

# DOCUMENTACIÓN, MODELADO Y RECONSTRUCCIÓN 3D DE LA CUEVA DE LAS CALDAS (OVIEDO). EL YACIMIENTO Y EL ARTE PARIETAL

**M<sup>a</sup> Soledad Corchón Rodríguez, Diego González Aguilera, Ángel L. Muñoz Nieto, Javier Gómez Lahoz y Jesús Sabas Herrero**

*Resumen:* En este trabajo se exponen los primeros resultados de la aplicación de la tecnología de escaneo láser 3D y reconstitución tridimensional al registro y documentación de una cavidad con yacimiento y arte parietal paleolítico: la cueva de Las Caldas (Norte de España). Los procesos de captura, tratamiento y gestión de la información aplicados, proporcionan modelos tridimensionales que pueden texturizarse con imágenes digitales. El rigor métrico que proporcionan estos modelos potencia los resultados obtenidos con los procedimientos de registro tradicionales, así como la integración de la información en otros formatos digitales, desarrollando de este modo nuevas vías en la investigación del patrimonio arqueológico.

*Palabras-Clave:* Cueva de Las Caldas. Cornisa Cantábrica. Arte parietal, láser escáner 3D, fotogrametría, geotecnologías.

## I. INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

La cueva de Las Caldas se encuentra situada en la margen derecha del río Nalón, en la parte inferior de un pequeño valle lateral recorrido por el arroyo de Las Caldas, que vierte al río Gafo a unos 500 m de la cueva, y éste al Nalón 2 km aguas abajo. La gruta forma parte de un conjunto cárstico desarrollado en las Calizas de Montaña (Visiense-Namuriense, Carbonífero Inferior), con dos cavidades principales comunicadas entre sí (Caldas I y II), estructuradas en una compleja red de galerías y conductos. El desarrollo longitudinal de la cueva principal supera los 1.000 m y sus coordenadas geográficas son: 05° 54' 723" E; 43° 20' 123" N, a 160 m de a. s. m.

Las excavaciones realizadas en el Pasillo I y a la entrada de la Sala principal (1971-73: CORCHÓN *et al.* 1981), así como las posteriores más extensas (1980-1999: CORCHÓN 1990, 1992, 1995, 1999a, 2007), afectando a las Salas I y II y el vestíbulo exterior, exhumaron amplias secuencias del Solutrense Medio y Superior, así como del Magdaleniense

Inferior, Medio y Superior cantábricos. Para la datación de los niveles, se dispone de 27 dataciones radiométricas, calibradas (*ca.* 22 240-13 000 calBC: Tabla 1)<sup>2</sup>.

La cueva de Las Caldas es conocida también por la riqueza de los ajuares óseos y el arte mueble de los niveles solutrenses y magdalenienses (CORCHÓN, 1994 y 2005). Los soportes decorados y temas del arte mueble del Magdaleniense Medio cuentan con amplios paralelos en otros yacimientos del valle del Nalón (La Viña), Cantabria (La Garma) y Pirineos vasco-franceses, particularmente en Isturitz (CORCHÓN y RIVERO, 2009). Esta similitud de elementos culturales reflejaría la existencia de una amplia movilidad entre los grupos paleolíticos, implicando contactos, intercambios y relaciones a larga distancia. Este mismo fenómeno es revelado por la presencia, en porcentajes significativos, de sílex alóctonos cuyas áreas-fuente se encuentran situadas en otros lugares de Asturias y Cantabria, a menos de 100 km de la cueva. En otros casos, los desplazamientos de materias primas foráneas han sido mayores, como es el caso de los sílex de Urbasa, Flysch vasco y Treviño, alcanzando los Pirineos (Bidache) y Las Landas francesas (Chalosse). Estos últimos implican transportes desde 350 a 500 km de distancia de la cueva de Las Caldas (CORCHÓN, TARRIÑO y MARTÍNEZ, 2009).

Estas circunstancias, explican la realización de un proyecto interdisciplinar para la aplicación de las nuevas tecnologías geomáticas a la documentación de la cueva de Las Caldas, con particular atención a los grabados parietales conservados cerca de la entrada.

<sup>1</sup> Investigación realizada en el marco de los proyectos DGICYT: BHA 2003-05438 y HUM 2007-66057 (investigadora principal: M.<sup>a</sup> Soledad Corchón).

<sup>2</sup> <sup>14</sup>C (AMS): Angström Laboratory (Div. of Ion Physics, 14C-Lab.), Univ. of Uppsala. <sup>14</sup>C (ordinario): Laboratoire Radiocarbone, Centre de Datations et d'Analyses Isotopiques (CNRS), Lyon. Calibraciones: curva CalPal 2007-HULU (WENINGER *et al.*, 2007).

REF. LAB.	<sup>14</sup> C BP	CALBC (CALPAL 2007)	NIVEL / SECTOR	CLASIFICACIÓN
Ua-15318	20250 ± 235	22240 ± 300 (AMS)	15 (Sala I)	Solutrense Medio
Ly-2428	19510 ± 330	21420 ± 360	16 (Topera)	Solutrense Medio
Ly-2426	19480 ± 260	21380 ± 280	12b (Pasillo)	Solutrense Medio
Ly-2425	19030 ± 320	20940 ± 330	12t (Pasillo)	Solutrense Medio
Ly-2429	19000 ± 280	20930 ± 380	18 (Topera)	Solutrense Medio
Ly-2424	19390 ± 260	21280 ± 280	9 (Pasillo)	Solutrense Superior
Ly-2423	18310 ± 260	20050 ± 360	7 (Pasillo)	Solutrense Superior
Ua-15316	18305 ± 295	20050 ± 380 (AMS)	11 (Sala I)	Solutrense Superior
Ua-15315	17945 ± 370	19680 ± 520 (AMS)	9 (Sala I)	Solutrense Superior
Ua-4302	17380 ± 215	18920 ± 260 (AMS)	XIVc (Sala II)	Solutrense Final
Ly-2422	17050 ± 290	18540 ± 340	4 (Pasillo)	Solutrense Final
Ly-2421	18250 ± 300	20000 ± 390	3 (Pasillo)	Solutrense Final
Ua-4301	15165 ± 160	16330 ± 240 (AMS)	XIII (Sala II)	Magdalenense Inferior
Ua-4300	14835 ± 130	16180 ± 270 (AMS)	XIIinf (Sala II)	Magdalenense Inferior
Ua-2735	14495 ± 140	15690 ± 150 (AMS)	XII (Sala II)	Magdalenense Inferior
Ua-2734	13755 ± 120	15010 ± 80 (AMS)	XI (Sala II)	Magdalenense Inferior
Ua-10188	13370 ± 110	14430 ± 330 (AMS)	IX (Sala II)	Magdalenense Medio
Ua-10189	13640 ± 150	14890 ± 140 (AMS)	VIII (Sala II)	Magdalenense Medio
Ly-2936	13310 ± 200	14280 ± 430	VIII (Sala II)	Magdalenense Medio
Ly-3318	12869 ± 160	13580 ± 310	VII (Sala II)	Magdalenense Medio
Ua-10190	13650 ± 140	14910 ± 120 (AMS)	VIc (Sala II)	Magdalenense Medio
Ly-2427	13400 ± 150	14420 ± 380	IV/III (Sala II)	Magdalenense Medio
Ua-10191	13185 ± 155	14160 ± 380 (AMS)	IIIb-IIIc (Sala II)	Medio/Upper Magd.
Ua-10192	12960 ± 190	13850 ± 440 (AMS)	II (Sala II)	Magdalenense Superior
Ua-10193	12595 ± 125	13100 ± 210 (AMS)	I (Sala II)	Magdalenense Superior
Ua-10194	12590 ± 120	13090 ± 200 (AMS)	-II (Sala II)	Magdalenense Superior

TABLA I: Dataciones de los niveles de la cueva de Las Caldas.

## II. LOS GRABADOS PARIETALES DEL VESTÍBULO

En el vestíbulo de Caldas I, el muro derecho ofrece un panel con grabados que se extienden desde la boca de la cueva hasta el arranque de una pequeña gatera<sup>3</sup>. Su final coincide con el límite hasta donde profundizan los rayos solares vespertinos, ajustándose esta ubicación al concepto clásico de santuario exterior. El soporte, muy frágil y agrietado, muestra numerosas descamaciones que continúan en la actualidad por las heladas invernales, líquenes y la escorrentía de la pared. También deterioran el muro letreros modernos, grabados a navaja junto a la verja y al final de los grabados, y manchas de pintura reciente a mayor altura que los grabados.

<sup>3</sup> Agradecemos al doctor Eduardo García Sánchez (UNED, Albacete) su inestimable colaboración en los trabajos realizados en Las Caldas en 2006. La composición fotográfica y dibujo de la figura 1, sobre calco de S. Corchón, son obra suya, así como las fotografías de los grabados. El estudio de estos, entregado para su publicación en 2006 (J. Fortea, Proyecto Teverga) es objeto de un estudio extenso en: M.<sup>a</sup> S. CORCHÓN *et al.*: *La cueva de Las Caldas (San Juan de Priorio, Oviedo). Los niveles magdalenenses de las Salas I y II, y los grabados parietales* (en prep.).

Los más antiguos de éstos, anchos y muy redondeados por erosión, ofrecen una característica poco habitual en el arte del Pleistoceno: aparecen cortados por las cicatrices de una línea continua de fractura de la pared. Las primeras excavaciones en el yacimiento, realizadas al pie de los grabados (1971-1973: CORCHÓN *et al.*, 1981), determinaron que el desplome de estos grandes bloques se produce durante la sedimentación del Solutrense Medio. A la izquierda, otros grabados reproducen, a trazo muy fino, motivos lineales y estilizaciones femeninas de tipo claviforme, con amplios paralelos en el Solutrense Superior e inicios del Magdalenense regionales. A estos últimos se les superpone una tercera serie de grabados realizados a trazo profundo, de carácter fusiforme, atribuidos también al Magdalenense.

El *Panel de los Grabados* mide 197 cm de longitud y se desarrolla paralelamente a la citada línea de fractura (Figura 1). La altura máxima que alcanzan los grabados sobre este perfil de rotura es de 33,5 cm, para los grabados finos situados al final del panel, mientras que la mínima –sólo 5,5 cm– corresponde a unos de los profundos cortados por la citada fractura. La existencia de una zona intermedia de 90 cm sin grabados –que pudiera haber albergado grabados actualmente perdidos–, permite dividir el Panel en dos

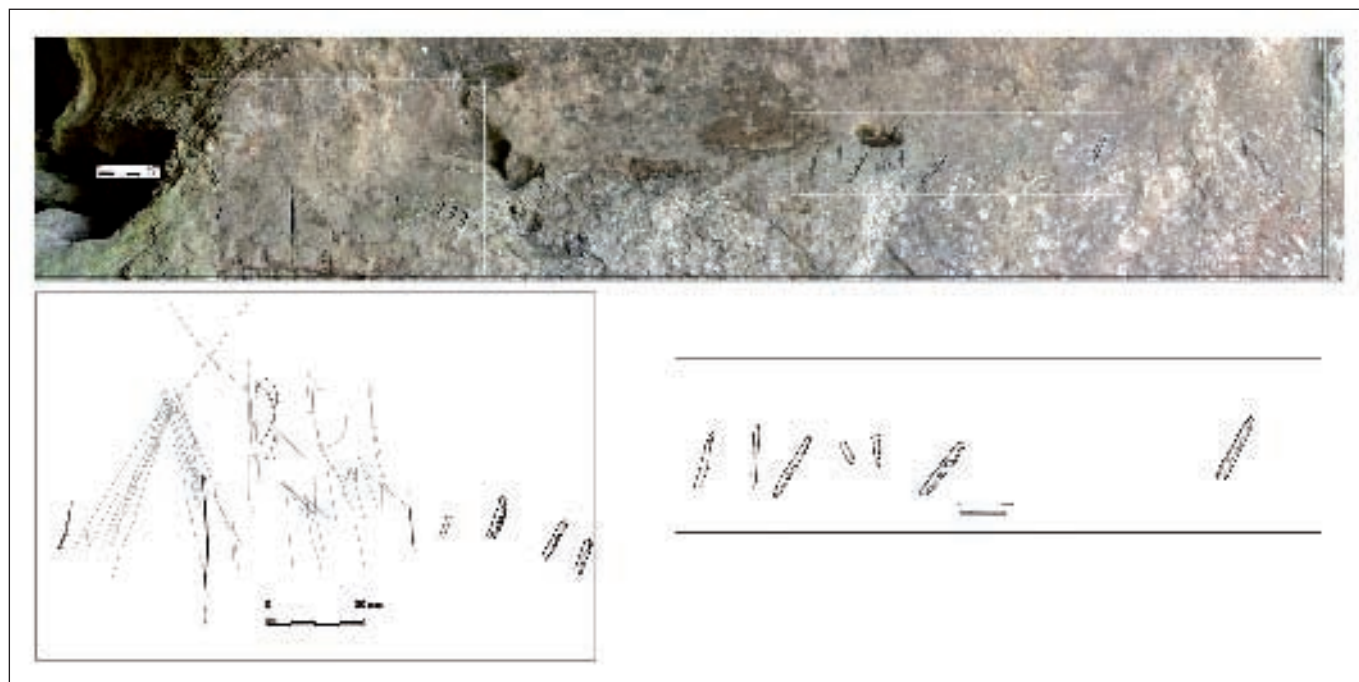


FIGURA 1: Composición fotográfica y calcos de los grabados del Panel.

sectores: el izquierdo, hacia el interior, y el derecho a escasa distancia de la boca, con un total de diez grupos de motivos grabados. El desplome del muro que sustenta los grabados afectó a las realizaciones del sector izquierdo más próximas a la entrada, y a la totalidad del sector derecho, donde están los grabados más antiguos, anchos y erosionados.

### II.1. LOS GRABADOS DEL SECTOR IZQUIERDO

Este sector del Panel, de 52 cm de longitud, muestra siete grupos de trazos:

- **GRUPO 1:** Motivo angular en el extremo izquierdo del Panel (19 x 14 cm). Son incisiones múltiples de trazo múltiple y perfil angular muy fino, dispuestas en bandas de orientación convergente que se cruzan en el ápice. El motivo guarda cierta relación formal con otros lineales convergentes del arte mobiliario y parietal: los denominados «signos en abanico». Sobre el motivo se grabó un aspa: dos trazos largos cruzados de 16, 5 y 16 cm de longitud, irregulares y muy finos.

- **GRUPO 2:** Gruesa incisión fusiforme de perfil angular, ensanchada en el centro y adelgazada en los extremos, que se superpone y corta a los anteriores en sentido longitudinal (15 x 0,50 cm). Otra incisión profunda (6,2 x 0,25 cm), peor conservada, se encuentra a la izquierda del primer motivo, al que corta y se superpone. A unos 2 cm a la derecha, superpuestos al motivo angular 1, se encuentran otros dos grabados de trazo muy fino: dos líneas cruzadas en aspa (7 y 5,5 cm de longitud), que probablemente

forman parte del motivo angular, dada la identidad del conjunto, superponiéndose la incisión fusiforme gruesa a todo el grupo (Foto 1).

- **GRUPO 3:** A unos 4 cm a la derecha de los anteriores se encuentran los motivos más interesantes del Panel: cuatro ideomorfos de trazo muy fino, grabados con doble apoyo del buril similar a los del grupo 1. Son tres claviformes, dos de ellos cerrados y el tercero abierto, superpuestos entre sí. Se trata de contornos ovales (12 x 2-3 cm) adosados a líneas verticales (17 y 16,5 cm) de idéntica factura: grabado múltiple fino.

El cuarto ideomorfo, a escasos centímetros (3,5-7,5 cm) a la derecha de los anteriores, es una figura oval-fusiforme, curvada hacia el interior y adelgazada en ambos extremos (13,5 cm de longitud x 4,2 cm de anchura máxima), ajustada a los esquemas habituales de una estilización femenina. La línea exterior se prolonga en un largo trazo oblicuo de 17 cm de longitud. En ambos extremos, el cierre de la figura se produce por el cruce de las líneas del contorno, acorde con el esquema acéfalo y ápodo de estas siluetas antropomórficas. La incisión simple muy fina, con doble apoyo en el surco y repasada en el contorno posterior, es análoga a los claviformes.

- **GRUPO 4:** Motivos en gancho. A continuación de los claviformes, en posición inferior, se encuentran tres finos trazos verticales paralelos sobre los que inciden otros tantos cortos y oblicuos (longitudinales largos: 8,2; 9,5; 6 y 4,5 cm. Los convergentes distales: 6; 6; y 4,5 cm). A la derecha,

completan la serie otros dos trazos sueltos de idéntica factura (4,5 y 5 cm de longitud) (Foto 1).

- **GRUPO 5:** Trazos lineales de factura irregular sobre una grieta paralela a fractura de la pared (17,5 y 3,5 cm). Integran el motivo una incisión larga de trazo fino inclinada hacia la izquierda, y otra corta asociada al extremo de la misma. La identidad de trazado con la línea del contorno estilizado femenino sugiere un posible grafismo similar, perdido con la descamación de la pared. La longitud de los trazos es también análoga a los ideomorfos. Entre estas líneas, desbordándolas hacia la derecha, otros oblicuos más cortos e igualmente finos cierran la serie (2,5; 3 y 5,5 cm de longitud).

- **GRUPO 6:** A escasa distancia se encuentra otro trazo grabado fusiforme más corto y estrecho, parcialmente de-



Foto 1: Grabados del sector izquierdo, parte baja: grabados finos y trazos fusiformes superpuestos Grupos 2, 4 y 6).



Foto 2: Detalle de los conjuntos 8 y 9, asociados a una concavidad circular.

teriorado por esta grieta y la fractura del muro (8,5 x 2 cm), que profundiza de 2 a 3 mm en la roca caliza (Foto 1).

- **GRUPO 7:** Los grabados restantes de este sector y los siguientes son de características diferentes, y se relacionan con los niveles del Solutrense Medio existentes al pie de los mismos, como se ha dicho. Son surcos anchos y someros, de perfil en «U» abierta, muy lavados por la escorrentía de la pared, y en algunos casos apenas son visibles. Están situados a una altura inferior a los grabados de trazo fino, apareciendo cortados en la parte inferior (dimensiones, de izquierda a derecha: 4, 8, 8 y 4 x 5 a 7 mm). Integran este primer grupo cuatro surcos inclinados hacia la derecha, muy desgastados y ensanchados por erosión. Del primero, situado a la izquierda, apenas se conserva el fondo del grabado primitivo. Su disposición en grupos oblicuo-parallelos encuentra un paralelo cercano en los grabados secuenciales, típicos del arte mueble del Solutrense cantábrico.

## II.2. LOS GRABADOS DEL SECTOR DERECHO

A 90 cm de los anteriores se encuentran dos grupos de tres surcos grabados en torno a una concavidad natural, como es frecuente en el arte parietal solutrense. El último es un surco aislado, probablemente integrante de otro grupo perdido por la descamación del muro junto a la entrada. La factura técnica y erosión de los surcos son similares a los anteriores, y como ellos aparecen cortados por el desprendimiento de bloques del muro.

- **GRUPO 8:** Tres surcos anchos y desgastados (9,8 a 8 cm x 0,5 a 0,7 cm). Como los anteriores, están dispuestos en paralelo e inclinados hacia la derecha. En un extremo, apenas es visible el fondo de otro posible surco muy erosionado (5 x 0,4 cm) (Foto 2).

- **GRUPO 9:** A continuación, orientados en sentido opuesto, contornean la parte inferior de la misma concavidad dos surcos inclinados hacia la izquierda, ensanchados por la escorrentía de la pared (3,2 y 4,2 x 0,5 y 0,6 cm). Al otro lado de la concavidad, el tercero, muy erosionado, está orientado inversamente hacia la derecha (6 x 1 cm).

- **GRUPO 10:** A 29 cm de los anteriores, en la zona más alta del panel, cierra la serie otro surco aislado (6 x 1 cm), muy erosionado y afectado por descamaciones recientes.

## III. REFLEXIONES SOBRE LA CRONOLOGÍA DE LOS GRABADOS

Finalmente, en lo que se refiere a la cronología de los grabados parietales documentados, los grabados profundos de *trazo fusiforme* cuentan con amplios paralelos en la región, aunque su cronología es discutida. En el caso concreto de Las Caldas, un dato interesante se refiere al hallazgo en

la base del Magdaleniense Medio de la Sala II (nivel IX) de un voluminoso canto de cuarcita, grabado con una incisión profunda de perfil angular ensanchado que lo recorre en toda su longitud, análoga a los citados trazos fusiformes del Pasillo I. La superposición de estos grabados a otros muy finos (Grupo 1) torna creíble la hipótesis de su atribución cronológica al final del Magdaleniense Inferior o comienzos del Medio, en esta cueva (ca. 14500 calBC).

En cuanto a los tres motivos *claviformes*, que también pueden interpretarse como esquemas antropomórficos femeninos dado el polimorfismo de la representación humana paleolítica, tampoco carecen de paralelos en el arte mueble Solutrense Superior regional (La Riera y Balmori: CORCHÓN, 1994). Y en relación con la caracterización cronológica de la figura estilizada femenina, cuenta con numerosos paralelos en la nutrida colección de antropomorfos de los niveles del Magdaleniense Medio del yacimiento de la Sala II, que incluye figuras estilizadas y otras de tipo claviforme, destacando la diáfisis 3305 y las plaquitas 361 y 639 (CORCHÓN, 1999b). Otros paralelos se encuentran en el Solutrense Superior regional: una representación estilizada femenina grabada en una plaqueta de El Buxu, para la cual se ha señalado además su relación con el grabado parietal del sector B de un posible antropomorfo femenino en visión frontal, infrapuesto a un escaleriforme (MENÉNDEZ, 1999: 254). En el ámbito parietal extra-cantábrico, tanto los claviformes como la estilización femenina cuentan con paralelos cercanos entre los grabados parietales de la Meseta Norte atribuidos al Solutrense, en el *Gran Techo* del sector VI de la cueva de La Griega (CORCHÓN *et al.*, 1997: 71-73).

Y en último lugar, los grabados más típicamente solutrenses –los surcos actualmente anchos y someros por erosión, en series y disposición oblicua en paralelo–, cuentan con numerosos paralelos en los grabados secuenciales que caracterizan el arte mobiliario y parietal del Solutrense cantábrico y del suroeste europeo.

#### IV. INTEGRACIÓN DE GEOTECNOLOGÍAS PARA LA DIGITALIZACIÓN 3D DE LAS CAVIDADES

Durante el año 2006, en el marco de un proyecto interdisciplinar (BHA 2003-05438), encaminado a evaluar las posibilidades que ofrece la aplicación de diversas tecnologías geomáticas para obtener modelos digitales que reproduzcan la estructura original de las cuevas y la visualización tridimensional del arte parietal de las mismas, se iniciaron las investigaciones en la cueva de Las Caldas. Los trabajos de campo, continuados en 2007 y 2008 en el marco de otro proyecto (HUM 2007-66057), en curso, se ampliaron a la documentación 3D de otra cavidad ubicada en el mismo valle del Nalón: la cueva de La Peña (San Román de Candamo), que se describe en este mismo

volumen. Estos estudios integran los resultados obtenidos con el registro mediante el láser escáner terrestre (Terrestrial Laser Scanner; TLS, de ahora en adelante), equipos fotogramétricos y fotografía digital de los soportes y paneles en alta resolución.

Dadas las peculiaridades geométricas y radiométricas de ambas cavidades, el láser escáner se revela como la tecnología geomática más idónea, capaz de resolver los problemas derivados de un entorno sumamente frágil, de características muy específicas. Sin embargo, la tecnología láser escáner adolece de diversos inconvenientes: desde su alto coste y el carácter desordenado y masivo de la información capturada, hasta la imposibilidad de proporcionar datos que incorporen a las imágenes colores y texturas reales en alta resolución. Por ello, la metodología de trabajo aplicada resuelve estas limitaciones mediante la integración de técnicas geomáticas de fotogrametría de rango cercano y del láser escáner terrestre, para proporcionar una documentación y reconstrucción tridimensional integrales. De este modo, el TLS se configura como una técnica no agresiva que permite integrar informaciones procedentes de diversas fuentes, para generar productos gráficos de carácter métrico de gran interés para el análisis, la conservación y la difusión de los yacimientos y el arte prehistóricos.

Desde un punto de vista técnico, el principio operacional del TLS consiste en:

1. Desviar un rayo láser por medio de espejos móviles (rotatorios o bien oscilantes).
2. Reflejar el láser sobre una superficie.
3. Recepción del rayo reflejado desde dicha superficie.

Este proceso permite realizar lecturas espaciales de las superficies barridas, obteniendo a partir de referencias fijas tres coordenadas de cada punto donde el rayo haya incidido. Los datos así conseguidos son importados y procesados en un ordenador. El resultado es una nube de puntos que permite obtener representaciones tridimensionales de las superficies barridas por el láser. A diferencia de lo que ocurre con los sistemas de registro topográfico y toma de imágenes basados en la reflexión, la precisión en la medición de distancias lograda por el TLS está supeditada a la intensidad del rayo reflejado. Esta relación existente entre intensidad y precisión está bien establecida en las leyes de la física óptica, siendo los principales parámetros de esta ecuación la distancia, el ángulo de incidencia y las propiedades de la superficie. Siguiendo estos principios, durante los últimos años se ha desarrollado la tecnología de los láseres escáner que permiten realizar lecturas y generar topografías tridimensionales a diferentes escalas: desde TLS aéreos de largo alcance, orientados a la creación de ortofotomapas, hasta TLS de corto alcance, utilizados para realizar imágenes 3D de objetos singulares. En una situa-

ción intermedia se sitúa el láser escáner de alcance medio, destinado a topografías de detalle en interiores y exteriores, pudiendo ser utilizado para generar imágenes tridimensionales en espacios de configuración compleja, como es el caso de las cuevas del valle del Nalón estudiadas, con lugares de difícil acceso y salas interiores espaciosas.

## V. METODOLOGÍA APLICADA Y TOMA DE DATOS

Tanto en la cueva de Las Caldas como en La Peña de Candamo se ha empleado un TLS de medio alcance (Trimble GS200). Entre sus características técnicas básicas, cabe destacar que su láser es pulsado: emite la radiación de modo discontinuo, de ND: YAG. Su longitud de onda es  $\lambda=532$  y basa las mediciones de coordenadas sobre el principio operativo del «tiempo de vuelo». Quiere ello decir que calcula la distancia a la superficie analizada teniendo en cuenta el tiempo invertido por el pulso de radiación en incidir sobre la misma y retornar al foco emisor.

Las características técnicas del rayo láser generado por el Trimble GS200, en especial su longitud de onda, hacen que su utilización no implique daño o alteración de ningún tipo para la superficie de estudio, por lo que su empleo resulta adecuado para obtener una topografía de detalle de los frágiles soportes de las cuevas con arte parietal.

El multisensor incorpora una cabeza rotatoria y dos espejos internos, uno cóncavo fijo, y otro plano oscilante, configuración que permite obtener escenas panorámicas, con un máximo de  $360^\circ$  Hx y  $60^\circ$  V. Ello reduce el número de estacionamientos, aunque plantea limitaciones de alcance vertical, que se han subsanado ensamblando una rótula micrométrica (Manfrotto 400).

La precisión del TSL Trimble GS200 es de 1,5 mm a 50 m de distancia, con un diámetro del spot láser de 3 mm. En cuanto a la velocidad de lectura, alcanza los 5.000 pts/s, pues dispone de una frecuencia máxima de repetición de 5.000 Hz. Las principales características técnicas se describen en la Tabla 2.

Finalmente, el TSL permite determinar, en tiempo real, la coloración RGB de cada uno de los puntos escaneados, gracias a la cámara de vídeo que incorpora en su interior. No obstante, la resolución radiométrica de la cámara es bastante baja, tan sólo  $768 \times 576$  píxeles, lo que obliga utilizar una cámara externa de alta resolución. En este caso, se procedió a tomar series de imágenes digitales con una cámara digital convencional que proporciona imágenes al menos de  $3.360 \times 2.460$  píxeles (Tabla 3).

En último lugar, se utilizó una cámara panorámica Nikon D70 con objetivo Nikkor AF DX de «ojo de pez» con un campo óptico de casi  $180^\circ$  a lo largo de la

FABRICANTE	Trimble
MODELO	GS200
RANGO	Optimizado a 200 m, con 350 m de capacidad de sobreescaneo
RESOLUCIÓN	3 mm a 100 m
PRECISIÓN	1,5 mm a 50 m
VELOCIDAD	Hasta 5.000 pts/s
CAMPO DE VISIÓN	Horizontal: $360^\circ$ ; Vertical: $60^\circ$
PESO	13,6 kg
TAMAÑO	340 mm x 270 mm x 420 mm

TABLA 2: Láser escáner terrestre, Trimble GS200. Especificaciones técnicas.

SONY DSC F828	
RESOLUCIÓN DEL SENSOR	8 mp
TAMAÑO DE IMAGEN	$3.264 \times 2.448$ píxel
FOCAL	7,1 mm
TAMAÑO DEL SENSOR	$8,8 \times 6,6$ mm

TABLA 3: Cámara digital Sony DSC F828. Especificaciones técnicas.

CÁMARA NIKON D70	
RESOLUCIÓN DEL SENSOR	6 mp
TAMAÑO DE IMAGEN	$3.000 \times 2.000$ píxel
TAMAÑO DEL SENSOR	$23,7 \times 15,6$ mm
OBJETIVO NIKKOR AF DX	
FOCAL	10,5 mm
CAMPO A LO LARGO DE LA DIAGONAL	$175^\circ$
RÓTULA	
RANGO DESPLAZAMIENTO X	190 mm
RANGO DESPLAZAMIENTO Y	190 mm
RANGO DESPLAZAMIENTO Z	80 mm
RANGO GIRO HORIZONTAL	$360^\circ$
RANGO GIRO VERTICAL	$180^\circ$

TABLA 4: Cámara panorámica, Nikon D70 con objetivo Nikkor AF DX y con rótula Manfrotto 303SPH. Especificaciones técnicas.

diagonal. El sensor CCD ofrece una resolución de  $3000 \times 2000$  píxeles y da lugar a imágenes en formato JPEG (Tabla 4). De cara a garantizar la inmovilidad del punto de vista tanto como la regularidad angular en la dirección de los ejes de toma, esta cámara se estaciona sobre una rótula que ofrece cinco grados de libertad para la cámara: tres traslaciones (X, Y, Z) y dos rotaciones (horizontal y vertical).

El siguiente esquema (Figura 2) ilustra la metodología multisensor desarrollada y puesta en práctica para documentar y modelizar ambas cuevas paleolíticas<sup>4</sup>:

En la primera fase de trabajo, realizada sobre el terreno, se configuraron los diferentes sensores con sus parámetros básicos, planificando el número y ubicación de los estacionamientos de los diferentes sensores a utilizar: cámara digital, cámara panorámica y láser escáner terrestre. La adquisición de datos es llevada a cabo siguiendo unos protocolos y reglas básicas, en este caso particularizadas para los emplazamientos subterráneos.

Se llevaron a cabo tres tipos diferentes de tomas láser en esta fase de trabajo de campo:

A. TOMAS LÁSER GENERALES. Se efectuaron en las dos cavidades del complejo cárstico de Las Caldas. En Caldas I la toma láser global, con una resolución media de 20 milímetros a 10 metros de distancia, tiene como objetivo documentar la geometría y volumetría completas de la cueva. Simultáneamente, se localizaron con precisión la superficie objeto de excavaciones arqueológicas, y el vestíbulo con grabados parietales. En cambio, en Caldas II sólo se realizó el levantamiento topográfico de la entrada a la cueva. Este acceso, por donde actualmente desagua un río hipogeo inferior, ofrece un interés menor y se pospuso la realización de un levantamiento topográfico completo para una segunda fase del proyecto. Así, el recorrido a documentar quedó establecido en seis estacionamientos del multisensor en Caldas I, y sólo uno en Caldas II (Figura 3 y Foto 3).

La calidad de los resultados, en la fusión de las nubes de puntos obtenidas en cada estacionamiento, se ha garantizado solapando en torno al 25 % el área abarcada por cada una de las sucesivas estaciones. La identificación precisa de cada uno de los estacionamientos planteó algunas dificultades, dada la geometría compleja de la cavidad. El problema se solventó mediante la ubicación estratégica de dispositivos fijos de referencia con intervisibilidad. En concreto, sobre el punto cero de referencia en las intervenciones arqueológicas y en la verja exterior se ubicaron, respectivamente, la diana reflectora y una esfera (Foto 4). Esta maniobra estuvo encaminada a establecer el eje longitudinal de las cuadrículas excavadas, a fin de ubicar estas últimas en el modelo 3D de la cavidad generado a partir de los datos obtenidos por el TSL.

<sup>4</sup> La descripción pormenorizada de la metodología aplicada para la reconstrucción tridimensional del interior de la cueva de Las Caldas, mediante la integración de los diversos sensores geomáticos, en: GONZÁLEZ AGUILERA, D. *et al.*: «Tecnologías geomáticas aplicadas en la cueva de Las Caldas», en M.<sup>a</sup> S. Corchón (coord.): *La cueva de Las Caldas. I. Arte parietal y estudio de los niveles magdaleniense de la Sala II* (en prep.).

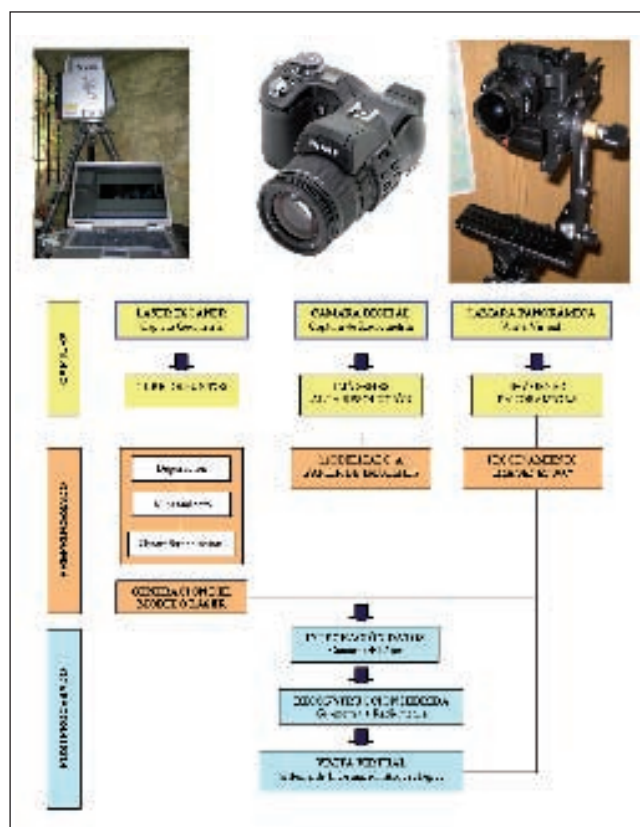


FIGURA 2: Metodología empleada para la documentación y modelización de Las Caldas.

B. TOMAS LÁSER DE DETALLE (PANEL DE LOS GRABADOS). Mientras que los escaneados globales, anteriormente descritos, tienen como objetivo la obtención de un modelo tridimensional del contexto, el escaneado detallado pretende evaluar las posibilidades que ofrece, como herramienta de análisis, la topografía en detalle 3D de los soportes más significativos. A tal fin, en el vestíbulo de Caldas I, que alberga los grabados paleolíticos, se estableció una resolución de malla media de 2 mm, a 10 m de distancia.

C. TOMAS LÁSER DE TARGETS. Diversos puntos singulares de control, materializados por marcadores artificiales (tarjetas y esferas), fueron repartidos por toda la cavidad y levantados con el propio láser escáner terrestre con un doble propósito: registrar todos los sensores (cámaras y TSL) bajo un mismo sistema de referencia, y georreferenciar ambos conjuntos de datos (nubes de puntos e imágenes) en el marco arqueológico existente proporcionado por los arqueólogos. Asimismo, la propia definición del sistema de referencia permitió establecer con precisión un sistema altimétrico (punto de cota cero) y los ejes delimitadores de la excavación arqueológica.







FOTO 3: Las Caldas II. Ejemplo de resultado de generación de un modelo 3D antes del procesado final.

o escaneados, permite obtener el objeto a documentar en un único sistema de referencia. Establecemos un sistema local o global de referencia a través de la definición de un origen y dirección de los ejes X, Y, Z, estando los datos láser en un sistema único y común. Para ello, es necesario que las tomas de datos láser tengan asignados solapamientos superiores al 10 %, para lograr la precisión suficiente en el alineamiento (fusión de nubes) y evitar la imposibilidad de alinear tomas.

En síntesis, las tareas realizadas en Caldas I, se sintetizan en:

- **REGISTRO Y FUSIÓN DE NUBES DE PUNTOS.** Se encajaron las seis estaciones bajo un mismo sistema de referencia, apoyándose en una red esferas y dianas distribuidas en el interior de la cueva para este propósito. El 25 % de solapamiento mantenido entre nubes de puntos adyacentes garantizó la calidad de los resultados obtenidos tras la aplicación de los procesos iterativos basados en el algoritmo ICP (Iterative Closest Point).

- **SEGMENTACIÓN Y FILTRADO.** Mediante estas operaciones se eliminaron todos aquellos puntos y elementos innecesarios. Para ello se emplearon diversos tipos de fil-



FOTO 4: Escáner y esfera sobre la verja de entrada a Caldas I y generación de un modelo 3D pre-procesado.

tros combinados con segmentaciones manuales al objeto de depurar el modelo.

- **TRANSFERENCIA DE TEXTURAS.** Puesto que la información radiométrica proporcionada por la cámara interna de la que está dotado este dispositivo es claramente insuficiente, hubo que recurrir al empleo de una cámara digital de alta resolución externa para integrar información de color de buena calidad en el modelo láser. Respecto de la toma de imágenes de alta resolución, hay que reseñar que las tomas fotográficas se realizan de modo independiente al escaneado; sin embargo, se adoptó el criterio de que las posiciones de ambos sensores no distasen demasiado (Figura 4). Se realizaron dos tipos diferentes de tomas fotográficas que, en algunos casos, necesitaron un pre-procesado para corregir los defectos de iluminación:

- Imágenes independientes, usadas para transferir texturas a los escaneados de detalle.

- Imágenes panorámicas, usadas para proporcionar un ángulo de visión de 360 grados y apoyar la transferencia de texturas sobre el modelo global.

El objetivo final es generar mosaicos fotogramétricos de los paneles decorados que, una vez fusionados con los modelos 3D de las superficies que los sustentan, proporcionan un registro preciso tanto del soporte como de los grabados.

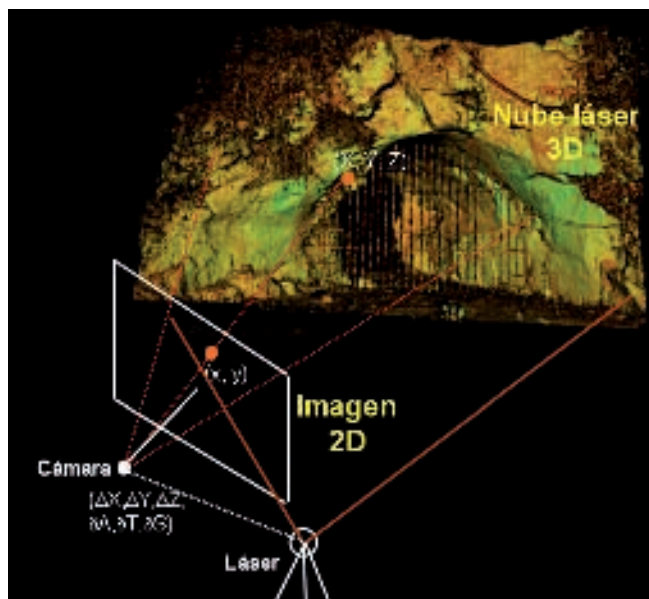


FIGURA 4: Las Caldas I. Modelo de registro del láser escáner y la cámara digital.

La incorporación de la textura fotográfica al modelo láser es una labor paciente, que requiere bastante tiempo para conseguir buenos resultados. Además, esta fase del procesado de datos es también una tarea delicada, ya que supone la fusión de información procedente de dos sensores diferentes: uno con información bidimensional (la cámara), y otro con información tridimensional (el escáner láser). La proximidad entre los puntos de estacionamiento del escáner y los puntos desde los que se realizaron las fotografías contribuye a la mejora de la calidad del modelo.

En los trabajos realizados en las cuevas de Las Caldas y Candamo, la extracción de puntos homólogos (conocida como *matching* en la práctica fotogramétrica) permite integrar la textura de la cámara con el modelo láser. Los puntos homólogos actúan como puntos de anclaje en el proceso de georreferenciación de la textura o las realizaciones parietales sobre el modelo láser. Así, cuantos más puntos homólogos sean extraídos y correspondidos, la calidad del proceso será mayor. En nuestro caso, se utilizó siempre un mínimo de 8 puntos homólogos (Foto 5 y Figura 5).

Por tanto, la integración de la imagen digital y el modelo láser es una operación esencial dentro del flujo de trabajo, ya que permite tener bajo un mismo sistema de coordenadas los datos arqueológicos y topográficos. No obstante, el proceso no es, en absoluto, sencillo máxime cuando se pretende hacerlo de forma totalmente automática. Y en ocasiones, el propio usuario será el que tenga que asistir el proceso mediante la búsqueda manual de los puntos homólogos.

- **GEORREFERENCIACIÓN DEL MODELO.** Después de las operaciones anteriores, hubo que repositonar geoméricamente el modelo para ajustarlo en el sistema

de coordenadas establecido durante las excavaciones arqueológicas. El objetivo perseguido con ello era facilitar la integración de información gráfica obtenida, con anterioridad o posterioridad, sobre el propio modelo 3D.

## VII. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS. LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DERIVADOS

Una vez construido y georreferenciado un modelo dotado de texturas de calidad, la obtención de productos gráficos derivados se convierte en una tarea de ejecución sencilla e inmediata. Algunos de ellos son: el cálculo y la representación de secciones, curvados, mallas de triángulos, determinación de medidas, volumetrías, etc. En la investigación realizada en Las Caldas, se obtuvieron diversos productos derivados, referidos a tres niveles o planos de información:

A) Un plano básico basado en el soporte métrico tridimensional, proporcionado directamente por el TSL. Esta es una de las cualidades más interesantes del TSL: la calidad geométrica de la información adquirida, imposible de conseguir mediante las técnicas clásicas de topografía y fotogrametría. El modelo métrico tridimensional permite al arqueólogo obtener de modo automático mediciones métricas (distancias, superficies y volumetrías), mapas de alturas y secciones transversales, que muestran con rigor la morfología de la cueva mediante perfiles transversales y longitudinales (Figura 5).

En el caso del Panel de los Grabados se ha realizado con una resolución de 2-3 milímetros. En cambio, el modelo métrico global 3D de la cueva está escaneado con una resolución de 1-2 centímetros, suficiente para permitir la extracción inmediata de magnitudes espaciales como distancias, diferencias de nivel, ángulos, superficies y volúmenes (Figura 5, arriba). En el mismo orden de cuestiones, se



FOTO 5: Las Caldas I. Extracción puntos homólogos en el Pasillo I con el Panel de los grabados.

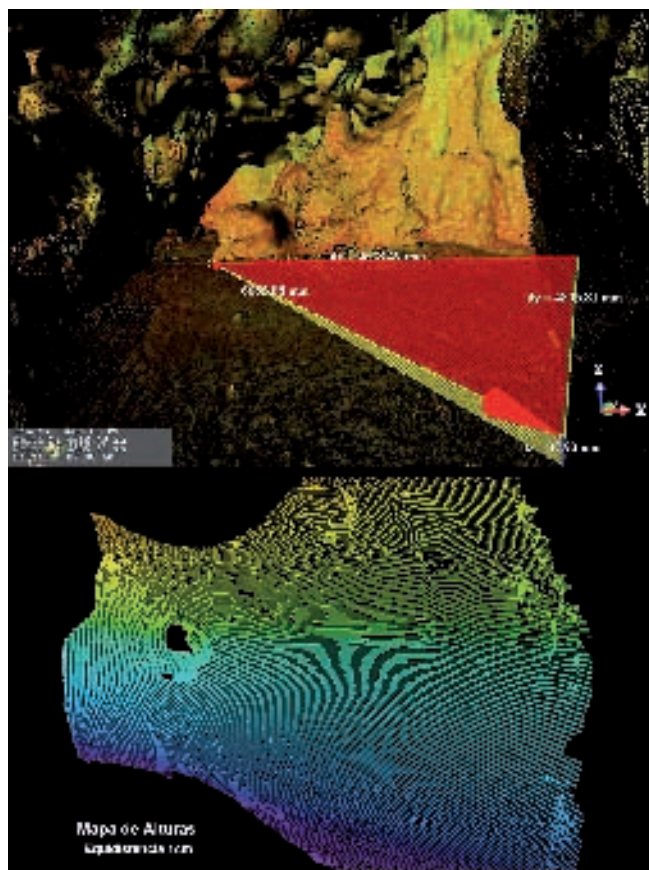


FIGURA 5: Arriba, Sala I de Las Caldas, modelo métrico global láser. Abajo, mapa de alturas del muro derecho (Panel de los Grabados). Equidistancia: 1 cm.

han obtenido secciones transversales en formato vectorial, que muestran la forma y el perfil de la cueva a lo largo del eje de excavación. Una sección sobre el plano Z ajustado al nivel 0 de la cueva nos permitió extraer el plano en planta de la misma, sobre el cual se incorporan las cuadrículas de las excavaciones (Figura 3).

B) Un plano intermedio, basado en el modelizado híbrido que combina datos láser con imágenes de alta resolución y otras panorámicas, que permite al prehistoriador obtener un modelo integral foto-realístico (Figura 6). Estos modelos tridimensionales texturizados, elaborados sobre la base de una malla de triángulos irregulares, resultan particularmente útiles para la interpretación y análisis arqueológicos, al igual que las imágenes sólidas (Figura 7) y las ortofotos en color. En relación con estas últimas, la eliminación de las distorsiones ópticas y de los efectos del relieve convierte a las ortofotos en un documento con las propiedades métricas de un mapa.

C) En tercer lugar, en un plano avanzado se sitúan los soportes de realidad virtual que integran todos los datos adquiridos, georreferenciados bajo una misma plataforma. Este nivel permite establecer, a modo de visita virtual, una

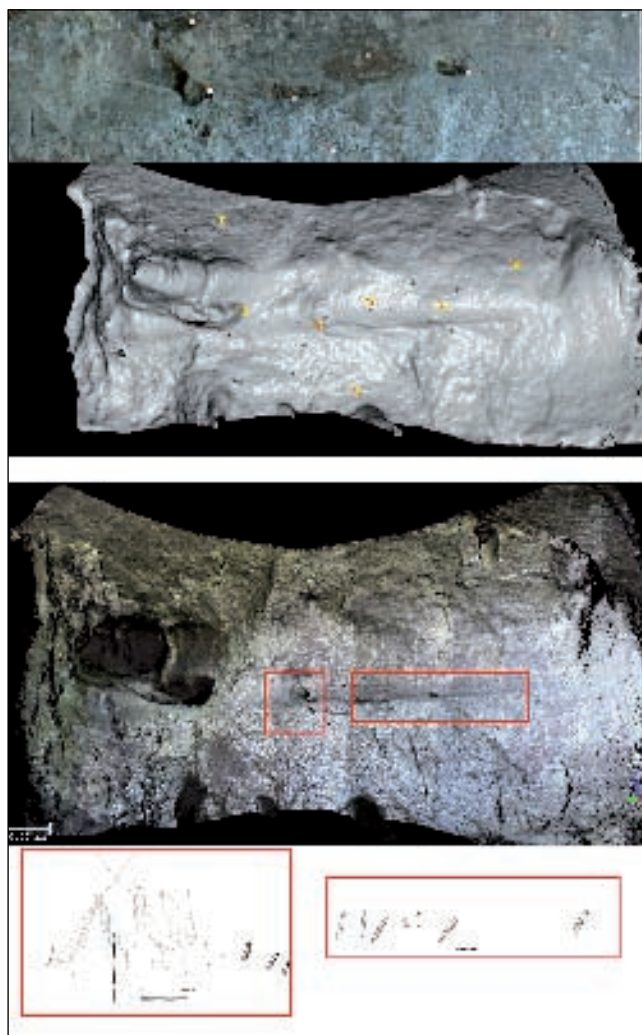


FIGURA 6: Panel de los Grabados: integración de la imagen digital y el modelo láser (arriba). Modelo fotorrealístico del panel (abajo).

catalogación y un fichero o *archivo digital* de la cueva de Las Caldas, y generar un sistema de información arqueológico que integre todos los datos adquiridos. A su vez, el *vuelo virtual* muestra, a lo largo de una trayectoria definida, una secuencia de planos de visualización en modo dinámico. Se trata, en suma, de productos multiescalables que ofrecen diferentes niveles de información: un nivel experto de uso científico y técnico, y otro de acceso virtual a la cavidad para el usuario no experto (Figura 8).

## BIBLIOGRAFÍA

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1990): «La cueva de Las Caldas (Priorio, Oviedo). Investigaciones efectuadas entre 1980 y 1986», *Excavaciones Arqueológicas en Asturias 1983-1986*, Consejería de Cultura, Oviedo, pp. 37-53.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1992): «La cueva de Las Caldas (Priorio, Oviedo) II. Investigaciones efectuadas entre 1987 y 1990»,

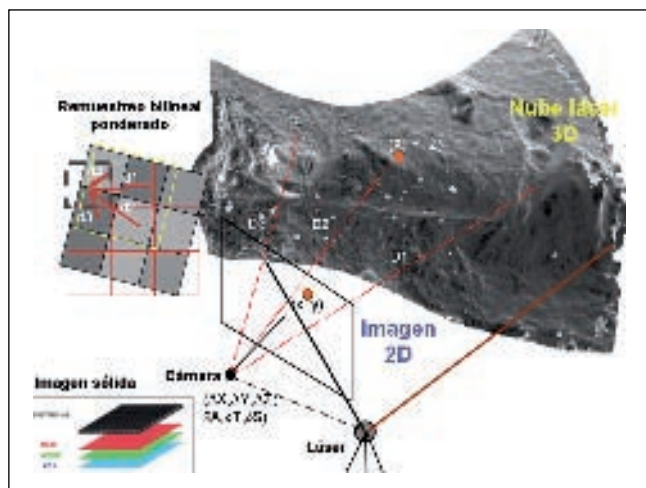


FIGURA 7: Proceso de generación de la imagen sólida sobre el Panel de los Grabados de la cueva de Las Caldas.



FIGURA 8: Catalogación digital y visita virtual de la cueva de Las Caldas. Sistema de información arqueológica.

*Excavaciones arqueológicas en Asturias (1987-90)*, Consejería de Cultura, Oviedo, pp. 33-47.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1994): «Últimos hallazgos y nuevas interpretaciones del arte mueble paleolítico en el Occidente asturiano», *Complutum*, 5, Arte paleolítico: pp. 235-264.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1995): «La Cueva de Las Caldas (Priorio, Oviedo) III. Resultados preliminares de las excavaciones (Campañas 1991-1994)», *Excavaciones arqueológicas en Asturias (1991-94)*, Consejería de Cultura, Oviedo, pp. 45-60.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1999A): «La Cueva de Las Caldas (Priorio, Oviedo) IV. Resultados preliminares de las excavaciones (Campañas 1995-1998)», *Excavaciones Arqueológicas en Asturias (1995-98)*, Consejería de Cultura, Oviedo, pp. 43-57.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (1999B): «Nuevas representaciones de antropomorfos en el Magdaleniense Medio cantábrico», *Zephyrus* LI: 35-60.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (2005): «Europa 16500-14000 a. C.: un lenguaje común», en P. Arias y R. Ontañón (eds.): *La materia del lenguaje prehistórico*, Ed. Ministerio de Cultura, Gobierno de Cantabria, IIPC, 2ª edición (corregida y aumentada), Madrid, pp. 105-126.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (2007): «Investigaciones en la cueva de Las Caldas. V. Los niveles del Magdaleniense superior», *Excavaciones arqueológicas en Asturias (1999-2002)*, Consejería de Cultura, Principado de Asturias, Oviedo, pp. 45-67.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S.; HOYOS GÓMEZ, M.; SOTO, E. (1981): *La cueva de Las Caldas (San Juan de Priorio, Oviedo)*, Ministerio de Cultura, Excavaciones Arqueológicas en España, vol. 115, Madrid, 268 pp.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (coord.) 1997: *La cueva de La Griega de Pedraza (Segovia)*, Arqueología de Castilla y León, 3. ed., Junta de Castilla y León, 1997, 278 pp.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S.; RIVERO VILÁ, O. (2009): «Los rodetes del Magdaleniense Medio cántabro-pirenaico. Análisis tecnológico y nuevas evidencias de la cueva de Las Caldas (Asturias, España)», *Zephyrus* LXI, 2008-I, pp. 63-86.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S.; GARCÍA, E.; GONZÁLEZ AGUILERA, G.; MUÑOZ NIETO, A. L.; GÓMEZ LAHOZ, J.; HERRERO PASCUAL, J. S. (2009): «3D scanning and three-dimensional modelling: a new methodology applied to the study and conservation of Palaeolithic rock art. The examples of Las Caldas cave (Priorio, Asturias) and the Peña de Candamo (San Román de Candamo, Asturias, Spain)», *Acts of the XV th International Congress UISPP, Lisbon (4-9 sept., 2006)*, BAR Int. Series Hadrian Books Ltd. Oxford (i. p.).

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S.; TARRIÑO, A.; MARTÍNEZ, J. (2009): «Mobilité, territoires et relations culturelles au début du Magdalénien moyen cantabrique: nouvelles perspectives», *Acts of the XV th International Congress UISPP, Lisbon (4-9 sept., 2006)*, BAR Int. Series, Oxford, 1938, pp. 217-230.

CORCHÓN RODRÍGUEZ, M.<sup>a</sup> S. (en prep.): *La cueva de Las Caldas (San Juan de Priorio, Oviedo). Los niveles magdalenienses de las Salas I y II, y los grabados parietales* (vol. 1 de la monografía dedicada al yacimiento).

GONZÁLEZ AGUILERA, G.; MUÑOZ, A. L.; GÓMEZ, J.; HERRERO, J. S., CORCHÓN, M.<sup>a</sup> S.; LAGE, M.; GARCÍA, E. (2009): «Recording and modeling Paleolithic caves through laser scanning», *Proceedings IEEE/ GEOWS (2009). IEEE Xplore 2009*: 19-26.

MENÉNDEZ, M. (1999): «Tectiformes y otros signos parietales de la Cueva del Buxu», en: *De Oriente a Occidente. Homenaje al doctor Emilio Olávarri, Bibliotheca Salmanticensis*, Est. 25, Universidad Pontificia, Salamanca: 247-265

WENINGER, B.; JÖRIS O.; DANZEGLOCKE, U. (2007): *Calpal-Hulu*, Cologne University Radiocarbon Calibration Package, mai 2007.