. MÚLTIPLE TOMA FOTOGRÁFICA PARA FOTOGRAMETRÍA DE UN DOLMEN. (SERRANO BASTERRA Y DÍAZ SAN MILLÁN 2018)

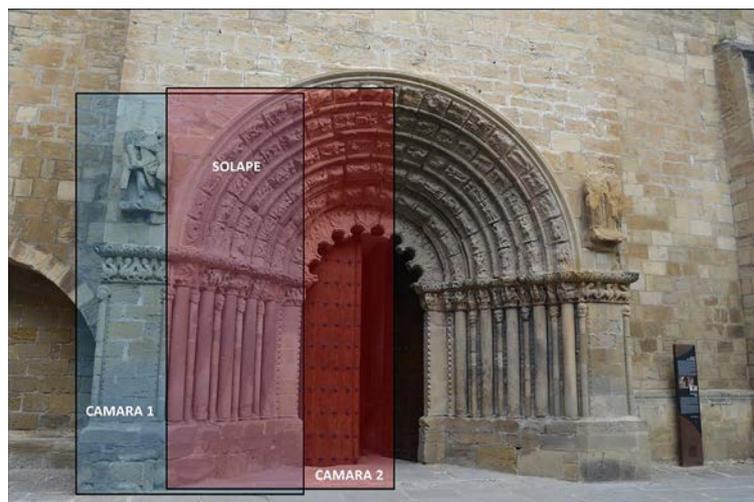


FIGURA 8. SOLAPE (OVERLAP), EN TOMA FOTOGRÁFICA PARA FOTOGRAMETRÍA DE PORTADA DE UNA IGLESIA. (SERRANO BASTERRA Y DÍAZ SAN MILLÁN 2018)

Un procedimiento muy común para este desplazamiento paralelo y horizontal, es la utilización de un *slider* o carro sobre el que se sitúa un trípode, y encima colocamos la cámara fotográfica. Esto nos asegura unos movimientos laterales de la cámara precisos, y si a ello acompañamos una medición de los puntos donde realizar las tomas, nos aseguramos de que el porcentaje de solape sea el suficiente para la posterior recreación del modelo en 3D.

Otro de los aspectos fundamentales en la fotogrametría de objeto cercano es la iluminación. Como cualquier técnica basada en la fotografía digital, dependemos totalmente de la cantidad y la calidad de la iluminación recibida por el objeto a documentar, ya que este refleja el tipo de radiación que recibe. Por tanto es fundamental, para una toma de datos de calidad, que el objeto este bien iluminado con luz natural o artificial, y esta sea estable y coherente.

La mejora de los equipos y de los procesos informáticos, nos ha permitido realizar estudios y modelos fotogramétricos de los yacimientos casi desde cualquier ordenador doméstico.

Las innumerables ventajas que ha aportado la fotogrametría, hace que sea ampliamente utilizada por la comunidad científica, para la documentación, estudio y difusión del patrimonio. Los beneficios en concreto en el arte rupestre son múltiples, y superan en mucho a algunos inconvenientes que presenta. Por lo que ha llegado prácticamente a imponerse en la mayoría de los estudios en este campo de investigación.

La fotogrametría se presenta como una metodología y un camino óptimo para trabajar con yacimientos arqueológicos. La era digital en este campo nos ha permitido no solamente la captura automática de puntos, líneas, y la consecuente creación de ortoimágenes, modelos visuales, etc., también ha posibilitado la identificación de nuevas superficies y figuras. (Lerma García 2001).

Los estudios fotogramétricos basados en la adquisición de imágenes digitales, pueden ser considerados como una seria variante a otras alternativas mucho más caras como la utilización del láser escáner terrestre. Y pueden ser satisfactoriamente aplicados para el registro de yacimientos arqueológicos y monumentos. Por otro lado, también pueden ser utilizados para complementar y mejorar proyectos en los que el escáner láser es la opción elegida en primer lugar. (Cabrelles López *et al.* 2010).

Quizá la ventaja más importante es la no manipulación ni contacto directo con el soporte ni los motivos a documentar, por lo que no se produce ningún tipo alteración. Por otro lado la documentación y el modelo creado se realizan directamente sobre el original, no sobre una representación del mismo, lo que evita distorsiones y disminuye la subjetividad. Se realiza tanto un modelado en tres dimensiones de las figuras como del soporte que los sustenta. Conseguimos también una georreferenciación exacta tanto del yacimiento como de los motivos. Obtenemos finalmente un modelo en tres dimensiones perfecto, de alta resolución e imperecedero del yacimiento, lo que nos permitirá su estudio en el futuro aunque el yacimiento original se deteriore o desaparezca por diversos motivos. Podemos recabar un amplio registro de datos, tanto a nivel cuantitativo como cualitativo, con los cuales podemos a posteriori acceder a escenas no visibles por el ojo humano del espectro electromagnético. Amplía considerablemente nuestro rango de obtención

de datos en superficies y formas irregulares, así como permite acceder a lugares hasta ahora inaccesibles. También conseguimos un ahorro significativo en el tiempo de trabajo de campo, y una gran rapidez en la documentación. Todo ello se traduce también en la mayor parte de las ocasiones en un ahorro económico, aun teniendo en cuenta el alto precio de los equipos y tecnología.

Otra de las principales ventajas es la eliminación casi absoluta de la subjetividad en la documentación, déficit casi imposible de subsanar con el resto de metodologías anteriormente vistas. Y finalmente señalar que obtenemos modelos digitales e informatizados, lo que nos permite un mejor procesado y estudio de las imágenes, así como una mejor difusión de la información a la comunidad científica y al público en general.

Apuntar algunos de los inconvenientes que presenta, que aunque no son muchos sí significativos. Para el correcto manejo tanto de los equipos de campo como de laboratorio, es necesaria una formación específica y una amplia experiencia, por lo que generalmente estos trabajos son realizados por especialistas. Es destacable también, el alto costo económico tanto de estos equipos, como de los de procesado posterior en laboratorio. Por último significar el ahorro de tiempo en el registro de campo; pero en cambio el trabajo posterior de análisis, modelado, renderizado, e interpretación y estudio de la información obtenida, se amplía con respecto a otras metodologías de documentación del arte rupestre.

2.7.3. Escáner 3D

Actualmente en los proyectos de documentación del patrimonio cultural se emplean distintas metodologías de adquisición de datos espaciales, como la topografía convencional, la fotogrametría (con sus variantes y variados equipos), y las técnicas de láser terrestre LE3D (o TLS *terrestrial laser scanner*). Es muy importante la elección de la tecnología apropiada (sensores, hardware, software), los procedimientos adecuados, el flujo de trabajo correcto, la óptima calidad métrica, etc. Por lo que la elección de la metodología resulta una cuestión de difícil resolución. (Cardenal Escarcena *et al.* 2010).

Muchos autores sostienen que la fotogrametría es la mejor opción, aunque presenta el inconveniente del post-procesado. Ya que las imágenes que recaba proporcionan una información muy completa y valiosa, con gran nivel de detalle, costes moderados, portabilidad del equipo, fácil manejo, rápido registro, etc. Pero no podemos olvidar el enorme potencial de las técnicas láser.

La principal ventaja de los sensores activos, como el caso del LE3D, es su gran capacidad de adquisición de datos espaciales y de información radiométrica de los puntos medidos (RGB e intensidad). Con estos datos de cientos de miles o millones de puntos (en pocas horas de trabajo), podemos generar modelos de gran precisión y fiabilidad. Pero su inconveniente está precisamente en que toda esta enorme cantidad de información hay que almacenarla y precisa un posterior procesado. (Cardenal Escarcena *et al.* 2010).

Una de las particularidades de la toma de datos topográficos, ya sea mediante una estación total o laser escáner, que la diferencian de la fotogrametría, es que mientras que en la primera opción trabajamos sobre datos e información capturados directamente sobre la superficie de un objeto, la fotogrametría procesa sus trabajos y modelos a base de las tomas o representaciones del mismo. (Mañana Borrazás *et al.* 2009).

Los instrumentos de captación de datos basados en el láser 3D deberían ser la metodología adecuada y preferiblemente recomendada, para capturar nubes de puntos en escenarios donde nos encontramos con formas complejas (como en el interior de cuevas) (González-Aguilera *et al.* 2009), de gran extensión, o en aquellas situaciones en las que las condiciones de iluminación son mínimas o incluso inexistentes. (Bayarri Cayón y Castillo López 2009).

En los últimos tiempos, para la documentación tanto de abrigos como cuevas donde encontramos arte rupestre, se ha venido imponiendo la utilización de la metodología combinada de fotogrametría y escáner laser 3D. La integración del láser escáner y la fotogrametría (métodos remotos de recoger datos espaciales y geométricos en 3D) ha de ser utilizada en el estudio de yacimientos. El láser escáner proporciona una nube densa de puntos, que realiza con precisión una réplica de la superficie del objeto y su geometría. Si integramos una cámara digital en la unidad de escaneo, obtenemos imágenes fotográficas que combinadas con la nube de puntos, da la opción de producir modelos fotorrealísticos en 3D interactivos. (Bates *et al.* 2010).

La fotogrametría terrestre con la obtención de imágenes digitales, y el escaneado láser son dos de las soluciones comúnmente más requeridas a la hora de documentar el patrimonio cultural, particularmente el arquitectónico y el arqueológico. Y tenemos tres opciones a la hora de plantear estos trabajos complejos. En primer lugar tener como base las imágenes fotogramétricas y como complemento el escaneado láser para zonas concretas; en segundo lugar realizarlo al revés; y por último una integración del láser escáner y las imágenes digitales. (Cabrelles López y Lerma García 2015).

El escáner láser terrestre es una herramienta que permite la recogida masiva de datos con una alta calidad de resultados, en términos de precisión métrica y texturas. Su aplicación en el arte rupestre es muy adecuada por la gran cantidad de información recabada en un corto espacio de tiempo. La alta resolución de estos instrumentos nos permite una gran precisión submilimétrica en texturas y detalles muy pequeños. (Lagüela López *et al.* 2011).

Conseguir la reproducción tridimensional del arte rupestre ha supuesto para esta disciplina, uno de los logros más importantes adquiridos durante este siglo. Para ello se han utilizado distintos procedimientos, como son la fotogrametría de objeto cercano, el escáner láser, y el escáner de luz estructurada. Todos ellos han logrado resultados semejantes, en numerosos estudios de documentación de estaciones con arte rupestre. (Ruiz López 2019).

El escaneado de un yacimiento que contenga arte rupestre, se puede realizar actualmente con un escáner láser, con un LIDAR aéreo-trasportado, o con fotogrametría (también utilizando drones, ya sean de ala fija o rotatoria). Con



FIGURA 9. ESCÁNER 3D DE LUZ BLANCA ESTRUCTURADA, ESCÁNER LÁSER 3D Y ESTACIÓN TOTAL EN EL PROCESO DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL ABRIGO DE LA CERRADA DEL TÍO JORGE O TÍO JOSÉ. ANGÁS. (TOMADO DE ANGÁS PAJAS Y BEA MARTÍNEZ 2015)



FIGURA 10. TRABAJO DE DOCUMENTACIÓN EN FUENTE DE LOS MOLINOS CON ESCÁNER LÁSER 3D. PROYECTO VELAD. VÉLEZ BLANCO (ALMERÍA). AÑO 2015. (IMAGEN DEL AUTOR)

todos estos sistemas de registro se obtienen nubes de puntos y mallas, los cuales pueden ser referenciados a partir de puntos comunes o de coordenadas compartidas. De estas densas nubes de puntos se derivan mallas poligonales, que nos reproducen con exactitud los aspectos físicos de yacimiento documentado. El escaneado en 3D recaba gran cantidad de datos sobre la forma y dimensiones de un objeto, plano, yacimiento, etc.

El escáner láser fue el más utilizado en los inicios de la era digital en cualquiera de sus variantes, ya fueran los de diferencia de fase, de tiempo de vuelo o de triangulación. Es un dispositivo que recaba masivamente datos, mediante la medición de las distancias y ángulos por medio de un rayo láser, el cual se emite en diferentes longitudes de onda.

La aplicación de la tecnología del escáner laser 3D, en un principio va dirigida a registrar y analizar cualquier tipo de objeto o estructura, para múltiples campos y disciplinas, ya sean estudios patrimoniales o no. Su propio carácter interdisciplinar, la enlazan con otro tipo de tecnologías pioneras de investigación con las cuales se enriquece. Como estudios medioambientales, documentación del paisaje mediante SIG, estudios hidráulicos, análisis espectrales de arte rupestre, etc. (Angás Pajas *et al.* 2013).

El escáner basado en pulsos láser, también denominado escáner de tiempo de vuelo (Figura 10), mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del rebote sobre el objeto o superficie a documentar. O por medio de los desfases entre las longitudes de onda emitidas y las recepcionadas tras el reflejo.

Es decir, nos mide la intensidad de la señal y la distancia, estableciendo su posición espacial (x, y, z) de los puntos a lo largo del objeto o superficie. Obtenemos por tanto una nube de puntos densa, y la resolución obtenida dependerá de las características de nuestro equipo, y de la configuración y calibrado que hayamos realizado. No

dependen sus resultados de la existencia de luz, ni natural ni artificial, y nos permite una precisión en la toma de datos de todo tipo de superficies, con una aproximación submilimétrica.

En el escáner láser, un haz de luz láser es emitido hasta cada uno de los puntos de la superficie a documentar. El escáner dispone de varios espejos giratorios que van emitiendo y van haciendo un barrido por toda la superficie. Su cabeza rotatoria y los espejos internos que posee, nos permiten obtener datos en formato de una escena panorámica, abarcando un total de 360°. (Corchón Rodríguez *et al.* 2012).

El escaneo láser nos proporciona una nube de puntos densa que representa una réplica de la geometría de la superficie del objeto o del yacimiento. El sistema de posicionamiento global geográfico nos permite obtener distancias y coordenadas, así que el yacimiento y el resto de datos quedan georreferenciados. (Bates *et al.* 2010). Este posicionamiento es proporcionado por el GPS del propio escáner y de las mediciones realizadas con la estación total de dianas repartidas a su alrededor. Una alternativa es el uso de grupos de esferas de referencia, los cuales ayudan a solapar los diferentes tramos de escaneado.

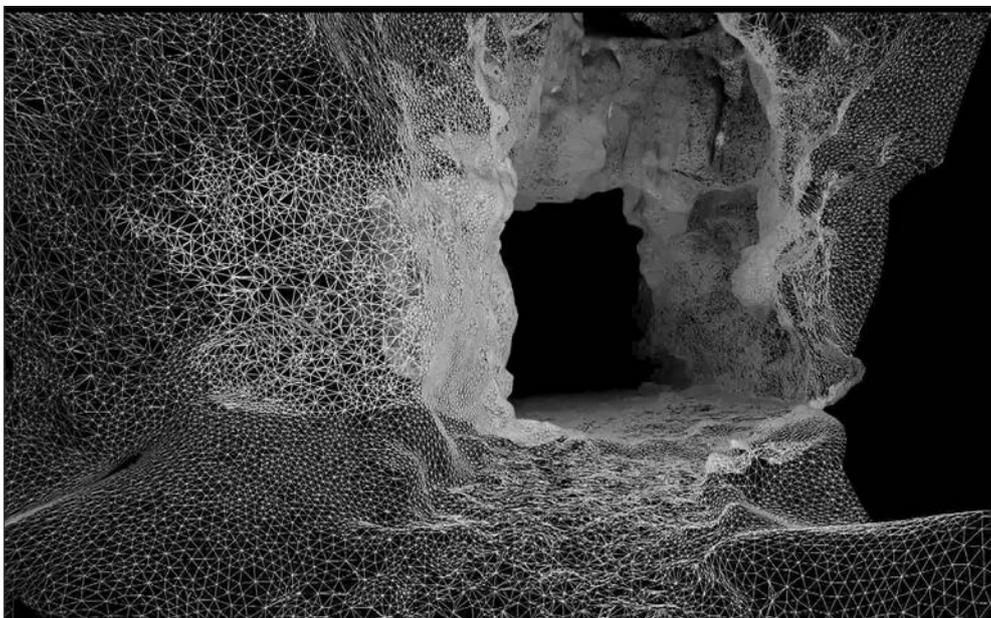


FIGURA 11. CUEVA DE EL RENO (GUADALAJARA), NUBE DE PUNTOS OBTENIDA CON ESCÁNER 3D (TOMADO DE BAYARRI CAYÓN V. GIM-GEOMATICS, PROYECTO SIGAREP I)

Por su parte el *escáner de luz estructurada* genera y emite un patrón de luz que se proyecta sobre el yacimiento o el objeto a documentar. Existiendo variados tipos y características, el funcionamiento es similar. Este patrón emitido, al ser captado por el sensor óptico realiza un registro de la geometría y el color. La luz que emite este tipo de escáner puede ser blanca (como el de la imagen 12), o infrarroja. Actualmente se opta por esta segunda opción, ya que de este modo la luz no interfiere con la iluminación natural o artificial en la documentación, ni altera los colores originales del motivo.

De modo diferente a otro tipo de escáneres basados en la medición del tiempo de vuelo o la diferencia de fase, a través de la proyección de una luz láser sobre el

objeto, este tipo de escáneres de mano proyectan un patrón de luz estructurada, bidimensional, de rayas o rejilla, el cual nos permite obtener una nube de puntos por medio de la triangulación. Un proyector emite la luz, y una cámara (generalmente son al menos dos receptores), obtienen las imágenes de dicho objeto. (Rodríguez López 2014). Del mismo modo que los escáneres láser, también captura el color RGB de la totalidad de los puntos escaneados, ya que va combinado con una cámara digital de baja resolución. (Ruiz López 2019).



FIGURA 12. DIGITALIZACIÓN MEDIANTE ESCÁNER 3D DE LUZ BLANCA ESTRUCTURADA. ABRIGO DE CHIMIACHAS (PARQUE CULTURAL DEL RÍO VERO. HUESCA). (TOMADO DE ANGÁS PAJAS Y BEA MARTÍNEZ 2014)

Este tipo de escáner es muy usado para la documentación de superficies grabadas, ya que puede alcanzar resoluciones más altas que el escáner láser, con una precisión de 0,05 mm, y con un uso más sencillo. Los equipos de este tipo más utilizados actualmente son los denominados *handheld*, que al ser de uso manual requieren un desplazamiento por toda la superficie a documentar. Mediante esta tecnología, los escáneres 3D pueden generar imágenes tridimensionales de geometrías y entornos muy complejos, y realizar toda esta tarea en tan solo unos minutos, y con un alto nivel de detalle. Los datos geométricos de la superficie recabados por parte del escáner son acumulados en una nube de puntos. Con esta nube de puntos se dibuja la silueta y forma de la superficie u objeto, en un proceso denominado reconstrucción.

La utilización del láser escáner en 3D nos aporta un doble valor metodológico. Por un lado el ya mencionado modelo milimétrico del original, tanto de la propia estación como del entorno, registrando las figuras y sus escenas. Lo que también nos permite llevar un control de la estructura y morfología del yacimiento, con el objeto de poder evaluar cualquier alteración o patología de la roca. Y por otro lado, nos proporciona una herramienta de estudio, análisis y transformación de los datos digitales obtenidos. Lo que nos puede llevar a realizar nuevos descubrimientos de figuras no observables por el ojo humano.

La minuciosidad con que los datos son recogidos, y la posibilidad que nos ofrece esta tecnología de georreferenciar todos los puntos topográficamente, nos daría la posibilidad de crear por primera vez un verdadero archivo documental geométrico. Nos ofrece también un modelado reproducible cualitativa y cuantitativamente a cualquier escala. Pudiendo controlar cualquier tipo alteración y su constante estado de conservación. (Sebastián López *et al.* 2010).

Para una correcta documentación se debe seleccionar con precisión el emplazamiento del escáner, y realizar los trabajos que sean necesarios para cubrir todo el espacio e irregularidades de la superficie (importante aumentar la resolución en aquellos lugares que tengan mayor interés). A continuación, se procede al procesado del modelo, con la alineación de los distintos sistemas de coordenadas en un único sistema de referencia común. Seguidamente eliminaremos aquellos datos escaneados que no resulta interesante reflejar, las redundancias y el ruido. Para finalizar este paso generaremos la malla de la nube de puntos obtenida en la documentación, eliminando zonas oscuras no deseadas (Lerma García *et al.* 2010). El siguiente proceso sería el de texturización creando un modelo en 3D, el cual resulta una réplica bastante exacta del original (Skoog *et al.* 2016). Indicar que con esta tecnología también somos capaces de revelar pinturas ocultas tras ciertos materiales (Jalandoni *et al.* 2021), o incluso aclarar superposiciones.

Las ventajas e inconvenientes que presenta esta metodología son similares a las de la fotogrametría. No hay un contacto directo con la superficie, lo que como ya hemos indicado supone un seguro para la buena conservación del yacimiento para el futuro. Trabajamos directamente con el yacimiento y no sobre una representación, por lo que disminuimos la posible subjetividad. Obtenemos un modelo en tres dimensiones exacto del original, imperecedero, y con una georreferenciación también exacta. Eliminamos totalmente la subjetividad e imperfección humanas en la documentación. Y por último creamos un modelo digital sencillo de manejar y fácilmente divulgable a la comunidad científica y al público en general.

Los equipos, tanto de campo como informáticos, tienen un alto coste económico. Existen a menudo dificultades de transporte, ya que es muy frecuente que los yacimientos estén en lugares de difícil acceso, y los equipos son muy pesados. Se precisa bastante tiempo de trabajo en laboratorio para el procesado de las imágenes y la creación de los modelos informáticos. También resulta imprescindible una formación específica para el uso de estos equipos y software informático.

Los inconvenientes de alto coste de los equipos, y el carácter desordenado de la enorme cantidad de datos recabados, y sobre todo la imposibilidad de proporcionar datos que incorporen, imágenes digitales en color con texturas reales y de alta resolución, ha hecho que muchos investigadores consideren que lo adecuado es su integración con técnicas geomáticas de fotogrametría de rango cercano, para poder obtener una documentación y reconstrucción tridimensional integrales. (Corchón Rodríguez *et al.* 2009).

2.8. EL CALCO DIGITAL

La era digital ha puesto en manos de disciplinas como la arqueología una enorme cantidad y variedad de equipos, programas, técnicas de captura, retoque, alteración, tratamiento, rectificación métrica y gráfica tanto de imágenes en 2D, con software como Photoshop, ImageJ, etc., como restitución en 3D de alta resolución, con la fotogrametría digital y el escáner 3D. Toda esta variedad de opciones nos permiten realizar una documentación muy completa de los enclaves con arte rupestre (tanto de las figuras como sus soportes), con mucha exactitud y reduciendo la subjetividad.

La restitución gráfica es un procedimiento indispensable para poder conseguir dos objetivos principales: interpretar las graffias y facilitar la observación a otros investigadores. Este proceso tradicionalmente se ha realizado de forma manual, con los calcos analíticos y los descriptivos. Con la era digital se han introducido criterios objetivos con algoritmos para la selección de tonalidades, consiguiendo mejores resultados homogéneos y fidedignos. (Gárate Maidagan 2018).

Resulta necesario realizar un estudio técnico y preciso, que pueda facilitarnos la identificación de las figuras. Sobre todo, cuando su estado de conservación no es óptimo, o tenemos gran número de superposiciones que nos dificultan su individualización y estudio. Para ello una buena herramienta de trabajo son los calcos electrónicos, que son documentos descriptivos de estudio a escala, que nos facilitan la visualización e interpretación del arte rupestre. Así como su divulgación y realización de estudios de degradación y conservación de las estaciones. (Domingo Sanz *et al.* 2013).

Debemos entender el calco electrónico como una herramienta que se pone a disposición del investigador, para poder analizar y estudiar el arte rupestre de una forma más fiable y objetivable. Así como poder captar y procesar información que resulta difícil e incluso a veces imposible de captar por el ojo humano.

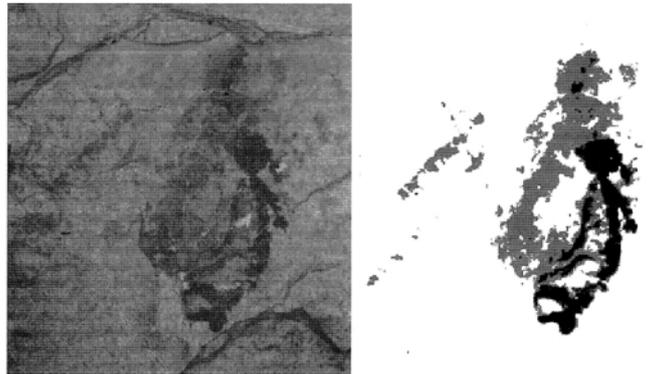


FIGURA 13. FOTOGRAFÍA Y CALCO ELECTRÓNICO, FIGURA 32 (ABRIGO IV). CINGLE DE LA GASULLA. (TOMADO DE MONTERO RUIZ *ET AL.* 1998)

Desde los inicios de la era digital se fueron utilizando técnicas de retoque fotográfico para poder mejorar la visibilidad de los motivos de arte rupestre, tratando de aislarlos respecto al soporte que los sustenta, mediante procedimientos de selección de áreas de color. Suponiendo una mejora respecto a las técnicas

anteriores, y basándose en la metodología de elaboración de calcos a partir de fotografías impresas o diapositivas.

La imagen digital se encuentra compuesta por matrices numéricas, en las cuales quedan establecidas las diferentes variables de color (como el tono, la saturación, y el brillo). La coordinación de estas variables con millones de posibilidades, nos permite realizar combinaciones y selecciones de modelos para poder observar las imágenes de formas muy diferentes. El procedimiento consiste en ir descomponiendo la imagen y organizando los datos, para ir seleccionando la información relevante (los pigmentos que nos interesan), a través de criterios matemáticos. (Montero Ruiz *et al.* 1998).

Es importante señalar que no se realiza un falseamiento de la imagen real, solamente se realiza una manipulación de los píxeles existentes en el archivo, para extraer las posibles variables y modelos que nos sean de utilidad, pero sin modificar la realidad. Esto nos permite obtener la información importante sobre las figuras, sobre los pigmentos que nos interesa seleccionar para su discriminación individual. Todo ello nos dará la opción de poder estudiar, analizar y plasmar cada figura de manera particular. Siendo de gran utilidad en aquellos yacimientos en los que las imágenes se encuentran muy degradadas, son muy difíciles de advertir, o existen superposiciones.

El punto de partida en la documentación de una estación con arte rupestre debe ser el de poder identificar individualmente cada uno de los motivos del panel. Para ello la documentación con imágenes digitales en 2D de alta resolución para su posterior tratamiento con software, nos permite aislar y acentuar diferencias de cada figura para la posterior elaboración de calcos digitales. (Domingo Sanz *et al.* 2013).

La percepción visual del ser humano de las imágenes, pese a disponer de un sensor de alta capacidad, está condicionada a efectos visuales engañosos, diferentes en cada persona. El ojo realiza una conversión cromática, y aquello que percibimos con un color en un primer instante, va alterándose pasado un tiempo.

Es decir, nuestra visión va realizando correcciones automáticas cromáticas (y de otros tipos), y tiende a situar la imagen en valores intermedios. Ofreciéndonos una imagen que integra todas las variables superpuestas en una única perspectiva, que se va modificando si varían las condiciones ambientales (ya sean lumínicas, de orientación, etc.). (Montero Ruiz *et al.* 1998).

Con la fotografía digital, también establecemos unas condiciones concretas para la captación de una imagen. Pero el abanico de posibilidades se nos amplía, ya que podemos seleccionar las opciones o variables que deseemos, e incluso alcanzar longitudes de onda no perceptibles por el ojo humano. Lo que nos ofrece mayores medios de identificación e interpretación de las figuras.

Es importante realizar una completa documentación de yacimientos de arte rupestre, para obtener modelos tridimensionales fotorrealísticos. Pero si nuestro objetivo es estudiar e identificar figuras, necesitamos profundizar en el estudio de cada motivo, y para ello necesitamos, para poder manipularlos, aislarlos del soporte que los aloja e individualizarlos.

Si bien es cierto que, en el proceso de digitalización de las imágenes se producen también distorsiones, entre ellas cromáticas. Pero al tratarse de archivos digitales

1. CALCO INDIVIDUAL

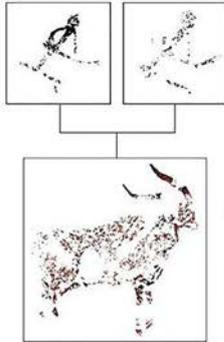


Fotografía 2D: requiere tratamiento fotográfico para identificar motivos.

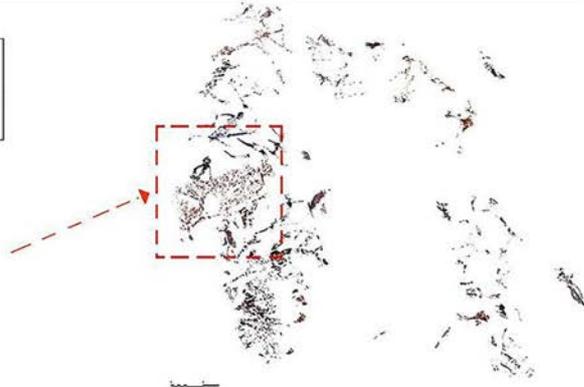


Calco digital 2D, que permite la individualización de cada motivo: 2 figuras humanas y un cáprido.

2. RELACIONES ESPACIALES

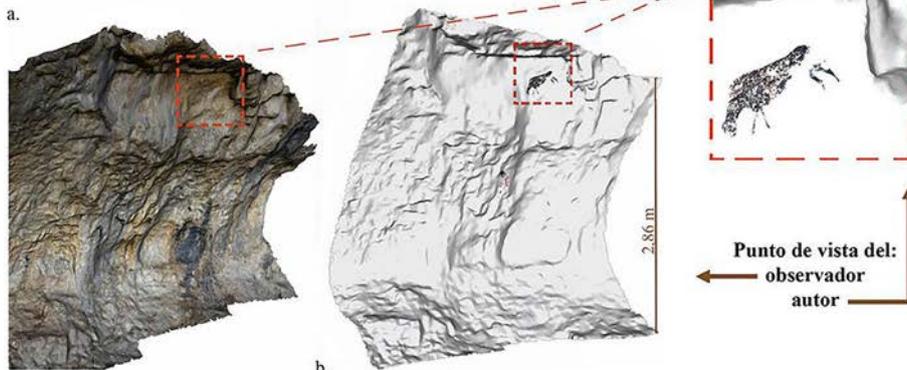


Reconstrucción 2D de la secuencia en base a las pautas de superposición.



Reconstrucción 2D de parte de la escena en la que se prima la visión frontal de cada motivo (visión del pintor).

3. RELACIÓN CON EL SOPORTE y MULTIPLICIDAD DE PUNTOS DE VISTA



Modelo 3D del abrigo VII del Cingle de la Mola Remigia: a. Con textura fotográfica. b. incorporando los calcos individuales. Frente al 2D, el 3D multiplica el número de perspectivas, reproduciendo de forma más realista el punto de vista del observador, y facilitando la comprensión de los motivos en el espacio y en relación al soporte.

FIGURA 14. DOCUMENTOS PARA UNA REPRODUCCIÓN INTEGRAL DEL ARTE RUPESTRE. (TOMADO DE DOMINGO SANZ ET AL. 2013)

susceptibles de alteración, podemos tratar de restituir las condiciones y colores originales, de ahí la gran importancia de incluir una escala de color adecuada en nuestra documentación de los motivos.

La reproducción bidimensional de motivos de arte rupestre, situados en espacios tridimensionales suele conllevar cierta distorsión métrica, ya que solamente documentamos dos dimensiones (la altura y la anchura), y se acentúa por las alteraciones provocadas por la lente en función de la distancia focal y el ángulo de disparo. (Domingo Sanz *et al.* 2013). Hemos que tener siempre presente que cualquier tipo de calco, ya sea procedente de fotografías analógicas o digitales, tendrá siempre distorsiones y distará mucho de ser una fiel reproducción de la realidad si no se corrigen mediante software.

Todas las tomas fotográficas presentan distorsiones y aberraciones geométricas y cromáticas. Tratamos de plasmar una realidad tridimensional con un formato de archivo bidimensional, y para lograrlo se ha tratado de desarrollar las metodologías para aproximar e integrar el calco digital sobre modelos en 3D.

Resulta importante señalar las enormes posibilidades que nos ofrece hoy en día la fotografía digital, obteniendo imágenes en longitudes de onda más allá de la visión del ser humano y de las fotografías tradicionales (infrarrojo, ultravioleta, etc.). Nos permite identificar figuras recubiertas por depósitos de calcita u orgánicos, o aquellas muy degradadas o aislar las superposiciones. Todo ello gracias al posterior retoque con software, y su individualización y plasmación en los calcos digitales.

En la documentación y análisis de este tipo de estaciones es importante también, la realización y plasmación digital de una reproducción o documento que, establezca la relación existente entre cada figura respecto al resto de motivos del panel. Lo cual nos permite profundizar en el análisis y comprensión de las secuencias, agrupaciones, escenas y las pautas compositivas.

Una de las principales limitaciones de las reproducciones en 2D, tanto analógicas como digitales, es poder reproducir la multiplicidad de planos en los que se manifiesta un panel. En la documentación en dos dimensiones se plasma habitualmente un único punto de vista, que suele coincidir con el que en su día realizó las representaciones. Pero con la incorporación de las técnicas de documentación tridimensionales se puede suplir esta deficiencia. Con los modelos tridimensionales digitales podemos escalar y rotar los paneles, para observarlos y estudiarlos desde otros puntos de vista. La combinación de las técnicas digitales de 2D (fotografía y calco digital), con los modelos en 3D, resultan técnicas complementarias, que nos permiten realizar múltiples lecturas de un mismo yacimiento, una observación más detallada de las figuras, así como una reproducción más fiel y exacta de la estación. (Domingo Sanz *et al.* 2013).

Desde el punto de vista de la conservación, la creación de modelos en 3D de alta resolución de las representaciones parietales, así como de sus soportes, abrigos, cuevas, etc., permitirá que en un futuro incierto conservemos un modelo digital de alta precisión, una réplica virtual que permita a futuras generaciones su estudio y disfrute. (Fritz y Tosello 2007).

Sin ninguna duda el calco sobre fotografía digital, así como la fotogrametría y el escáner láser nos aportan una ventaja esencial, que justifica el haberse convertido en las metodologías más demandadas por los investigadores. Ya que además de ser técnicas de documentación muy precisas, nos permiten identificar y analizar nuevos aspectos no perceptibles por el ojo humano. Y no solamente el descubrimiento de nuevas figuras, sino también el establecimiento de nuevas relaciones, organizaciones compositivas y problemas de conservación. (Sebastián López *et al.* 2010).

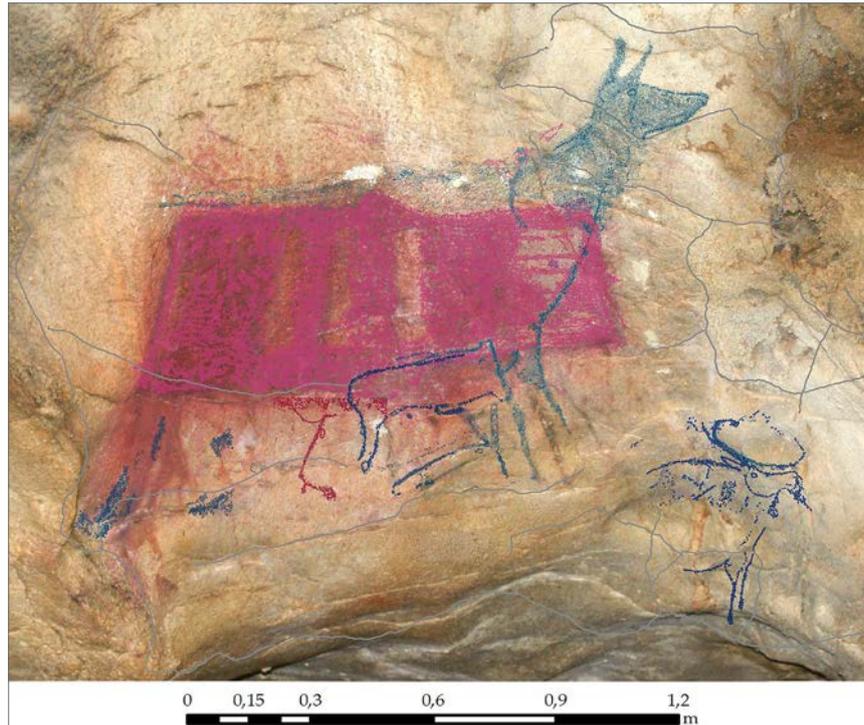


FIGURA 15. CALCO DIGITAL SOBRE ORTOIMAGEN DE UN PANEL CUEVA DE EL CASTILLO. (TOMADO DE BAYARRI CAYÓN 2020)



FIGURA 16. GIGA-ORTOIMAGEN DEL TECHO DE LA SALA DE POLICROMOS. CUEVA DE ALTAMIRA. (BAYARRI CAYÓN ET AL. 2015)

Con la metodología de reproducción digital a partir de una textura de alta resolución de un modelo fotogramétrico, e integrando en ellos las reproducciones digitales de las figuras, a base de una textura generada en modo ortofoto u ortofoto adaptativa, conseguimos una fiel reproducción del yacimiento, y garantizando una menor distorsión de los motivos, que con otro tipo de procedimientos. (Ruiz López 2019).

A continuación, se muestra una Tabla, donde podemos observar las principales ventajas y limitaciones que presentan las metodologías de documentación analizadas en este trabajo.

PROCEDIMIENTO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Dibujo a mano alzada	No implica contacto directo con los motivos. Barato. No requiere equipamiento adicional. Resuelve problemas de visibilidad en el trazo y aclara el orden de superposiciones.	Gran subjetividad potencial. Fidelidad cuestionable. Lento: necesidad de gran cantidad de horas de trabajo de campo y posteriores de gabinete.
Calco directo	Barato. No requiere formación adicional ni equipos complejos. Resuelve problemas de visibilidad en el trazo y aclara el orden de superposiciones.	Potencialmente subjetivo. Fidelidad cuestionable. Lento: necesidad de gran cantidad de horas de trabajo de campo y posteriores de gabinete. Invasivo: Posibles deterioros mecánicos. Condensaciones en la cara interna del soporte plástico. Transferencia de sustancias adherentes a la roca soporte.
Calcos por frotación (frottage)	Barato. No requiere formación adicional ni equipos complicados. Relativamente rápido: no requiere un tiempo prolongado en el trabajo de campo.	Potencialmente subjetivo. Fidelidad cuestionable. Invasivo: Posibles deterioros mecánicos. Posibles deterioros químicos. Deterioro estético cuando implica la adición de pigmentos. Favorecimiento de procesos de Biodeterioro.
Obtención de moldes directos	Refleja el relieve y la microtopografía del grabado. Resultados fiables.	Requiere formación específica. Caro. Invasivo: Posibles deterioros mecánicos. Posibles deterioros químicos. Deterioro estético debido a la acción de las sustancias desmoldantes o de los componentes del molde. Favorecimiento de procesos de Biodeterioro.
Fotografía analógica	No implica contacto físico con los motivos. Rápido. Registro simultáneo de paneles y soporte.	Presencia de aberraciones debidas a la morfología de las lentes. Presencia de deformaciones geométricas en la imagen. Dificultad para el registro fiable del color. Calcos obtenidos de manera lenta y costosa.
Fotografía digital *	No implica contacto físico con los motivos. Rápido. Registro simultáneo de paneles y soporte. Podemos combinar variados documentos en un mismo archivo. Permiten una posterior corrección y modificación. Ocupan menos espacio físico. Almacenamiento más seguro y no degradación. Obtención de imágenes al instante y no revelado. Más fáciles de compartir y divulgar. Archivos con mucha información y en variadas resoluciones y formatos. Gran variedad de dispositivos de registro.	Necesidad de memoria interna y externa de almacenamiento. Equipos caros. Dificultad para el registro fiable del color. Necesaria formación o expertos. También se registran deformaciones y aberraciones. Aumento de trabajo posterior en laboratorio.
Fotogrametría analógica	No implica contacto físico con los motivos. Fiable en cuanto al relieve.	Caro. Necesita personal especializado. Potencialmente subjetivo, al ubicarse manualmente las pinturas. Gran cantidad de horas de trabajo de campo y de laboratorio.

Fotogrametría Digital *	No implica contacto físico con los motivos. Modelo creado directamente sobre el original. Georreferenciación exacta. Creación modelo 3D exacto. No subjetividad. Rápido. Registro simultáneo de paneles y soporte. Fácil modelo para difusión. Excelentes resultados combinado con escáner 3D.	Caro. Necesita personal especializado. Gran cantidad de horas de trabajo de laboratorio. Precisa mucha memoria almacenamiento.
Escáner 3D *	No implica contacto físico con los motivos. Modelo creado directamente sobre el original. Georreferenciación exacta. Creación modelo 3D exacto. No subjetividad. Rápido. Registro simultáneo de paneles y soporte. Fácil modelo para difusión. Excelentes resultados combinado con fotogrametría digital.	Caro. Necesita personal especializado. Dificultades de transporte del material. Gran cantidad de horas de trabajo de laboratorio. Precisa mucha memoria almacenamiento.
Calco digital *	Permite la corrección de aberraciones y distorsiones y rectificado posterior del color. No existe contacto directo. Facilidad de almacenamiento y difusión. Objetividad en el registro. Identificación e individualización de figuras. Facilita visualización de imágenes y conjuntos. Estudios y análisis posteriores. Captura información no visible. Gran cantidad de datos recabados. No se altera realidad. Aclara superposiciones. Registro de figuras y soporte. Plasmar varios puntos de vista. Ocupan menos espacio físico. Almacenamiento más seguro y no degradación. Archivos con mucha información y en variadas resoluciones y formatos.	Dificultad de registrar el color. Caro. Distorsiones y aberraciones cromáticas. Precisa formación específica o expertos. Aumento de trabajo posterior en laboratorio. Software específico. Necesidad de memoria interna y externa de almacenamiento.

TABLA 1. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE DOCUMENTACIÓN DE ARTE RUPESTRE ANALIZADOS. (TOMADO DE ROGERIO CANDELERIA 2011). *AMPLIACIÓN DE METODOLOGÍAS ANALIZADAS EN LA TABLA SUPERIOR, Y REALIZADA EN ESTE TRABAJO POR EL AUTOR

3. CONCLUSIONES

En este artículo se abordan varias lagunas en la documentación del arte rupestre, como la falta de una metodología estandarizada y la necesidad de utilizar técnicas más precisas y no invasivas para la documentación de los yacimientos.

El arte rupestre es una de las representaciones más importantes del legado de nuestros antepasados. Forma parte de nuestro patrimonio cultural, y estamos obligados moralmente a realizar cuanto esté en nuestra mano para su estudio y conservación. En las últimas décadas se han aplicado medidas para su preservación y la no alteración de estos enclaves.

Las manifestaciones de arte rupestre no suelen mostrarse aisladas del conjunto en el cual se engloban. Forman parte de todo un sistema más complejo donde podemos encontrar elementos bióticos y abióticos, los cuales interaccionan y definen su estado de conservación. De la estabilidad de este delicado equilibrio de relaciones depende su preservación para el futuro.

Desgraciadamente el principal enemigo de los enclaves con arte rupestre es el daño producido por el ser humano. Resulta necesario por tanto que tanto los investigadores como las administraciones competentes tomen medidas de protección al respecto.

La evolución de la documentación del arte rupestre ha estado condicionada por el surgimiento de innovaciones tecnológicas y de nuevas metodologías de trabajo, los cuales nos han permitido obtener resultados más exactos y de mejor calidad.

El enfoque tradicional en la documentación ha sido el de realizar una copia, es decir un calco de las representaciones. Pero las técnicas anteriores a la era digital no permitían registrar la tridimensionalidad de una manera adecuada, debido a la imposibilidad técnica de trasladar esta característica a un soporte bidimensional. Las nuevas metodologías aplicadas hoy en día, han supuesto una mejora con respecto al pasado en la calidad y cantidad de datos obtenidos. En su georreferenciación exacta, así como en la no alteración de los yacimientos y sus figuras.

En el inicio de los estudios de esta disciplina (y aún en numerosas ocasiones), no existía una selección de las metodologías de documentación en función de unos objetivos específicos. Ni de estudio de evolución o conservación de los yacimientos, ni de obtención de información oculta y no visible al ojo humano. El objetivo primordial era el de realizar una copia de las figuras localizadas en los paneles, para su registro y posterior difusión del descubrimiento. Sin analizar si estas metodologías podían alterar su delicado equilibrio de conservación, o si se estaba realizando con precisión y objetividad. Y sin enjuiciar otros muchos aspectos que se tienen en cuenta hoy día. Lógicamente debido a que no disponían de la perspectiva e información actual, y a que solamente podían utilizar aquellos métodos que tenían a su alcance. Por lo que no debemos minusvalorar estos trabajos, debiendo entender y calibrar cada situación en su contexto histórico y geográfico.

Por estos motivos parece recomendable ampliar nuestra perspectiva, recopilando toda la información posible del conjunto del yacimiento. Para no obtener solamente los datos sobre los motivos, sino también de su soporte, el enclave en su conjunto y todo aquello que influya en el sistema del que forma parte y que pueda ayudarnos en su estudio y conservación.

Aún hoy en día podemos asistir a una variada utilización de metodologías de documentación sin una selección previa motivada y sin mucho rigor. También continuamos viendo, tanto en artículos, manuales de estudio, e incluso museos, una representación de las figuras o escenas que en muchas ocasiones carecen de la exactitud o precisión requerida. Parece ser, en la mayoría de las ocasiones, que cualquier metodología de registro es correcta y adecuada, cuando esto, como hemos podido analizar en este trabajo, no es así.

Por todo lo descrito, resulta del todo impropio y se hace necesario desterrar para siempre, aquellas metodologías de documentación que impliquen algún tipo de contacto directo con las representaciones artísticas o su soporte. Así como aquellas que puedan alterar de cualquier manera, el delicado sistema que permite que se preserven, produciendo cualquier tipo de cambio físico-químico que afecte a su conservación. Por ello los investigadores no deberían proponer este tipo de trabajos, y por supuesto la administración no tendría que permitirlos. Resulta pues

recomendable seleccionar técnicas de estudio no invasivas, aunque busquemos objetivos preferentes como el tipo de pigmentos o la datación de las figuras.

Procesos en este sentido son, el análisis digital de la imagen y los estudios multiespectrales, que nos ofrecen enormes posibilidades (Pereira Uzal 2017). Los cuales nos permiten alcanzar más allá del ojo humano, y gracias a ello se está avanzando en este tipo de estudios y se están realizando nuevos descubrimientos. Incluso pudiendo analizar la evolución microbiana en un yacimiento, su posición y crecimiento. Estos métodos se convierten en una óptima alternativa barata, no invasiva, exacta y fiable, para realizar una documentación precisa de los yacimientos con arte rupestre.

Una de las finalidades de este trabajo era el de poder indicar cuales parecen ser las metodologías de documentación más adecuadas para la documentación del arte rupestre. Si bien es cierto que la diferente heterogeneidad de las manifestaciones y de nuestros objetivos de estudio, dificulta enormemente esta tarea. Seleccionar una metodología de documentación adecuada resulta del todo esencial, para poder recabar los datos necesarios y tener una comprensión total y precisa de nuestro patrimonio cultural.

Hemos podido comprobar también que las ventajas y posibilidades que nos otorgan las tecnologías digitales, superan enormemente a los medios analógicos (dibujo a mano alzada, calco directo, indirecto *in situ* o a partir de fotografías, fotografía analógica). Estos procedimientos también nos ofrecen una precisión geométrica muy superior con valores métricos. Permitiendo un registro casi exacto del color, con resultados reproducibles, y eliminando en gran medida la subjetividad. Se caracterizan principalmente por ser medios no invasivos, no afectando a la conservación de los yacimientos.

El dibujo a mano alzada, pese a ser el primer método de documentación utilizado, sigue resultando muy útil para un primer registro de la información y la confección de fichas. Es por ello que se continúa utilizando en la mayor parte de los trabajos de campo en este sentido. No precisa un contacto directo con las superficies, y la subjetividad e imperfección iniciales de este procedimiento, se suplen a posteriori con las metodologías utilizadas para completar el trabajo.

Para el registro fotográfico, utilizaremos la fotografía digital en los formatos y resoluciones óptimos, la cual presenta innumerables ventajas respecto de la fotografía analógica. Registrando mucha más información, acortando el tiempo empleado, teniendo mayor facilidad de almacenaje, de transmisión de la información, permitiendo posteriores retoques y modificaciones de distorsiones, facilitando el posterior análisis de la imagen digital, estudios multiespectrales e hiperespectrales, etc. Debido a sus innumerables ventajas se ha impuesto, desde hace un par de décadas, en todos los estudios de yacimientos. Es importante que estas imágenes las tomemos en un formato que registre la mayor información posible (como el formato JPEG o RAW).

Para la realización de tratamientos de análisis digital de las imágenes obtenidas, y la corrección de errores y aberraciones de las mismas, utilizaremos software de procesamiento de imágenes y retoque fotográfico, análisis multiespectrales, ortorectificación de imágenes, selección y discriminación de figuras y escenas, realización de calcos digitales, etc. Podemos observar los buenos resultados de la aplicación de estas

técnicas, por ejemplo en el Cingle de la Mola Remigia (Domingo Sanz *et al.* 2013), en proyectos realizados en la cueva del Arco II (Lomba Maurandi *et al.* 2020), y en la cueva de El Castillo (Ripoll López *et al.* 2021).

Podemos aplicar también otras técnicas fotográficas, para ampliar y mejorar la información obtenida, así como para obtener una mejor calidad para la difusión al público. Métodos como son la fotografía gigapixel (de altísima resolución) o la fotografía esférica. Alguna representación de estas técnicas la vemos en tareas en el abrigo de Riquelme (San Nicolás del Toro 2012), o en la cueva de Altamira (Bayarri Cayón *et al.* 2015).

Si lo que pretendemos es realizar un estudio o selección individualizada de cada una de las figuras. Así como poder estudiar la relación entre las mismas, las escenas, y entre las representaciones y el soporte. La metodología fundamental a utilizar será la de realización de calcos digitales. Trabajos en este sentido en el Cingle de la Gasulla (Montero Ruiz *et al.* 1998), en el Cingle de la Mola Remigia (Domingo Sanz *et al.* 2013) y en la cueva de El Castillo (Bayarri Cayón 2020). Con ellos podemos seleccionar la información que nos resulta relevante o deseamos discriminar del conjunto, aislarla para su análisis, para su difusión, o para su posterior plasmación en fotografías ortorectificadas del soporte, etc.

Cuando el objetivo final de nuestro estudio es la realización de nuevos descubrimientos y valorar otros enfoques, parece que la metodología que resulta más adecuada es el registro y análisis digital de la imagen. La realización de análisis multiespectrales de la imagen, alcanzando aquello que no es capaz de captar el ojo humano. Trabajos como el del panel de las manos de la Cueva de El Castillo nos muestran estas ventajas (Ripoll López *et al.* 2015). Los últimos estudios y descubrimientos realizados se basan en los análisis hiperespectrales, un enfoque aún más completo que el multiespectral y que está aportando más información de los yacimientos. Permitiendo realizar nuevos y sorprendentes hallazgos, así como mejorar la visualización de los pigmentos en paneles con arte rupestre (Bayarri Cayón *et al.* 2019). Un ejemplo de ello es el estudio de los paneles de arte rupestre de la cueva de El Castillo (Bayarri Cayón *et al.* 2021a). También podemos realizar análisis hiperespectrales en estudio de pinturas de otro tipo, como cuadros, en textos, frescos, frisos y murales (Le Mouélic *et al.* 2013; Alfeld *et al.* 2018; Cucci *et al.* 2019).

Para la obtención de las imágenes hiperespectrales utilizaremos sensores especiales como el espectrómetro, el cual recaba mucha más información de las superficies (de la radiación que desprenden), transformándola en valores numéricos que finalmente proporcionan estos archivos tan completos. Este tipo de imágenes nos permiten obtener una mejor resolución y calidad, así como un mayor rango de frecuencia del espectro electromagnético, por lo que podemos advertir figuras ocultas en paneles con arte rupestre (Schmitt *et al.* 2023). También obtenemos lo que se denomina la firma espectral, la cual nos permite identificar los materiales o pigmentos que componen una figura, sin necesidad de tener un contacto directo con ella. Resultando de mucha utilidad, cuando lo que queremos realizar son tareas encaminadas a identificar los componentes de los materiales utilizados en la realización de los motivos (rupestres o de otro tipo) (Daniel and Mounier 2015), o cuando estamos realizando trabajos de conservación (Fischer and Kakoulli 2006) o comprobación de degradación de

yacimientos. Aplicaciones de esta técnica las tenemos por ejemplo en Otello (Defrasne *et al.* 2023) o en El Castillo (Bayarri Cayón *et al.* 2021a).

Para la determinación de los componentes de las pictografías, los soportes y las pátinas, así como realizar estudios sobre las alteraciones y cambios que sufren las figuras y paneles, podemos utilizar también la espectroscopia de Raman (Pozo-Antonio *et al.* 2021). Como en los recientes proyectos de análisis de enclaves con arte rupestre en los Urales (Kiseleva *et al.* 2023). Así como la espectrometría de fluorescencia por Rayos X por energía dispersa, para el análisis de materiales y sus composición (Roldán *et al.* 2010; Alfeld *et al.* 2019; Chanteraud *et al.* 2021; Lemièrre *et al.* 2021; Trosseau *et al.* 2021; Rabbachin *et al.* 2022), cuya aplicación también podemos ver en los estudios de pigmentos en enclaves del río Vero en España (Martín-Ramos *et al.* 2023). Ambas técnicas suponen una excelente metodología para realizar este tipo de tareas, sin alterar ni tener un contacto directo con los yacimientos.

También podemos planificar a partir de la aplicación de estas tecnologías digitales, procedimientos de diagnóstico de alteraciones de los yacimientos, así como estrategias para su monitorización volumétrica (comparando modelos en 3D de diferentes momentos) y fisicoquímica, así como seguimiento de la evolución en el tiempo de los mismos. Como en los recientes estudios realizados en Altamira (Bayarri Cayón *et al.* 2023b). Desarrollando una intervención preventiva para su conservación, elaborando mapas de alteraciones, identificando puntos de riesgo mediante medición de temperaturas, etc. Confeccionando bases de datos en torno a los yacimientos, pudiendo advertir sus alteraciones y prevenir su deterioro.

Para el registro tridimensional de los datos, volumen e información en general contenida en el yacimiento, utilizaremos los procedimientos de documentación con escáner láser, escáner de luz estructurada y fotogrametría digital de objeto cercano. Los cuales como hemos podido describir y comprobar en este trabajo, nos permiten capturar la información con una resolución y perfección submilimétrica. Suponiendo un enorme avance en la documentación de estos enclaves, acortando los trabajos de campo, eliminando la subjetividad de metodologías del pasado, y registrando la información por medios de teledetección que no precisan contacto directo con los paneles, y por tanto no afectan a su estado de conservación. Podemos ver la aplicación de estas técnicas aisladas o combinadas en numerosos trabajos de investigación, ya se trate de arte rupestre u otro tipo de estudios (Lerma García *et al.* 2013; Cassen *et al.* 2014; Ruiz López *et al.* 2016; Angás Pajas *et al.* 2019), así como en el estudio de diversas cuevas cantábricas (Bayarri Cayón y Castillo López 2009), en el registro de varios yacimientos del proyecto Aram (Angás Pajas y Bea Martínez 2014), en las Coves de la Saltadora (Cabrelles López y Lerma García 2015), y analizando plaquetas de la cueva del Parpalló (Cabrelles López *et al.* 2020).

Para recabar la información tridimensional del yacimiento, el escáner laser 3D parece ser la tecnología geomática más idónea, sin embargo presenta algunos inconvenientes desarrollados con anterioridad. Debido a lo descrito y para resolver estas deficiencias, considero que lo adecuado ha de ser la integración de las técnicas geomáticas de fotogrametría de rango cercano y de láser escáner terrestre. Algún ejemplo práctico lo vemos en el Cingle de la Mola Remigia (Domingo Sanz *et al.* 2013), en abrigo de la Cerrada del Tío Jorge o Tío José (Angás Pajas y Bea Martínez

2015), en la cueva de El Castillo (Bayarri Cayón 2020) y en La Covatina (Domingo Sanz *et al.* 2021).

Con estos procedimientos conseguiremos una documentación y reconstrucción tridimensional integral del yacimiento. Así como obtener modelos exactos en tres dimensiones, los cuales en combinación con la fotografía digital, favorecen su preservación para el futuro, la realización de investigaciones, y sobre todo para su difusión a la comunidad científica, y al público en general. Pudiendo ser incluidos en publicaciones web, así como la realización de formatos digitales en 3D, para la inmersión del espectador en estos entornos virtuales. Una aplicación de estos procesos los vemos en la creación de entorno virtual de la cueva Santimamiñe (Barrera Mayo *et al.* 2009).

El escaneado en 3D de yacimientos está arrojando resultados sorprendentes. En el caso de las cuevas, obtenemos un modelado perfecto con medidas y dimensiones exactas, lo que en la mayoría de casos está modificando enormemente los planos y medidas que poseíamos. Como ha ocurrido recientemente en los trabajos realizados con esta tecnología en la cueva de El Castillo (Bayarri Cayón *et al.* 2021b).

Para la documentación de los grabados y pinturas rupestres, el escáner de luz estructurada proporciona una gran resolución y alta precisión. Nos permite registrar la profundidad de incluso los grabados muy finos, y de los modelos existentes los que proporcionan mejores resultados son los de luz infrarroja. Utilizado por ejemplo (junto a otras metodologías), dentro del proyecto ARAM (Angás Pajas y Bea Martínez 2014). Aunque es de señalar que, cada vez es más frecuente la localización de grabados que no presentan un surco o incisión susceptible de ser registrado. Bien porque han sido cubiertos por una pátina, o porque se realizaron por métodos de abrasión. Resulta habitual encontrar este tipo de grabados en yacimientos al aire libre o en abrigos. En ocasiones se está comprobando que quizá es más conveniente su registro con fotografía digital, y su visualización e identificación a base de software de procesado multiespectral de imágenes.

Las imágenes y videos capturados de zonas exteriores y generales de los yacimientos y de su entorno, considero que resulta conveniente realizarlos en último lugar. Ya que es cuando somos conocedores de toda la amplitud y extensión del enclave, y podemos documentar toda esa información de una forma más completa. Para la realización de este tipo de tareas es muy recomendable la utilización de drones (RPAS), aeronaves no tripuladas que dispongan de cámaras de alta resolución. La utilización de drones nos ofrece una visión y perspectiva imposible de lograr con otro tipo de dispositivos. Ya que proporciona una visión aérea muy completa del entorno y de 360 grados alrededor del yacimiento. La efectividad de este procedimiento, la podemos comprobar por ejemplo en los trabajos de prospección y documentación de arte rupestre en el Cañón de la Horadada (Palencia) (Muñoz Ibáñez *et al.* 2023). La documentación con drones nos aporta un enfoque distinto, más amplio y atractivo, y ofrece información relevante para otro tipo de estudios y procedimientos. Con estos dispositivos podemos realizar también trabajos fotogramétricos del conjunto del entorno y de los enclaves, lo que nos aporta un modelado en 3D de alta precisión. En ocasiones son el único medio para poder documentar yacimientos que se encuentran en lugares inaccesibles por otros medios.

Para finalizar, quisiera señalar que este trabajo hace avanzar el estado del arte rupestre en cuanto su documentación se refiere, al proponer una metodología más adecuada y eficiente para la documentación de los yacimientos. Además, he tratado de destacar la importancia de utilizar técnicas no invasivas y respetuosas con los yacimientos, para su conveniente conservación y difusión.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfeld, M., Mulliez, M., Devogelaere, J., de Viguerie, L., Jockey, P and Walter, P. 2018: «MA-XRF and hyperspectral reflectance imaging for visualizing traces of antique polychromy on the Frieze of the Siphnian Treasury». *Microchemical Journal*, 395.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.05.050>
- Alfeld, M., Baraldi, C., Gamberini, M. C. and Walter, P. 2019: «Investigation of the pigment use in the Tomb of the Reliefs and other tombs in the Etruscan Banditaccia Necropolis». *X-Ray Spectrometry* 48:262–273. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.2951>
- Angás Pajas, J., Bea Martínez, M. y Royo Guillén, J. I. 2013: «Documentación geométrica mediante tecnología láser escáner 3D del arte rupestre en la cuenca del Matarraña (Teruel)». *Cuadernos de arte rupestre*, nº 6. ISSN: 1699-0889, 91-101.
- Angás Pajas, J. y Bea Martínez, M. 2014: «Propuesta conceptual y metodológica en la documentación gráfica y geométrica del arte rupestre». *Proyecto ARAM (Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia)*. ISBN: 978-84-617-2993-7, 344-361.
- Angás Pajas, J. y Bea Martínez, M. 2015: *La documentación gráfica y puesta en valor de los conjuntos con arte rupestre de Bezas y Tormón*. Manuel Bea & Jorge Angás. ISBN: 978-84-608-3978-1.
- Angás Pajas, J., Farjas Abadia, M., and Bea Martínez, M. 2019: «Multirange Data in Cultural Heritage: Technologies, Formats and Visualization». *Proceedings*, 19, 16.
DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019019016>.
- Barrera Mayo, S., Otaola Barbeito, A. y Bayarri Cayón, V. 2009: «Explotación turística no intrusiva de la cueva de Santimamiñe (Vizcaya) mediante realidad virtual». *II Congreso español de cuevas turísticas*, 359-371. Madrid. ISBN 978-84-613-3730-9.
- Bates, K., Falkingham, P. L., Rarity, F. and Hodgetts, D. 2010: «Application of high-resolution laser scanning and photogrammetric techniques to data acquisition, analysis and interpretation in palaeontology». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVIII, 68-73.
- Bayarri Cayón, V. y Castillo López, E. 2009: «Caracterización geométrica de elementos complejos mediante la integración de diferentes técnicas geomáticas. Resultados obtenidos en diferentes cuevas de la cornisa cantábrica». *Conferencia 8ª Semana Geomática Internacional*. Barcelona.
- Bayarri Cayón, V., Latova, J., Castillo López, E., Lasheras, J. A., de las Heras, C. y Prada, A. 2015: «Nueva ortoimagen verdadera del Techo de Policromos de la Cueva de Altamira». *XIX International Rock Art Conference IFRAO*. Cáceres.
- Bayarri Cayón, V., Sebastián, M. A. and Ripoll López, S. 2019: «Hyperspectral Imaging Techniques for the Study, Conservation and Management of Rock Art». *Applied Sciences*, 9, 5011. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9235011>
- Bayarri Cayón, V. 2020: *Algoritmos de análisis de imágenes multispectrales e hiperespectrales para la documentación e interpretación del arte rupestre*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España.
- Bayarri Cayón, V., Castillo López, E., Ripoll López, S. and Sebastián, M. A. 2021a: «Improved application of hyperspectral analysis to rock art panels from El Castillo cave (Spain)». *Applied Sciences* 11(3):1292. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031292>

- Bayarri Cayón, V., Castillo López, E., Ripoll López, S. and Sebastián, M. A. 2021b: «Control of laser scanner trilateration networks for accurate georeferencing of caves: application to El Castillo cave (Spain)». *Sustainability* (13):13526. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132413526>
- Bayarri, V., Prada, A. and García, F. 2023a: «A Multimodal Research Approach to Assessing the Karst Structural Conditions of the Ceiling of a Cave with Palaeolithic Cave Art Paintings: Polychrome Hall at Altamira Cave (Spain)». *Sensors*, 23(22):9153. <https://doi.org/10.3390/s23229153>
- Bayarri Cayón, V., Prada, A., García, F., Días, L. M., De las Heras, C., Castillo, E. and Fatás, P. 2023b: «Integration of remote-sensing techniques for the preventive conservation of Paleolithic cave art in the karst of the Altamira cave». *Remote Sensing*. 15(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15041087>
- Cabrelles López, M., Seguí, A., Navarro, S. and Portalés, C. 2010: «3D Photorealistic modelling of stone monuments by dense image matching». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 38, 121-124.
- Cabrelles López, M. y Lerma García, J. L. 2015: «Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados». *Virtual Archaeology Review*. 4. 64. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2013.4320>
- Cabrelles López, M., Lerma García, J. L., and Villaverde Bonilla, V. 2020: «Macro photogrammetry & surface features extraction for paleolithic portable art documentation». *Applied Sciences* 10 (19). DOI: 10.3390/app10196908.
- Camargo Tuta, C. C., Hurtado Agudelo, D. C., Téllez Salazar, M. L. y Bonilla Romero, J. 2015: «Documentación de arte rupestre por métodos topográficos en el municipio de Guasca, Cundinamarca». *Rupestreweb*, <http://www.rupestreweb.info/documentacionguasca.html>
- Cardenal Escarcena, F. J., Mata de Castro, E., Pérez García, J. L., Mozas Calveche, J. T., Fernández del Castillo, T., Delgado García, J., Ureña Cámara, M. A. y Castillo Armenteros, J. C. 2010: «Técnicas fotogramétricas y de escáner láser terrestre aplicadas a la documentación y valoración del patrimonio histórico». *I Congreso Internacional sobre catastro unificado y multipropósito*. ISBN: 978-84-8439-519-5, 459-470.
- Cassen, S., Lescop, L., Grimaud, V. and Robin, G. 2014: «Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: Laser grammetric and photographic recording in Gavrinis passage tomb (Brittany, France)». *Journal of Archaeological Science* 45(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.019>
- Corchón Rodríguez, M. S., González Aguilera, D., Muñoz Nieto, A. L., Gómez Lahoz, J. y Herrero Pascual, J. 2009: «Documentación, modelado y reconstrucción 3D de la cueva de Las Caldas (Oviedo). El yacimiento y el arte parietal». *Excavaciones arqueológicas en Asturias 2003-2006*, 2009, ISBN 978-84-8053-545-8, 355-366.
- Corchón Rodríguez, M. S., Ortega Martínez, P., González Aguilera, D., Muñoz, A., Rodríguez, P. y Rivero Vilá, O. 2012: «Nuevas investigaciones en La Cueva de La Griega (Pedraza, Segovia, España). Aportaciones de las geotecnologías al estudio del arte paleolítico». *Espacio, tiempo y forma. Serie I, Prehistoria y arqueología*, ISSN 1131-7698, n° 5, 543-556.
- Cortea, I.M., Ratoi, L., Ghervase, L., Tentea, O. and Dinu, M. 2021: «Investigation of Ancient Wall Painting Fragments Discovered in the Roman Roman Baths from Alburnus Maior by Complementary Non-Destructive Techniques». *Applied Sciences*, 11:10049. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11110049>
- Cucci, C., Webb, E. K., Casini A., Ginanni, M., Prandi, E., Stefani, L., Vitorino, T. and Marcello, P. 2019: «Short-wave infrared reflectance hyperspectral imaging for painting

- investigations: A methodological study». *Journal of the American Institute for Conservation*, 58:16–36. DOI: <https://doi.org/10.1080/01971360.2018.1543102>
- Chanteraud, C., Chalmin, É., Lebon, M., Salomon, H., Jacq, K., Noûs, C., Delannoy, J. J., and Monney, J. 2021: «Contribution and limits of portable X-ray fluorescence for studying Palaeolithic rock art: A case study at the Points cave (Aiguèze, Gard, France)». *Journal of Archaeological Science Reports*, 37(9):102898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102898>
- Cheli, A. E. 2012: *Introducción a la fotogrametría y su evolución*. Ediciones Hespérides. ISBN 978-987-1844-04-3. Argentina.
- Daniel, F. and Mounier, A. 2015: «Mobile hyperspectral imaging for the non-invasive study of a mural painting in the Belves Castle (France, 15th C)». *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 1:81–88. DOI: <https://doi.org/10.1080/20548923.2016.1183942>
- Defrasne, C. 2014: «Digital image enhancement for recording rupestrian engravings: Applications to an alpine rock shelter». *Journal of Archaeological Science* 50(1):31–38]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.010>
- Defrasne, C., Massé, M., Giraud, M. and Schmitt, B. 2023: «The contribution of VNIR and SWIR hyperspectral imaging to rock art studies: example of the Otello schematic rock art site (Saint-Rémy-de-Provence, Bouches-du-Rhône, France)». *Archaeol Anthropol Sci* 15, 116. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01812-6>
- Domingo Sanz, I., Villaverde Bonilla, V., López Montalvo, E. y Lerma García, J. L. 2013: «Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D)». *Cuadernos de arte rupestre*. n° 6. ISSN: 1699-0889, 21-32.
- Domingo Sanz, I., Roman, D., Lerma García, J. L. and Rodríguez, I. 2021: *Multidisciplinary and integral approaches to rock art as a strategy for rock art conservation*. Charper of Global perspectives for the conservation and management of open-air rock art sites. 55-75. ISBN: 9780429355349.
- Evans, L. and Mourad, A.L. 2018: «DStretch® and Egyptian tomb paintings: A case study from Beni Hassan». *Journal of Archaeological Science Reports*, 18, 78–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.011>
- Fischer, C. and Kakoulli, I. 2006: «Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications». *Studies in Conservation*, 51:3–16. DOI:10.1179/sic.2006.51.Supplement-1.3.
- Fritz, C. and Tosello, G. 2007: «The Hidden Meaning of Forms: Methods of Recording Paleolithic Parietal Art». *Journal of Archaeological Method and Theory*. 14. 48-80. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10816-007-9027-3>
- Gárate Maidagan, D. 2018: *Métodos y técnicas de documentación aplicadas al arte paleolítico*. Curso online 2ª edición. Universidad de Burgos.
- Gil Esteban, M., Cruz Berrocal, M., Gil-Carles, J. M. y Martínez Navarrete, M. I. 2005: «Martín Almagro Basch, Fernando Gil Carles y el Corpus del Arte Rupestre Levantino». *Trabajos de Prehistoria*. Vol. 62, n° 1. 27-46. ISSN 0082-5638.
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J. and Gutierrez-Alonso, G. 2009: «3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art». *Sensors*, 9, 1108-1127. DOI: <https://doi.org/10.3390/s90201108>
- Gunn, R. G., Douglas, L. C. and Whear, R. L. 2014: «Interpreting polychrome paintings using DStretch». *Rock Art Res.* 31, 101–104.

- Harman, J. 2005: *Using decorrelation stretch to enhance rock art images*. In Proceedings of the American Rock Art Research Association Annual Meeting, Sparks, NV, USA, 28–30; Volume 28. DOI: <https://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.pdf>
- Jalandoni, A., Winans, W.R. and Willis, M. D. 2021: «Intensity Values of Terrestrial Laser Scans Reveal Hidden Black Rock Art Pigment». *Remote Sens.*, 13, 1357. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13071357>
- Kiseleva, D., Shagalov, E., Pankrushina, E., Shirokov, V., Khorkova, A. and Danilov, D. 2023: «Microanalytical investigation of prehistoric colorants from Uralian rock art (Ignatievskaya cave and Idrisovskaya II and Zmiev Kamen' pictographs)». *Heritage* 6 (1), 67–89. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage6010004>
- Lagüela López, S., Riveiro, B., Armesto, J and Carrera Ramírez, F. 2011: «New approaches for 3D documentation of petroglyphs in the North West of the Iberian Peninsula». *XXIII International Scientific Committee for Documentation of Cultural Heritage Symposium*. Praga – CZ.
- Le Mouélic, S., Chauvet, F., Giraud, M., Le Menn, E., Leynia, C., and Barbet, O. 2013: «Investigation of a painting dating the French revolution using visible and near infrared hyperspectral imagery». *5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*. pp 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2013.8080713>
- Le Quellec, J. L., Duquesnoy, F. and Defrasne, C. 2015: «Digital image enhancement with DStretch®: Is complexity always necessary for efficiency?» *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit*, 2, 55–67.
- Lemière, B. and Harmon, R. S. 2021: *XRF and LIBS for field geology*. In *Portable Spectroscopy and Spectrometry*; Crocombe, R., Leary, P., Kammrath, B., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2021; pp. 455–497. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119636489.ch42>
- Lerma García, J. L. 2001: «Documentation and recovery of rupestrian paintings: an automatic approach». *CIPA International Symposium*, 18–21, Postdam (Germany).
- Lerma García, J. L. 2002: *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Universidad politécnica de Valencia. ISBN: 84-9705-210-2.
- Lerma García, J. L., Villaverde Bonilla, V., García, A. and Cardona, J. 2006: «Close range photogrammetry and enhanced recording of palaeolithic rock art». *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden* 25–27.
- Lerma García, J. L., Cabrelles López, M., Navarro Tarín, S. y Galcerá Ustero, S. 2010: «Documentación 3D y visualización multimedia de la Cova del Parpalló (Gandia)». *Virtual Archaeology Review*. 1(2):123–127. DOI: <https://doi.org/10.4995/var.2010.4701>
- Lerma García, J. L., Cabrelles López, M., Navarro, S. y Seguí, A. E. 2013: «Modelado fotorealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital». *Cuadernos de arte rupestre*. nº 6. ISSN: 1699-0889, 85–90.
- Lomba Maurandi, J., Salmerón Juan, J., Martín Lerma, I. y Sánchez Hernández, A. 2020: *Arte rupestre y arqueología en los Almadenes*. Cieza, Murcia. Ayuntamiento de Cieza. ISBN: 978-84-09-07024-4.
- Mañana Borrazás, P., Blanco Rotea, R. y Rodríguez Paz, A. 2009: «La documentación geométrica de elementos patrimoniales con láser escáner terrestre. La experiencia de lapa Galicia». *Cuadernos de estudios gallegos*. T. 56, nº 122. ISSN 0210-847X, 33–65.
- Martín-Ramos, P. and Cuchi, J. 2023: «Portable X-ray Fluorescence Analysis of Levantine and Schematic Art Pigments from the River Vero Shelters (Huesca, NE Spain)». *Heritage* 6(4):3789–3800 DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage6040201>

- Martínez Collado, F. J., Medina Ruiz, A. J. y San Nicolás del Toro, M. 2013: «Aplicación del plugin DStretch para el programa ImageJ al estudio de las manifestaciones pictóricas del abrigo Riquelme (Murcia)». *Cuadernos de arte rupestre: revista del Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla*, ISSN 1699-0889, nº. 6, 113-127.
- Martínez Sánchez, M. y Flores García, A. 2020: «Aplicación de la fotogrametría a la divulgación histórica: creación, gestión y difusión del patrimonio 3D para el siglo XXI». *Jornadas de Arqueología de la Comunidad Valenciana 2016-2017-2018*. ISBN 978-84-482-6485-7, 559-566.
- Mas Cornellá, M., Maura Mijares, R., Solís Delgado, M. y Pérez González, J. 2013: «Reproducción digital, microfotografía estereoscópica y fotografía esférica aplicadas a la interpretación del arte rupestre prehistórico». *Cuadernos de arte rupestre*. nº 6. ISSN: 1699-0889, 77-83.
- Moneva Montero, M. D. 1993: «Primeros sistemas de reproducción de Arte Rupestre en España». *Espacio, tiempo y forma. Serie I, Prehistoria y Arqueología*, nº 6. ISSN: 1131-7698, 413-444.
- Montero Ruiz, I., Rodríguez Alcalde, A. L., Vicent García, J. M. y Cruz Berrocal, M. 1998: «Técnicas digitales para la elaboración de calcos de arte rupestre». *Trabajos de Prehistoria*, ISSN: 0082-5638, Vol. 55, nº 1, 155-169.
- Muñoz Ibáñez, F. J., Ripoll López, S., Bayarri Cayón, V., Expósito Gil, V., García Sánchez, J. L., Rioja, D., Latova, J. y Herrera, J. 2023. «El cañón de la Horadada (Palencia). El cañón sagrado. Un avance a su descubrimiento y estudio sistemático». Consorcio CENIEH (ed.) *Actualidad de la investigación en las estaciones paleolíticas de Siega Verde y el valle de Còa. 193-207*.
- Pereira Uzal, J. M. 2013: «Modelado 3D en patrimonio por técnicas de structure from motion». *PH Investigación*. nº 1. ISSN-e 2340-9479, 77-87.
- Pereira Uzal, J. M. 2017: «Nuevas perspectivas en la documentación gráfica del Arte Rupestre». *Kobie Serie Anejo*, nº 16, ISSN: 0214-7971, 41-50.
- Pozo-Antonio, J. S., Comendador Rey, B., Alves Bacelar, L. and Barreiro, P. 2021: «Methodological Approach (In Situ and Laboratory) for the Characterisation of Late Prehistoric Rock Paintings–Penedo Gordo (NW Spain)». *Minerals*, 11, 551. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060551>
- Rabbachin, L., Piñar, G., Nir, I., Kushmaro, A., Pavan, M.J., Eitenberger, E., Waldherr, M., Graf, A. and Sterflinger, K. 2022: «A Multi-Analytical Approach to Infer Mineral–Microbial Interactions Applied to Petroglyph Sites in the Negev Desert of Israel». *Applied Sciences*, 12, 6936. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146936>
- Ripoll López, S. 2006-2009: «Cómo estudiar una estación con arte rupestre». *Xama, Mendoza, Argentina*. ISSN 0327-1250, 299-319.
- Ripoll López, S., Bayarri Cayón, V., Castillo López, E., Latova, J. y Muñoz Ibáñez, F. J. 2015: «El panel de las manos de la cueva de El Castillo. (Puente Viesgo, Cantabria). *Conference: XIX International rock art Conference IFRAO*. Portugal.
- Ripoll López, S., Bayarri Cayón, V., Muñoz Ibáñez, F. J., Ortega, R., Castillo López, E., Latova, J., Herrera, J., Moreno Salinas, M. y Martín Lerma, I. 2021: «Hands Stencils in El Castillo cave (Puente viesgo, Cantabria, Spain). An interdisciplinary study». *Proceedings of the prehistoric society*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/ppr.2021.11>
- Rodríguez González, E., Carbonell Pastor, S. and Casals, J. R. 2019: «Lost colours: Photogrammetry, image analysis using the DStretch plugin, and 3-D modelling of post-firing painted pottery from the south west Iberian Peninsula». *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 13(2):e00093.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00093>
- Rodríguez López, F. I. 2014: *Representación 3D de petroglifos: propuesta de metodología de modelización de los grabados del Valle de Tamanart, Marruecos*. Trabajo fin de Máster. E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM).
- Rogero Candellera, M. A. 2007: «Una propuesta no invasiva para la documentación integral del arte rupestre». *Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC*. Universidad de Sevilla. ISBN: 978-84-690-9905-6.
- Rogero Candellera, M. A. 2011: *Técnicas de análisis digital de imágenes para la documentación integral de la pintura rupestre*. PhD Thesis, Universidad de Sevilla. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC. ISBN: 978-84-693-4529-0
- Roldán, C., Murcia-Mascarós, S., Ferrero, J., Villaverde Bonilla, V., López-Montalvo, E., Domingo Sanz, I., Martínez Valle, R. and Guillem Calatayud, P. M. 2010: «Application of field portable EDXRF spectrometry to analysis of pigments of Levantine rock art». *X-Ray Spectrometry*, 39, 243–250. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.1254>
- Ruiz López, J. F., Sebastián López, M., Quesada, M., Pereira Uzal, J. M., Fernández, S., Pitarch, A., Maguregui, M., Giakoumaki, A., Martínez, I., Madariaga, J. M., Lorente, J. C. y Dólera, A. 2016: «4D. Arte rupestre». *Monografías del Centro de Estudios de Prehistoria y Arte Rupestre*. ISBN: 978-84-7564-644-2.
- Ruiz López, J. L. 2019: «Tecnologías actuales al servicio de la documentación, estudio, conservación y divulgación del arte rupestre». *I Jornades Internacionals d'Art Rupestre de l'Arc Mediterrani de la Península Ibèrica*, 341-373.
- San Nicolás del Toro, M. 2012: «Documentación gráfica del arte rupestre postpaleolítico para un Plan de gestión». *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio Mundial. Parque cultural del río Vero, Alquezar (Huesca)*.
- Schmitt, B., Souidi, Z., Duquesnoy, F. and Donze, F. V. 2023: «From RGB camera to hyperspectral imaging: a breakthrough in Neolithic rock painting analysis». *Heritage Science*, 11, 91. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00940-5>
- Sebastián López, M., Uriarte González, A., Angás Pajas, J. y Martínez Bea, M. 2010: «Documentación sistémica del arte rupestre mediante el análisis espectral del escaneado 3D de las estaciones pintadas en Aragón. El caso concreto del abrigo de La Vacada (Castellote, Teruel) y el covacho del Plano del Pulido (Caspe, Zaragoza). España». *Virtual Archaeology Review*, ISSN-e 1989-9947, Vol. 1, nº. 1, 123-127.
- Serrano Basterra, P. y Díaz San Millán, I. 2018: *Curso Introducción a la Fotogrametría Digital y su uso en Patrimonio*. Universidad de Burgos, UBU Abierta. <http://www.ubu.es>
- Skoog, B., Helmholz, P. and Belton, D. 2016: «Multispectral analysis of indigenous rock art using terrestrial laser scanning. International Archives of the Photogrammetry». *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 405–412. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-405-2016>
- Trosseau, A., Maigret, A., Coquinot, Y. and Reiche, I. 2021: «In situ XRF study of black colouring matter of the Palaeolithic figures in the Font-de-Gaume cave». *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36, 2449–2459. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1JA00202C>
- Vavulin, M., Nevskaya, I. and Tybykova, L. 2019: «Digital macro-photogrammetry in documentation of old Turkic runiform inscriptions in the Altai Mountains». *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 19, 81–104. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239053>
- Vozmediano Montoya, D. 2006: *Fotogrametría digital aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales de entidades patrimoniales*. Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU).