

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/339487568>

Tecnologías actuales al servicio de la documentación, estudio, conservación y divulgación del arte rupestre

Chapter · February 2020

CITATIONS

0

READS

8

1 author:



Juan F. Ruiz

University of Castilla-La Mancha

41 PUBLICATIONS 502 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ROCK ART REPOSITORY /REPOSITORIO DE ARTE RUPESTRE [View project](#)



La técnica paleolítica del trazo fino y estriado entre los orígenes del estilo levantino de la Península Ibérica. Evidencias para una reflexión. [View project](#)

Tecnologías actuales al servicio de la documentación, estudio, conservación y divulgación del arte rupestre

Juan F. Ruiz López

Laboratorio de Arqueología, Patrimonio y Tecnologías Emergentes. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de Ciencias de la Educación y Humanidades. CREAP. Spain.
juanfrancisco.ruiz@uclm.es

Resumen. La omnipresencia de lo tecnológico en las sociedades contemporáneas encuentra su correlato también en el estudio del arte rupestre. Durante las dos últimas décadas hemos vivido la irrupción de multitud de tecnologías que han transformado irremisiblemente la aproximación de los investigadores a este objeto de estudio.

En esta comunicación se abordarán algunos de los aspectos claves de esta auténtica revolución tecnológica, que han afectado a los sistemas de documentación, a las técnicas de estudio, al diagnóstico de su conservación, e incluso a los mecanismos de divulgación social. No obstante, el papel adquirido por la tecnología no puede asumirse de manera acrítica. Las diferentes tecnologías solo pueden ser herramientas al servicio de los investigadores y no fines en si mismas. Por otro lado, cada vez es más necesaria la estandarización de procedimientos y resultados, de cara a posibilitar la creación de repositorios digitales abiertos que faciliten el acceso a la información digital y su preservación. Sobre esa base se podrán crear redes de intercambio de información que contribuyan a optimizar recursos y a favorecer investigaciones futuras.

Palabras clave: documentación de arte rupestre; metodología de estudio; tecnologías digitales; repositorios digitales

Resum. L'omnipresència del tecnològic en les societats contemporànies troba el seu correlat també en l'estudi de l'art rupestre. Durant les dues últimes dècades hem viscut la irrupció de multitud de tecnologies que han transformat irremissiblement l'aproximació dels investigadors a aquest objecte d'estudi.

En aquesta comunicació s'abordaran alguns dels aspectes claus d'aquesta autèntica revolució tecnològica, que han afectat els sistemes de documentació, a les tècniques d'estudi, a la diagnosi de la seva conservació, i fins i tot als mecanismes de divulgació social. No obstant això, el paper adquirit per la tecnologia no pot assumir de manera acrítica. Les diferents tecnologies només poden ser eines al servei dels investigadors i no finalitats en si mateixes. D'altra banda, cada vegada és més necessària l'estandardització de procediments i resultats, de cara a possibilitar la creació de dipòsits digitals oberts que facilitin l'accés a la informació digital i la seva preservació. Sobre aquesta base es podran crear xarxes d'intercanvi d'informació que contribueixin a optimitzar recursos i a afavorir investigacions futures.

Paraules clau: documentació d'art rupestre; metodologia d'estudi; tecnologies digitals; repositoris digitals

Abstract. The ubiquity of technology in contemporary societies has its counterpart also in the rock art studies. During the last two decades, we have witnessed the outbreak of many technologies that have irrevocably transformed how researchers are approaching to this object of study.

In this paper, some of the key aspects of this genuine technological revolution will be discussed, including the transformation of documentation procedures, research methods, preservation diagnosis, or even social outreach systems. The role acquired by technology, however, cannot be uncritically assumed. The different technologies are just tools at the service of researchers, and not ends in themselves. Besides that, it is increasingly necessary the standardization of methodologies and results to enable the creation of digital repositories that could facilitate an open access to the digital information and its preservation. On this basis, collaborative information exchange networks could be created to help to optimize the use of resources and foster future investigations.

Key words: Rock Art Recording; Research Methodologies, Digital Technologies, Digital Repositories

1. Introducción

Hablar en la actualidad de documentación, estudio, conservación y divulgación de arte rupestre sin hacer referencia a las tecnologías digitales es prácticamente imposible. Al igual que en casi todas las facetas del mundo contemporáneo, la ubicuidad de lo digital ha afectado de pleno a la investigación de los grafismos prehistóricos, merced a la omnipresencia de los ordenadores (incluidos los smartphones que llevamos en el bolsillo), a la constante mejora del software y a la disponibilidad de redes de comunicación de banda ancha en la mayor parte del territorio.

La sociedad tecnologizada en la que vivimos no ha surgido de la nada; lo mismo sucede en el ámbito del arte rupestre. El desarrollo de la informática eclosionó con la aparición de los primeros ordenadores personales, allá por 1984, si tomamos como referencia al Apple Macintosh 128K, en el que ya estaban presentes la mayoría de los elementos de hardware y software que configuran a los ordenadores actuales. Hacia 1990, ya corría *Adobe Photoshop* en aquellos ordenadores, aunque sus sistemas operativos todavía tendrían que esperar unos años hasta alcanzar la sofisticación de Windows XP o MacOS X. Las bases de algunas tareas documentales básicas como los GPS diferenciales, o los escáneres láser, comenzaron a comercializarse alrededor de 1993. Los sistemas de información geográfica y las técnicas de teledetección, también se consolidaron hacia mediados de la década de 1990, y no han dejado de perfeccionarse desde entonces. Un software tan popular en la actualidad como *DStretch* apareció por primera vez en 2005. Los programas basados en técnicas de *computer vision* o visión artificial, a partir de los cuales se desarrollaron los algoritmos de *Structure from Motion* (SfM), comenzaron a popularizarse alrededor de 2009; es decir, las tecnologías al servicio del arte rupestre han alcanzado ya una sólida madurez soportada por más de treinta años de desarrollo y de mejora permanente de sus capacidades, potencia y facilidad de uso.

El impacto de los cambios acumulados como consecuencia de la adopción de tecnologías es de tal calibre, que podríamos hablar de un nuevo paradigma basado en los medios tecnológicos. La revolución digital de nuestra disciplina, acelerada desde aproximadamente 2010, ha terminado por reemplazar al mundo analógico precedente. Diversas tecnologías han ido progresivamente ocupando todos los ámbitos de la disciplina, desde la propia documentación hasta la caracterización fisicoquímica, extendiéndose hasta las formas de comunicación y de divulgación. Por este motivo, considero que los investigadores debemos superar el anticuado concepto de «nuevas tecnologías», es decir, una visión de las mismas que,

aunque sea a nivel inconsciente, sigue tomando los procedimientos analógicos como el estándar de trabajo, y asumir que esas tecnologías digitales son las formas propias de trabajo de este inicio del siglo XXI, en lo referente a la investigación del arte rupestre. Muy pocos investigadores siguen anclados a metodologías analógicas, afortunadamente, por el considerable incremento de la precisión, exactitud, rapidez de trabajo y garantía de conservación del bien cultural que suponen las tecnologías actuales.

En el presente trabajo partiremos de una visión retrospectiva sobre el desarrollo de estas tecnologías en diversos ámbitos, y analizaremos sus posibilidades actuales y de futuro. La amplitud y diversidad de temas a tratar obligará a ofrecer una visión muy sucinta de muchos de ellos. En primer lugar, nos centraremos en las tecnologías destinadas a la documentación del arte rupestre, uno de los ámbitos en los que mayores avances se han experimentado, de la mano de los productos de síntesis, tales como fotogrametría, fotografía gigapíxel, *focus stacking*, etc... que a partir de fotografías digitales generan otros productos que superan las limitaciones de las cámaras fotográficas, o permiten la obtención de otros resultados, como modelos 3D (fig. 1).

Los medios tecnológicos analizados han contribuido también a un mejor conocimiento del nivel de conservación del arte rupestre. La fragilidad de nuestro objeto de estudio es evidente, por lo que la aportación de estas tecnologías es muy relevante para su preservación para las generaciones futuras.

Finalmente, otro campo en el que la contribución tecnológica ha sido fundamental es el de la divulgación. Las tecnologías, cada vez más accesibles, están ayudando a democratizar el conocimiento del arte rupestre en diversos sentidos; las publicaciones digitales abiertas, las webs especializadas y las tecnologías destinadas a la mejora de la visita son herramientas que, a corto plazo, pueden contribuir a que la sociedad sea consciente de la extraordinaria riqueza patrimonial acumulada en las cavernas y abrigos de la península ibérica, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las comarcas, usualmente deprimidas, en las que se conserva.



Figura 1. La revolución de los productos de síntesis ha incorporado a la panoplia documental multitud de técnicas basadas en la fotografía digital que ofrecen en la actualidad un sinfín de posibilidades al investigador.

El futuro en este campo resulta difícil de predecir; hace quince años no podíamos ni siquiera imaginar algunas de las herramientas a nuestra disposición a día de hoy. No obstante, parece claro que el desarrollo de la inteligencia artificial y del *Big Data* impactarán irremediabilmente en nuestra disciplina. En este sentido, apuntaremos posibilidades que ya hemos empezado a esbozar destinadas a la colaboración en red, dentro de entornos abiertos. Mediante estas herramientas se podría potenciar el desarrollo de estudios globales, más ambiciosos y menos localistas, que ayuden a superar el cierto inmovilismo en el que se encuentran, por ejemplo, las investigaciones del arte levantino. En definitiva, tecnología útil; la inversión en tiempo, dinero y esfuerzo que ha supuesto el desarrollo del paradigma digital solo adquiere sentido si estas tecnologías se conciben desde el principio como un medio al servicio de la investigación, y no como un fin en si mismo, como, lamentablemente, está sucediendo con demasiada frecuencia en nuestra disciplina en los últimos años.

2. Tecnologías para la documentación del arte rupestre

La documentación de arte rupestre se ocupa de registrar todas aquellas dimensiones necesarias para capturar la realidad física de las pinturas y grabados rupestres. Al menos, dos de esas dimensiones son básicas: el volumen y el color. El volumen afecta a todo el arte rupestre, tanto pinturas como grabados que fueron realizados sobre un soporte que determina su morfología y posición en el panel. En el caso del grabado es especialmente importante, debido a su naturaleza sustractiva que altera el propio volumen del soporte. El color es la primera dimensión percibida de las pinturas parietales, pero también es importante para el grabado que presenta un tono diferente en las capas externas y en el fondo de la zona alterada por la acción antrópica. Volumen y color convergen finalmente en el repertorio gráfico rupestre.

La documentación ha estado tradicionalmente enfocada en la realización de un calco, es decir, a una representación de los registros gráficos conservados en un determinado panel, ya fuera reconstruidos, como sucedió con frecuencia a inicios del siglo xx, o representando su estado real de conservación. Tanto por diversos medios analógicos como en los primeros momentos de la época digital, algunos autores se dieron cuenta de que era necesario incorporar en los calcos indicaciones de las zonas alteradas o de sus relaciones con la fisiografía del soporte (Lorblanchet, 2010; López-Montalvo, 2011; Ripoll, 1963). No obstante, las técnicas anteriores a la era digital no consiguieron una representación útil de la tridimensionalidad que permitiera entender las particularidades de la inserción de un registro en un panel determinado, manteniendo sus relaciones espaciales con el resto de figuras. Las razones son obvias; por un lado, las limitaciones de las metodologías analógicas (calco directo, calco indirecto a partir de fotografías), y por otro, por la «imposible» transición entre la realidad tridimensional del soporte físico y la bidimensionalidad del papel impreso o de la reproducción fotográfica (fig. 2).

2.1. Nuevos paradigmas de documentación gráfica de arte rupestre

El paradigma actual de documentación arranca de una concepción más amplia de nuestro objeto de estudio. El estudio del arte rupestre ya no se ocupa exclusivamente del registro de las huellas de la actividad simbólica realizada por seres humanos sobre superficies rocosas, sino que entiende estas huellas dentro de un objeto de estudio muy complejo que podríamos denominar, parafraseando al tristemente desaparecido Ramiro Alloza, como sistema rupestre (Alloza *et al.*, 2012), y en el que intervienen factores abióticos, bióticos y antropogénicos. Las tecnologías digitales permiten registrar la interacción dinámica a lo

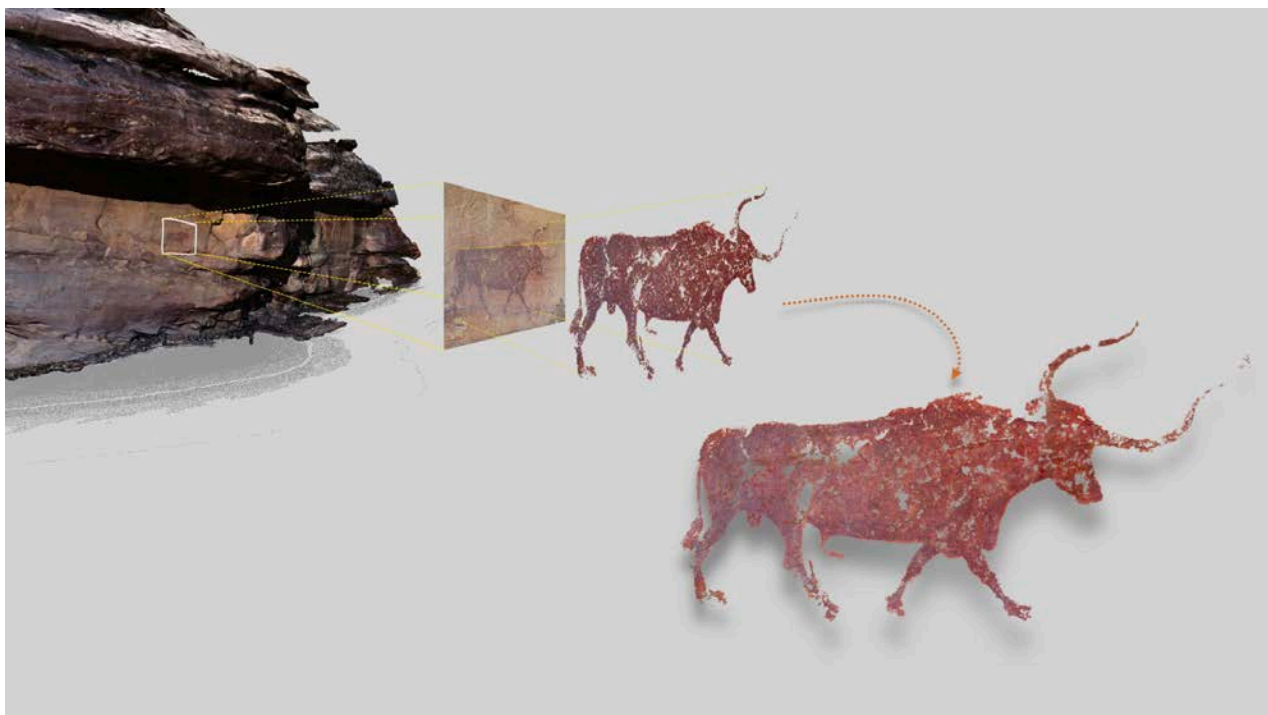


Figura 2. El calco tradicional se apoya en la proyección cónica de la fotografía de un motivo que se traspassa a un plano bidimensional, con las inevitables distorsiones ligadas a esa traslación, como se aprecia en esta ilustración generada con el ejemplo de Selva Pascuala (Villar del Humo, Cuenca).

largo del tiempo de los factores abióticos (roca soporte, geología), bióticos (plantas, animales, microorganismos) y antropogénicos (pinturas y grabados) con el medio ambiente (clima, acción de los elementos atmosféricos). Todos estos factores determinan lo que se ha preservado y su estado de conservación actual, lo que supone reconocer que nuestra capacidad de acceder al registro de creaciones prehistóricas está condicionada por los procesos tafonómicos derivados de dicha interacción.

Esta base teórica constituye el punto de partida de diversos proyectos que se han desarrollado en los últimos años (Sebastián *et al.*, 2013; Onrubia *et al.*, 2017; Ruiz *et al.*, 2016b), en los que el registro artístico ha ido perdiendo centralidad a manos de una visión ampliada del objeto de estudio rupestre. Podríamos plantear que este proceso de cambio se inició hace unas décadas con la reconsideración del arte rupestre como objeto arqueológico, en el que la acción humana (puntual o reiterada) sobre un lugar, deja un residuo físico (marca grabada, componentes pictóricos) que altera el soporte previo e interacciona dinámicamente con los factores bióticos y abióticos, generando un registro arqueológico que evoluciona a lo largo del tiempo tanto como resultado de la utilización social del enclave (entorno, cueva/abrigo, y panel) como de la acción del medio ambiente sobre el resto de factores (fig. 3). La aproximación a esta dinámica compleja del objeto rupestre es lo que se viene denominando como documentación integral (Rogerio-Candelera, 2007; 2014).

Las posibilidades ofrecidas por las tecnologías digitales en comparación con los medios analógicos (dibujo a mano alzada, calco directo, calco indirecto in situ, o a partir de fotografías) son enormes. Pero además garantizan una precisión geométrica incomparablemente superior, tienen valores métricos, permiten una reproducción exacta del color (dentro de los límites de los espacios de color digitales), cierto grado de reproducibilidad, y una total ausencia de afecciones a la conservación como consecuencia de su naturaleza no invasiva. Todas estas posibilidades constituyen el núcleo duro de la revolución vivida en la documentación del arte rupestre.



Figura 3. El paradigma de documentación integral de arte rupestre no atiende en exclusiva a los grafismos sino a la totalidad de elementos que interactúan dinámicamente en el sistema rupestre.

Obviamente, el motivo pictórico o grabado sigue siendo fundamental, pero la aproximación al mismo ha cambiado radicalmente. Desde que se adquirió conciencia de los riesgos que entrañaba la utilización del calco directo, su uso fue decayendo paulatinamente a favor de la fotografía, que, por su parte, fue ganando con celeridad un papel central en las tareas de documentación. Esa tendencia se consolidó con el advenimiento de la imagen digital. Las primeras cámaras digitales, el software de retoque fotográfico, o los primeros intentos de gestionar el color de las imágenes nos deslumbraron con su aura de novedad, prometiendo la transformación radical de formas de trabajo que, en lo referente a la documentación del arte rupestre, habían evolucionado muy despacio desde principios del siglo xx. O, al menos, eso parecía. En realidad, los trabajos de documentación, durante los primeros momentos de la fotografía digital, siguieron nutriéndose de los mismos principios teóricos que estaban en uso desde que las técnicas de calco directo comenzaron a ser sustituidas, a mediados de los años 70, por los denominados calcos indirectos. Muchas imágenes eran simplemente escaneadas de antiguos negativos o diapositivas, y tanto aquellas como las fotos de las nuevas cámaras digitales eran tratadas casi por igual. Seguíamos produciendo calcos indirectos a partir de fotos, que ahora llamábamos calcos digitales, pero que en lo esencial no se diferenciaban de los anteriores; incluso tratábamos de imitar el efecto del punteado mediante filtros en *Photoshop* (López-Montalvo, 2011). El nuevo calco digital continuaba siendo una trasposición bidimensional de la realidad tridimensional del motivo rupestre, aunque en general mejorase la calidad de los calcos analógicos precedentes (fig. 4).

2.2. El registro de la tridimensionalidad

Los cambios verdaderamente profundos en muchos procesos documentales han ido de la mano del crecimiento de la imagen digital. La fotografía digital comenzó a aproximarse a la analógica, en cuanto a calidad y precio, en 2003; cámaras como la *Canon EOS 300D* pusieron a disposición de los investigadores de arte rupestre una herramienta que resultaba mucho más fácil de trabajar que el escaneado de originales analógicos, aun a costa de la pérdida de resolución que supuso durante los primeros años. La rapidísima evolución de las cámaras digitales terminó por dejar obsoletas a las analógicas y, con ello,



Figura 4. Reproducción de un sector de Mas dels Ous (Xert, Castellón) realizado en 2010 por el autor, siguiendo los criterios habituales para el calco digital bidimensional.

acabó también con una cierta ingenuidad respecto a la propia naturaleza de la imagen fotográfica. Los programas de retoque fotográfico, como *Adobe Photoshop*, posibilitan la corrección de las distorsiones de las imágenes fotográficas inherentes a su perspectiva cónica, y a cada tipo de lente y cuerpo de cámara. Ello forma parte de los procesos de revelado de los negativos digitales (archivos *raw*), que ofrecen unas posibilidades de procesado de las imágenes que en el mundo analógico eran sencillamente impensables fuera de complejos laboratorios de revelado. Las correcciones mediante software de distorsiones geométricas y aberraciones nos enfrentaron a la realidad de que las fotografías existentes no podían considerarse, salvo excepciones, como una reproducción fiel del objeto de estudio, ni a nivel geométrico ni a nivel colorimétrico. Los complejos flujos de trabajo ligados al calco analógico indirecto comportaban distorsiones geométricas considerables que ahora se podían resolver fácilmente con ayuda de software, como el propio *Photoshop*, o más específico como *DxO Optics Pro*, entre otros. La imagen digital *raw*, con unos flujos de trabajo adecuados, adquiriría un carácter de evidencia científica atendiendo a su naturaleza de matriz de datos (Vicent *et al.*, 1996). Con todo, una fotografía digital no deja de ser una proyección sobre un plano, por lo que la posibilidad de reproducir a partir de ella de un volumen complejo y tridimensional no se alcanzaba todavía.

La reproducción tridimensional del objeto rupestre ha sido una de las conquistas de mayor impacto realizadas durante este siglo. Los medios para alcanzarla son varios: escáner láser, escáner de luz estructurada y fotogrametría de objeto cercano. En la actualidad todos estos procedimientos obtienen resultados equiparables (Lerma *et al.*, 2012) y han sido ampliamente probados en multitud de casos ligados al arte prehistórico, abarcando desde grabados en objetos muebles hasta el registro tridimensional de cavernas enteras. No obstante, la que ha ido adquiriendo mayor importancia en los últimos años es la fotogrametría de objeto cercano, derivada de imágenes digitales y obtenida a partir de software basado en los principios

de la visión artificial (o *computer vision* en inglés) como es el caso del *Structure from Motion* (SfM) (Do-neus *et al.*, 2011; Verhoeven *et al.*, 2012) que se basa en el empleo de algoritmos como SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) o SURF (*Speeded Up Robust Features*).

De cualquier tipo de modelo 3D se deriva información métrica de interés para la documentación del arte rupestre, tanto a nivel de panel, como a nivel de territorio. Las nubes de puntos y las mallas generadas por cualquier de los sistemas de escaneado pueden ser referenciadas a partir de puntos comunes, o de coordenadas compartidas. Los escáneres láser suelen contar con un GPS, pero su localización subcentimétrica demanda la instauración de una red topográfica de referencia basada en herramientas topográficas como un GPS diferencial o una estación total. El escaneado del entorno de una estación rupestre se puede hacer tanto con un escáner láser, como con un LIDAR aerotransportado, o con fotogrametría basada en el vuelo efectuado con un dron UAV, ya sea de ala fija o de ala rotatoria. Estos diferentes procedimientos de escaneado pueden ser combinados para la realización de una documentación multiescala, abarcando desde el territorio inmediato a la estación, al panel o incluso a la microtopografía de un grabado.

Estos procedimientos de captura han supuesto la apertura de multitud de nuevas oportunidades para el estudio del arte rupestre. Todos ellos generan nubes de puntos densas, de las que se derivan mallas poligonales que reproducen la realidad física del objeto documentado. Aunque en la actualidad todas ellas sean equiparables en resolución y precisión, cada una tiene ventajas e inconvenientes que es necesario considerar. El escáner láser es el que se utilizó con mayor profusión a inicios de la era digital (Gonzalez-Aguilera *et al.*, 2009; Sebastián *et al.*, 2010; Angás, 2012), independientemente de su tipología (diferencia de fase, tiempo de vuelo, triangulación). Se define como un dispositivo de adquisición masiva de datos sin contacto con el bien cultural a partir de la medición de distancias y ángulos efectuado por un haz de rayo láser, emitido a diferentes longitudes de onda. Puede estar basado en pulsos láser (escáner de tiempo de vuelo) que mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del rebote en el objeto a documentar, o en los desfases en las longitudes de onda del láser entre la onda emitida y la reflejada por el objeto. En cualquier caso, mide la intensidad de la señal y la distancia, determinando la posición espacial (x, y, z) de puntos a lo largo de la superficie del objeto, así como su color RGB. El resultado es una nube de puntos densa coloreada, cuya resolución dependerá de las propias características del equipo y de la configuración concreta con la que se realice el escaneado. En la actualidad, se alcanzan resoluciones submilimétricas. Se trata de dispositivos métricos, por lo que existen métricas que permiten conocer la precisión de la captura de datos. El escaneado láser no depende de la existencia de luz, por lo que son ideales para la captura de entornos como las cavernas paleolíticas. Además, son el procedimiento más adecuado para el escaneado del entorno de las estaciones con arte rupestre, posibilitando una aproximación macro-micro que puede ser muy interesante. La georreferenciación de los escaneados se realiza apoyándose tanto en el posicionamiento GPS del propio escáner, como en las mediciones efectuadas con estación total de dianas distribuidas a su alrededor. Alternativamente, se pueden usar conjuntos de esferas de referencia que ayudan a solapar los diferentes tramos escaneados.

Los escáneres láser no capturan una imagen, por lo que suelen equiparse con una cámara fotográfica que captura imágenes que durante el postprocesado se acoplan a la malla geométrica. Aunque la calidad de estas imágenes ha mejorado sustancialmente en los últimos años, todavía no tienen suficiente resolución para los requerimientos de la documentación detallada de motivos rupestres. Por otro lado, se trata de aparatos muy caros por lo que el precio de un escaneado puede ser considerable.

Los escáneres de luz estructurada, por su parte, pueden tener diferentes características, pero, en general, se definen por la emisión de un patrón de luz que se proyecta sobre el objeto a documentar. Este

patrón es captado por un sensor óptico que registra la geometría y color del objeto. La luz emitida puede ser visible, por lo general blanca o, como es más frecuente en la actualidad, infrarroja, ya que no interfiere con la iluminación de la escena ni con el color del objeto a documentar. Al igual que el escáner láser, captura el color RGB de los puntos escaneados, en combinación con una cámara digital de baja resolución, por debajo de 2 Mp. Por este motivo, se ha usado para la captura de superficies grabadas, dado que puede llegar a resoluciones tan elevadas como un escáner láser, con una precisión de 0,05 mm, de un modo más sencillo. Los equipos más populares en la actualidad son de tipo *handheld*, por lo que se requiere su desplazamiento a lo largo de la superficie a capturar.

Por último, la fotogrametría de objeto cercano es, sin duda, la más popular en el mundo arqueológico a día de hoy, tanto por su accesibilidad como por su relación calidad/precio (Domingo *et al.*, 2013; Lerma *et al.*, 2006). La fotogrametría de objeto cercano actual se basa en la utilización de fotografías digitales procedentes de cualquier tipo de cámara digital (cámara fotográfica, *smartphone*, etc...) que son usadas por software especializado para deducir la posición espacial de los puntos homólogos que los algoritmos de procesamiento identifican entre las diferentes imágenes. Para ello, es necesario que cada punto homólogo esté recogido en, al menos, tres imágenes diferentes, y que la inclinación del plano focal respecto al objeto en esos puntos no sea superior a 45°. Las homologías detectadas son entonces transformadas en puntos dispuestos en el espacio en coordenadas xyz arbitrarias, o referidas a un sistema de coordenadas preestablecido. Los valores métricos dependerán de dichas coordenadas o de la presencia de puntos de control que pueden ser medidos con una estación total, o a mano. La precisión de estas medidas determinará la precisión geométrica del modelo. No obstante, debe tenerse en cuenta que la única valoración métrica aceptada en la actualidad es la que se deriva de productos métricos, por ejemplo, los derivados de un escaneado láser, dadas las imprecisiones inevitables de una medición manual, que difícilmente estará por debajo de 2 mm.

La popularidad de la fotogrametría estriba en que el escaneado de un objeto es relativamente sencillo teniendo en cuenta una serie de nociones mínimas. En primer lugar, el software actual se basa en el movimiento de la cámara fotográfica alrededor del objeto que se documenta. Si el objeto es de bulto redondo la circulación a su alrededor será en círculos convergentes, nunca divergentes, mientras que, si es un objeto más o menos plano como, por ejemplo, un panel con arte rupestre, la cámara deberá moverse en paralelo al mismo en la medida de lo posible, tratando de cubrir desde ángulos diferentes las anfractuosidades del soporte. Los desplazamientos laterales deben tener un mínimo de un 60 % de solape respecto a la posición previa, aunque es recomendable un solape que se aproxime al 80 %, y alrededor de un 50 % de desplazamiento vertical. La utilización de un *slider* sobre un trípode es una de las opciones más eficaces para garantizar desplazamientos laterales precisos.

El punto crucial en la captura fotogramétrica es el cálculo del GSD (*Ground Sample Distance*), fórmula que permite estimar la distancia en los desplazamientos laterales en función de las dimensiones del sensor, de la longitud focal y la distancia al objeto. Dicha fórmula es $GSD = SPS \cdot H / f$, donde GSD es la resolución del futuro modelo 3D; SPS (*Sensor Pixel Size*) es el tamaño del sensor en μm ; H es la distancia de la cámara al objeto en metros; f es la distancia focal de la lente en milímetros. Conociendo el GSD y el ancho del sensor en píxeles se puede calcular las distancias de desplazamiento lateral en función del grado de solape entre imágenes que se estime conveniente. Podemos constatar a partir de los trabajos publicados que con frecuencia se recurre a lentes con una distancia focal pequeña, es decir, a grandes angulares, y a incrementar la distancia entre la cámara y el objeto. Esta solución garantiza una cobertura adecuada de la pared rocosa, y suele producir modelos 3D sin lagunas. Pero, este tipo de lentes no son las más adecuadas para capturar el nivel de detalle que se debería demandar de los modelos fotogramétricos

destinados a registrar arte rupestre, especialmente en estilos como el arte levantino o el esquemático, en el que las figuras pueden ser auténticas miniaturas. De nada sirve un modelo 3D en cuya textura no se pueden ver los motivos rupestres, y esto sólo se puede garantizar con lentes con un mayor nivel de aproximación y con fotografías realizadas a una distancia de la pared que no sea excesiva. Una distancia entre 1 y 1,5 m es, probablemente, el rango de distancias más adecuado para este tipo de arte rupestre.

Otro aspecto fundamental es la iluminación. La fotogrametría, como cualquier técnica basada en la fotografía digital, es estrictamente dependiente de la cantidad de luz que registra un sensor digital de la radiación reflejada por un objeto. Así pues, es necesario que el objeto esté bien iluminado, mediante luz natural o artificial, para garantizar una captura de datos de calidad. Por otro lado, la iluminación debe ser, en la medida de lo posible, estable y coherente, por lo que, en sesiones de larga duración, las cambiantes condiciones de la luz natural pueden ser problemáticas. Luces LED y flashes son las alternativas más viables, de los cuales existen una gran variedad de opciones en el mercado. Se debe optar por fuentes de iluminación que garanticen un CRI (*color rendition index*) de al menos un 95 %, y una temperatura de color tan estable como sea posible (Pereira, 2016; 2017; 2019), en cifras que no sean muy superiores a 50 °K entre disparo y disparo.

El tipo de fotografía que con más frecuencia se realiza en arte rupestre puede tener problemas de profundidad de campo. Como es sabido, la profundidad de campo determina la zona que tiene una nitidez aceptable dentro del rango focal de la lente utilizada. Para objetos con una superficie con un elevado grado de irregularidad, es recomendable utilizar una profundidad de campo elevada, la cual depende de la apertura de diafragma, de la distancia focal, y de la distancia física al objeto. En el caso de la fotogrametría, las imágenes nítidas permiten al software localizar una mayor cantidad de homologías, mientras que las áreas de baja nitidez generarán un mayor grado de incertidumbre en la reconstrucción. La utilización de una apertura de diafragma de f/11 suele ser la recomendación general, pero por encima de f/8 se obtendrán unos resultados aceptables. No obstante, esto conlleva un problema añadido, la nitidez de la imagen dependerá de la cantidad de luz que recibe el sensor, que será tanto menor cuanto más se cierre el diafragma. La utilización de diafragmas muy abiertos, f/5.6 o inferiores, para garantizar un tiempo de exposición corto e imágenes no trepidadas, no es recomendable en la medida en que generará una apreciable pérdida de nitidez en amplias zonas de la imagen, pudiendo hacerlas inservibles para la reconstrucción fotogramétrica. En definitiva, se trata de un proceso en el que hay que encontrar un equilibrio entre las circunstancias de la sesión de captura y el equipo disponible, y la necesidad de obtener imágenes enfocadas, no trepidadas, bien iluminadas y con una adecuada profundidad de campo.

El software que procesa las imágenes es clave para alcanzar los resultados esperados. En los últimos años han predominado dos programas: *Agisoft PhotoScan*, o *Metashape*, su nombre actual, y *Reality-Capture*. En ambos casos, los resultados son brillantes, permitiendo la obtención de nubes de puntos extremadamente densas, mallas muy precisas y texturas fotográficas de alta resolución. Ninguno de los dos productos tiene un precio económico, pero en ciertos tipos de licencia el software suministrado por Agisoft es más asequible, por lo que posiblemente sea más popular en la actualidad. Por su parte, *Reality-Capture* parece ofrecer un rendimiento superior y la capacidad de integrar en un único procesado tanto los datos procedentes de escáneres láser como de capturas fotogramétricas.

Un modelo 3D fotogramétrico puede alcanzar niveles de resolución elevadísimos; dependerá de la longitud focal de la lente utilizada durante el escaneado y del tamaño del sensor de la cámara. Con una lente macro, o incluso micro, se pueden realizar levantamientos fotogramétricos de objetos o detalles realmente pequeños, de escala milimétrica o submilimétrica. Por lo tanto, no existe un límite de antemano en la resolución fotogramétrica, como ocurre con los modelos 3D generados por escáneres. Otra de las grandes ven-

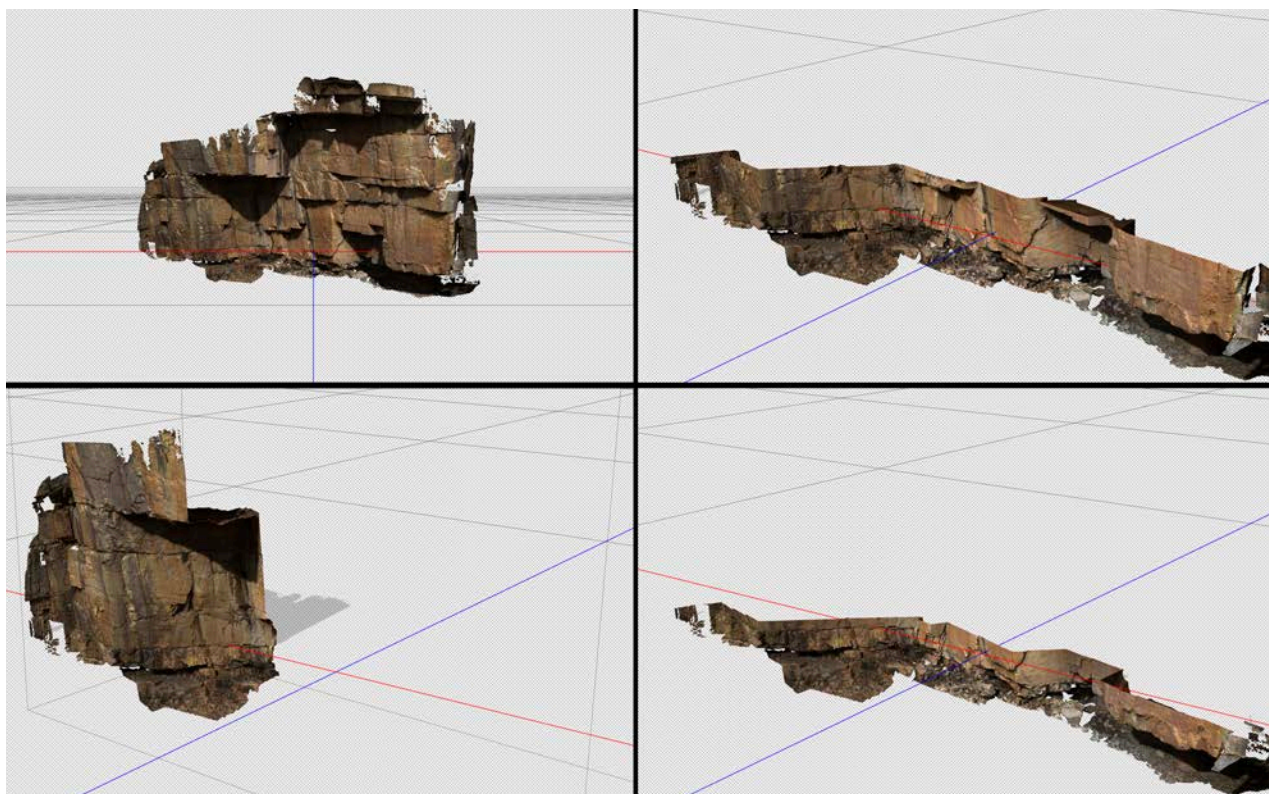


Figura 5. Modelo 3D del Canchal de las Cabras Pintadas (La Alberca, Salamanca), realizado en 2019, y planta y alzados generados a partir de él en *Adobe Photoshop*.

tajas de la fotogrametría es que, dado que el volumen del objeto se escanea a partir de fotografías, la textura fotográfica resultante puede tener una elevadísima resolución. Su calidad, obviamente, será dependiente de la calidad de las propias imágenes. Por este motivo, es crucial controlar algunos de los aspectos indicados previamente, como ausencia de trepidación, nitidez general, o incluso valores como los de la acutancia (Pereira, 2017), que determina el grado de contraste entre píxeles contiguos que difieren en su luminancia.

El resultado final del modelado 3D lo constituirá una nube de puntos densa, una malla geométrica y una textura fotográfica. El tamaño de la nube de puntos, pero sobre todo el de la malla, determinarán la manejabilidad del modelo. Con frecuencia es necesaria reducir la malla para poder moverla con comodidad en un ordenador de prestaciones medias. La nube de puntos puede dar lugar a procesos de filtrado en función de diversos parámetros, como el color RGB, algo habitual en el manejo de escaneados de espacios cubiertos de vegetación. El mismo concepto se ha empezado a aplicar ya para clasificar las nubes de puntos de paneles pintados y grabados, e incluso a incrementar la distancia colorimétrica entre ellos enfatizando así las áreas con pinturas (Cerrillo, Ortiz y Martínez, 2013), de modo análogo a la función que cumple en la actualidad *DStretch*. El filtrado de una nube de puntos densa puede convertirse progresivamente en una alternativa al calco digital, que, como veremos más adelante, tienden a generarse a partir de las texturas fotográficas fotogramétricas, ya sea en modo ortofoto o, en ocasiones, como ortofotos adaptativas.

La información que se deriva de un modelo 3D sustituye con ventaja algunas de las tareas más tediosas de la documentación tradicional. Por ejemplo, la obtención de plantas y alzados de cuevas y abrigos podía suponer horas de trabajo de campo, en ocasiones con precisión muy baja. En la actualidad, generar estas secciones es sencillo; basta con producir el modelo digital de elevaciones y una ortoimagen, sobre las que se puede calcular planta y alzado con la precisión milimétrica del modelo 3D (fig. 5). Esta aproximación también es muy eficaz para el estudio de la técnica de los grabados.

2.3. Fotografía gigapíxel

Otro producto de síntesis es la imagen gigapíxel, que también se basa en la obtención de series de fotografías que posteriormente son fusionadas mediante software. Utiliza los principios de *computer vision*, y algoritmos que identifican homografías entre la matriz de imágenes. La principal diferencia es que la imagen gigapíxel se suele basar en la captura de un mosaico regular de fotografías, en el que los desplazamientos son calculados gracias a cabezales robóticos, ya sea de tipo rótula nodal, o de tipo *slider* motorizado. En ambos casos, sobre el cabezal robótico se instala una cámara réflex digital con una lente determinada, por lo general, con una focal elevada, que puede llegar a 600 mm, o a resoluciones de fotografía macro. Tras calcular el punto de no paralaje, se configura la posición de las dos esquinas opuestas de la escena a capturar, y se programa el campo de visión y el nivel de solape entre imágenes, entre otros parámetros; a partir de ese momento el cabezal robótico inicia la captura secuencial de fotografías hasta cubrir toda la superficie. Software como *PTGui*, *Hugin* o el propio *Adobe Photoshop* se encargan de realizar la fusión o cosido de decenas, centenares o millares de fotografías para generar una imagen continua de elevadísima resolución, normalmente por encima de 1 Gb y con frecuencia superando los 10 Gb. Esta técnica posibilita, por lo general, un nivel de detalle de la imagen superior al que se obtiene de una fotogrametría, por lo que constituye un recurso complementario con diversas utilidades.

La fotografía gigapíxel puede ser usada como técnica exploratoria para cubrir un panel en su integridad a muy alta resolución (Ruiz, 2019), lo que en combinación con *DStretch* (Quesada y Harman, 2019) posibilita la identificación de restos pictóricos que en una documentación tradicional dependerían de que el investigador hubiese observado y fotografiado la figura *in situ*. Otro uso de la fotografía gigapíxel es el registro individual de motivos parietales a escala macro, lo que puede servir para la identificación de marcas de útiles. Las tomas realizadas con cabezales robóticos nodales tienden a tener distorsiones hacia los extremos de la zona registrada, conforme el ángulo del plano focal se incrementa; por este motivo, puede ser conveniente fijar referencias lineales mediante marcadores adheridos a la pared, o con niveles láser autonivelantes con proyección en cruz, de modo que durante el procesado se pueda corregir la distorsión de la proyección mediante la referencia a dichas líneas rectas.

La fotografía gigapíxel se puede usar para realizar panorámicas de las vistas desde la estación y de los parajes en los que se enclavan. Los cabezales robóticos pueden ser empleados también para la realización de fotografías esféricas, un tipo de imagen de síntesis que permite percibir las relaciones de la estación con su entorno. Este tipo de productos son muy útiles a nivel divulgativo, de modo individual o formando parte de recorridos virtuales.¹

2.4. La documentación digital del color

La segunda dimensión básica del arte rupestre es el color. Tradicionalmente, se limitaba a una descripción subjetiva del color percibido por el investigador mediante terminologías ambiguas como rojo vinoso, rojo claro, castaño azulado... Estas imprecisas descripciones fueron progresivamente reemplazadas por referencias a diversas cartas de color estandarizadas. Durante la década de 1970 comenzaron a utilizarse las cartas de color *Pantone*, una colección de muestras de color desarrollada para la industria gráfica. Unos años después, ganó popularidad la *Munsell Soil Color Chart*, un sistema usado principalmente por geólogos para describir los colores del suelo. Las *Munsell* tenían ventajas evidentes sobre las *Pantone*, al estar basa-

1. http://parqueculturalriovero.com/images/virtual/Recorrido_Virtual_PCRV.html

das en un espacio de color tridimensional con tres ejes: tono, luminosidad y saturación. En ambos casos podían reemplazar con éxito a las denominaciones subjetivas, ya que permitían una referencia precisa a un color estandarizado. No obstante, los dos sistemas presentaban un problema básico; constituyen muestras discretas de espacios de color continuos, por lo que la precisión de su descripción es baja. El observador del color de una pintura rupestre lo aproxima al más similar según las cualidades de su sistema de visión, la iluminación y otras variables psicoperceptuales. En definitiva, no constituyen un medio a través del cual se pueda lograr una descripción colorimétrica objetiva independiente del observador (Ruiz y Pereira, 2014).

La tecnología digital trajo consigo procedimientos de restitución del color de una imagen fotográfica, a partir de la introducción de una carta de color en la escena capturada. El primero en popularizarse fue el desarrollado por Robert Bednarik, que fue distribuido como *IFRAO Standard Scale*. Esta carta de color ha tenido un éxito tremendo, y no exclusivamente en arte rupestre, debido a su distribución gratuita y a la promesa de poder restituir los colores con fidelidad al original. La escala IFRAO cuenta con una escala de color con cuatro colores (rojo, verde, amarillo y azul), y una escala densitométrica de tres muestras. La escala cuenta además con una medida de 10 cm para ser usada como escala en las imágenes (Bednarik, 1994). Pese al flujo de trabajo descrito para la restitución del color (Bednarik y Seshadri, 1995), en realidad, su utilidad es muy limitada. Diversos autores han señalado la imposibilidad de gestionar adecuadamente el color de las imágenes (Echevarría, 2009; Mark y Billo, 1996) a través de dicho flujo de trabajo, calificando su uso como «*a false sense of security*». Más recientemente, se han descrito detalladamente las inconsistencias ligadas a su impresión en cuatricromía, la incidencia de fluorescencia UV causada por agentes fluorescentes blanqueantes del cartón, y valores colorimétricos fuera del espacio sRGB (Pereira, 2013c), problemas que se agravan por la utilización de cartas deterioradas por el uso, plastificadas o que fueron impresas en impresoras caseras.

La documentación del color en la era digital se puede realizar por diferentes procedimientos que garantizan la precisión y reproducibilidad de las medidas en un determinado espacio de color. El más preciso es el uso de espectroradiómetros o espectrocolorímetros, y, por tanto, debería considerarse el estándar en las mediciones colorimétricas de arte rupestre. Pueden ser de contacto o sin contacto, y, por lo general, emiten una luz calibrada que permite caracterizar una muestra de color dentro de un espacio de color triestímulo, semejante al sistema de visión humana. Estos dispositivos tienen un precio elevado, por lo que su uso para la caracterización del color en arte rupestre ha sido escaso (Martínez y Guillem, 2012; Ruiz y Pereira, 2014).

La alternativa más viable en la actualidad es la medición del color a través de fotografías tomadas en condiciones de luz controlada, y con su color y densitometría gestionadas a través de un flujo de trabajo adecuado (Pereira, 2013a; 2013b; 2013d). Mantener una iluminación coherente y constante desde el punto de vista colorimétrico supone contar con fuentes de luz con un CRI (*colour rendition index*) superior al 95 %, con iluminante estándar (D50 ó D65), y una constancia de color y potencia lumínica elevada. En la actualidad, tanto los paneles LED, como los flashes pueden cumplir la mayor parte de estos requerimientos. La colorimetría y el ajuste tonal se basarán en la inclusión en la escena de una carta de color estándar profesional, como *X-Rite ColorChecker Passport*, o *QP Card 203*. Estas cartas de color tienen parches colorimétricos basados en pigmentos uniformes y bien caracterizados. También incluyen parches en escala de grises para calibrar los ajustes tonales y el balance de blancos. Una imagen de la carta de color al principio de una sesión con luz constante es suficiente para generar una gestión de color adecuada de todas las fotografías tomadas con las mismas condiciones. El color medido en las imágenes gestionadas se aproxima a los valores de un espectrofotómetro de mano, en valores indiscernibles para el ojo humano, es decir, con una diferencia $\Delta E \leq 3$ (Ruiz y Pereira, 2014).

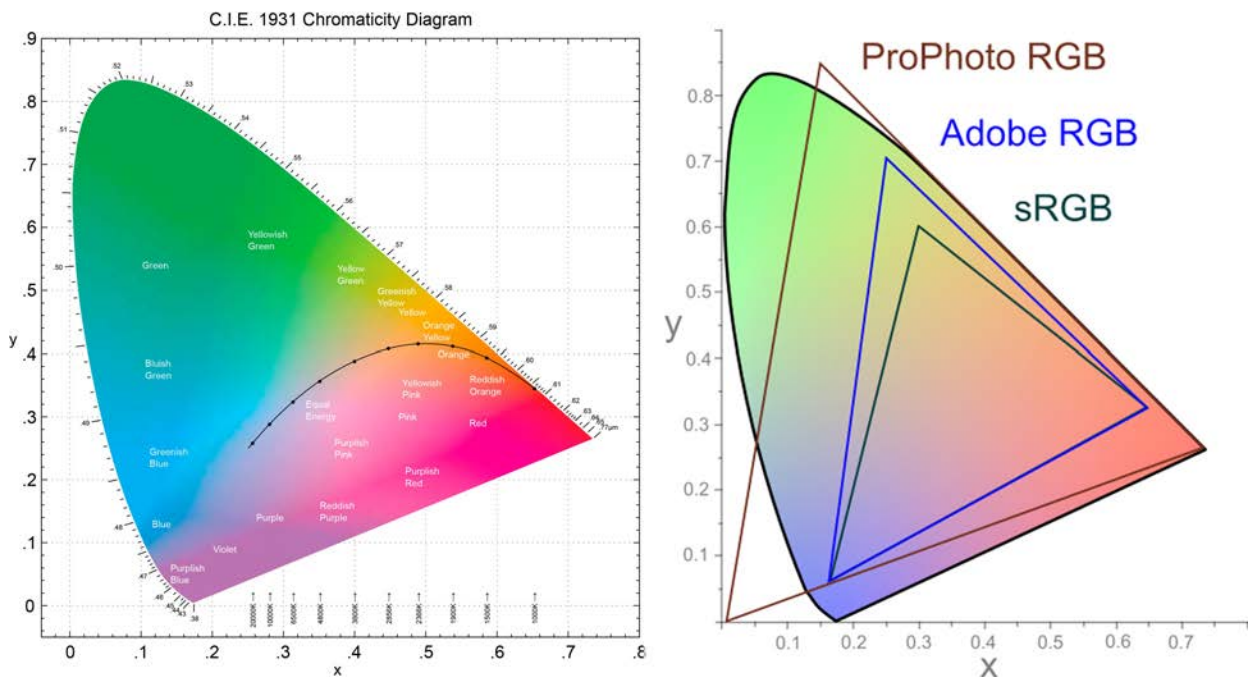


Figura 6. Comparación entre el espacio de color CIELAB, y las gamas de color del espacio RGB dependiente de dispositivo. Fuente de los gráficos: <https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>, y <https://design.tutsplus.com/es/articles/advanced-color-theory-what-is-color-management--cms-26307>.

Cualquiera de estos procedimientos para la medición colorimétrica digital debe ser entendida e interpretada dentro del espacio de color al que se refiere. El sistema de visión humana fue caracterizado a través del modelo cromático CIELAB, también conocido como CIE 1976 $L^*a^*b^*$, basado en el espacio CIE 1931 XYZ. Este espacio de color tridimensional trata de linealizar las diferencias de color que puede percibir el ojo humano. CIELAB se representa en un espacio tridimensional, que obedece a su naturaleza triestímulo, en el que sus valores tienen unas coordenadas XYZ, en el que L representa la luminosidad (de negro a blanco), A abarca las coordenadas de colores de verde a rojo (+a indica rojo, -a indica verde), y B las coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul). No es un espacio de color dependiente de dispositivo, lo que lo hace útil para describir la colorimetría medida según la percepción humana. Por el contrario, los espacios de color digitales con los que operan los sensores de imagen son dependientes de dispositivo. Este es el caso del espacio de color CMYK, destinado a dispositivos de impresión, y de RGB, del que existen diversas implementaciones como sRGB, Adobe RGB, ProPhotoRGB. Una cámara digital captura el color a través de un sensor en el que la luz incidente es descompuesta en sus tres componentes primarios: rojo, verde y azul (*Red, Green* y *Blue* en inglés).

Ninguno de los espacios de color RGB pueden reproducir la totalidad de la gama de colores perceptibles para el ojo humano; por ejemplo, el espacio Adobe RGB está limitado a aproximadamente un 50 % del espacio CIELAB. Los valores RGB se representan de acuerdo con la capacidad de reproducción cromática de un dispositivo (fig. 6). De este modo, el mismo color rojo podrá verse de manera distinta en distintas pantallas, proyectores o cámaras digitales. Por este motivo, los valores RGB no son adecuados para describir el color de una pintura o grabado rupestre.

La colorimetría en arte rupestre debería referirse al espacio CIELAB, y comunicarse a través de sus coordenadas cromáticas (Ruiz *et al.*, 2018a; Ruiz *et al.*, 2018b). Existen propuestas de descripción de es-

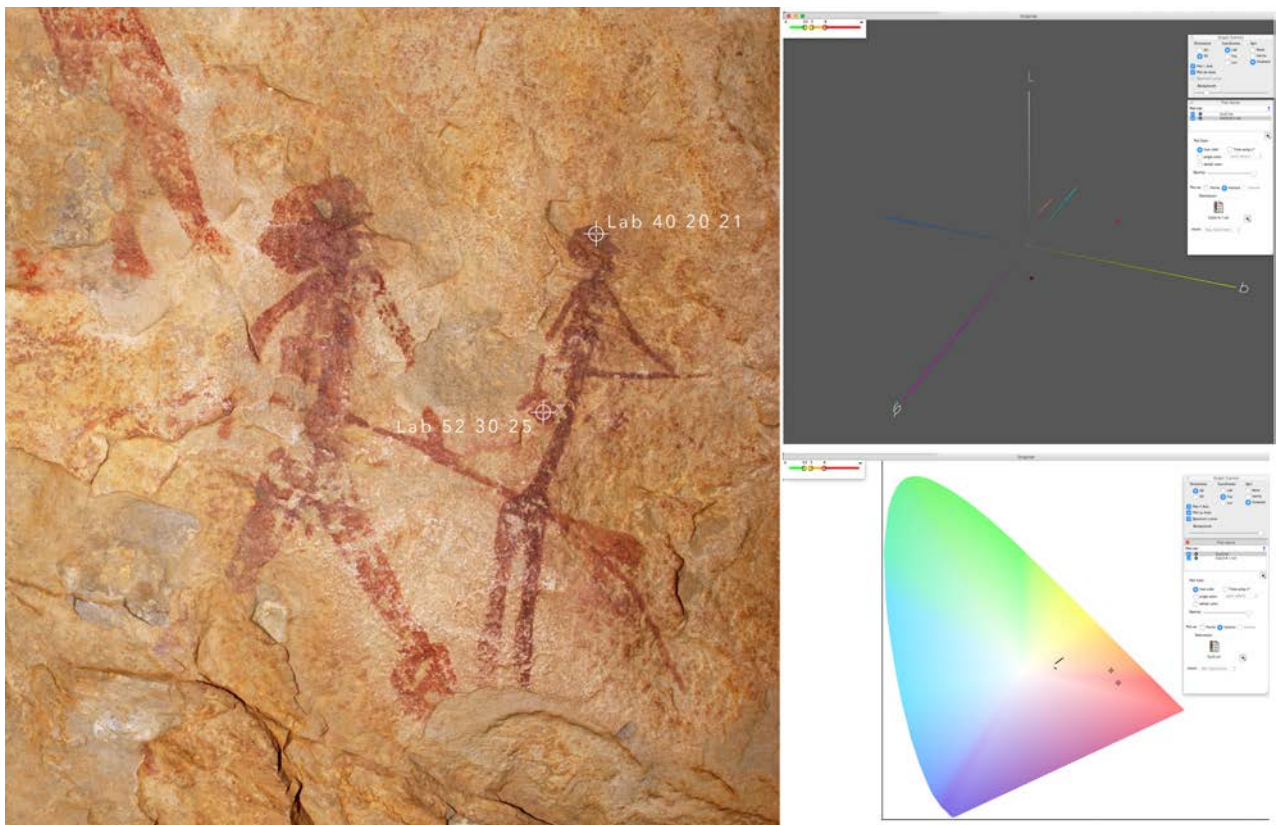


Figura 7. Ejemplo de medición del color en el espacio CIELAB sobre pictografías levantinas procedentes de Cova dels Rossegadors (La Pobra de Benifassà, Castellón). En el *software ColorThink Pro* las mediciones sobre una figura se pueden mostrar como un segmento, o las medidas únicas como un punto en el espacio Lab 3D (arriba derecha). Alternativamente, se pueden mostrar sobre la representación bidimensional del espacio de color CIELAB.

tos valores CIELAB que otorgan denominaciones fácilmente comprensibles (no basadas en percepciones subjetivas) a las distintas regiones del espectro visible. Es decir, en base a estas coordenadas podríamos indicar la existencia de un color rojo, rojo anaranjado o rojo violáceo a partir de un cálculo de la distancia a unas coordenadas concretas en valores ΔE , y en función del elipsoide considerado aceptable alrededor de esas coordenadas. La comunicación de estos valores colorimétricos debería realizarse con las tres coordenadas $L^*a^*b^*$, acompañada de su descripción, y, la localización del punto de medida en la pintura.

La documentación del color del arte parietal puede ser usada también para medir su degradación. Valores medidos con los parámetros indicados previamente pueden servir para estimar el deterioro a lo largo del tiempo, uno de los criterios de monitorización que establecimos en las diferentes ediciones de los proyectos «4D · arte rupestre» (Ruiz, Quesada y Pereira, 2019; Ruiz *et al.*, 2016b). También se puede hacer una estimación del deterioro sufrido por una pintura atendiendo a la distancia ΔE entre las zonas de pintura mejor conservada y las más degradadas. Diferentes programas informáticos permiten esta valoración; en el caso concreto del *software ColorThink Pro* estas distancias se pueden visualizar en un gráfico tridimensional en el que resulta fácil percibir intuitivamente la relación directa entre la degradación de la pintura y la longitud del segmento entre dos puntos en el espacio CIELAB (fig. 7); no obstante, esta misma distancia también puede estar relacionada con cuestiones técnicas como la densidad de la materia pictórica. La misma metodología puede ser usada para representar en un gráfico 3D o incluso en un diagrama ternario la proximidad o lejanía colorimétrica entre las pinturas de una estación o de diferentes estaciones. La precisión de estas informa-

ciones es directamente dependiente de la precisión de las medidas efectuadas, por lo que es estrictamente necesario documentar y publicar las condiciones de documentación a partir de los que se han obtenido los valores colorimétricos, y, en su caso, los procesos de gestión del color y de control de calidad seguidos.

2.5. La documentación digital de las marcas de realización

Las técnicas digitales también posibilitan el estudio de la técnica de realización de pinturas y grabados. La fotografía macro y micro permiten capturar información significativa de las marcas de útiles (inicio y final de trazo), de la anchura de línea, de las huellas de pelos de pinceles, de los surcos y estrías de los útiles líticos, de la direccionalidad de la línea o de la superposición entre líneas grabadas o pintadas (Rivero, 2007; 2015; Ruiz, 2006; 2011).

La principal herramienta para ello son los microscopios digitales. Los más usados son los *Dino-Lite*, que, en sus distintas versiones, permiten el análisis in situ de las marcas de útiles y su visualización en portátiles, e incluso en *tablets* y *smartphones* (Boyd y Cox, 2016). Una alternativa la constituyen los sistemas *X-Loupe* (Hernanz *et al.*, 2018), que acoplan a una cámara compacta un sistema de lentes micro con una serie de luces LED que se pueden conmutar para favorecer la dirección más adecuada de la luz. La utilización de microscopios ópticos con cámaras digitales acopladas produce imágenes de gran calidad a lo largo de todo el rango de ampliación, pero su manejo y transporte entrañan una notable dificultad, debido a su peso, y al del trípode requerido para su uso (Ruiz, 2006)

La utilización de la técnica de *focus stacking* ha permitido mejorar notablemente algunas de las dificultades asociadas a la macro y microfotografía. Este tipo de fotografía presenta habitualmente problemas de profundidad de campo; el *focus stacking* viene a solucionar este punto mediante la fusión de una serie de fotografías tomadas en distintos planos focales, dando como resultado una imagen de síntesis totalmente enfocada. *Software* especializado como *Helicon Focus* o *Zerene Stacker* producen la fusión de las imágenes e incluso pueden calcular los pasos necesarios para conseguir el enfoque entre los puntos más alejado y más cercano. Algunas cámaras digitales comienzan a contar con esa funcionalidad como es el caso de la recientemente aparecida Canon EOS RP.

El estudio de las marcas dejadas por útiles líticos también se puede llevar a cabo a partir de los modelos digitales de elevaciones de un modelo 3D. En este caso, se pueden extraer secciones y perfiles de las líneas dejadas por el útil en diferentes puntos, de modo que se puedan obtener sus características técnicas, e incluso compararlas con los producidos en reproducciones experimentales (Ruiz *et al.*, 2019).

3. Tecnologías digitales para la visualización y análisis de arte rupestre

En el caso de las pictografías, su coloración suele estar degradada como consecuencia de procesos de alteración naturales o por efecto de la acción antrópica. Por tanto, uno de los principales objetivos de la investigación arqueológica ha sido superar la limitación en la perceptibilidad de los registros gráficos para posibilitar su comprensión e interpretación. Las tecnologías digitales han contribuido a resolver este problema en la documentación de pinturas rupestres incrementando la visibilidad de los registros. Dos vías alternativas han impactado fuertemente en la investigación, partiendo de presupuestos diferentes, pero alcanzando resultados en cierto modo similares, lo que con frecuencia ha llevado a una confusión entre ellas: *DStretch*, con tratamientos digitales basados en técnicas de *decorrelation stretch*, y la imagen multi/hiperespectral.

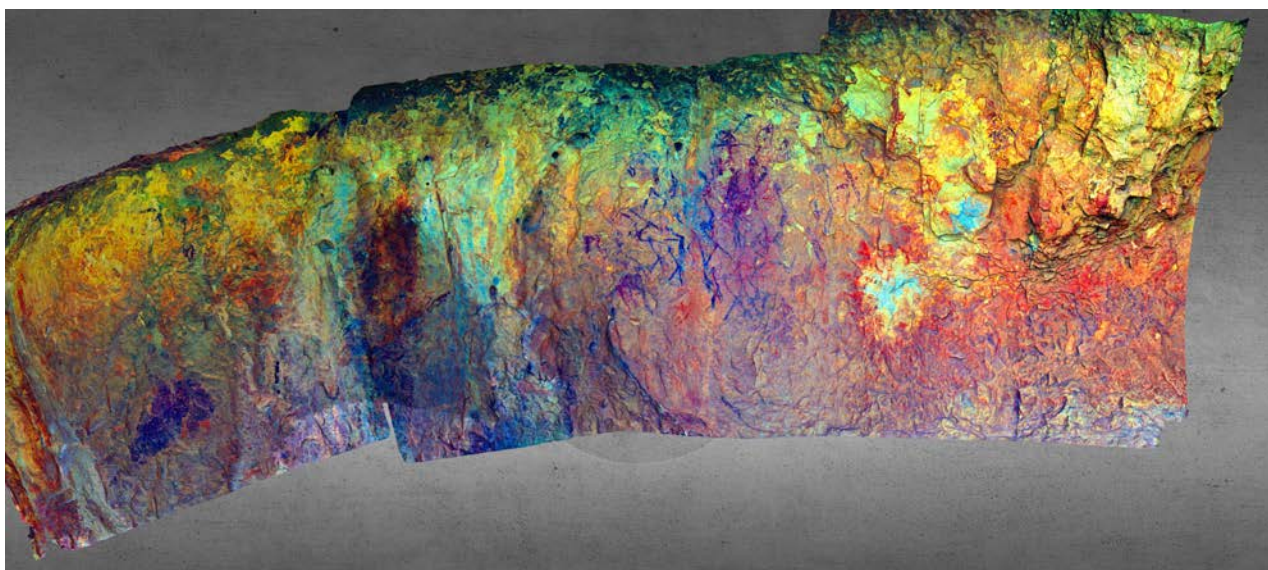


Figura 8. Modelo 3D de Coves del Civil texturizado con la versión tratada en *DStretch* de su textura fotográfica de alta resolución.

3.1. DStretch

La aplicación de técnicas simples de retoque digital mejoró sustancialmente la visibilidad de los registros gráficos, pero exigía ciertos conocimientos sobre espacios de color, y sobre las posibilidades y funcionamiento de programas como *Adobe Photoshop*. A partir de 2005 se inició una verdadera revolución en este sentido, de la mano de *DStretch*, un *plugin* desarrollado para *ImageJ* (Harman, 2008; Quesada, 2008), que ofrecía una alternativa rápida y sencilla que mejoraba los anteriores procedimientos de retoque fotográfico. *DStretch* brinda unos resultados espectaculares con sólo apretar un botón, de modo totalmente transparente al usuario, pese a la complejidad del tratamiento de imagen que se aplica. Este software se basa en la técnica de teledetección conocida como descorrelación de espacios de color, desarrollada para el análisis de imágenes satelitales, consiguiendo mejorar el contraste entre fondo y figura de manera que la distribución de áreas pigmentadas se haga mucho más evidente al observador.

El software parte de la matriz RGB de una fotografía digital para realizar la descorrelación de la imagen. El algoritmo usado se basa en la aplicación de la transformada de Karhunen-Loeve, una técnica estadística multivariante análoga al análisis estadístico de componentes principales (Harman, 2008), que realiza la diagonalización de la covarianza o de la correlación de la matriz de colores dentro de un determinado espacio de color. A partir de ella, el contraste de los colores es enfatizado para ecualizar sus varianzas, lo que permite su descorrelación y expansión a la totalidad del nuevo espacio de color creado. De todo ello se obtiene una imagen con nuevos ejes directores y un número menor de variables, facilitando la comprensión de los distintos grados de correlación entre ellas. Por último, la transformada inversa es aplicada para devolver los colores a un tono más próximo al original en el espacio de color RGB, produciendo una imagen en falso color que mejora sustancialmente la visibilidad de las pictografías (Ruiz López *et al.*, 2018a: 98).

Su popularización y el gran número de publicaciones realizadas sobre el mismo en los últimos años nos exime de entrar en mayores detalles y en glosar su evidente utilidad (Caldwell y Botzjoorns, 2014; Le Quellec *et al.*, 2013). Las imágenes en falso color generadas por este software se han aplicado con éxito también para enfatizar grabados, y están en la base de la mayor parte de flujos de trabajo tendentes a la obtención de un calco digital, incluyendo texturas de modelos 3D (fig. 8) y fotografías gigapixel.

Es indudable que su utilización ha facilitado tremendamente la labor de los investigadores y ha contribuido a descubrimientos notables. Pero también lo es que su uso acrítico ha generado más de un fiasco en forma de identificación abusiva, lo que es obviamente responsabilidad de los investigadores y no del software. Sus recientes versiones para *smartphone* y *tablet* lo convierten en una herramienta utilísima para el trabajo de campo y la observación de arte rupestre de forma rápida, sencilla y eficaz, cuya utilidad en trabajos de prospección es más que evidente.

3.2. Imagen multi/hiperespectral

El término imagen multiespectral o hiperespectral se refiere a la obtención de una imagen final clasificada en función del comportamiento espectral de los objetos incluidos en la escena fotográfica. La obtención de estas imágenes parte del entrecruzamiento de dos procesos distintos: el de captura, y el de procesado y análisis multi/hiperespectral; el primero se basa en un dispositivo capaz de capturar una región del espectro electromagnético en bandas discretas o de modo continuo (hiperespectral), mientras que el segundo hace referencia al software que es capaz de transformar la información espectral captada por cada píxel del sensor en una imagen clasificada en la que se refleja la caracterización espectral por píxel de la escena.

El concepto de imagen multiespectral nace ligado a la fotografía de satélite destinada a la observación terrestre producida mediante sensores que capturaban diversas longitudes de onda del espectro, usualmente en las regiones del rojo (700-800nm), verde (520-600nm), azul (450-520nm) y del infrarrojo cercano (NIR - Near Infrared 800-1100nm). Estas imágenes eran posteriormente registradas entre sí para conformar un cubo de imágenes en el que cada píxel reflejaba su respuesta espectral en las diferentes bandas capturadas. En la actualidad, este tipo de fotografía se aplica al estudio del arte rupestre como extensión de la fotografía ultravioleta e infrarroja, tan frecuente en el mundo analógico, y con la intención de obtener una primera caracterización espectral del comportamiento de los materiales que se integran en el sistema rupestre, posibilitando el análisis de alteraciones, o la clasificación de compuestos pictóricos. La respuesta espectral registra la interacción de la materia con la radiación electromagnética por medio de una curva espectral (o espectro), característica de cada material, que recoge la cantidad de luz emitida, reflejada o transmitida por ese material. Dos de las magnitudes físicas que mide la fotografía multi/hiperespectral son la radiancia, que mide la propagación de la radiación por el espacio o a través de los materiales, y la reflectancia, que registra la intensidad de la luz reflejada por un material en relación a la intensidad de la luz incidente. Las variaciones de reflectancia son las que usualmente se registran en los espectros que caracterizan el comportamiento espectral de un material.

En la actualidad, la fotografía multiespectral se realiza mediante sensores específicos sensibles a la radiación entre 350-400 nm (NUV) y 1000-1100 nm (NIR). No obstante, también se puede realizar con cámaras réflex convencionales, aprovechando la sensibilidad de la mayor parte de los sensores digitales a longitudes de onda entre aproximadamente 380 y 950 nm, tras eliminar los filtros que limitan la sensibilidad de los sensores a longitudes de onda en el rango de la luz visible (\approx 400-700 nm). En ambos casos, las cámaras se equipan con objetivos que carezcan de tratamientos bloqueantes de UV e IR, entre las que destacan las carísimas lentes de fluorita, y con un sistema de filtros de paso que bloquean el paso de radiación electromagnética excepto en una estrecha banda. Por lo general, no se emplean más allá de 5-10 bandas. Usualmente, se usa la luz solar como fuente de energía, pero en ocasiones también se recurre a fuentes de energía de un rango espectral determinado, por ejemplo, ultravioleta o infrarroja.

En el caso de la imagen hiperespectral, el número de bandas se incrementa notablemente hasta centenares o millares, con una anchura de unos pocos nm. Esto permite una caracterización espectral mucho más precisa. Este tipo de dispositivos capturan bandas monocromáticas con las que componen un cubo de imágenes. La mayoría de los sensores hiperespectrales abarcan el rango del ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano, dadas las dificultades físicas para incorporar en el mismo sensor longitudes de onda más allá del NIR. Estos sensores pueden ser de tipo lineal, que capturan la información secuencialmente en una anchura de aproximadamente un píxel de todas las bandas, o de área que capturan una imagen completa de la región cubierta por la óptica de la cámara. Al igual que con la hiperespectral, la iluminación solar o iluminación específica es necesaria para medir la reflectancia de los materiales.

El conjunto de las imágenes multi o hiperespectrales componen un cubo de imágenes, en el que cada píxel contiene la información de las bandas capturadas, produciendo un espectro característico de ese material. El procesado de la información espectral permite finalmente generar imágenes clasificadas en falso color, que ofrecen información continua sobre la distribución de los materiales existentes en la escena. Análisis estadísticos, como el ACP, y técnicas como el *decorrelation stretch* son usadas habitualmente para la clasificación de la información (Cerrillo y Sepúlveda, 2015; Rogerio-Candelera, 2014).

Las posibilidades brindadas por estas técnicas son muy grandes, pero hay una serie de cuestiones que es necesario tener en cuenta desde el principio. El diferente plano focal de cada una de las bandas registradas puede dificultar notablemente conseguir una imagen final adecuadamente enfocada. Algunos dispositivos ya cuentan con correcciones de esta problemática, dado lo dificultoso que resulta su enfoque manual. Por otro lado, es necesario tener en cuenta los efectos que la dispersión, absorción y reflectancia pueden tener sobre la capa de pigmento, que en el caso del arte rupestre puede ser bastante heterogénea, y presentar una notable continuidad espacial. La imagen multispectral suele tener un bajo rendimiento en la caracterización de pigmentos basados en óxido de hierro, sobre todo en tonos rojos claros, debido al comportamiento espectral de este tipo de materiales. Estos pigmentos tienen una absorción elevada en las bandas entre 400-600 nm y una reflectancia acusada por encima y hasta 800 nm. En las bandas del NIR estos pigmentos reducen sus niveles de energía, que vuelven a elevarse por encima de 1200 nm. En consecuencia, los pigmentos de óxido de hierro tienden a ser transparentes en el infrarrojo cercano, ya que la radiación NIR penetra la capa de estos pigmentos, por lo que se puede registrar la información existente en capas más profundas. Si a ello unimos la posibilidad de que el sustrato sea rico en óxidos de hierro, como ocurre con frecuencia en arte rupestre al aire libre, la definición de una clase para estos pigmentos puede no ser lo suficientemente precisa.

El software destinado a este tipo de análisis está en permanente evolución, abarcando desde el software gratuito, como *MultiSpec* o *HyperCube*, hasta el suministrado por algunos fabricantes de cámaras, o las herramientas dedicadas con las que cuentan sistemas de información geográfica como *QGis* o *ENVI*.

4. Reproducción digital de arte rupestre. El calco

Desde los comienzos de la era digital se emplearon las técnicas de retoque fotográfico para mejorar la visibilidad de las pictografías y grabados, y posibilitar su aislamiento respecto al fondo o soporte mediante técnicas avanzadas de selección de áreas de color. Sobre esta base se desarrollaron dos estrategias de trabajo: el calco aditivo, que progresivamente va seleccionando las áreas identificadas como correspondientes al registro gráfico (López-Montalvo, 2011), y el calco sustractivo, en el que se seleccionan áreas

del soporte que progresivamente se van eliminando hasta quedar exclusivamente las correspondientes al pigmento (Maura y Cantalejo, 2005).

Este tipo de calco digital se desarrolló sobre la base conceptual de los calcos indirectos elaborados a partir de fotografías impresas o de diapositivas proyectadas, llegando incluso a imitar el efecto de punteado típico de los calcos analógicos (Domingo y López-Montalvo, 2002). Es evidente que supusieron una mejora notable de resultados, con una mayor objetividad, y un aumento de la reproducibilidad, que se fueron incrementando conforme mejoraron las cámaras digitales y el propio software de retoque digital, por lo general *Adobe Photoshop*. Al mismo tiempo, las posibilidades de corrección de las distorsiones de la imagen nos enfrentaron a la simplificación con la que habitualmente nos enfrentábamos al objeto rupestre; por un lado, se asumía el concepto calco, históricamente derivado del calco directo en contacto con la superficie rocosa, y, en consecuencia, libre de distorsiones geométricas, al menos a nivel de motivo individual. Pero ningún calco basado en fotografías, analógicas o digitales, está libre de distorsiones; es muy común asumir que la fotografía es una reproducción fiel de la realidad, casi un facsímil, pero lejos de ser cierto, cualquier imagen fotográfica sufre de distorsiones que la alejan de la realidad captada. Todos los cuerpos de cámara y lentes tienen aberraciones geométricas que es necesario corregir mediante software para eliminar las distorsiones de tipo barril o cojín, o las aberraciones cromáticas. La propia perspectiva de la imagen determina la apariencia de los motivos, por lo que siempre se recomendó posicionar la cámara ortogonalmente al panel, algo que no siempre es fácil o posible. Tenemos que ser conscientes de que los «calcos digitales» en realidad no son calcos, dado que no derivan del contacto directo con el panel, y que sin correcciones de las distorsiones de la imagen difícilmente podrán ser considerados reproducciones fidedignas del grafismo documentado. Por otro lado, se trata de proyecciones cónicas bidimensionales de una realidad tridimensional. Las posibilidades actuales de capturar la tercera dimensión han acelerado el desarrollo de metodologías que se aproximan a la del calco directo sobre modelos 3D (Feruglio *et al.*, 2015) o que, en su defecto, permiten una integración absoluta de la reproducción digital sobre su malla geométrica (Domingo *et al.*, 2013) o textura.

La metodología de reproducción digital a partir de la textura de alta resolución de un modelo fotogramétrico la hemos aplicado en los últimos años a diferentes enclaves con pinturas rupestres que incluyen desde arte paleolítico hasta la decoración policroma de la Cueva Pintada de Gáldar, pasando por sitios con arte levantino y esquemático (Ruiz *et al.*, 2018a; Ruiz *et al.*, 2016a) (fig. 9). Esta metodología permite una integración directa de las reproducciones digitales de los registros gráficos en los modelos 3D, utilizando para ello la textura generada en modo ortofoto u ortofoto adaptativa. Estas dos proyecciones son las más adecuadas ya que garantizan una menor distorsión de los motivos pintados o grabados. No obstante, en cavidades con un elevado nivel de concavidad o complejidad geométrica esa distorsión puede ser demasiado acusada para permitir una lectura correcta de los grafismos en una ortofoto. En estos casos, puede ser más adecuado recurrir a la ortofoto adaptativa, que divide la textura en fragmentos ortogonales; esto supone que, en ocasiones, los grafismos pueden aparecer fragmentados, lo que puede dificultar considerablemente el proceso de lectura e identificación de grafismos.

Tras su exportación desde el software fotogramétrico, la textura se abre en un programa de edición de imágenes, donde será manipulada hasta alcanzar la reproducción digital de la totalidad de la estación, o panel. El primer paso suele ser el tratamiento *DStretch* de la totalidad del archivo. Esto permite disponer de un modelo 3D con textura *DStretch* tras su reimportación al software fotogramétrico, algo muy útil para explorar la disposición de los registros gráficos. Ese tratamiento *DStretch* puede ser usado para iniciar el proceso de calco, pero también se puede hacer el recorte de una figura concreta para su tratamiento independiente en *DStretch*, mejorando las posibilidades de enfatizar el pigmento,



Figura 9. Reproducción digital de una serie de pictografías de Cañada de Marco (Ruiz *et al.*, 2016a) integradas en el modelo 3D fotogramétrico.

dado que los tratamientos de la totalidad de la textura pueden favorecer a determinados pigmentos frente a otros.

Las áreas seleccionadas para cada motivo son guardadas en una capa independiente, a las que se aplica el modo de transparencia multiplicar, incrementando la sensación de integración en el soporte. A continuación, son coloreadas con un único color, lo más próximo posible al color medido por los procedimientos descritos más arriba. La textura de base se puede colorear con un tono similar al natural, pero tratando de conseguir un contraste adecuado con la tonalidad de las pictografías o grabados que facilite su visualización.

Por último, una vez completada la reproducción y coloreado, la imagen se acopla y se guarda en formato .tiff. Se importa al modelo 3D en el software fotogramétrico, en nuestro caso *Metashape*, lo que produce un modelo 3D texturizado con la capa de reproducción digital perfectamente acoplada a su geometría. Este procedimiento se puede aplicar por igual a pinturas y grabados rupestres.

El modelo 3D texturizado con la reproducción digital se puede exportar en formato .obj, u otro formato 3D, para su renderizado posterior en *Blender* o en *Adobe Photoshop* con sus herramientas 3D. A este modelo 3D se le pueden importar texturas alternativas generadas por el procedimiento descrito anteriormente. La aplicación de efectos de iluminación, sombreado, perspectiva u ortogonalidad, etc... permite generar imágenes 2D de alta calidad en la que se resalta tanto el relieve de la roca como los grafismos.

La documentación de grabados también ha cambiado considerablemente gracias a la utilización de tecnología digital y modelos tridimensionales. Los grabados de surco ancho, piqueteados o cualquier técnica con cierta profundidad pueden ser visualizados con mayor facilidad aplicando iluminaciones



Figura 10. Modelo 3D renderizado en *Adobe Photoshop* del Canchal de las Cabras Pintadas I (La Alberca, Salamanca), texturizado con la reproducción digital obtenida a partir de su textura en formato ortofoto adaptativa generada en Agisoft Metashape.

virtuales rasantes en *Blender* o *Photoshop*; su modelo digital de elevaciones puede ser usado también para resaltar el relieve en un SIG con técnicas de *hillshading*, obteniendo resultados mejores cuanto más lisa es la roca (Floss *et al.*, 2018). Una alternativa muy útil es *XShade* que produce un sombreado poco realista, pero que enfatiza las líneas grabadas (Rusinkiewicz, Burns y DeCarlo, 2006), similar al que se obtiene con algunos *shaders* en el software *Meshlab*.

Para los grabados finos, típicos de momentos finales del Paleolítico superior, Mesolítico y Edad del Hierro se han experimentado diversas posibilidades. Una de las que ha demostrado su utilidad es el RTI (*reflectance transformation imaging*), una técnica que registra luces procedentes de diferentes direcciones para, una vez procesada la imagen sintética, producir iluminaciones virtuales en cualquier dirección y con varios tipos de mapeados (Mudge *et al.*, 2006), lo cual resulta útil para cualquier clase de grabados. Para la documentación del grabado inciso fino o poco profundo sigue siendo necesario utilizar iluminación rasante, por lo general con flashes. La captura tridimensional de conjuntos de grabados finos sobre soportes con geometrías complejas puede conllevar aplicar estrategias específicas, como la planteada recientemente para el caso de la cueva de Atxurra (Rivero *et al.*, 2019), en la que combinamos modelos 3D iluminados con luces rasantes específicas para cada figura o sector de figuras con un modelo 3D iluminado uniformemente de la totalidad del panel. Las texturas de los modelos 3D generados con luz rasante son usadas para dibujar la reproducción digital, mediante el empleo de pantallas táctiles y lápices digitales, siendo posteriormente procesados, iluminados y renderizados en *Blender* o *Photoshop*.

5. Preservación y divulgación

El impacto de las tecnologías digitales ha desbordado ampliamente la esfera de la investigación científica de los grafismos prehistóricos, adentrándose en terrenos que forman parte de disciplinas ajenas, como el diagnóstico y la conservación preventiva, o directamente en el ámbito de la difusión y democratización del conocimiento. Lo más positivo de todo ello es que la mayoría de esos objetivos paralelos se alcanzan a través de los productos digitales derivados de la documentación y estudio de arte rupestre. Por lo tanto, la revolución digital puede ser una herramienta decisiva para que nuestro objeto de estudio alcance el interés y reconocimiento social y, a través de ello, se logre mantener el suficiente número de acciones financiadas para garantizar su preservación para generaciones futuras y un nivel de la investigación acorde a su importancia cultural.

5.1. Tecnologías para la conservación

En el caso de la preservación, el empleo de tecnologías digitales ha permitido desarrollar sistemas eficaces de diagnóstico y monitorización que han permitido implantar políticas de conservación preventiva. El caso de los proyectos 4D · arte rupestre (Ruiz *et al.*, 2016b), desarrollado hasta la fecha en más de 20 localizaciones incluidas en el bien UNESCO Arte Rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica, ha sido paradigmático en este sentido. Partiendo de la aplicación de diversas tecnologías digitales se plantearon una serie de procedimientos de diagnóstico de las alteraciones detectadas, se definieron procedimientos de monitorización volumétrica y fisicoquímica a lo largo del tiempo, y con la información acumulada se han realizado intervenciones de conservación preventiva que han disminuido los riesgos de deterioro a corto y medio plazo (fig. 11). El diagnóstico se ha basado en la elaboración de mapas de alteraciones, en la identificación de puntos de riesgo mediante termografías, y en la caracterización fisicoquímica de las



Figura 11. Esquema conceptual del sistema de monitorización desarrollado y aplicado en el marco de los proyectos 4D · arte rupestre.

alteraciones. Una base de datos en la que se registran los procesos de alteración, y los factores de riesgo permite realizar una valoración numérica del nivel de conservación relativa de la estación.

La monitorización volumétrica se ha llevado a cabo mediante la comparación de modelos 3D capturados en diferentes momentos, permitiendo la identificación de cambios negativos (pérdidas de soporte, desaparición de plantas o telarañas, etc...) o positivos (crecimiento de plantas o líquenes, aparición de nidos de insectos y telarañas, cuantificación de la frecuentación de animales, etc...) (Ruiz, Quesada y Pereira, 2019). La monitorización fisicoquímica ha tratado de observar variaciones a lo largo del tiempo en los fenómenos que afectan a la conservación de las pinturas rupestres, como la evolución de las eflorescencias, o el análisis de puntos en los que se han producido pérdidas de sustrato. La monitorización se ha efectuado en lapsos temporales que van desde tres meses hasta cuatro años, permitiendo tener un conocimiento preciso de su evolución y de sus riesgos. En los casos de Solana de las Covachas VI (Nerpio) y de Ermites I y V (Ulldecona), esta información ha servido para elaborar planes de conservación y consolidación de los puntos que presentaban un mayor nivel de riesgo. Obviamente, este tipo de proyectos requiere de un enfoque multidisciplinar en el que colaboren arqueólogos, restauradores, geólogos, químicos, ingenieros, programadores o biólogos.

5.2. Tecnologías para la divulgación del arte rupestre

La utilidad de las tecnologías digitales para la divulgación del fenómeno rupestre es evidente, y todavía lo será más a corto plazo. Estas tecnologías permiten acercar a un público generalista productos que posibilitan el conocimiento del arte rupestre a través del autodescubrimiento y la experiencia de calidad, y, en ocasiones, que esto suceda en el propio enclave en el que se conservan los grafismos prehistóricos.

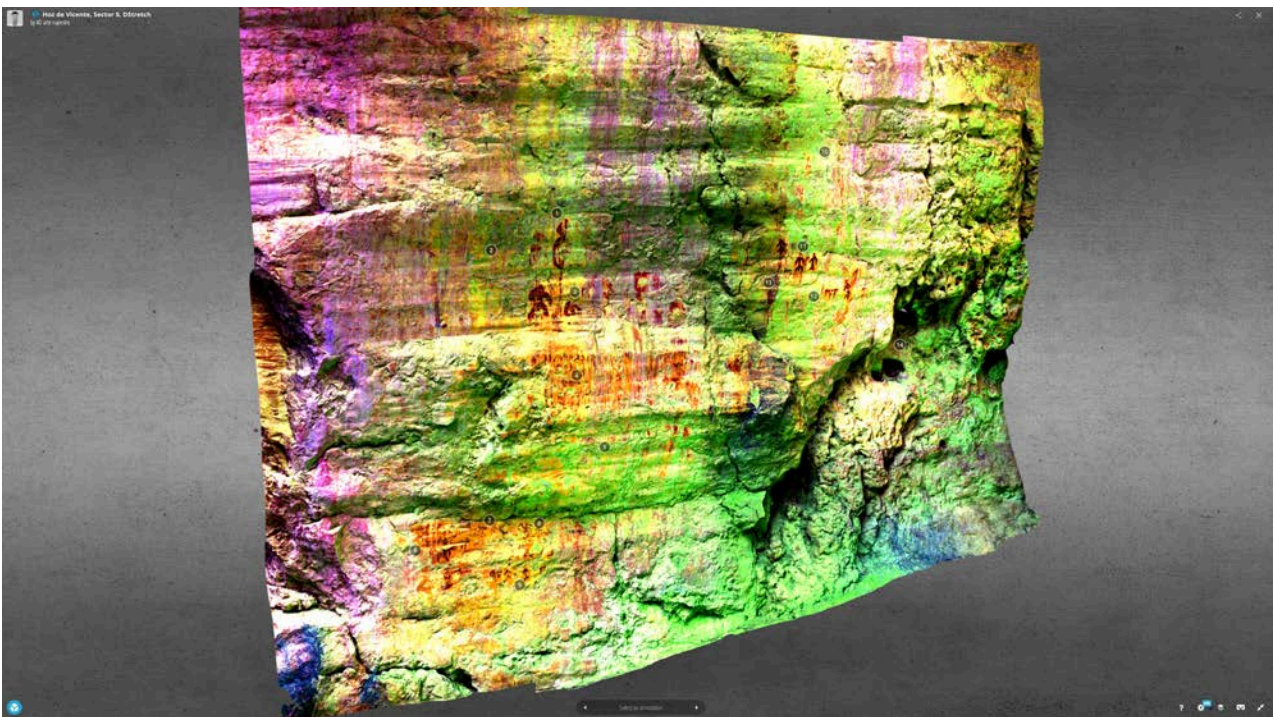


Figura 12. Modelo 3D con textura tratada en DStretch del sector 5 de la Hoz de Vicente (Minglanilla, Cuenca), subido a la plataforma *Sketchfab*, en la que se pueden fijar puntos de interés para incrementar su función didáctica y divulgativa.

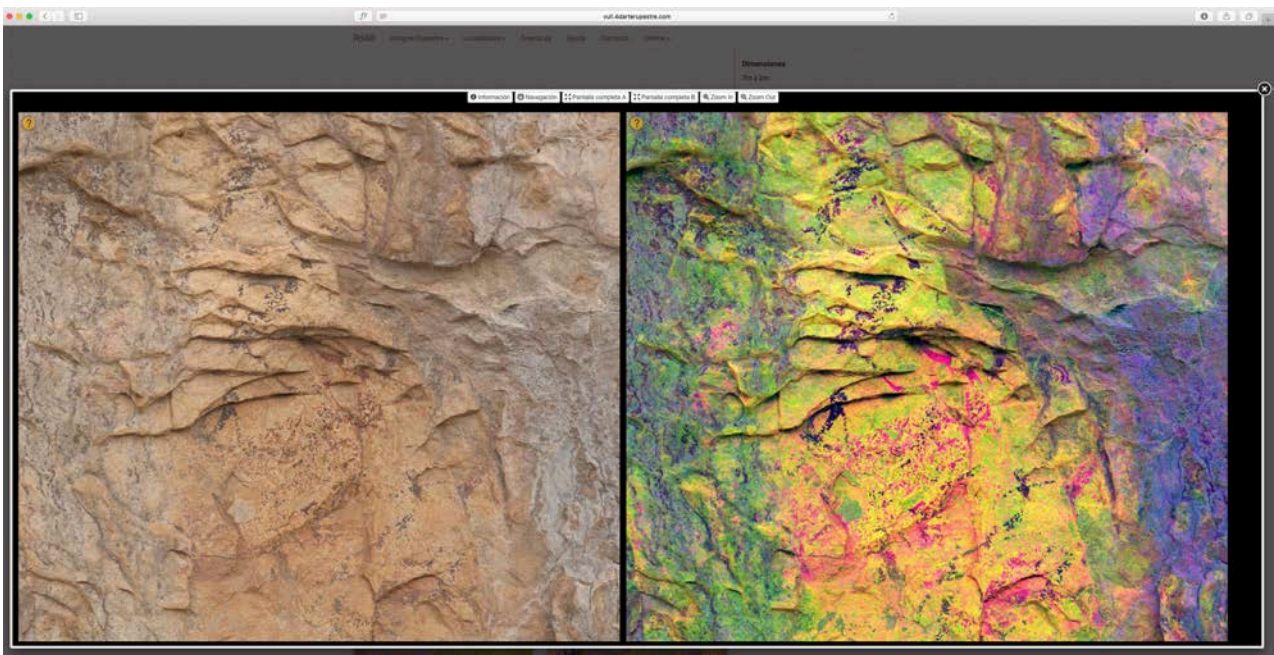


Figura 13. Visor de imágenes gigapíxel implementado en la web del proyecto 4D VuLL, en el que se pueden sincronizar las vistas en su color normal y en versión enfatizada mediante *DStretch*, lo que facilita la comprensión y localización de las figuras.

Los productos digitales derivados de la documentación pueden ser transformados fácilmente en medios divulgativos. Por ejemplo, las nubes de puntos, los modelos 3D con diferentes tipos de texturizado, las imágenes gigapíxel, o las fotografías esféricas pueden ser visualizadas por medio de visores específicos que funcionan en cualquier navegador, tanto en ordenadores como en soportes móviles. La mejora constante de las redes de comunicaciones permite que esto sea posible en casi cualquier lugar y momento, constituyendo una oportunidad única de interactuar con productos digitales de alta calidad que aproximan al usuario no especializado un conocimiento hasta ahora reservado a los investigadores. El caso de la plataforma *Sketchfab* es paradigmático; este visor de modelos 3D hace posible la interacción con modelos con textura fotográfica, textura tratada con *DStretch* o textura con la reproducción digital facilitando al usuario la comprensión de las estaciones rupestres (fig. 12). El acceso a estos medios de divulgación se puede dejar abierto a la búsqueda personal de los usuarios, o se puede canalizar a través de plataformas web específicas, en formato de repositorios digitales en los que se pueden concentrar productos digitales diversos, pero todos ellos orientados a facilitar la comprensión de nuestro objeto de estudio y a motivar la visita y conocimiento directo del arte rupestre. El repositorio RDaR², en el que se han hecho accesibles algunos de los resultados de los proyectos 4D · arte rupestre es un buen ejemplo de la utilidad de estos medios tecnológicos para acercar el fenómeno rupestre a un público generalista, sin perder la calidad científica (fig. 13). Al mismo tiempo, estos productos podrían ser usados por las administraciones públicas para elaborar sus planes de gestión.

La experiencia in situ de los formatos tecnológicos es una vía extremadamente eficaz de desarrollar el interés de los visitantes por el arte rupestre. La implantación de sistemas de realidad aumentada en la Valltorta y Ulldecona, en el marco del proyecto eArt, constituye un buen ejemplo de cómo superar las limitaciones impuestas por las condiciones de conservación, la difícil lectura y el pequeño tamaño de las

2. <http://vull.4darterupestre.com>; <http://4dclm1.4darterupestre.com/>; <http://batuecas.4darterupestre.com/>



Figura 14. La app eARt permite al usuario identificar *in situ* la localización de las pictografías gracias a la utilización de realidad aumentada sin marcadores. En esta imagen se muestra en el Abric I d'Ermites (Ulldecona, Tarragona).

figuras del arte levantino. Este formato de realidad aumentada permite al visitante percibir el arte rupestre propiciando su autodescubrimiento, gracias a la superposición de las reproducciones de los motivos (en su estado actual o reconstruidos) sobre el *stream* de video que captura un dispositivo móvil tras identificar su posición en el panel, y en ausencia de marcadores o elementos que puedan distorsionar o alterar el lugar. La respuesta del visitante pasa de la sorpresa inicial a la comprensión e identificación de las figuras sin necesidad de la «prótesis» tecnológica. Este tipo de visitas demanda una readaptación del papel del guía, quien, no obstante, sigue siendo un elemento imprescindible para facilitar la comprensión del fenómeno rupestre (Ruiz, 2017: 45). Las posibilidades que ofrecerá la realidad aumentada mixta en pocos años harán que este tipo de propuestas se multipliquen e incrementen el interés del público.

Las infinitas posibilidades de la realidad virtual también han empezado a impactar en la divulgación del arte rupestre. De las diversas experiencias de los últimos años destaca la recientemente inaugurada en el MUPAC de Santander para posibilitar una experiencia inmersiva virtual de La Garma, facilitando la comprensión de los modos de vida paleolíticos, de su entorno y, por supuesto, del arte rupestre conservado en este enclave. Estas tecnologías siguen siendo dependientes de instalaciones, por lo que su espacio natural de desarrollo son los museos y centros de interpretación. No obstante, cabe esperar la aparición de sistemas autónomos cada vez más potentes que permitan su utilización *in situ*, con las limitaciones que inevitablemente imponen la fisiografía de los lugares y los posibles riesgos para los visitantes.

El desarrollo tecnológico no sirve de mucho si no va acompañado de una didáctica adecuada del fenómeno rupestre. En este campo queda mucho camino por recorrer, pero existen propuestas muy interesantes que se basan en productos digitales. Por ejemplo, en la Cova dels Rossegadors se ha desarro-

lado una propuesta didáctica para hacer comprensible el arte rupestre levantino a invidentes, integrando durante la visita al lugar, la percepción del entorno, la comprensión del espacio, y el descubrimiento de la iconografía del abrigo mediante medios hápticos. Un juego perceptivo, en el que se combinan figuras modeladas en 3D, desarrolladas a partir de los grafismos conservados en Cova dels Rossegadors, y siluetas a escala 1:1 de estas figuras permite a los visitantes entender el arte levantino sin utilizar la vista, e incluso posibilita la creación de nuevas escenas mediante soportes magnéticos (Ruiz López, 2017: 49). Otro buen ejemplo de didáctica basada en la gamificación es el interactivo instalado en el centro de interpretación de Ermites, en Ulldecona; aquí el juego *Nosotros cazadores*, permite a los usuarios la comprensión de las escenas de caza del arte levantino al adquirir el rol del cazador que persigue, conduce o dispara sus flechas sobre una manada de animales.

En mi opinión, estas confluencias entre medios digitales, investigación, didáctica y divulgación son esenciales para alcanzar el deseado reconocimiento público de nuestro objeto de estudio y procurar su preservación para el futuro.

6. El futuro inmediato y las tecnologías digitales

El futuro de las tecnologías digitales y su impacto sobre nuestra disciplina es impredecible; nadie podría haber anticipado a principios de este siglo el punto en el que nos encontramos en la actualidad, por lo que intentar una prospectiva a largo plazo es fútil. Sin embargo, a corto plazo hay una serie de tecnologías emergentes que con seguridad producirán un impacto notable en la investigación del fenómeno rupestre a escala mundial; entre ellas, destacan la inteligencia artificial (IA) y el *Big Data*, tecnologías íntimamente conectadas, y que impactarán en ámbitos como la identificación y clasificación de motivos (Zeppelzauer *et al.*, 2016; National Geographic, 2019), o la explotación de *datasets* cada vez de mayor tamaño.

En cierto modo, podemos considerar que el arte rupestre prehistórico constituye una auténtica base de datos en la que se codificaron las esferas simbólicas de las sociedades ágrafas. Estos dispositivos de la memoria conservan las huellas de las etapas más antiguas de la evolución humana y son, por tanto, un objeto cultural de valor incalculable, que requiere de herramientas más potentes que las empleadas hasta ahora para su análisis e interpretación. Las tecnologías digitales pueden transformar estas bases de datos analógicas, las pinturas y grabados rupestres, en bases de datos y repositorios digitales que posibiliten la investigación científica bajo un esquema abierto, descentralizado y colaborativo. Este planteamiento ha inspirado un proyecto (Mediar-L), todavía en fase de desarrollo, destinado a la investigación del arte rupestre levantino, y en el que colaboran más de veinte investigadores de doce universidades o instituciones. En la actualidad, los investigadores dependen de sus propias imágenes y bases de datos, lo que, sin lugar a dudas, dificulta el avance en la comprensión de todo el conocimiento acumulado en los conjuntos de arte rupestre levantino, e impide una visión global sobre este fenómeno único en Europa. Las posibilidades de una explotación de datos, basada en técnicas estadísticas avanzadas, o en otros procedimientos de análisis científico, quedan reducidas, por tanto, a iniciativas individuales con conclusiones limitadas a escalas locales o regionales. Esta circunstancia dificulta una mejor comprensión y visibilidad de este estílo por parte de la comunidad científica internacional, en contraste con otras formas de arte prehistórico existentes en España, como el paleolítico.

El proyecto Mediar-L pretende ligar los principios de colaboración entre investigadores, mutualización del conocimiento y análisis globales basados en *datasets* compartidos y abiertos. En la actualidad, las bases de datos de cada investigador no suelen ser publicadas. Es, por tanto, necesario desarrollar un

modelo conceptual de referencia (CRM, de sus siglas en inglés) que, a partir de la utilización de un vocabulario estándar y de una ontología básica pueda permitir formular preguntas de creciente complejidad y con perspectivas más amplias de lo que ha sido posible hasta ahora. Con ello, se podrán aplicar por primera vez técnicas estadísticas avanzadas, minería de datos y procesos de análisis mediante inteligencia artificial sobre un número elevado de registros gráficos procedentes de centenares de enclaves con este tipo de arte rupestre. Su aplicabilidad está garantizada por repositorios que facilitan la accesibilidad y explotación de los *datasets*, basados en el uso de metadatos y en los principios de la web semántica. Su interoperatividad con formatos abiertos permitirá alcanzar los objetivos del proyecto y el futuro desarrollo de nuevas líneas de investigación, no necesariamente contempladas inicialmente, por parte de cualquiera de los investigadores participantes.

Este planteamiento supone un radical cambio de paradigma, posibilitando que los conjuntos de datos compartidos se manejen de forma colectiva, coordinada e integrada, de acuerdo con los principios de ciencia abierta (*Open Science*) que el *European Research Council* pretende impulsar³. Los mecanismos de cooperación previstos se basan en principios de economía colaborativa, en la que todos los miembros del colectivo obtengan beneficios mutuos de su contribución con datos e imágenes al proyecto. Este mecanismo pretende romper con el aislamiento tradicional de los investigadores y sentar las bases para el desarrollo de herramientas de análisis basadas en IA y en *Big Data*, con los que cada investigador podrá continuar sus propias líneas de investigación. En este sentido, se animará a otros investigadores a unirse respetando los principios de investigación colaborativa y sostenible. Esperamos con ello, dar lugar al desarrollo del principal foco para la investigación y difusión del arte rupestre levantino.

Planteamientos análogos se han elaborado en los últimos años en diversos campos de la arqueología, tales como los proyectos STELLAR (May *et al.*, 2012), Sign-Base⁴ o 3D-Pitoti⁵, la base de datos de imágenes Montelius y el software de análisis estadístico WinSerion (Stadler, 2014), o las bases de datos Ariane y Ariane-Levante⁶ y el software estadístico STAT2. Esta propuesta va mucho más allá de las bases de datos actualmente existentes, como el IDEARQ Arte Levantino,⁷ en el que se integran las imágenes del fondo Martín Almagro Basch del CSIC con una IDE que se pretendió convertir en estándar de la investigación arqueológica, o la base de datos EuroPreart.⁸

Más allá de las características específicas de este proyecto, es evidente que existe la necesidad de desarrollar mecanismos de colaboración, salvaguarda y preservación de la información que están elaborando los diferentes equipos que trabajan en arte rupestre en España y en el mundo. En Francia existe desde hace años la obligación de depositar los productos digitales en el *Centre National de Préhistoire*, dependiente del Ministerio de Cultura; este repositorio oficial tiene la función de uniformar el trabajo de los investigadores, de garantizar el acceso presente y futuro a esta información, y de conservar los datos generados mediante una política de preservación digital efectiva. No existe nada similar en nuestro país, ni a nivel estatal ni a nivel autonómico, lo que delega la responsabilidad de la interoperatividad, colaboración y preservación en los propios investigadores y en sus capacidades. Bienes de interés cultural como

3. <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-policy-platform>

4. <http://www.wordsandbones.uni-tuebingen.de/?event=colloquium-signbase-data-driven-approach-abstract-signs-paleolithic>

5. <http://www.3d-pitoti.eu>

6. Las bases de datos Ariane han sido desarrollado por Georges Sauvet, y la correspondiente a arte levantino (Ariane-Levante) se integra en el proyecto Mediar-L.

7. http://www.idearqueologia.org/visualizador_idearq/?ln=es

8. <http://www.europreart.net>

estos merecerían una política pública mucho más activa de investigación, salvaguarda y difusión de la existente hasta la fecha.

7. Conclusiones

La revolución digital ha cambiado o está cambiando la mayoría de los procesos de trabajo e investigación de los especialistas en arte rupestre. En poco más de diez años el despliegue tecnológico nos ha situado ante posibilidades difícilmente imaginables pocos años antes. Pero precisamente, su condición revolucionaria y el deslumbramiento que ha producido entre los investigadores conlleva un riesgo notable, el de confundir cuál es el objeto de estudio de los especialistas en arte rupestre. En ningún caso lo es el desarrollo tecnológico *per se*; las tecnologías no son un fin en si mismo para los arqueólogos que estudiamos el arte rupestre. Por el contrario, son herramientas muy potentes que deben ser puestas al servicio de los investigadores e integradas en sus flujos de trabajo para alcanzar los objetivos arqueológicos perseguidos. Las tecnologías deberían servir exclusivamente para responder las preguntas que nos formulamos los arqueólogos en relación a las sociedades humanas del pasado, y, en nuestro caso, de sus sistemas de comunicación gráficos.

El papel de los arqueólogos y especialistas en arte rupestre no puede ser subordinado al de los tecnólogos o al de los profesionales de las ciencias auxiliares de la arqueología. Por el contrario, nuestra obligación es la de comprender, dominar y aplicar estas tecnologías para alcanzar esos objetivos desde el entendimiento de sus posibilidades y limitaciones. Obviamente, el establecimiento de marcos de colaboración multidisciplinarios será necesario para que los arqueólogos adquieran progresivamente el control de esas otras disciplinas, al igual que ocurrió con anterioridad con otras técnicas perfectamente integradas en nuestros flujos de trabajo actuales.

8. Bibliografía

- ALLOZA IZQUIERDO, R.; ROYO GUILLÉN, J. I.; RECUENCO CARABALLO, J. L.; LECINA ENCISO, M.; PÉREZ BELLIDO, R. y IGLESIAS GARCÍA, M. P. (2012). La conservación del arte rupestre al aire libre: un desafío formidable. En M. N. Juste Arruga, M. A. Hernández Prieto, A. Pereta Aybar, J. I. Royo Guillén, y J. A. Andrés Moreno (Eds.), *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial Parque Cultural del río Vero Alquézar, Huesca Comarca de Somontano de Barbastro 28 al 31 de mayo, 2012*, pp. 89-106). Comarca de Somontano de Barbastro.
- ANGÁS PAJAS, J. (2012). Nuevas técnicas de documentación geométrica y análisis del arte rupestre. En M. N. Juste Arruga, M. A. Hernández Prieto, A. Pereta Aybar, J. I. Royo Guillén y J. A. Andrés Moreno (eds.), *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial Parque Cultural del río Vero Alquézar, Huesca Comarca de Somontano de Barbastro 28 al 31 de mayo, 2012* (pp. 61-71). Huesca: Comarca de Somontano de Barbastro.
- BEDNARIK, R. G. (1994). Introducing the IFRAO Standard Scale. *Rock Art Research*, 11, 74-75.
- BEDNARIK, R. G. y SESHADRI, K. (1995). Digital colour reconstitution in rock art photography. *Rock Art Research*, 12, 45-51.
- BOYD, C. E. y COX, K. (2016). *The White Shaman Mural: An Enduring Creation Narrative in the Rock Art of the Lower Pecos*. Austin: University of Texas Press.
- CALDWELL, D. y BOTZOJORNIS, U. (2014). An historic sign, possible Mesolithic menhir, DStretch, and problems in dating rock art to the Sauveterrian in the Massif de Fontainebleau. *Journal of Archaeological Science*, 42, 140-151. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2013.09.023>

- CERRILLO CUENCA, E.; ORTIZ-CODER, P. y MARTÍNEZ DEL POZO, J. A. (2013). Computer vision methods and rock art: towards a digital detection of pigments. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6(3), 227-239. <http://doi.org/10.1007/s12520-013-0147-2>
- CERRILLO CUENCA, E. y SEPÚLVEDA, M. (2015). An assessment of methods for the digital enhancement of rock paintings: the rock art from the precordillera of Arica (Chile) as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 55(C), 197-208. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2015.01.006>
- DOMINGO SANZ, I. y LÓPEZ-MONTALVO, E. (2002). Metodología: el proceso de obtención de calcos o reproducciones. In R. Martínez Valle y V. Villaverde Bonilla (eds.), *La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta* (pp. 75-81). Tírig: Museu de la Valltorta.
- DOMINGO SANZ, I.; VILLAVERDE BONILLA, V.; LÓPEZ-MONTALVO, E., LERMA GARCÍA, J. L. y CABRELLES LÓPEZ, M. (2013). Latest developments in rock art recording: towards an integral documentation of Levantine rock art sites combining 2D and 3D recording techniques. *Journal of Archaeological Science*, 40(4), 1879-1889. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2012.11.024>
- DONEUS, M.; BRIESE, C.; VERHOEVEN, G.; FERA, M.; KUCERA, M. y NEUBAUER, W. (2011). From deposit to point cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics*, 6, 81-88.
- ECHEVARRÍA, G. T. (2009). The IFRAO Standard Scale: a revision. *Rock Art Research*, 26(2), 225.
- FERUGLIO, V.; DUTAILLY, B.; BALLADE, M.; BOURDIER, C.; FERRIER, C.; KONIK, S. *et al.* (2015). Un outil de relevés 3D partagé en ligne: premières applications pour l'art et la taphonomie des parois ornées de la grotte de Cussac (ArTaPOC / programme LaScArBx) (pp. 49-54). *Virtual Retrospect. Actes du colloque Pessac (France) 27 - 28 - 29 novembre 2013*
- FLOSS, H.; RUIZ LÓPEZ, J. F.; HOYER, C. T.; HERKERT, K.; HUBER, N.; REBENTISCH, A. y RÖSCH, A. M. (2018). Les figurations pariétales paléolithiques de la grotte Agneux I (commune de Rully, Saône-et-Loire, France). Une méthodologie de distinction entre préhistoire et modernité. En H. Floss y A. Pastoors (Eds.), *Palaeolithic rock and cave art in Central Europe* (pp. 9-32). Rahden/Westf.
- GONZALEZ-AGUILERA, D.; MUÑOZ-NIETO, A.; GÓMEZ-LAHOZ, J.; HERRERO-PASCUAL, J. y GUTIERREZ-ALONSO, G. (2009). 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art. *Sensors*, 9(2), 1108-1127. <http://doi.org/10.3390/s90201108>
- HARMAN, Jon. (2008). Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images. Consultado agosto 2013, from <http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>
- HERNANZ GISMERO, A.; GAVIRA VALLEJO, J. M.; IRIARTE CELA, M.; RUIZ LÓPEZ, J. F.; STEELMAN, K. L.; BUENO RAMÍREZ, P. *et al.* (2018). Arqueometría de los pigmentos del Dolmen de Soto 1, Huelva. Primeros resultados de microscopía Raman y oxidación de plasma. En P. Bueno Ramírez, J. A. Linares Catela, R. de Balbín Behrmann y R. M. Barroso Bermejo (eds.), *Símbolos de la muerte en la Prehistoria reciente del sur de Europa. Dolmen de Soto, Huelva, España*. (pp. 132-144). Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.
- LE QUELLEC, J.-L.; HARMAN, J.; DEFRASNE, C. y DUQUESNOY, F. (2013). DStretch® et l'amélioration des images numériques: applications à l'archéologie des images rupestres. *Les Cahiers de l'AARS*, 16, 177-198.
- LERMA GARCÍA, J. L., CABRELLES LÓPEZ, M.; NAVARRO TARÍN, S. y SEGUÍ, A. E. (2012). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de arte rupestre*, 6, 82-87.
- LERMA GARCÍA, J. L.; VILLAVERDE BONILLA, V.; GARCÍA, A. y CARDONA, J. (2006). Close range photogrammetry and enhanced recording of Palaeolithic Rock Art. *Iaprs*, XXXVI (5), 147-154.
- LORBLANCHET, M. (2010). *Art parietal - les grottes ornées du Quercy*. Arles: Editions du Rouergue.
- LÓPEZ-MONTALVO, E. (2011). Imágenes en la roca: del calco directo a la era digital en el registro gráfico del arte rupestre levantino. *Clio Arqueológica*, 25(1), 153-201.
- MARK, R. y BILLO, E. (1996). The IFRAO Color Scale: Some Considerations (pp. 28-31). *Proceedings of International Rock Art Congress*, Namibia.
- MARTÍNEZ VALLE, R. y GUILLEM CALATAYUD, P. M. (2012). Una nueva visión de las pinturas rupestres de Cantos de la Visera II (Yecla, Murcia). *Yakka. Revista De Estudios Yeclanos*, 19, 63-80.

- MAURA MIJARES, R. y CANTALEJO DUARTE, P. (2005). Procesos digitales aplicados a la reproducción gráfica del Arte Paleolítico. En J. L. Sanchidrián Torti, R. M. Márquez Alcántara y J. M. Fullola Pericot (eds.), *La cuenca mediterránea durante el Paleolítico Superior: 38.000-10.000 años*. Fundación Cueva de Nerja.
- MAY, K.; BINDING, C.; TUDHOPE, D. y JEFFREY, S. (2012). Semantic technologies enhancing links and linked data for archaeological resources. En M. Zhou, I. Romanowska, Z. Wu, P. Xu, y P. Verhagen (eds.), *Revive the Past. Proceedings of the 39th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Beijing, 12-16 April 2011* (pp. 261-272). Amsterdam: Pallas Publications.
- MUDGE, M.; MALZBENDER, T.; SCHROER, C. y LUM, M. (2006). New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display. In M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, y K. Mania (Eds.), (pp. 195-202). *7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST, CIPA/VAST/EG/EuroMed*.
- NATIONAL GEOGRAPHIC (2019). Descubiertos nuevos geoglifos en Nazca gracias a la Inteligencia Artificial. Consultado el 18 de noviembre de 2019. https://www.nationalgeographic.com.es/historia/descubiertos-nuevos-geoglifos-nazca-gracias-a-inteligencia-artificial_14950/2
- ONRUBIA PINTADO, J.; SÁENZ SAGASTI, J. I.; RODRÍGUEZ SANTANA, C.; HERNANDEZ-LOPEZ, D.; GONZÁLEZ PIQUERAS, J.; QUINTANILLA RODENAS, A. *et al.* (2017). Nuevas técnicas para la investigación y la conservación de la Cueva Pintada de Gáldar (Gran Canaria): modelado 3d y análisis de imagen. *Coloquio De Historia Canario-Americana*, XXII (183), 1-20.
- PEREIRA UZAL, J. M. (2013a). *Gestión del color en proyectos de digitalización*. Barcelona: Marcombo. Ediciones técnicas.
- PEREIRA UZAL, J. M. (2016). Control del color en flashes: Broncolor Enhanced Color Temperature Control (ECTC) - Jose Pereira. <http://www.jpereira.net/apuntes-breves/control-del-color-en-flashes-broncolor-enhanced-color-temperature-control-ectc>
- PEREIRA UZAL, J. M. (2017). Nuevas perspectivas en la documentación gráfica de arte rupestre. *Kobie. Serie Anejo*, 16, 41-50.
- PEREIRA UZAL, J. M. (2019). Caracterización radiométrica de una cabeza de flash para su uso en digitalización de obras de arte. *Revista Ph*, 96, 158-169. <http://doi.org/10.33349/2019.0>
- PEREIRA UZAL, J. M. (2013b). Perfiles de cámara DCP + ajuste tonal = precisión colorimétrica. Consultado junio 2013, <http://www.jpereira.net/gestion-de-color-articulos/perfiles-de-camara-dcp-y-ajuste-tonal>
- PEREIRA UZAL, J. M. (2013c). De la IFRAO Standard Scale al ICC: el color como atributo de preservación en la documentación de arte rupestre. Consultado en https://www.researchgate.net/publication/331414303_De_la_IFRAO_Standard_Scale_al_ICC_el_color_como_atributo_de_preservacion_en_la_documentacion_de_arte_rupestre
- PEREIRA UZAL, J. M. (2013d). Evaluación de la reproducción del color en flujos de revelado raw en la digitalización y documentación gráfica de bienes culturales. *X Congreso Nacional del Color*.
- QUESADA MARTÍNEZ, E. (2008). Aplicación Dstretch del software Image-J. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia. *Cuadernos de arte rupestre*, 5, 9-27.
- QUESADA MARTÍNEZ, E. y HARMAN, J. (2019). A step further in rock art digital enhancements. DStretch on Gigapixel imaging. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, e00098. <http://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00098>
- RIPOLL PERELLÓ, E. (1963). *Pinturas rupestres de La Gasulla (Castellón)*. Barcelona: IPA.
- RIVERO VILÁ, O. (2007). Aproximación al estudio de las cadenas operativas del grabado sobre soporte pétreo: análisis tecnológico de una representación de équido del Magdaleniense Medio de la cueva de Las Caldas (Asturias; España). *Zephyrus*, 60, 99-113.
- RIVERO VILÁ, O. (2015). *Art mobilier des chasseurs magdaléniens à la façade atlantique*. Liège: Édition Eraul.
- RIVERO VILÁ, O.; RUIZ LÓPEZ, J. F.; INTXAURBE, I.; SALAZAR, S. y GARATE MAIDAGAN, D. (2019). On the limits of 3D capture: A new method to approach the photogrammetric recording of palaeolithic thin incised engravings in Atxurra Cave (northern Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 14, e00106. <http://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00106>
- ROGERIO-CANDELERIA, M. Á. (2007). *Una propuesta no invasiva para la documentación integral del arte rupestre*. Departamento de Prehistoria y Arqueología. Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Sevilla.

- ROGERIO-CANDELERIA, M. Á. (2014). Digital image analysis based study, recording, and protection of painted rock art. Some Iberian experiences. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.daach.2014.11.001>
- RUIZ LÓPEZ, J. F. (2006). *Las pinturas rupestres en la Serranía de Cuenca. Análisis, revisión y crítica del concepto de estilo en las manifestaciones plásticas postpaleolíticas*. (M. Mas Cornellà, ed.). Tesis doctoral inédita, UNED. Madrid.
- RUIZ LÓPEZ, J. F. (2011). From macro-style to micro-style: Analysis of Levantine Art technique as stylistic discriminant factor. En J. J. García Arranz, H. Collado Giraldo y G. H. Nash (eds.), *The Levantine Question. La cuestión levantina* (pp. 323-344). Budapest: Archeolingua.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; PEREIRA UZAL, J. M. (2014). The colours of rock art. Analysis of colour recording and communication systems in rock art research. *Journal of Archaeological Science*, 50(C), 338-349. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.023>
- RUIZ LÓPEZ, J. F. (2017). Nuevas tecnologías al servicio de la difusión y socialización del arte rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica. En C. Frías Castillejo (ed.), *Actas de las II Jornadas de Museos y colecciones museográficas permanentes de la Comunidad Valenciana. Nuevas tecnologías aplicadas a la gestión turística del patrimonio arqueológico. 3-4 de marzo de 2017. L'Alfàs del Pi (Alicante)* pp. 38-53.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; QUESADA MARTÍNEZ, E. y PEREIRA UZAL, J. M. (2019). Diagnosis and monitoring of rock art sites in "4D · arte rupestre" projects. *Les Nouvelles de l'Archaeologie*, 154, 1-6.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; HOYER, C. T.; REBENTISCH, A.; ROESCH, A. M.; HERKERT, K.; HUBER, N. y Floss, H. (2019). Tool mark analyses for the identification of palaeolithic art and modern graffiti. The case of Grottes d'Agneux in Rully (Saône-et-Loire, France). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, e00107. <http://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00107>
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; QUESADA MARTÍNEZ, E.; PEREIRA UZAL, J. M. y PÉREZ BELLIDO, R. (2018a). Metodología de la monitorización del arte paleolítico de Cieza. En J. Lomba Maurandi (ed.), *Arte rupestre y arqueología en Los Almadenes (Cieza, Murcia). Intervención integral tras el incendio en un paraje protegido y Patrimonio de la Humanidad* (pp. 39-66). Murcia.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; ROYO LASARTE, J.; ROYO GUILLÉN, J. I.; ALLOZA IZQUIERDO, R.; PEREIRA UZAL, J. M. y RIVERO VILÁ, O. (2016a). *Guía Cañada de Marco (Alcaine, Teruel). 50 aniversario de su descubrimiento*. Ayuntamiento de Alcaine.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; SALMERÓN JUAN, J.; QUESADA MARTÍNEZ, E.; PEREIRA UZAL, J. M.; LOMBA MAURANDI, J. y MARTÍN LERMA, I. (2018b). El arte paleolítico de la Cueva de las Cabras. En J. Lomba Maurandi (ed.), *Arte rupestre y arqueología en Los Almadenes (Cieza, Murcia). Intervención integral tras el incendio en un paraje protegido y Patrimonio de la Humanidad*. Murcia: Monografías Centro de Estudios de Prehistoria y Arte Rupestre. Ayuntamiento de Cieza. Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales.
- RUIZ LÓPEZ, J. F.; SEBASTIÁN LÓPEZ, M.; QUESADA MARTÍNEZ, E.; PEREIRA UZAL, J. M.; FERNÁNDEZ ORTIZ DE VALLEJUELO, S.; PITARCH MARTÍ, À. et al. (2016b). *4D · arte rupestre*. Murcia: Centro de Estudios de Prehistoria y Arte Rupestre. Dirección General de Bienes Culturales. Comunidad Autónoma de Murcia.
- RUSINKIEWICZ, S.; BURNS, M. y DECARLO, D. (2006). Exaggerated Shading for Depicting Shape and Detail (Vol. 25, pp. 1-7). *ACM Transactions on Graphics Proc. SIGGRAPH*.
- SEBASTIÁN LÓPEZ, M.; URIARTE GONZÁLEZ, A.; ANGÁS PAJAS, J. y BEA MARTÍNEZ, M. (2010). Documentación sistémica del arte rupestre mediante el análisis espectral del escaneado 3D de las estaciones pintadas en Aragón. *Virtual Archaeology Review*, 1 (1), 123-127.
- SEBASTIÁN LÓPEZ, M.; PALOMO ARROYO, M.; RINCÓN RAMÍREZ, J. A.; ORMEÑO VILLAJOS, S. y VICENT GARCÍA, J. M. (2013). Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multiespectrales. Ensayos en la cueva del tío Garroso (Alacón, Teruel). En *La ciencia y el arte IV. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio* (pp. 279-287). Instituto de Patrimonio Cultural de España.
- STADLER, P. (2014). Quantitative Methods with Image Database Montelius and the Software Package WinSer for Archaeologists: Examples of Different Analyses. 156p, 132f. Versión del 23.11.2014., 1-108. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3787.7924>

- VERHOEVEN, G.; CHEREMISIN, D.; STICHELBAUT, B.; GHEYLE, W. y DE REU, J. D. (2012). The deteriorating preservation of the Altai Rock art: assessing three-dimensional image-based modelling in rock art research and management. *Rock Art Research*, 29 (2), 139-156.
- VICENT GARCÍA, J. M.; MONTERO RUIZ, I.; RODRÍGUEZ ALCALDE, A. L.; MARTÍNEZ NAVARRETE, M. I. y CHAPA, T. (1996). Aplicación de la imagen multiespectral al estudio y conservación del arte rupestre postpaleolítico. *Trabajos de Prehistoria*, 53 (2), 19-35. <http://doi.org/10.3989/tp.1996.v53.i2.390>
- ZEPPELZAUER, M.; POIER, G.; SEIDL, M.; REINBACHER, C.; SCHULTER, S.; BREITENEDER, C. y BISCHOF, H. (2016). Interactive 3D Segmentation of Rock-Art by Enhanced Depth Maps and Gradient Preserving Regularization. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 9 (4), 1-30. <http://doi.org/10.1145/2950062>

