

CÆSARAUGUSTA

Documentación geométrica del patrimonio cultural

Análisis de las técnicas, ensayos y nuevas perspectivas

JORGE ANGÁS PAJAS





CUBIERTA

Composición a partir de un detalle de una escultura romana de la *terza corte* del *Palazzo Vecchio* (Florencia), digitalizada con un escáner de luz estructurada (FIG. 70), y el alzado norte compuesto del *Palazzo Vecchio* y parte de la *Piazza della Signoria*, extraído de la nube de puntos en escala de grises de la fachada exterior y de la zona documentada interior correspondiente a *Via dei Gondi* (FIG. 116), tratadas infográficamente.

La versión original y completa de esta obra debe consultarse en:
<https://ifc.dpz.es/publicaciones/ebooks/id/3782>



Esta obra está sujeta a la licencia CC BY-NC-ND 4.0 Internacional de Creative Commons que determina lo siguiente:

- **BY (Reconocimiento):** Debe reconocer adecuadamente la autoría, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciador o lo recibe por el uso que hace.
- **NC (No comercial):** La explotación de la obra queda limitada a usos no comerciales.
- **ND (Sin obras derivadas):** La autorización para explotar la obra no incluye la transformación para crear una obra derivada.

Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.

86
CAESARAUGUSTA

CONSEJO DE REDACCIÓN

DIRECTOR

MIGUEL BELTRÁN LLORIS

CONSEJEROS

GUILLERMO FATÁS CABEZA

MANUEL A. MARTÍN BUENO

JOSÉ MARÍA RODANÉS VICENTE

PILAR UTRILLA ARANDA

ANTONIO BELTRÁN MARTÍNEZ †

SECRETARIO

CARLOS SÁENZ PRECIADO

CONSEJO ASESOR

JOSÉ ANTONIO ABÁSULO ÁLVAREZ

Universidad de Valladolid

CARMEN ARANEGUI GASCÓ

Universidad de Valencia

ENRIQUE ARIÑO GIL

Universidad de Salamanca

IGNACIO BARANDIARÁN MAESTU

Universidad del País Vasco

RICHARD J. HARRISON

Universidad de Bristol

PILAR LEÓN ALONSO

Universidad de Sevilla

ATTILIO MASTINO

Universidad de Sassari

JUAN ÁNGEL PAZ PERALTA

Museo de Zaragoza

JEAN MICHEL RODDAZ

Universidad de Burdeos

LAWRENCE STRAUS

Universidad de Alburquerque, USA

VALENTÍN VILLAVERDE BONILLA

Universidad de Valencia

ÁNGELA DONATI †

Universidad de Bolonia

JESÚS FORTEA PÉREZ †

Universidad de Oviedo

JESÚS LIZ GIRAL †

Universidad de Salamanca

CÆSARAUGUSTA

Documentación geométrica del patrimonio cultural

Análisis de las técnicas, ensayos y nuevas perspectivas

JORGE ANGÁS PAJAS



INSTITUCIÓN FERNANDO EL CATÓLICO
Excma. Diputación de Zaragoza

Zaragoza, 2019

Publicación núm. 3699 de la
Institución Fernando el Católico,
organismo autónomo
de la Excma. Diputación de Zaragoza,
plaza de España, 2. 50071 Zaragoza (España)
tels. [34] 976 288 878 / 976 288 879
ifc@dpz.es
<https://ifc.dpz.es>



•
Diseño gráfico
Víctor Lahuerta

•
Impresión
Zitro Comunicación, SL

•
Encuadernación
Raga, SA

•
ISBN 978-84-9911-555-9
Depósito legal Z 1143-2019

•
Hecho e impreso en España–Unión Europea
Made and Printed in Spain–European Union

•
Toda la correspondencia, peticiones de envíos,
remisión de publicaciones, etc., deben dirigirse a
Institución Fernando el Católico
Palacio Provincial, plaza de España, 2. 50071 Zaragoza (España)



A modo de introducción: pasado, presente y futuro de *Cæsaraugusta*

Este nuevo formato de la revista decana de Aragón, *Cæsaraugusta*, requiere de unas líneas que condensen el espíritu de nuestra publicación, que se ha ido adaptando al paso de los tiempos, prolongando el deseo de servicio a nuestra comunidad, con la divulgación del progreso científico en materia de antigüedad.

Cæsaraugusta, nació hace 68 años, como *Publicaciones del Seminario de Arqueología y Numismática Aragonesas*, PSANA, bajo la dirección de Antonio Beltrán Martínez, Jefe de la Sección de Arqueología y Numismática de la Institución Fernando el Católico. En su primera andadura cumplió con creces el ideario de su fundación, destinado a la antigüedad, a los alumnos universitarios, la investigación, el afán divulgador... Desde dicho momento este medio se convirtió en el espacio natural de divulgación y promoción científica del patrimonio arqueológico, etnológico y numismático del territorio de Aragón, siendo durante muchos años, el principal y único medio de difusión puesto a la disposición de los investigadores y reflejando en su estructura el espíritu universitario y humanista de su fundador.

En el preámbulo de la recién nacida revista se enunciaron los puntos que habrían de marcar el desarrollo de la publicación y que se han mantenido a través del tiempo: «1. Ámbito geográfico. Especialmente dedicado a lo regional y local, atendiendo a las provincias aragonesas, sin dejar de lado las comarcas de la Corona de Aragón y los temas generales que puedan afectarlas; 2. Ámbito cronológico. El de la propia antigüedad, hasta el final de los pueblos germánicos, en lo numismático hasta el fin de las acuñaciones privadas aragonesas y en lo epigráfico hasta lo medieval; 3. Ámbito temático. La antigüedad aragonesa y la relacionada con ella, así como las propias disciplinas definidas».

Las páginas de la revista han venido acogiendo sistemáticamente los primeros trabajos de los investigadores aragoneses que en sucesivas generaciones han dedicado sus desvelos al estudio de nuestro patrimonio antiguo o etnológico: Manuel Pellicer (1951), Enrique Vallespí (1953), María Ángeles Mezquíriz (1953), Purificación Atrián (1954), Carmelo Lisón (1955), Mercedes Pueyo (1957), Guillermo Fatás (1964), Ignacio Barandiarán (1964), Concepción Blasco Bosqued (1964), Miguel Beltrán Lloris (1965), Manuel Antonio Martín Bueno (1967), Jorge Eiroa García (1968), Teresa Andrés (1972), Pilar Casado (1972), Joaquín Lostal Pros (1977) y un largo etcétera hasta nuestros días.

A la primera etapa PSANA (1951-1954), se añade (1954) la nueva cabecera, *CÆSARAUGUSTA* y a su contenido inicial, se suman los museos y la etnología y comienzan a hacer acto de presencia las tesis de licenciatura o doctorales y de forma muy intensa las excavaciones y prospecciones arqueológicas del territorio aragonés, así como las bio-bibliografías arqueológicas y las conclusiones de congresos y reuniones científicas. Desde 1965, con la creación de la Cátedra Galiay, la revista se convertirá en su órgano de expresión, con la misma dirección, enunciados y cabecera y la lógica evolución en determinados aspectos de información y contenidos, hasta la década de los ochenta del pasado siglo.

En el periodo más reciente, desde 1986, la dirección de la revista vino asumida por Miguel Beltrán. En esta etapa de la revista se han mantenido los principios vigentes en la misma, continuando nuestras páginas acogiendo trabajos de tipo generalista, tanto de investigadores consagrados, como de licenciados aventajados, manteniendo el espíritu ya existente y en parte procediendo a dar a la luz compromisos y encargos de la propia revista a diversos autores. En dicho periodo se han dedicado números especiales a la *Crónica bibliográfica del Aragón Antiguo*, desde el Paleolítico hasta el siglo XII, y comenzó a desarrollarse con fuerza la publicación de números monográficos, combinada con la publicación de los resultados de las excavaciones arqueológicas, necesitadas en muchas ocasiones de mayor extensión de la que brindaban las páginas de los informes reglamentarios rendidos a la administración autonómica.

En el año 2001, la revista asumió sus cincuenta años de andadura, con un número extraordinario y nuevo diseño de Víctor Lahuerta, en el que se abordó de forma sistemática una *Crónica del Aragón Antiguo* entre los años 1994 y 1998, continuando el ya emprendido del periodo 1987-1993 y siguiendo su misma estructura. Desde dicho momento el consejo de redacción, quedó conformado por Antonio Beltrán Martínez, Guillermo Fatás Cabeza, Manuel A. Martín Bueno y Pilar Utrilla Miranda, figurando como secretario Carlos Sáenz Preciado, además de un nutrido consejo asesor con representantes de las principales universidades españolas, del Reino Unido, Francia e Italia, a quienes nunca hemos agradecido de forma suficiente su valiosa actuación. De dichos órganos de gestión han causado baja por fallecimiento, Antonio Beltrán Martínez (2006), Javier Fortea Pérez (2009) y Jesús Liz Giral (2015).

En los inicios de *Cæsaraugusta*, solo la revistas *Teruel* (1949) y *Argensola* (1950), de contenidos generalistas y dependientes de los Institutos de Estudios hermanos, turolense y oscense, participaban en el panorama aragonés. Actualmente ha aumentado notablemente el número de publicaciones existentes en Aragón, dedicadas a ámbitos semejantes al de nuestra revista, y su existencia ha obligado continuamente a posicionar los postulados de *Cæsaraugusta*.

Exceptuadas las *Monografías Arqueológicas* de la Universidad (desde 1966), en la década de los 70 del siglo XX, surgen tres publicaciones de los Centros de Estudios Locales, Borjano (*Cuadernos de estudios Borjanos*, 1978) y Caspolino (*Bajo Aragón Prehistoria, Cuadernos de Estudios Caspolinos*, 1979). Pero es en la década de los 80 cuando se produce una auténtica explosión de revistas, nueve, entre las cuales, dedicadas exclusivamente a la antigüedad miscelánea, sobresalen *Kalathos* (1981), *Arqueología Aragonesa* (1984 hasta 2009) y *Bolskan* (1985) y contemplando además aspectos de historia comarcal o particular, *Turiaso* (1980), *Museo de Zaragoza, Boletín* (1982), *Encuentros de Estudios Bilbilitanos* (1983), *Tolous* (1984) y *Al-Qannis* (1989). Finalmente, *Salduie* (2001). Y en el mismo año (2001) y en el seno de la propia Institución Fernando el Católico, *Palaeohispanica*, de contenido arqueológico, epigráfico, numismático e histórico.

A este panorama editorial, verdaderamente abrumador, se suma la propia serie de monografías de la Institución Fernando el Católico, que vienen publicándose de forma esporádica desde 1946 con la *Dominación romana en Aragón*, de José Galiay hasta la reciente *Las cloacas de Cæsaraugusta* (2013), y que se verán reconducidas bajo la cabecera de la renovada serie de CÆSARAUGUSTA, cuyo nuevo formato ofrece natural cabida a las exigencias de dichos trabajos.

Así, se ha juzgado oportuno, a propuesta del Consejo de redacción, continuar en los contenidos monográficos, especializados, ya enunciados en el periodo precedente, y que constituyen una carencia notable en nuestro panorama editorial. Además, para favorecer su carácter universal, se adopta para *Caesaraugusta* un nuevo formato, como se ha comentado, físicamente de mayor tamaño, que permite su mejor expresión gráfica y la inclusión de escalas de figuras evitadas hasta ahora por las limitaciones de espacio. Se aborda esta renovación a partir del presente año 2019, conservando el espíritu, cabecera, logotipos y colores de CÆSARAUGUSTA, como el mejor medio de asegurar la permanencia, solvente, en nuestro enriquecido ámbito editorial, de la revista de Antigüedad decana de Aragón.

Zaragoza, 12 de febrero de 2019

Miguel Beltrán Lloris

Sumario

11	Prólogo
15	Agradecimientos
16	Glosario de acrónimos
17	Introducción
18	Objetivos y estructura del estudio
21	1. Estado de la cuestión: antecedentes
23	1.1. Documentación y difusión del patrimonio cultural: una propuesta dual en el siglo XXI
24	1.1.1. La intervención pública en la documentación del patrimonio: recomendaciones de organismos públicos
25	1.2. Una retrospectiva sobre el significado de documentación del patrimonio
29	1.3. Proyectos de documentación en el contexto europeo: la gestión de modelos tridimensionales en bases de datos
30	1.3.1. ARIADNE
31	1.3.2. 3D COFORM
31	1.3.3. Europeana. <i>Connecting Archaeology and Architecture in Europeana</i> (CARARE)
32	1.3.4. 3D-ICONS
32	1.3.4.1. Técnicas de registro de datos 3D
34	1.3.5. Otros proyectos desarrollados de referencia
34	1.3.5.1. Prototipo <i>QueryArch3D</i>
35	1.3.5.2. Huma-Num. <i>La TGIR des humanités numérique</i>
35	1.3.6. Proyectos dedicados al Arte Rupestre
39	1.3.6.1. HANDPAS
41	2. Clasificación y análisis de las principales técnicas y herramientas empleadas en la documentación geométrica del patrimonio cultural
43	2.1. Introducción
44	2.2. La invención y desarrollo de la captura de imágenes en la arqueología: entre el dibujo y la fotografía

44	2.3. La incorporación de plataformas aéreas
44	2.3.1. La fotografía aérea arqueológica
48	2.3.2. Las plataformas satelitales
48	2.3.3. La fotografía aérea de baja altura: los sistemas RPAS o drones
50	2.3.3.1. Clasificación de los RPAS o drones
57	2.3.3.2. Tipologías y usos de sensores
59	2.4. El desarrollo de los instrumentos óptico-electrónicos
59	2.4.1. Técnicas de topografía clásica
59	2.4.1.1. Teodolito
59	2.4.1.2. Nivel
60	2.4.1.3. Estación total
61	2.4.1.4. Sistemas de posicionamiento global satelital GNSS
62	2.4.2. Escáner tridimensional: tipología
62	2.4.2.1. Objeto cercano
63	2.4.2.2. <i>Terrestrial Laser Scanner</i> (TLS)
65	2.4.2.3. <i>Aerial Laser Scanner</i> (ALS)
65	2.4.2.4. <i>Mobile Laser Scanner</i> (MLS)
66	2.5. La era de la computación y el desarrollo del <i>software</i>
66	2.5.1. Técnicas de correlación automática de imágenes (SfM) para reconstrucciones tridimensionales: aeronaves RPAS o drones
68	2.5.2. Técnicas de registro geométrico de bajo coste
73	3. Ensayos metodológicos en el proceso documental
76	Tratamiento de la información
76	Valorización y difusión de la información tridimensional: democratización de resultados en la sociedad de la información actual
77	3.1. Bienes muebles: digitalización y reproducción
77	3.1.1. Aplicaciones
79	3.1.2. Digitalización de esculturas
81	3.1.3. Diferentes estrategias en la documentación
82	3.1.4. Postproceso y tipos de réplicas
82	3.1.4.1. Tipos de réplicas
83	3.2. Arte rupestre
83	3.2.1. Introducción
86	3.2.1.1. La documentación gráfica y geométrica del arte rupestre y la necesidad de su organización
88	3.2.2. Abrigos rupestres: proyecto ARAM
88	3.2.2.1. Antecedentes
89	3.2.2.2. Metodología
90	3.2.2.3. Fases de realización
90	3.2.2.4. Herramientas utilizadas en la documentación gráfica y geométrica
92	3.2.2.5. Calcos digitales
93	3.2.2.6. Modelos tridimensionales
94	3.2.2.7. Resultados y conclusiones
95	3.2.3. Cuevas paleolíticas: Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca)
95	3.2.3.1. Introducción

96	3.2.3.2. Metodología
99	3.2.3.3. Resultados
99	3.2.3.4. Conclusiones
100	3.3. Yacimientos arqueológicos
100	3.3.1. Técnicas de documentación geométrica de bajo coste en arqueología: Labitolosa (La Puebla de Castro, Huesca) y Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza)
100	3.3.1.1. Introducción
100	3.3.1.2. Técnicas empleadas
102	3.3.1.3. Resultados y conclusiones
103	3.3.2. Arqueología urbana
103	3.3.2.1. Documentación geométrica de los restos arqueológicos hallados en el solar del Círculo Católico (Huesca)
111	3.3.2.2. <i>Florentia</i> : documentación del teatro y anfiteatro romano (Florenia)
116	3.4. Monumentos arquitectónicos
116	3.4.1. Patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro
116	3.4.1.1. Introducción
118	3.4.1.2. Contexto cultural y antecedentes historiográficos
122	3.4.1.3. Metodología desarrollada
124	3.4.1.4. Resultados obtenidos: aplicación de estándares en el postproceso de la información
126	3.4.1.5. Conclusiones
126	3.5. Arqueología del paisaje: documentar lo que no se ve
126	3.5.1. Introducción: la teledetección
128	3.5.2. Objetivos del estudio
128	3.5.3. El contexto histórico-arqueológico: el valle medio del Ebro en época romana
128	3.5.4. El yacimiento romano republicano de Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza)
128	3.5.5. La ciudad imperial de Labitolosa (La Puebla de Castro, Huesca)
129	3.5.6. Adquisición de los datos de campo
129	3.5.6.1. Fase topográfica
129	3.5.6.2. Fase de vuelo
132	3.5.6.3. Postproceso de la información
132	3.5.7. Tratamientos aplicados a las imágenes
132	3.5.7.1. Realces y mejoras visuales
133	3.5.7.2. Extracción de información temática: creación de neocanales
134	3.5.7.3. Extracción de información temática: clasificación digital de la imagen
135	3.5.8. Resultados obtenidos
136	3.5.8.1. Resultados de la metodología aplicada
141	3.5.8.2. Resultados arqueológicos
141	3.5.9. Conclusiones
143	3.6. La reconstrucción patrimonial mediante modelos tridimensionales
143	3.6.1. Antecedentes
146	3.6.2. Arte rupestre: propuesta de restauración digital del arte rupestre destruido de los abrigos de Roca dels Moros y Els Gascons (Cretas, Teruel)
146	3.6.2.1. Historiografía de las investigaciones
147	3.6.2.2. Los abrigos rupestres
147	3.6.2.3. Técnicas aplicadas

152	3.6.2.4. Resultados
154	3.6.2.5. Conclusiones
154	3.6.3. Arquitectura: el acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)
154	3.6.3.1. Propuesta de reconstrucción tridimensional del acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)
156	3.6.3.2. Objetivos del proyecto
157	3.6.3.3. Técnicas utilizadas
158	3.6.3.4. Resultados y conclusiones
160	3.6.4. Arqueología: El Cabezo de la Cruz (La Muela, Zaragoza)
160	3.6.4.1. Introducción
160	3.6.4.2. Objetivos
161	3.6.4.3. Metodología
164	3.6.4.4. Resultados y conclusiones
165	3.7. Propuestas para la integración de modelos tridimensionales en plataformas web
166	3.7.1. La evolución del concepto SIG en Arqueología: <i>web mapping</i>
168	3.7.2. Modelos tridimensionales para navegadores: PDF3D vs. WebGL
168	3.7.2.1. Gestión de modelos mediante archivos PDF3D
168	3.7.2.2. Sistemas basados en <i>Web Graphics Library</i> (WebGL)
177	3.7.3. Propuesta de descripción conceptual de una base de datos
178	3.7.4. Propuesta para la gestión de los datos tridimensionales
181	3.7.5. Sistemas de visualización inmersivos
185	3.7.6. Conclusiones
187	4. Resultados y conclusiones
189	4.1. Clasificación de los resultados obtenidos
189	4.1.1. Análisis de las técnicas y su tendencia social
190	4.1.2. Bienes muebles
190	4.1.3. Arte rupestre: cuevas y abrigos
192	4.1.4. Monumentos arquitectónicos
194	4.1.5. Yacimientos arqueológicos
196	4.1.6. Reconstrucciones tridimensionales
196	4.1.7. Arqueología del paisaje
199	4.2. Conclusiones
200	4.2.1. La gestión informática de la información generada: regulación del proceso en la codificación de los metadatos
200	4.2.2. Representación gráfica en soportes bidimensionales vs. tridimensionales
201	4.2.3. Acceso público a la información
201	4.3. La necesidad de un carácter híbrido en la frontera de varias disciplinas
203	4.4. Propuestas de futuro
207	5. Bibliografía

Prólogo

Es un honor para mí realizar el prólogo al libro de la DPZ que recoge los resultados de la Tesis Doctoral de Jorge Angás Pajas titulada *Documentación geométrica del Patrimonio cultural: análisis de las técnicas, ensayos y nuevas perspectivas*, tesis que obtuvo el Primer Premio Extraordinario de Doctorado (macroárea de Humanidades) en la convocatoria del 2016, un año con una fuerte competencia ya que se leyeron más de 800 tesis doctorales en la Universidad de Zaragoza, correspondiendo 8 premios al área en la que concursaba.

Y es un honor porque Jorge es el resultado del éxito del Programa Sócrates-Erasmus ya que comenzó su andadura profesional cuando fue enviado en el curso 2002-2003 a la Universidad de Siena, *Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali*. Allí se introdujo a fondo en las técnicas de topografía y escáner 3D dentro del grupo de Etruscología que dirigía el profesor Andrea Zifferero, estudiando asignaturas tan interesantes como *Archeologia Sperimentale* o *Informatica applicata all'archeologia*.

Completó su estancia en Siena con una Beca predoctoral de investigación (*dottorato di ricerca*) del Ministerio de Asuntos Exteriores de Italia en el *Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti* de la *Università degli Studi di Siena* durante el curso 2003-2004.

A su vuelta a Zaragoza fue rápidamente contratado por la empresa *Tecnitop* y comenzó entonces su actividad relacionada con su especialización en topografía aplicada al patrimonio arqueológico, análisis espacial del territorio y tecnología láser escáner 3D. El levantamiento topográfico, planimetría y MDT de la Cueva de la Fuente del Trucho fue su primera aportación en 2005 al patrimonio aragonés.

Su inquietud le llevó a continuación a fundar una empresa propia como una *Spin-Off* de la Universidad de Zaragoza. Se convirtió así en socio fundador de la empresa *Scanner Patrimonio e Industria, SL*, dedicada a la investigación, desarrollo y aplicación de la tecnología láser escáner tridimensional a elementos patrimoniales, industriales y obra civil, al mismo tiempo que compaginaba su escaso tiempo libre con la elaboración de su Tesis Doctoral. Ésta, leída en 2016, trata de una revisión tan exhaustiva como novedosa de todas las técnicas empleadas para una correcta documentación del patrimonio cultural, haciendo especial hincapié en ejemplos aragoneses.

Su trabajo desde la empresa ha alcanzado un relevante prestigio nacional e internacional. En el primer caso, son ejemplo sus ac-

tuaciones en una treintena de cuevas y abrigos peninsulares con arte rupestre levantino o paleolítico ubicados en Aragón, Castilla, Extremadura o Murcia. Su modelo de restitución de las pinturas levantinas arrancadas en la Roca dels Moros de Calapatá (lugar donde se descubrió el arte levantino) exhibidas hoy en el Museo Arqueológico de Barcelona, es un buen ejemplo de la aplicación de las nuevas técnicas para la difusión del Patrimonio. En la misma línea, ha desarrollado el Proyecto ARAM (Arte rupestre y accesibilidad multimedia) donde ha tratado de establecer un protocolo en el proceso de documentación del arte rupestre, favoreciendo la transmisión de conocimientos y la difusión del Patrimonio.

Su proyección internacional, trabajando para equipos de investigación de las Universidades de Toulouse y Burdeos, se centra en la documentación de las más importantes cuevas francesas con arte paleolítico, no solo de las clásicas conocidas de Niaux y Gargas en el Pirineo francés, o Roucadour en el Lot, sino también en otras recientemente descubiertas, como Cussac en la Dordoña o Bruniquel en el Aveyron. En esta cueva se acaba de publicar en la revista *Nature* la existencia de dos grandes círculos formados por cientos de fragmentos de estalagmitas que habían sido rotas expresamente y que mostraban signos de uso de fuego, con una cronología de 176.500 años de antigüedad. Su levantamiento topográfico, muy complicado por su difícil acceso, demuestra que los neandertales ocuparon las cuevas mucho antes de lo que se creía, ya que la distancia entre la boca de la cueva y las estructuras de estalagmitas, 336 metros, demostraría que los primeros neandertales se adentraron muy al interior y que sabían manejar el fuego en un espacio profundo. También ha trabajado en el capítulo de Gestión, desarrollando el protocolo marco de documentación del arte paleolítico para el Ministerio de Cultura de Francia.

En Italia ha escaneado cuevas con arte rupestre paleolítico, como la Grotta Perciata en Palermo (Sicilia), aunque ha trabajado principalmente en lugares tan interesantes como el *Palazzo Vecchio* de Florencia, restableciendo las estructuras arqueológicas del subsuelo sin necesidad de realizar excavaciones. El proyecto europeo *HandPas* le ha llevado a documentar todas las manos pintadas de época paleolítica del occidente de Europa, principalmente en España e Italia. Por último, ha realizado varios proyectos de documentación arquitectónica y arqueológica en Oriente Medio, en el Sultanato de Omán y en el Emirato de Sharjah (Emiratos Árabes Unidos) y en Asia Central en Termez (Uzbekistán).

En el Valle del Ebro, y dentro ya del mundo clásico, ha reconstruido digitalmente mediante modelos tridimensionales diferentes obras públicas de época romana: por ejemplo, acueductos como los de los Bañales (Uncastillo), Albarracín-Gea, Lodosa-Alcanadre o Andelos (Mendigorría). Y también presas romanas, como la muy bien conservada de Muel, bajo la Ermita de Nuestra Señora de la Fuente y sus pinturas de Goya.

Ha documentado también poblados del Bronce-Hierro (Cabezo de la Cruz en La Muela, el Morredón en Fréscano, Los Collados de Jaulín), romanos republicanos (Valdeherrera en Calatayud o La Caridad de Caminreal) o altoimperiales (Labitosa, en la Puebla de Castro), algunos de ellos mediante la técnica de vuelos con drones.

Muchos ejemplos de toda esta ingente labor en la que se combinan tan variadas tecnologías se plasman en esta interesante tesis cuya lectura será muy útil para estudiantes de Arqueología. Jorge Angás se convierte para ellos en un magnífico ejemplo de joven emprendedor que ha sabido combinar investigación con transferencia a la empresa.

Pilar Utrilla Miranda

Per aspera ad astra



Que esten VV.SS. satisfechos de la descripcion del Reyno estimo yo mucho, y puedenlo estar VV.SS. con mui justa causa, porque tendran la mejor, y mas exacta descripcion que de ningun Reyno, ni provincia se ha hecho, porque todas quantas hay, se hazen por ynformacion y essa se hizo por vista de ojos, con instrumentos Mathematicos, vsados de pocos, y cotejen VV.SS. esse mappa con el de Cataluña, en los confines, y verán la verdad del mio, y la falsedad del otro.

Extracto de la carta que el cosmógrafo Juan Bautista Labaña envía a los diputados del Reino de Aragón sobre su célebre *Mapa e Itinerario del Reino de Aragón* (1610–1620)

HERNANDO (1996: 135).

Agradecimientos

Esta publicación constituye una adaptación revisada de los resultados de la tesis doctoral defendida el 5 de febrero de 2016 en la Universidad de Zaragoza. Una tesis «híbrida» robada a la familia y al sueño lleva implícita además, como no podría ser de otra manera, un sinfín de agradecimientos a personas que durante estos años contribuyeron, confiaron, alentaron o simplemente sugirieron reflexiones hacia otro tipo de enfoques que de alguna manera ayudaron a poder acabar este trabajo. Me siento afortunado y agradecido porque a lo largo de estos años he podido coincidir, en alguna parte de esta travesía, con muchos «mirlos blancos». Excelentes personas a través de las cuales he podido formarme y sobre todo seguiré aprendiendo, siempre desde un vastísimo escenario de disciplinas y conjunto de profesionales que cada vez más se unen en la documentación del patrimonio cultural. Sin la virtud y cuidado de los pequeños detalles, esta investigación nunca hubiese podido completarse. Sin embargo, ninguna de las personas, instituciones o empresas, aquí citadas, como es obvio, es responsable de los posibles errores u omisiones que se puedan haber cometido, siendo exclusivamente responsabilidad del propio autor.

Mi más sincera gratitud a los dos directores de esta tesis. A Pilar Utrilla, por su confianza, continuos ánimos y consejos en todos estos años que propiciaron finalmente «que organizase una tarea detrás de otra» y que nunca perdiese la esperanza de poder completar este trabajo. A Alfredo Serreta, por sus incesantes ideas que me indujeron a una constante inquietud en la frontera con otras disciplinas. Acostumbrados a un viaje tradicionalmente generalizado en una sola dirección –casi siempre desde la Ingeniería cuando conjugamos otras disciplinas en la documentación del patrimonio cultural–, la disponibilidad y magisterio que ambos directores me han brindado ha propiciado la difícil tarea de recorrer también ese camino desde las Letras.

El germen de este trabajo debo agradecerlo a las circunstancias y amigos que encontré en la *Università degli Studi di Siena* durante dos años. Sin duda, la fortuna, de algún modo, contribuyó a que pudiese emprender una primera investigación (Diploma de Estudios Avanzados) desde el Laboratorio de Etruscología con Andrea Zifferero y del Laboratorio de Informática aplicada a la Arqueología, siempre rodeado de un excelente conjunto de compañeros y profesores. Mi gratitud a todos ellos y muy especialmente a Andrea Masi y su familia (mi familia) Renzo y Viviana, y a Jacopo Bruttini. Compañeros de fatiga en nuestra querida Marsiliana D’Albegna.

De igual modo, debo agradecer a cada uno de los responsables científicos, instituciones, empresas y personas que han sufragado,

confiado y permitido cada uno de los trabajos expuestos en esta monografía. Igualmente mis más sincero agradecimiento a todas las personas vinculadas al Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza, Grupo de Investigación Primeros Pobladores del Valle del Ebro, Grupo de Investigación URBS y a todos los amigos que me han acompañado y ayudado en algún momento de esta travesía: Elena, Jorge, José Manuel, Mario, Raúl, Esther, Paco, Matt, Daniel, Gutí, Josué, Nuria, Enrique y especialmente a mi familia Tolosana del otro lado de los Pirineos, Cristina y Pascal, que siempre confiaron más en la persona que en la propia tecnología.

Quiero expresar un especial agradecimiento al tribunal de nuestra tesis: Dra. M^a Ángeles Magallón, Dr. José Luis Sanchidrián, Dr. Pascal Foucher, Dra. Mercedes Farjas, Dr. Jorge Santolaria que, sin duda, contribuyeron con todas sus apreciaciones y consejos a mejorar este trabajo.

Tampoco puedo olvidar a todos los compañeros de Scanner Patrimonio e Industria y de Tecnitop, y en especial a Jesús, Jorge, Israel, Estela, Salvador, Antonio, Joan, Diego y Esperanza con los que he compartido algo de sangre –cuando hablamos de cuevas–, mucho esfuerzo y demasiados imprevistos, en todo tipo de trabajos, ambientes y circunstancias, pero siempre con el ánimo de intentar mejorar, innovar y aprender un poco más cada día.

Asimismo, resulta un honor poder publicar este trabajo en la revista *Cæsaraugusta*. Mi más sincero agradecimiento a la Institución Fernando el Católico y, muy especialmente, a Miguel Beltrán por su paciencia y, sobre todo, por su confianza.

A Manuel Bea, amigo antes que compañero, que me enseña cada día a pensar más con el corazón que con la cabeza. Lo mejor está todavía por llegar.

Por último gracias a las verdaderas víctimas de esta investigación, mi familia, mi verdadero patrimonio. A mis padres Pili y Paco, ejemplo de trabajo, pilar fundamental para empezar, recorrer y acabar esta primera etapa del camino. A mis hermanos, cuñados, sobrinos y familia Uribe-Agudo por sus continuos ánimos y consejos. Finalmente a los mayores sufridores, a los que más me han ayudado y sobre todo soportado, a los que más tiempo ha robado esta investigación: Paula, Acher, Lorién y sus dos protectores, Thor y Ares. Sólo con su apoyo, cariño y amor he podido acabar esta investigación, aprendiendo lo más importante: dos mil años de una Presa son sólo el inicio *in this space and time [...] from the cradle to the grave*.

Glosario de acrónimos

ACP / PCA: Análisis de Componentes Principales / *Principal Component Analysis*

ALS: *Aerial Laser Scanning*

API: *Application Programming Interface*

ARAMPI: Arte Rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica

ATO: Organizaciones de Formación Aprobadas

AESA: Agencia Estatal de Seguridad Aérea (Ministerio de Fomento)

ASCII: *American Standard Code for Information Interchange*

BIM: *Building Information Modeling*

CAD: *Computer-Aided Design*

CCD: *Charge-Coupled Device*

CIPA: *The International Committee for Documentation of Cultural Heritage*

CNIG: Centro Nacional de Información Geográfica

CORS: *Continuously Operating Reference Station*

DCAT: *Data Catalog Vocabulary*

DCMI: *Dublin Core Metadata Initiative*

MDE / DEM: Modelo Digital de Elevación / *Digital Elevation Model*

DSLR: *Digital Single Lens Reflex*

DXF: *Drawing Exchange Format*

ED50: *European Datum 1950*

EPSG: *European Petroleum Survey Group*

ESA: *European Space Agency*

ETRS89: *European Terrestrial Reference System 1989*

EXIF: *Exchangeable image file format*

FGDC: *Federal Geographic Data Committee*

FOV: *Field of View*

FWHM: *Full Width at Half Maximum*

GCP: *Ground Control Point*

GLONASS: *Global Orbiting Navigation Satellite System*

GNSS: *Global Navigation Satellite System*

GNU GPL: *General Public License*

GPRS: *General Packet Radio Service*

GPS: *Global Positioning System*

GSD: *Ground Sample Distance*

ICAO: *International Civil Aviation Organization*

ICOMOS: *International Council on Monuments and Sites*

IDE(E): *Infraestructura de Datos Espaciales (de España)*

IGN: *Instituto Geográfico Nacional*

IMU: *Inertial Measurement Unit*

ISO: *International Organization for Standardization*

ISPRS: *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

ISTI-CNR: *Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione-Consiglio Nazionale delle Ricerche*

JPEG: *Joint Photographic Experts Group*

JSON: *JavaScript Object Notation*

KML: *Keyhole Markup Language*

LiDAR: *Light Detection and Ranging*

MDS / DSM: *Modelo Digital de Superficie / Digital Surface Model*

MDT / DTM: *Modelo Digital del Terreno / Digital Terrain Model*

MLS: *Mobile Laser Scanning*

NAVSTAR: *Navigation System with Timing and Ranging*

ND: *Nivel Digital*

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*

NIR: *Near Infrared*

Nm: *Nanómetro*

OGC: *Open Geospatial Consortium*

PDF: *Portable Document Format*

PPK: *Post-Processing Kinematic*

RGB: *Red Green Blue*

RINEX: *Receiver INdependent EXchange*

ROI: *Red de Orden Inferior*

RPAS: *Remotely Piloted Aircraft Systems*

RTK: *Real Time Kinematic*

SAR: *Synthetic Aperture Radar / Radar de Apertura Sintética*

SAVI: *Soil-adjusted Vegetation Index*

SfM: *Structure From Motion*

SGBD: *Sistema de gestión de base de datos*

SIG / GIS: *Sistema de Información Geográfica / Geographic Information Systems*

SQL: *Structured Query Language*

SLAM: *Simultaneous Localization and Mapping*

STL: *Stereo Lithography*

SWIR: *Short-Wavelength Infrared*

TIC / ICT: *Tecnologías de la Información y la Comunicación / Information and Communication Technology*

TIFF: *Tagged Image File Format*

TLS: *Terrestrial laser scanner*

TOF: *Time of Flight*

UAS: *Unmanned Aircraft Systems*

UAV: *Unmanned Aircraft Vehicle*

USGS: *United States Geological Survey*

UTF-8: *8-bit Unicode Transformation Format*

UTM: *Universal Transverse Mercator*

VRML: *Virtual Reality Modeling Language*

WFD: *Wave Form Digitizer Technology*

WGS84: *World Geodetic System 1984*

WMS: *Web Map Service*

W3C: *World Wide Web Consortium*

XML: *EXtensible Markup Language*

Introducción

El cambio de milenio ha coincidido con una vorágine tecnológica que el patrimonio cultural ha absorbido con la misma velocidad que muchas otras disciplinas. Este calado ha afectado de manera desigual a la interrelación de los usos de nuevas herramientas en la captura de información, aplicación de metodologías de trabajo, clasificación e interpretación de los resultados. Sin embargo, resulta contradictorio que todos estos avances no hayan contribuido de una manera más clara y efectiva, por sí solos, a una mejor organización de la documentación del patrimonio. Efectivamente, se han generado nuevas posibilidades que han aportado otro tipo de problemáticas más relacionadas con la organización de procedimientos y resultados que con la propia tecnología. Uno de los factores que origina esta velocidad diacrónica entre tecnología y metodología es la propia inmediatez que exigen las TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) en la sociedad actual. En este sentido, encontramos una acusada carencia respecto a una normalización que realmente haya contribuido a una organización de protocolos de trabajo y que, por ende, haya permitido homogeneizar resultados, dentro de un lenguaje común, entre el conjunto de profesionales que documentan, clasifican e investigan el patrimonio cultural¹.

Durante este periodo las técnicas han experimentado un notable avance tecnológico, discutiendo en muchas ocasiones metodología y tecnología por caminos totalmente discordantes. Uno de los ingredientes que ha influido en esta divergencia se encuentra en las características de la «sociedad de la información» que origina una

velocidad y obsolescencia de técnicas y herramientas, debido a factores económicos. De esta manera, los resultados que se presentan en este estudio han sido muchas veces fruto de la equivocación. Unas veces arrastrado por experimentaciones no siempre maduras ni contrastadas metodológicamente; otras, inmerso en la desoperación de combinar técnicas usadas en disciplinas distintas con el objetivo de comprobar su similitud en el, cada vez más híbrido, proceso de documentación del patrimonio.

A pesar de estos problemas, siempre hemos mantenido la inquietud de seguir aprendiendo y resolviendo cada uno de los pequeños problemas que surgen cada día en la documentación de los diferentes tipos de bienes patrimoniales. La fragilidad de la documentación del patrimonio es muchas veces comparable a una excavación arqueológica. Cada unidad estratigráfica es única, así como las decisiones y el protocolo de excavación en ese determinado momento. Las oportunidades también muchas veces son excepcionales, y la elección del procedimiento de trabajo es el que garantizará la perduración de esa información. Datos que no nos pertenecen ni por derecho, ni por propiedad intelectual, tan sólo seremos los transmisores que gestionen –de la mejor manera posible– toda esa información para que llegue a las generaciones futuras con la misma certeza, objetividad y frescura como si lo hubiesen documentado ellos mismos.

Asimismo, el estudio que aquí presentamos es fruto, sobre todo, de la inquietud de documentar el patrimonio cultural. Desde el año 2002 esta preocupación ha sido una constante en nuestra investigación, llevándonos a experimentar con diversas técnicas y herramientas hasta la actualidad. Desde las más simples, con un flexómetro para el levantamiento topográfico, por ejemplo, mediante técnicas de triangulación de las diferentes tumbas de cámara de la necrópolis etrusca de Fontingrande (Marsiliana D'Albegna), en la Maremma Toscana, hasta el uso de una combinación de escáneres tridimensionales y fotogrametría para la generación de un repositorio tridimensional de representaciones de manos paleolíticas en Europa (Proyecto HANDPAS).

A lo largo de los últimos años nos hemos planteado cuestiones cada vez más elementales buscando el origen y la finalidad de la documentación, cuando ésta quedaba absorbida por cuestiones políticas, económicas y sociales por encima de las científicas. Somos plenamente conscientes de que estas preguntas hubiesen resuelto muchos problemas en una época donde el artificio, muy frecuen-

¹ Dentro de la administración existen muy pocos ejemplos que tengan establecido un protocolo *ad hoc* para la documentación geométrica del patrimonio. Si tenemos en cuenta la variedad del colectivo que estudia el patrimonio, resulta comprensible entender la falta de encuentro en fijar este tipo de normas que satisfaga a todos. Un ejemplo destacable, desde el punto de vista geométrico, son las *recomendaciones técnicas para la documentación geométrica de entidades patrimoniales* del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH) (versión 1.0 de 23 de noviembre de 2011), proponiendo una *definición de procesos estandarizados que aseguren la homogeneidad y la interoperatividad de los modelos geométricos*. http://www.iaph.es/export/sites/default/galerias/patrimonio-cultural/documentos/gestion-informacion/recomendaciones_tecnicas_documentacion_geometrica_entidades_patrimoniales_iaph.pdf
Se trata, sin lugar a dudas, de uno de los mejores ejemplos institucionales que encontramos en España, donde además aglutina en sus «activos digitales» recomendaciones técnicas y guías metodológicas para: videos inmersivos, imágenes digitales, metadatos, patrimonio mueble e inmueble, cartografía, topografía, paisajes de interés cultural, etc. <https://repositorio.iaph.es/handle/11532/161555> (último acceso: noviembre de 2017).

temente, se confunde con el rigor técnico-científico. Cada vez proliferan más los congresos arqueológicos acompañados de términos como «virtual», «tridimensional» en los que sólo una minoría de los conferenciantes y participantes son historiadores o arqueólogos. Tampoco ayuda la propia arqueología cuando observamos portadas en monografías y congresos arqueológicos, únicamente con instrumentos tecnológicos. El registro del patrimonio cultural ha alcanzado un punto donde, recurrentemente, confundimos medio con finalidad, fruto de una marcada tendencia tecnológica social.

En el panorama actual observamos ligeros cambios una vez surgidos determinados movimientos, muy probablemente forzados por una coyuntura económica, que pretenden la búsqueda de algo más: el espectáculo de la tecnología por la tecnología. Los discos duros abandonados en los cajones con un tipo de información difícil de gestionar y los escáneres en los armarios cogiendo polvo han facilitado una respuesta funcional válida, sobre todo, con un marcado carácter social. El mensaje obtenido ha sido claro: qué hacemos y cómo organizamos un protocolo conjunto en el que todos sepamos cuáles son las reglas y en donde existan unas recomendaciones básicas. Toda esta tendencia social ha propiciado una optimización de recursos tanto a nivel institucional como a nivel privado. La riqueza social es bidireccional y unos sin los otros estamos totalmente perdidos. Es por ello, que en la mayoría de proyectos internacionales priman las sinergias entre diferentes escalas de organizaciones, centros educativos, laboratorios de investigación y sobre todo empresas, como motor económico y generador de empleo en el sector cultural. Por esta razón el conjunto de profesionales que gestionan el patrimonio es cada vez más heterogéneo. Este carácter híbrido, sin duda, debe de ser una constante entre la frontera de varias disciplinas que evite una segmentación en el proceso documental. En este sentido, la respuesta a cada pregunta debe tener un primer proceso multidisciplinar, consensuado posteriormente dentro de un conjunto de soluciones donde prime un carácter interdisciplinar, para finalmente obtener unos resultados transdisciplinarios con un marcado carácter didáctico como retorno a la sociedad, la generadora, y por ende, la verdadera propietaria del patrimonio cultural.

Objetivos y estructura del estudio

La estructura del presente estudio se ha planteado como una propuesta técnica basada en una selección de proyectos de investigación relacionados con diferentes escalas de representación de la documentación geométrica del patrimonio cultural. Cada uno de estos proyectos de investigación se ha planteado como ejemplos de representación de los diferentes bienes culturales, sirviendo de base narrativa y experimental. Así, detallamos las técnicas utilizadas mediante un recorrido por las diferentes clasificaciones del patrimonio cultural: desde los bienes muebles, yacimientos arqueológicos, abrigos y cuevas rupestres, monumentos arquitectónicos, hasta la propia arqueología del paisaje, teniendo en cuenta la idiosincrasia de cada una de ellas con toda la serie de particularidades que entraña su documentación. La necesidad de este análisis arranca de la falta de homogeneidad y escasez de protocolos de actuación, con una visión global, que permita trazar una interoperatividad entre el conjunto de profesionales que documentan el patrimonio. Esta carencia afecta a todos los ámbitos tanto institucionales, en todos los niveles internacionales, nacionales y autonómicos, como también al conjunto de científicos, profesionales y empresas. El resultado es un desconcierto entre la variedad de resultados, clasificaciones, gestión y almacenamiento que, lejos de debatir sobre su calidad y

rigurosidad científica, originan una heterogeneidad de resultados muy difíciles de clasificar. Este hecho se debe a la inexistencia de una propuesta común y generalizada que defina cuáles son las partes básicas y necesarias en cada uno de los procesos de la documentación del patrimonio.

En este sentido, la originalidad del estudio que aquí presentamos ha tratado de articular una visión entre varias materias tradicionalmente segmentadas, si atendemos a parámetros meramente técnicos o descriptivos como son las ciencias geomáticas (Arranz, 2013: 26)² y las ciencias de la antigüedad. Se trata de centrar dos tipos de sectores que cotidianamente se han considerado antagónicos entre las Letras y las Ciencias. Algunas de las investigaciones precedentes que ya han trabajado sobre la documentación geométrica del patrimonio han proporcionado una visión desde el punto de vista de las ciencias geomáticas. Así, citaremos la tesis doctoral de Martínez (2014) «*Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes*» de la Universidad de Santiago de Compostela. Esta tesis, desarrollada por compendio de publicaciones, se centra en la fotogrametría de rango cercano y su evaluación métrica, en el intento de sentar las bases para una estandarización metodológica de este tipo de técnicas en el patrimonio cultural. Otro ejemplo se plasma en la tesis de Arranz (2013) «*Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial*» del Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid. Este trabajo se ha dividido, en primer lugar, en una parte descriptiva sobre las técnicas, herramientas, materiales y métodos. En segundo lugar, se finaliza con un apartado donde se desarrolla una optimización de modelos. El contrapunto a las dos tesis anteriores, desde el campo geomático, es la tesis de Valle (2007) «*Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica*» de la Universidad de La Rioja. Esta tesis posee un punto de vista más cercano a los problemas que surgen en la documentación cotidiana del patrimonio, centrandolo su análisis en una propuesta metodológica y en un intento de organización de procesos como propuesta conceptual original. Por el contrario, desde el campo arqueológico encontramos muy pocos estudios que ofrezcan una perspectiva global centrada en la documentación del patrimonio. Así, tenemos que hacer referencia a la tesis de Verhoeven (2009) «*New Technologies, Methodologies, and Procedures for the Benefit of Aerial Archaeological Data Acquisition and Analysis*» de la Faculty of Arts & Philosophy Universiteit Gent centrada únicamente en la documentación aérea, y la tesis de Campana (2003) «*Remote Sensing, GIS, GPS e tecniche tradizionali. Percorsi integrati per lo studio dei paesaggi archeologici: Murlo-Montalcino e bassa Val di Cornia*» que igualmente aborda la documentación desde el punto de vista de la teledetección en la arqueología medieval desde la Universidad de Siena, Padova, Pisa y Venecia.

Si atendemos a otro tipo de estudios monográficos más centrados en una revisión historiográfica sobre la historia de la topografía y la cartografía, resulta ineludible citar dos trabajos clásicos como son el volumen de Luciani (1978) *History of land-surveyors and surveyors, from the origins up to 1900* y más recientemente Martín (2002) *Historia de la Cartografía y la Topografía*.

2 Se entiende por Geomática al conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica (también denominada espacial o geoespacial). En este conjunto se incluyen la Topografía, la Geodesia, la Cartografía, la Fotogrametría y la Teledetección. Para una mayor información sobre especificaciones, procedimientos y definiciones *vid.* Bryan *et al.* (2009).

En consecuencia, el estudio que aquí presentamos plantea, en primer lugar, una aproximación al estado actual de la cuestión a través de una revisión del método y técnicas hasta el proceso de documentación del siglo XXI. En segundo lugar, hemos considerado necesario establecer un breve análisis de cuáles son las principales técnicas actuales, empleadas en los diferentes ensayos que hemos realizado, desde un punto de vista empírico. Evitando de este modo visiones tradicionalmente teóricas o descriptivas que no conectan con las verdaderas problemáticas que tiene el patrimonio, ni tampoco tienen una visión interdisciplinar. Las técnicas y herramientas pueden variar dependiendo de los objetivos y las necesidades desde simples flexómetros pasando por el uso de escáneres tridimensionales o drones. Mediante esta descripción se quiere evitar el excesivo protagonismo que muchas veces cobran estas herramientas más que los resultados y el propio bien patrimonial. Resulta obvio, pero igualmente necesario, recalcar que el uso de la tecnología más avanzada tampoco garantiza el éxito de un proyecto (Ortega, 2011: 51). En muchos procesos de documentación coinciden las soluciones más simples con las más funcionales y que cotidianamente surgen de la combinación de diferentes técnicas ante una necesidad concreta (Almagro, 2011: 26-45). Tampoco queremos caer en un acusado carácter simplista de los problemas, pero tenemos que tener en cuenta que los procesos de documentación normalmente se realizan *in situ*, en condiciones de adaptación total al medio físico donde se integran. Por ello, resulta indispensable el trabajo sobre anteproyectos que definan las problemáticas, necesidades, estrategias técnicas y soluciones. Afirmado esto, no existe, ni por coste económico ni por grado tecnológico, una preponderancia de una técnica sobre otra, de todas las descritas en esta monografía. En este sentido, en el estudio que aquí presentamos se ha realizado una clasificación de las herramientas utilizadas, desde las denominadas clásicas hasta las más novedosas, desde un punto de vista funcional con el propósito de establecer un protocolo en su utilización teniendo en cuenta las necesidades de cada proyecto, científicas (documentación, conservación y prevención) y técnicas (precisión, resolución, escala) y sobre todo interpretativas a través de un proceso cognoscitivo. Para ello, se ha partido de la experiencia, en las diferentes clasificaciones del patrimonio, seleccionando aquellos ejemplos que hemos entendido que podían incluirse como arquetipo en la toma de datos, análisis e interpretación.

Una vez descrita la clasificación de las principales herramientas actuales, el objetivo ha sido establecer diferentes casos de estudio representativos de la documentación en cada una de las idiosincrasias de los bienes patrimoniales. Esta selección se ha realizado entre aproximadamente más de cuatrocientos proyectos de intervención diferentes de documentación geométrica, realizados desde el año 2002, teniendo en cuenta factores característicos y redundantes, que sirvan de ejemplo como estrategia en la toma de datos con una problemática análoga. Debido a la revisión y planteamiento de esta monografía, se han seleccionado especialmente proyectos relacionados con el patrimonio cultural aragonés. Principalmente, por su interés y variedad patrimonial, siguiendo un planteamiento sobre los antecedentes, los objetivos concretos, una reflexión sobre la solución más idónea y unos resultados, junto a unas conclusiones para cada una de las clasificaciones propuestas.

Los resultados generales se han dividido de acuerdo a una clasificación y posibilidades de la documentación aportada. Así como una propuesta acerca del uso de esta información de una manera ordenada, global y unificada mediante la generación de propuestas para la gestión de los datos tridimensionales. Sin duda, este último punto va a constituir el futuro de la documentación en los próximos años.

Finalmente se presentan las conclusiones finales resumidas, extraídas de cada uno de los capítulos desarrollados como aportación personal a los diferentes problemas planteados a lo largo de este estudio. Estableciendo algunas pautas y propuestas de futuro y, sobre todo, subrayando la necesidad de un enfoque híbrido en la frontera de varias disciplinas para la documentación geométrica del patrimonio cultural.



1. Estado de la cuestión: antecedentes



1. Estado de la cuestión: antecedentes

1.1. Documentación y difusión del patrimonio cultural: una propuesta dual en el siglo XXI

La heterogeneidad en las diferentes clasificaciones del patrimonio cultural determina una diversificación tanto en las técnicas empleadas en la digitalización como en el conjunto de profesionales encargados en la documentación geométrica de los bienes patrimoniales. De hecho, esta pluralidad del patrimonio está definida por su contenido semántico, por el método, las técnicas de documentación y por su propia difusión¹. Se convierte, de esta manera, en uno de los campos que más dificultades presenta para su registro, debido a su multiplicidad y sus características (materiales, formas, texturas, dimensiones, antigüedad, localización, fragilidad, etcétera). Si atendemos al uso que se ha dado a la gestión del patrimonio como «motor de masas», ha propiciado una constante búsqueda y adaptación para relacionar las nuevas técnicas de documentación como herramienta de difusión social (Ubieto, 2007: 25-26). Este factor, junto con otro tipo de causas que iremos describiendo, ha permitido durante el último decenio que surjan una gran variedad de técnicas de documentación tridimensionales que han sido aplicadas, mediante una metodología combinada, en la documentación y difusión turística del patrimonio cultural. Éstas han supuesto toda una revolución científico-divulgativa dentro de los campos de la arquitectura, del arte, de la arqueología o de la geología (Angás, 2011 y 2013; Angás / Serreta, 2010; Demetrescu / Fontana, 2009; Gabello, 2009; Guarnieri *et al.*, 2010; Isler *et al.*, 2006; Koutsoudis *et al.*, 2014; Martínez-Graña *et al.*, 2013; Moreno, 2014; Núñez *et al.*, 2012; Ramos, 2013; Richardson, 2014; Rubio *et al.*, 2009; Yastikli, 2007). En consecuencia, la utilización de estas herramientas ha permitido un aprovechamiento que puede y debe ser dual. Esto quiere decir que se deben utilizar para el proceso de documentación pero también como herramienta de conservación y difusión. No obstante, la carencia de estándares o procesos normalizados, tanto en el desarrollo como en la gestión de los modelos tridimensionales, ha producido un menor aprovechamiento de todos sus recursos.

1 Adoptamos la definición de Gutiérrez (2001:18) cuando hace una aclaración entre método y técnica proponiendo que «es necesario advertir que pese a lo usual de la expresión *método arqueológico*, ésta resulta en rigor conceptualmente impropia puesto que el método científico es uno y la expresión designa en realidad el conjunto de técnicas y procedimientos específicos de que se sirve la Arqueología».

Si revisamos las técnicas de documentación del patrimonio, ya sean métricas o no métricas, observamos cómo se encuentran influidas por el avance tecnológico derivado de una tendencia o demanda social cada vez más imbuida en el uso de las nuevas tecnologías y la comunicación global². Intentar recoger o asimilar los continuos cambios tecnológicos y aplicarlos correctamente para cada caso representa una carrera continua que requiere un aprendizaje constante, siquiera para el manejo tanto de los nuevos equipos como del *software* asociado. Tecnología y metodología han discurrido por un camino en los últimos años totalmente divergente sin una clara especificación y normalización de las técnicas empleadas. Así, establecer un criterio claro a la hora de fijar los parámetros que regulen su utilización resulta una tarea complicada. Nuestra propuesta, en primer lugar, hace una reflexión sobre qué entendemos por patrimonio y sus diferentes características. Para acercarnos a una definición debemos acudir a la Ley de Patrimonio Histórico Español (Ley 16/1985, de 25 de junio). El concepto queda definido en el preámbulo «Esta Ley consagra una nueva definición de Patrimonio Histórico y amplía notablemente su extensión» y continúa en el Art. 1 «Integran el Patrimonio Histórico Español los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte del mismo el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico, histórico o antropológico». La variedad patrimonial no deja de ser una constante más, relacionada con la propia heterogeneidad del concepto y sus dificultades. Este carácter heterogéneo queda recogido también por otras leyes de Patrimonio Cultural de carácter autonómico³.

2 Valle (2006:72) explica como la sociedad en el siglo XXI demanda un rápido retorno respecto a las inversiones realizadas, sobre todo, cuando estas han sido intangibles. Por este motivo, la sociedad reclama lenguajes universales con los que pueda acercarse rápidamente a ese conocimiento mediante una democratización. Si además tenemos en cuenta la inmediatez de la información actual, este retorno muchas veces precipita una cierta ansiedad científica y social en la justificación de resultados que, en muchas ocasiones, resulta contraproducente a la propia investigación.

3 Como las de Andalucía (Ley 14/2007), Aragón (Ley 3/1999), Asturias (Ley 1/2001), Baleares (Ley 12/1998), Canarias (Ley 4/1999), Cantabria (Ley 11/1998), Catalunya (Ley 9/1993), Castilla La Mancha (Ley 4/2013), Castilla y León (Ley 12/2002), Comunidad de Madrid (Ley 3/2013), Extremadura (Ley 2/1999), Galicia (Ley 8/1995), Murcia (Ley 4/2007), Navarra (Ley Foral 14/2005), País Vasco (Ley 7/1990) o Valencia (Ley 4/1998).

Esta diversidad provoca que debamos elegir estrategias de documentación adaptadas a cada situación. Por ejemplo, podríamos estar mencionando dos técnicas totalmente diferentes para el registro de:

- a) un bien mueble, como una escultura romana, podría ser documentada a través de un escáner de luz blanca estructurada para obtener una réplica del original.
- b) un bien inmueble de grandes dimensiones, como un acueducto romano, podría documentarse mediante el empleo de fotogrametría terrestre y técnicas de láser escáner 3D.

En cada uno de estos ejemplos emplearíamos técnicas totalmente diferentes con el mismo objetivo de registro y con una adaptación diferente al nivel de escala del objeto o estructura. De esta manera, resulta imprescindible establecer y diferenciar qué entendemos por «documentación geométrica» y por «arqueología virtual» –términos que habitualmente tienden a confundirse–. Según Valle (2007:43) define la «Documentación Geométrica del Patrimonio» como el «conjunto de registros y resultados obtenidos de la aplicación de ciencias y técnicas que posibilitan la detección, medida y representación de las cualidades geométricas relativas a la forma, dimensiones y disposición espacial, de los objetos constitutivos del patrimonio». En cambio la arqueología virtual se centra en aspectos ligados a la visualización y a la interpretación con la siguiente definición: «grupo de técnicas computacionales que permiten la visualización 3D y la representación virtual realista de objetos y edificios cuyos restos hemos perdido o se encuentran en tan mal estado de conservación como para hacer imposible o muy difícil su interpretación» (Reilly, 1991: 133-139).

Consecuentemente, pensamos que resulta totalmente necesario fijar y documentar los procesos empleados: el procedimiento que hemos seguido, los materiales utilizados, la resolución aplicada, la documentación previa, la fecha, etcétera. Dicha información forma parte de los denominados metadatos. Todo ello se debe entender como un conjunto de contenidos periféricos, necesarios para contextualizar y entender el resultado. Esta misma información será la encargada de facilitar el estudio y mejorar, en un futuro, la sistémica procesal a través de los metadatos generados. La comparación, salvando los anacronismos, resulta obligada con las técnicas de intervención de cualquier excavación arqueológica. Cada objeto o estructura hallada ha sido documentada con exactitud dentro de una unidad estratigráfica correspondiente. El valor del dato y su contexto se entiende a través de los metadatos como interlocutores entre la relación del conjunto de procesos y sus resultados.

Las mejoras tanto en la captación de datos (documentación) como en la representación de los resultados (esencialmente desde un punto de vista gráfico) no han determinado una estandarización o normalización metodológica para documentar, investigar, difundir y conservar el Patrimonio⁴. Así, consideramos que, ante la manifiesta dificultad en la adopción global de un protocolo de documentación unificado, el valor de los metadatos (información adicional sobre las características de la información almacenada) debe ser atendido con especial énfasis. Esto es así porque el acceso a los metadatos (su implementación e integración en los proyectos realizados) es el único camino para, en un futuro, conocer exactamente aspectos como el momento de la captura de la información, el formato, contenidos, calidad de los datos, restricciones, etcétera, de manera que la totalidad de la información pueda

ser empleada y recuperada en cualquier momento⁵. En esta línea, consideramos necesario abordar con mayor profundidad un *corpus* que articule todos los apartados para la normalización de la documentación.

La tendencia general que hemos observado, coincide con el cambio de milenio, cuando se inicia una nueva etapa tecnológica, promovida entre otros factores por el auge de Internet. En los primeros años la parte visual ha sido la prioritaria, pero con el paso de los años hemos constatado un cambio de tendencia. A partir de 2008-2009 empiezan a surgir proyectos, manuales y pliegos técnicos nacionales e internacionales que intentan organizar un verdadero protocolo de gestión tanto en los resultados como en el uso de las técnicas y herramientas. En este momento es cuando empieza a primar más la parte organizativa que la meramente gráfica. Podemos decir que acaba la etapa principalmente visual para entablar un diálogo más serio que profundiza en la utilidad de la información tanto científica como divulgativa, promoviendo una verdadera democratización tanto en la visualización como en su uso.

1.1.1. La intervención pública en la documentación del patrimonio: recomendaciones de organismos públicos

Asimismo, existen algunas recomendaciones básicas de organismos internacionales como *The International Committee for Documentation of Cultural Heritage* (CIPA)⁶ o como uno de los comités de *International Council on Monuments and Sites* (ICOMOS). Todos ellos están más enfocados a la arquitectura, con diversos compendios como la Carta de Cracovia⁷ promovida por ICOMOS en el año 2000 con alusiones específicas en su artículo 5º, promoviendo el uso de las nuevas tecnologías dentro del patrimonio cultural: «En la protección y preservación pública de los sitios arqueológicos, se debe potenciar el uso de modernas tecnologías, bancos de datos, sistemas de información y presentaciones virtuales». Otro ejemplo lo encontramos en la Carta de Ename⁸ también de ICOMOS realizada en 2007, para la interpretación y presentación enclaves patrimoniales donde en el punto 2.4, trata sobre *fuentes de información*, y hace la siguiente alusión: «Las reconstrucciones visuales, ya sean realizadas por artistas, arquitectos o diseñadas mediante ordenador se deben basar en un análisis detallado y sistemático de los datos medioambientales, arqueológicos, arquitectónicos e históricos, incluyendo el estudio de las fuentes escritas, orales e iconográficas, así como de la fotografía. Las fuentes de información en las que se basen tales reproducciones deben documentarse de forma clara y es preciso facilitar reconstrucciones alternativas, cuando esto sea posible, basadas en las mismas evidencias para su comparación». Posteriormente se generaron otro tipo de cartas centradas en la visualización de la información tridimensional en la investigación y divulgación del patrimonio cultural como la Carta de Londres

5 Sobre la gestión de los metadatos en el patrimonio cultural y sus aplicaciones prácticas *vid.* Styliadis *et. al.*, (2008): «Metadata-based heritage sites modeling with e-learning functionality», *Journal of Cultural Heritage*, pp. 296-312.

6 Establecido en colaboración con el *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS).

7 <http://ipce.mecd.gob.es/dam/jcr:b3b6503d-cf75-4cb0-adaf-226740ebd654/2000-carta-cracovia.pdf> (último acceso: noviembre de 2017).

8 <http://www.enamecharter.org/> (último acceso: noviembre de 2017).

4 *Vid.* n. 1 (apdo. Introducción) sobre las recomendaciones del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (IAPH).

(2006-2009)⁹ y posteriormente «Los principios de Sevilla»¹⁰ de 2011 (López-Mencheró, 2013) sobre la denominada «arqueología virtual» (*óp. cit.* Reilly, 1991).

La Carta de Londres tiene como principio fundamental establecer un protocolo de actuación orientado a la visualización del patrimonio cultural, centrándose en lo que denomina la «transparencia intelectual», aspecto que entendemos como un intento de enfocar de manera objetiva procesos técnicos y de metodología aplicados en la documentación. Sin embargo, acerca de sus contenidos se han planteado interesantes análisis que llevan a algunos investigadores a plantear una postura en la que se subraya que el modelo o imagen no constituye una solución a un problema concreto en sí mismo (Barceló y Vicente, 2011: 53-57). Planteamientos como éste nos reafirman en la cada vez más imperiosa necesidad de redefinir la documentación no como fin último de cualquier investigación, sino como un medio más de obtención de información.

Por otra parte, en la Carta de Sevilla ya se advierte de la existencia de «luces y sombras» en el panorama internacional relacionado con la visualización digital del patrimonio y, aunque toma como marco de generación la Carta de Londres, asumiendo todos los objetivos postulados en aquella, se incluyen algunos nuevos que tratan de desarrollar aspectos como los de interdisciplinariedad, finalidad, complementariedad, autenticidad, rigurosidad histórica, eficiencia, transparencia científica, formación y evaluación (López-Mencheró, 2013).

Dentro de la investigación europea todos los proyectos recientes como ARIADNE¹¹, CARARE¹², 3DCOFORM¹³, 3DICONs¹⁴, financiados a través del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea, constituyen un punto de inflexión en la estandarización de una metodología desarrollada, integrando a los principales grupos de investigación europeos. Por otro lado, encontramos algunos ejemplos monográficos dedicados en el mundo anglosajón que enfocan esta problemática de un modo esquemático y conciso. Estos organizan y sistematizan un proceso en la toma de datos, así como en su posterior organización y estandarización como *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage* (Bryan *et al.*, 2009) y *Measured and Drawn. Techniques and practice for the metric survey of historic buildings* (Andrews *et al.*, 2009). Fiel reflejo de esta fuerte tradición anglosajona en la organización de los procesos de trabajo, ha llevado a Inglaterra, en el sector de la arquitectura y la construcción, a liderar el BIM y su regulación desde el año 2011¹⁵.

Si observamos el panorama nacional, conviene destacar nuevamente las recomendaciones técnicas publicadas por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (2011) (*vid. supra* n. 1) que, sin duda, representa un claro avance institucional que aboga por una mayor estandarización en la documentación geométrica de entidades patrimoniales.

1.2. Una retrospectiva sobre el significado de documentación del patrimonio

El primer problema que se plantea en la sociedad actual es la variedad de opciones, digitales y no digitales, que intervienen en la representación patrimonial. Han variado en buena parte todos los soportes de representación. Es en éstos donde surgen los problemas de adaptación entre la metodología de trabajo y las nuevas tecnologías. Conviene subrayar que ante cualquier cambio que se produzca respecto a las nuevas reglas que gestionan una transformación metodológica, prácticamente es muy difícil lograr una transformación total. Resulta necesario reproducir una documentación igual que la anterior, integrando, eso sí, pequeños avances y modos de representar el patrimonio que con el tiempo puedan cobrar fuerza y finalmente constituir un verdadero cambio. En la historia de la arquitectura, uno de los objetivos en cualquier tipo de dibujo ha sido representar el espacio de una manera ordenada (Agustín *et al.*, 2013). En este sentido, para cualquier ejemplo de representación arquitectónica se ha recurrido al trinomio: planta, alzado y sección. En otros casos, las modas variaban del clásico modo de representación bidimensional a perspectivas isométricas (sobre todo en el siglo XIX), jugando con el punto de vista del observador para intentar romper un modo de observación plano o bidimensional en beneficio de la perspectiva (muy recurrente igualmente en la representación del arte rupestre).

En el momento actual, el cambio parece haber sido radical, sacudidos por nuevos modos de visualización donde el componente tecnológico es incuestionable. Muchas de estas técnicas llevan siglos de aprendizaje y desarrollo, como por ejemplo las técnicas de visión estereoscópicas, que por diversos factores económicos, políticos y sociales se han dilatado en el tiempo con nuevos avances tecnológicos.

En los diferentes periodos cronológicos, la condición social humana ha buscado la manera de representar el medio que le rodea con unas técnicas determinadas en cada etapa, obviamente no siempre con el fin de la documentación patrimonial que entendemos ahora. En este sentido, cabe recordar otros tipos de documentación del paisaje como el mapa más antiguo de la Europa Occidental, del periodo magdalenense (13.660 CalBP), que fue descubierto en Abautz (Navarra). Se trata de un bloque de piedra, con la representación de varias figuras zoomorfas y de un paraje grabado en la superficie que coincide morfológicamente con el entorno físico donde fue hallado. Ahora bien, para abordar su estudio necesitamos registrar, analizar e interpretar la propia documentación que describe (Utrilla *et al.*, 2009: 99-111). Su importancia se articula en dos factores determinantes:

- a) El contexto y unidades estratigráficas donde fue hallado es la clave para entender su encuadre cronológico y poner en relación su riqueza como bien mueble con el resto de su espacio cultural (como metáfora conceptual del metadato).
- b) Además para su documentación se han realizado tres experimentaciones para la obtención de una documentación geométrica a la mayor resolución posible. En concreto se ha utilizado tecnología láser de luz blanca estructurada, láser de triangulación y láser *trácker*, técnicas más adaptadas a la morfología del bien mueble. Sin embargo, sólo con este último se ha podido satisfacer el nivel de detalle que requieren los grabados con respecto al uso de técnicas fotográficas¹⁶.

16 *Vid.* apdo. 3.2.1 dedicado al arte rupestre.

9 <http://www.londoncharter.org/> (último acceso: noviembre de 2017).

10 López-Mencheró, V.M. (2013: 269-283) establece un interesante compendio explicativo acerca de los fundamentos teóricos de «Los principios internacionales de la Arqueología virtual» que recoge «Los principios de Sevilla». En este sentido, conviene destacar como a finales de 2017 fueron ratificados por la 19ª Asamblea General del *International Council of Monuments and Sites* (ICOMOS) en Nueva Delhi (*Resolution 19GA 2017/22 – Endorsement of the Seville Principles: International Principles on Virtual Archaeology*).

11 <http://www.ariadne-infrastructure.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

12 <http://www.carare.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

13 <http://www.3d-coform.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

14 <http://www.3dicons-project.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

15 Para una mayor información *vid.* n. 125, apdo. 3.7.4. sobre la Directiva 2014/24/UE.

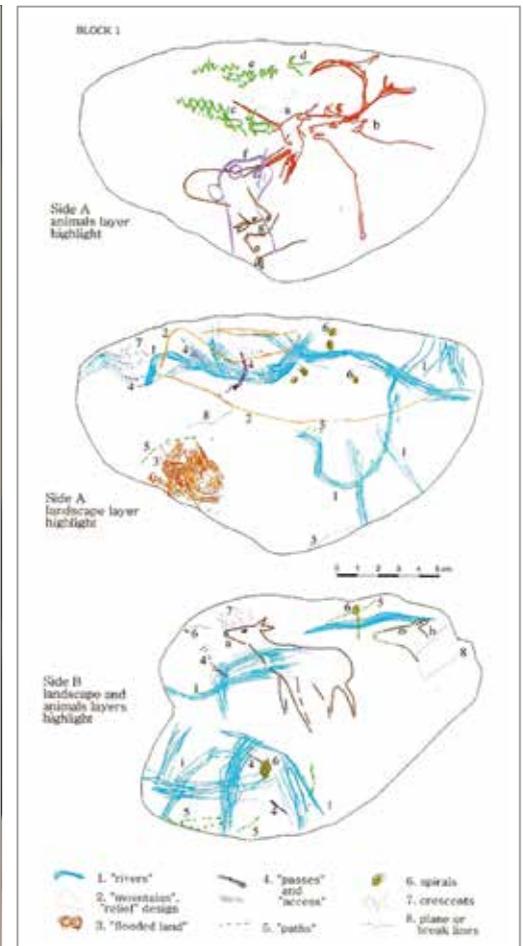


FIG. 1. Mapa grabado del bloque 1 de la cueva de Abauntz, en la Ulzama (Navarra) durante el proceso de documentación con un escáner de triangulación (a partir del original de Utrilla *et al.*, 2009: 102).

Si continuamos con un análisis temporal, cabe referirse también, a los autores grecolatinos que persiguieron, de igual modo, la incorporación de sistemas para normalizar y cuantificar la reproducción del paisaje, como por ejemplo las «coordenadas de Ptolomeo» y su relación con la red viaria romana cifradas en estadios (Gómez-Fraile, 2005: 35-64). Vitruvio da un paso más e intenta establecer unos estándares o cánones en su obra *De architectura* dentro de la arquitectura romana, que serán respetados y revitalizados en el Renacimiento con Vignola y Palladio. En la traducción del siglo XVIII de la obra vitruviana de Fray José Ortiz y Sanz¹⁷ se intenta dignificar su figura en una experimentación de las proporciones de cada monumento romano, «Se han de tomar geoméricamente las plantas y alzados de todos los edificios antiguos [...] enteros o en ruinas. En todos los monumentos considerables no íntegros se suplirá la parte diruida, por la guía de lo que reste, distinguiéndolo en los diseños». (Ortiz y Sanz, 1787: 12-14), cuestionando el ensayo de aquellos libros de viajeros y anticuarios, que no era sino el prelude del Romanticismo, ya que «las imágenes están excesivamente animadas por los golpes de claro y obscuro del pincel» (Ortiz, 1797, *Noticia y plan de un viaje arquitectónico-anticuario encargado por Su Majestad a Don José Ortiz Sanz*).

Resulta incuestionable señalar el potencial que tiene la historiografía como fuente de documentación de las transformaciones que ha sufrido el patrimonio, desde la Roma clásica hasta el Renacimiento,

Neoclasicismo y Romanticismo. Muchas de estas fuentes se utilizan para determinar el deterioro sufrido e incluso sirven de base para una reconstrucción tridimensional diacrónica.

Otro ejemplo característico sobre la representación gráfica como fuente arqueológica y cartográfica, en este caso, de un paisaje urbano, reflejo de una organización política es la *Forma Urbis* (Rodríguez-Almeida, 1977: 219-256). Se trata de un mapa de mármol a una escala aproximada de 1:240 de la ciudad de Roma en el periodo del emperador Septimio Severo (203-201 d.C.)¹⁸. Con unas dimensiones aproximadas de 18 x 13 metros, estaba dispuesto de manera vertical en un muro del Templo de la Paz. Desde 1999 la Universidad de San Francisco trabaja en la creación de una base de datos con cada uno de los fragmentos conservados y escaneados tridimensionalmente. Únicamente se conocen alrededor de un 10%, y de esta totalidad algo más de un 10% ha sido localizado en su actual posición¹⁹. Algún autor, como Monteroso (2011: 65), propone un concepto volumétrico de la *Forma Urbis* más allá de la clásica representación bidimensional «a partir de la descodificación gráfica» con el ejemplo de los *Arcus Neroniani* del Monte Celio.

La *Forma Urbis* es un claro ejemplo de la necesidad de cualquier tipo de Estado, a lo largo de la Historia hasta la actualidad, de documentar sus límites topográficos, geográficos y humanos con di-

17 La figura prolífica de José Ortiz y Sanz es destacable como arqueólogo y estudioso de la Antigüedad Clásica a finales del siglo XVIII. Además de traductor de la obra vitruviana es autor de un inventario clasificado de yacimientos arqueológicos (Cantó, 2001: 30-31). Consúltese también el apdo. 3.6 sobre la reconstrucción patrimonial mediante modelos tridimensionales.

18 Composición topográfica de todos los fragmentos hallados hasta ahora de la *Forma Urbis* <http://formaurbis.stanford.edu/docs/FURproject.html> (último acceso: noviembre de 2017).

19 Véase el ejemplo de esta base de datos 3D, *Stanford Digital Forma Urbis Romae Project*, con los 1.186 fragmentos hallados en <http://formaurbis.stanford.edu/> (último acceso: octubre de 2017).

ferentes objetivos censales, catastrales o simplemente defensivos, tanto del perímetro urbano como del espacio rural. Principalmente para poder hacer un uso y control de cada territorio y además ejercer un gravamen sobre el censo activo de la población y sus propiedades. En este sentido, tampoco debemos olvidar la importancia de los aspectos relacionados con la religión en la demarcación topográfica mediante zonas santuales del espacio geográfico que ocupa un territorio político (Angás, 2005)²⁰.

En Aragón, por ejemplo, la primera documentación de su territorio realizada con ciertas garantías técnicas y científicas fue plasmada por el cosmógrafo Juan Bautista Labaña en el siglo XVII en su famoso *Mapa de Aragón e Itinerario del Reino de Aragón*. Igualmente, no fue fruto de la casualidad que constituyese un encargo real para documentar el territorio, tal y como advierte Labaña en el inicio de su obra: «Partí de Madrid para hacer la descripción del Reino de Aragón por mandato de su Majestad el lunes 25 de octubre de 1610, un cuarto después de mediodía» (Labaña, 2006: 3). Labaña realiza un mapa a escala 1/600 000 aproximadamente, viajando por cada uno de los lugares del Reino de Aragón, introduciendo como gran avance técnico de principios del siglo XVII las triangulaciones desde determinados puntos estratégicos (normalmente torres, ermitas y picos de las principales cordilleras). Este avance técnico le permitió realizar un levantamiento cartográfico sobre el terreno con una considerable precisión, anotando en su cuaderno de viaje las mediciones: los «gr» grados, «l» leguas y sus orientaciones. Asimismo, en su obra incorpora otro tipo de información muy variada, como son, todo tipo de dibujos arquitectónicos (plantas, alzados), numismáticos, epigráficos, de diferentes utensilios, croquis cartográficos, etc. Igualmente recoge otro tipo de datos, descriptivos y censales sobre el número de hogares y vecinos de cada municipio que visita, además de una vasta colección de apreciaciones personales que resultan muy valiosas como testimonio sociológico del Aragón de principios del siglo XVII. De esta manera, podemos considerarlo como un precedente a la obra «enciclopédica» del siglo XIX de Pascual Madoz.

En resumen, la cartografía de Labaña es un excelente documento arqueológico, histórico y cartográfico que además constituyó la base de las sucesivas cartografías del territorio aragonés, con continuas reimpresiones, en los siguientes doscientos años.

Cada uno de estos testimonios y aportaciones han sido documentos únicos que han permitido conocer y analizar monumentos patrimoniales, algunos ya perdidos, y su estado de deterioro. De esta manera, conforme avanzamos en el tiempo, y sobre todo a partir del siglo XVII, el concepto de documentación del patrimonio se va perfilando, incorporando pequeños matices que diferencian la subjetividad de la objetividad técnica. En el ejemplo de Labaña (1620), en la presentación de su *Mapa de Aragón* ante los diputados del Reino de Aragón, hacía gala del uso de «instrumentos matemáticos» para el cálculo mediante triangulaciones de su mapa respecto a otras cartografías (Hernando, 199: 135)²¹. De la misma manera, observamos como ya, a finales del siglo XVIII, el debate

20 En el caso de la frontera noroccidental del territorio de la ciudad etrusca de Vulci, la influencia tipológica entre la etrusco-autóctona y la etrusco-lacial-campesino de los depósitos votivos extraurbanos, son claros demarcadores geográficos de un territorio político y su influencia en cada período cronológico, con además otras funcionalidades económicas, decorativas, sociales y culturales. Vid. Angás (2005): «Santuarios como indicadores de frontera en el territorio noroccidental de Vulci siglos VII-III a.C. Italia centro-irreña», *Salduie*, 5, pp. 65-94.

21 Extracto de la carta que el cosmógrafo Juan Bautista Labaña envía a los diputados del Reino de Aragón sobre su célebre *Mapa e Itinerario del Reino de Aragón* (1610-1620): «Que esten VV.SS. satisfechos de la descripción del Reyno estimo yo mucho, y puedenlo estar VV.SS. con mui justa causa, porque tendran la mejor, y mas exacta descripción que de ningun Reyno, ni provincia se ha hecho, porque todas quantas hay, se hazen por ynformacion y essa se hizo por vista de ojos, con instrumentos Mathematicos, vsados de pocos, y cotejen VV.SS. esse

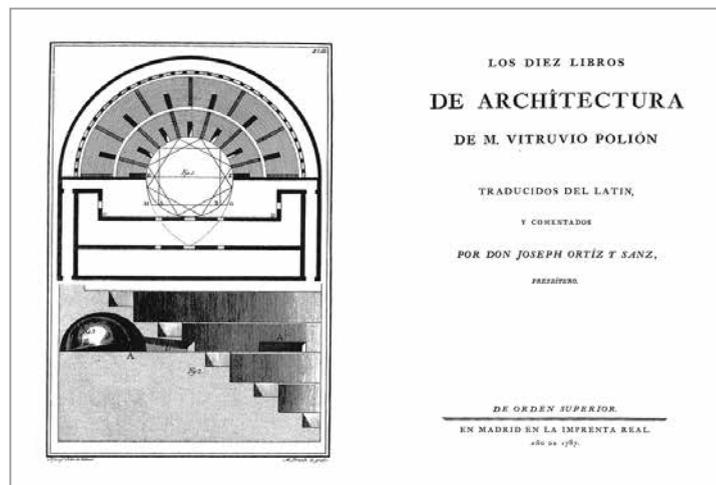


FIG. 2. Lámina de Ortiz y Sanz interpretando a través de la obra de Vitruvio la geometría de la planta de un teatro griego (Ortiz y Sanz, 1787: 124, cap. 8 del lib. V).

entre la diferencia conceptual de «restituciones» y las «reconstituciones» se encontraba en plena polémica (Ortega, 2010: 50-51). El problema que plantea este tipo de debate se encuentra en los modos de representación gráfica del patrimonio. ¿Cómo es posible que el arquitecto del s. XIX persiguiera un modo de representación buscando la perspectiva axonométrica²², adecuada al ojo del espectador, y hoy en día cuando supuestamente disponemos de modelos tridimensionales, su representación deba reducirse a un espacio bidimensional, sin aparentes diferencias con respecto a épocas anteriores? En este sentido, es precisamente en la presentación gráfica de los resultados en un determinado soporte donde encontramos todavía graves limitaciones. Éstas aparecen impuestas por los formatos tradicionales de las publicaciones, sobre todo en lo relativo a las dimensiones de las revistas, generalmente reducidas, y a su publicación en blanco y negro, factores que impiden apreciar detalles importantes en el estudio del bien patrimonial, especialmente de algunos como el arte rupestre. Consecuentemente, el aspecto limitador más destacado es la bidimensionalidad del formato de publicación, ya sea éste en papel o digital²³.

Hasta el momento, la mayoría de las publicaciones de trabajos, sobre todo aquellos en los que se emplean procedimientos tridimensionales, tan sólo ofrecen ejemplos gráficos bidimensionales. Resulta erróneo considerar que una imagen tridimensional publicada en dos dimensiones pueda ofrecer al lector una percepción más real del motivo o escena representados. El resultado, a nivel visual, puede resultar impactante, si bien no siempre permite extraer más datos o informaciones que las ofrecidas en una presentación tradicional.

La plasmación de volúmenes en publicaciones sobre patrimonio se ha reducido, en el mejor de los casos, bien a la presentación de imágenes bidimensionales de elementos tridimensionales, bien a dibujos o láminas en los que se integran una serie de signos convencionales (que varían según cada investigador) y que pretenden informar acerca de los diferentes valores del soporte o del bien: grieta, desconchado, protuberancia, oquedad, cambio de pendiente

mappa con el de Cataluña, en los confines, y verán la verdad del mío, y la falsedad del otro». Hernando (1996: 135).

22 Vid. FIG. 4 a modo de ejemplo la utilización de un simple dibujo como hipótesis arqueológica del teatro y anfiteatro romano de la actual Florencia, sobre la base de los datos adquiridos por un láser escáner 3D.

23 La única diferencia existente entre las publicaciones en formato papel y el digital suele ser que en el segundo puede aparecer más comúnmente en color, aunque no siempre se incluye.



FIG. 3. Mapa del Reino de Aragón de Juan Bautista Labaña (1610-1620). FUENTE: Biblioteca Nacional de España.

te, etc.; o bien, se han limitado a ofrecer archivos de movimiento de modelos tridimensionales con los que, sin embargo, no se puede interactuar²⁴.

Efectivamente la diferencia se encuentra en el soporte de representación: este ha sido el verdadero cambio material con las nuevas alternativas digitales. Una transformación paralela de la utilización

de soportes físicos a digitales. A partir de este punto se deriva el resto, ya que inevitablemente, si consentimos esta conversión, el método y técnicas sufren una ligera transformación.

Estos nuevos soportes buscan otras vías de documentación, valorización y difusión. Es por ello que surgen otros problemas derivados con la gestión y, sobre todo, preservación digital (Serra, 2008: 19-27)²⁵. Dichos problemas deben ser reglados en el establecimiento de estándares de gestión que permitan recuperar y en-

24 http://archaeologydataservice.ac.uk/era/section/record_manage/rm_record_lasers.jsf (último acceso: junio de 2015). «Marsoulas, la grotte oubliée», realización: Marc Azéma; coautores y consejo científico: C. Fritz y G. Tosello. Infografía 3D y restauración virtual: Carole Fritz, Gilles Tosello, Olivier Moreau y Marc Azéma (a partir de base de escaneado de Guy Perazio) <http://www.creap.fr/Marsoulas-3D.htm> (último acceso: junio de 2017).

25 Existen otros problemas que se están planteando actualmente sobre los nuevos soportes digitales como la propiedad intelectual. Sobre este punto destacamos la obra de Torres y Gómez (2011): *El copyright en cuestión*, atendiendo y preci-



FIG. 4. Ejemplo de un dibujo como hipótesis arqueológica del aprovechamiento urbano de los restos arqueológicos del teatro romano de *Florentia* (vid. apdo. 3.3.2.2) en la segunda mitad del siglo XII. Realizado sobre la nube de puntos adquirida con láser escáner 3D de los restos arqueológicos del antiguo teatro en la denominada *terza corte* del *Palazzo Vecchio*. Dib. Mirko Picchioni.

tender toda la información registrada. Para este proceso de normalización y estandarización debemos subrayar tres premisas fundamentales en el proceso de documentación geométrica que deberían cumplirse en todas sus formas, buscando la accesibilidad, la comprensibilidad y una marcada utilidad geométrica (Vallé, 2007: 162-163).

1.3. Proyectos de documentación en el contexto europeo: la gestión de modelos tridimensionales en bases de datos

Este apartado pretende analizar y reflexionar sobre los proyectos internacionales más significativos en los últimos años, ya realizados o que se están desarrollando actualmente, que tratan sobre los resultados en la aplicación de bases de datos relacionales con modelos tridimensionales del patrimonio cultural. Por esta razón, comprobaremos la integración en el conjunto de la información, con los planteamientos, los resultados y las propuestas en el contexto social actual. Para ello, hemos analizado una selección de algunos proyectos de investigación, representativos para esta monografía, que han trabajado en los aspectos gráficos y métricos sobre la visualización de datos y su interrelación. Sobre este análisis hemos extraído diferentes tipos de propuestas para la integración de modelos tridimensionales en plataformas web (vid. *infra* apdo. 3.7).

Aproximadamente desde el año 2000 se inicia una etapa de innovaciones tecnológicas, centrada en la digitalización de objetos muebles e inmuebles relacionados con el patrimonio cultural. Ante la gran diversidad sobre el método, técnicas y formatos que empiezan a coexistir, surgen una serie de iniciativas europeas que tienden a recoger todas estas innovaciones para su organización, gestión y aprovechamiento de la información tridimensional en el patrimonio cultural. Las primeras iniciativas se han centrado más en cómo resolver y unificar los problemas relacionados con la visualización gráfica y la variedad de formatos. Estos proyectos han sido 3D-ICONS y CARARE financiados por el programa ICT-PSP (*Information and Communication Technologies-Policy Support Programme*) en la modalidad de bibliotecas digitales. La mayoría de estos proyectos europeos surgen como desarrollo del proyecto Europeana que integra la construcción de una gran biblioteca digital de la cultura europea²⁶. El objetivo de Europeana no es únicamente la generación de un repositorio de modelos tridimensionales, su objetivo es mucho más amplio ya que integra todo tipo de archivos digitales de bibliotecas, archivos, museos, etc.

Para encontrar experiencias anteriores al cambio de milenio tenemos que remontarnos al año 1996 con el *Archaeological Data Service* (ADS) de la Universidad de York (UK)²⁷. El ADS se estableció como un servicio gratuito para crear, describir y preservar los datos arqueológicos con una finalidad enfocada a la investigación y divulgación. Además representa un magnífico ejemplo de buenas prácticas en el ámbito del almacenaje digital de la in-

sando los nuevos enfoques jurídicos de los derechos de autor con un auge de licencias *Creative Commons* y la dicotomía entre *copyright* y *copyleft*.

26 <https://www.europeana.eu/portal/es> (último acceso: noviembre de 2017).

27 <http://archaeologydataservice.ac.uk/> (último acceso: noviembre de 2017).

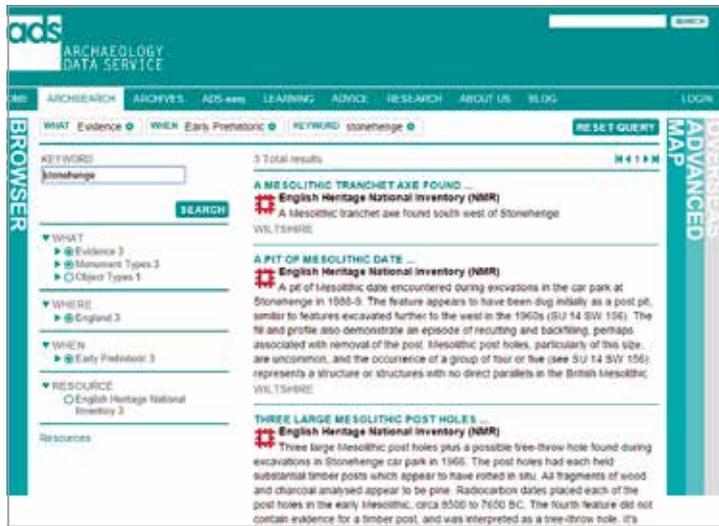


FIG. 5. Sistema de búsqueda online en la plataforma ArchSearch. FUENTE: <http://archaeologydataservice.ac.uk/archsearch/>

formación arqueológica. Actualmente está dirigido por un consorcio formado por las Universidades de Birmingham, Bradford, Glasgow, Kent y Canterbury, Leicester, Newcastle, Oxford y York. En 1998 presentan la primera versión de su catálogo online denominado ArchSearch²⁸ y posteriormente en 1999 sale su primer catálogo de buenas prácticas en la conservación digital. Aunque no profundiza en cómo relacionar la información arqueológica con modelos 3D, su manual de buenas prácticas en el almacenaje de la información y, sobre todo, cómo gestionar los diferentes metadatos, representa un excelente referente europeo²⁹, con una introducción sobre tipologías de herramientas (láser escáner 3D, UAV, fotogrametría), datos almacenados, formatos y casos prácticos de aplicación.

Actualmente coexisten varios proyectos europeos dedicados a la gestión de la infraestructura de datos espaciales (IDE)³⁰ dentro de la Arqueología y Patrimonio Cultural: NEARCH³¹, LoCloud³², ARIADNE³³, ALSF Online³⁴, EFCHED³⁵.

De todos ellos destacaremos, además de ARIADNE (*vid. infra*), el proyecto LoCloud (*Local Content in a European Cloud*). Este último consta de 32 socios e intervienen 26 países europeos y su objetivo es combinar los metadatos cartográficos de CARARE con *cloud computing technology*. Asimismo, pretende que cualquier organismo relacionado con el patrimonio cultural pueda hacer accesible sus datos online de una manera sencilla. Se trata de un proyecto ambicioso que pretende digitalizar alrededor de 4 millones de objetos.

28 <http://archaeologydataservice.ac.uk/archsearch/> (último acceso: noviembre de 2017).

29 <http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/Contents> (último acceso: noviembre de 2017).

30 Véase a modo descriptivo la Infraestructura de Datos Espaciales de España <http://www.idee.es/> En ella se incorporan varios recursos como ejemplos de interfaz de programación de aplicaciones (API) que utilizan servicios web abiertos e interoperables del *Open Geospatial Consortium* (OGC).

31 <http://archaeologydataservice.ac.uk/research/nearch> (último acceso: noviembre de 2017).

32 <http://www.locloud.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

33 <http://ariadne-infrastructure.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

34 <http://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/alsf/> (último acceso: noviembre de 2017).

35 http://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/efched_nerc_2006/ (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 6. Prototipo de ventana de acceso de consulta del proyecto Lo Cloud. FUENTE: <http://www.locloud.eu/>

1.3.1. ARIADNE

Además de las experiencias citadas, han surgido otro tipo de propuestas que intentan focalizar su objetivo en su relación con las bases de datos relacionales. Con este objetivo nace *Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking in Europe* (ARIADNE)³⁶. Se trata de un proyecto europeo, financiado por el séptimo programa marco de la Comisión Europea 2012-2016, que intenta relacionar bases de datos y objetos arqueológicos. Su finalidad se centra en hacer más accesibles las bases de datos existentes con información arqueológica, conformando una especie de red de trabajo interrelacionada en la que confluyan bases de datos e información de diferentes naturalezas y soportes: SIG, modelos y datos 3D, datos científicos y técnicos. Sin embargo, también en este caso el acceso a los datos se entiende como esencialmente orientado a la investigación.

De esta manera, pretende que los usuarios de ARIADNE puedan completar y aportar información en sus diferentes hojas de datos, desarrollando herramientas y servicios que permitan un acceso y sistema de comunicación común a verdaderos repositorios de datos arqueológicos puestos a disposición de la comunidad investigadora.

Su principal objetivo es la búsqueda de estándares que garanticen la interoperabilidad de datos en diferentes dominios web en arqueología.

Estos estándares quedan divididos en dos secciones:

A. Estándares de metadatos orientados a la Arqueología y esquemas conceptuales

- Modelos de referencia
- Yacimientos arqueológicos, monumentos y entornos
- Ciencias arqueológicas
- Objetos de museo
- Dublin Core (DCMI)
- Materiales bibliográficos
- Estándares de archivos
- Información geoespacial
- Otros estándares

B. Fuentes de terminología relacionadas con Arqueología

- Fuentes de terminología internacional
- Fuentes de terminología nacional
- Fuentes geoespaciales

36 <http://www.ariadne-infrastructure.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

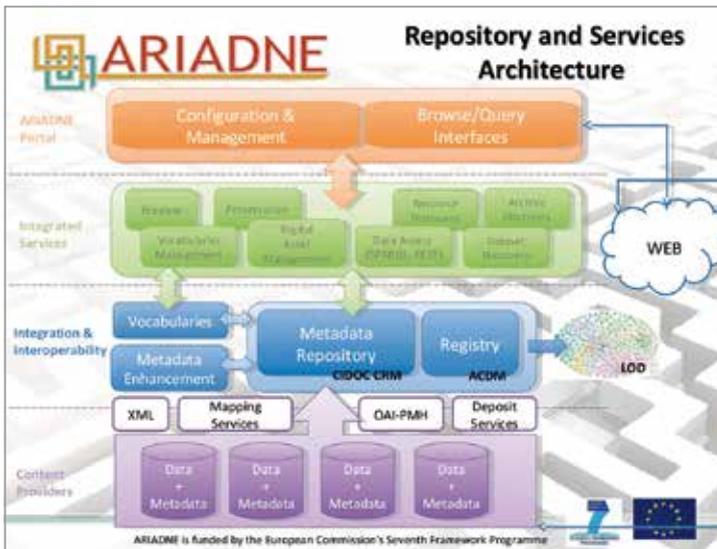


FIG. 7. Arquitectura de datos del catálogo de Ariadne (ACDM). *Ariadne Catalog Data Model*. FUENTE: <http://www.ariadne-infrastructure.eu/>

El modelo conceptual de registro de Ariadne llamado ACDM es una extensión del *Data Catalog Vocabulary* (DCAT). Se trata de una recomendación adaptada del W3C Consortium³⁷. El DCAT está propuesto como una herramienta para publicar un conjunto de datos y *Open Data*. La particularidad de ARIADNE es que se adapta y sigue las recomendaciones hechas por DCAT *Application Profile for data portals in Europe* respecto al uso de los términos de las ontologías de DCAT. Por lo tanto, estas recomendaciones establecen diferentes atributos y clases.

El principal objetivo de este modelo se centra en la clase *Archaeological Resource*, que conforma un catálogo dividido en las siguientes categorías:

- Servicios.
- Fuentes de lenguaje, vocabularios.
- Conjuntos de datos, bases de datos y SIG.
- Esquemas de metadatos.

Uno de los puntos claves del modelo se centra en los formatos de los metadatos denominado *Metadata Format* dividido en:

- Metadatos de nivel del conjunto de datos.
- Metadatos de registros arqueológicos.
- Metadatos de colecciones de objetos.

Los formatos están representados en el catálogo para proporcionar una información útil para la integración.

1.3.2. 3D-COFORM

Contemporáneamente se desarrolló otro proyecto europeo, dentro del séptimo programa marco denominado 3D-COFORM (2008-2012)³⁸, con el objetivo de avanzar en los diferentes métodos científicos y divulgativos de la digitalización 3D del patrimonio cultural. Asimismo, incorpora la digitalización 3D y su finalidad está dirigida tanto al público general como al ámbito profesional.

La planificación del proyecto fue establecida en tres fases de trabajo:

- Captura y proceso tridimensional.

37 <http://www.w3.org/TR/vocab/DCAT/> (último acceso: noviembre de 2017).

38 <http://3dcoform.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

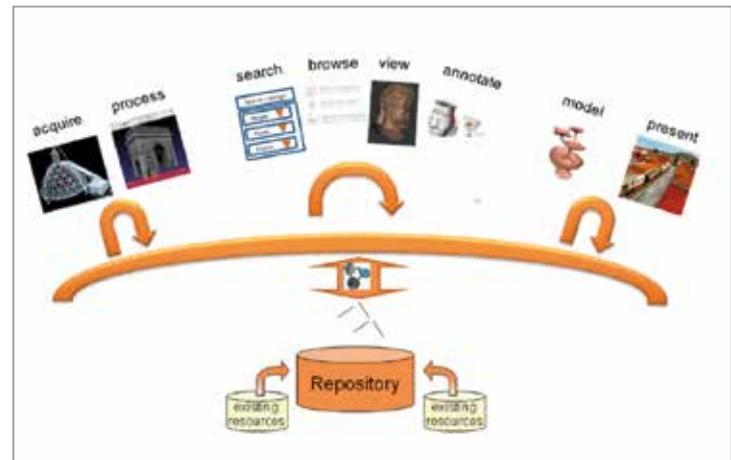


FIG. 8. Estructura de datos del proyecto europeo 3D-COFORM. FUENTE: <http://3dcoform.eu/>

- Integración de la información tridimensional con diferentes capas contextuales y metadatos.
- Visualización de los modelos tridimensionales.

1.3.3. Europea. *Connecting Archaeology and Architecture in Europeaana* (CARARE)

Otro proyecto, similar al anterior, ya finalizado (2010-2013), fue CARARE³⁹ (*Connecting ARchaeology and Architecture in Europeaana*), igualmente financiado por la comisión europea con el objetivo de promover la matriz Europeaana. El objetivo de este proyecto fue «desarrollar una red europea de organizaciones encargadas de investigar, proteger, informar y promover monumentos arqueológicos únicos, edificaciones arquitectónicas importantes, centros históricos de ciudades y monumentos industriales del mundo».

Una de las novedades que incorpora el proyecto de CARARE es que permite consultar contenidos 2D y 3D de elementos patrimoniales y de realidad virtual complementando de esta manera a Europeaana.

La red de trabajo que pretende integrar CARARE involucra a agencias y organizaciones de patrimonio, museos arqueológicos e instituciones de investigación y especialistas en archivos digitales con tres premisas básicas:

- hacer disponible el contenido digital del patrimonio arqueológico y arquitectónico a través de Europeaana.
- agregar contenidos y desarrollar servicios.
- permitir el acceso a los contenidos 3D y de Realidad Virtual a través de Europeaana.

CARARE propone además unas especificaciones funcionales relacionadas con los requerimientos para preparar contenidos 3D y de realidad virtual (VR) para Europeaana. Daniel Pletinckx y David Haskiya⁴⁰ en el año 2011 elaboraron un documento digital donde se establecieron las primeras recomendaciones acerca del contenido tridimensional. Sobre todo plantearon cuestiones fundamentales más allá del componente gráfico: el porqué y el para qué, la utilización de metadatos, tipos de plataformas, métodos de visuali-

39 <http://carare.eu> (último acceso: noviembre de 2017).

40 Pletinckx y Haskiya (2011). <http://www.carare.eu/eng/Media/Files/D5.1-Req-Spec-for-preparing-3D-VR-for-Europeana> (último acceso: noviembre de 2017).

zación y, especialmente, generalizaron el uso del formato estándar PDF3D para la publicación de las digitalizaciones tridimensionales. La elección del formato PDF3D se establece en base a su propia idiosincrasia: se trata de un formato abierto aceptado como estándar desde 2008 por la *International Organisation for Standardisation* ISO 32000-1 y ISO 32000-2. Además se elaboró un completo manual de entrenamiento⁴¹ con todas las posibilidades que ofrece el uso de este tipo de formato PDF3D (compatibilidad, importación y exportación, compresión, texturas, secciones x, y, z, organización por capas, medición por coordenadas o codificación de metadatos) y diferentes casos de estudio para codificar información⁴².

Sin embargo, Plentinckx (2011:23) ya planteó algunas limitaciones en la utilización de este tipo de formatos cuando se trata bien de mallas complejas o modelos de mayores dimensiones. De hecho, Koutsoudis (2013)⁴³ cierra, sorprendentemente, el pliego técnico de los documentos sobre gestión de los modelos tridimensionales y realidad virtual de CARARE en su artículo titulado «Bringing Cultural Heritage 3D Content to the Web Using the X3DOM Framework», apostando por un cambio diferente al propuesto. Este debía producirse para facilitar aún más el acceso a formatos tridimensionales de un modo directo, sin programas ni *plugins*, mediante navegadores web que sean compatibles por la especificación estándar WebGL. Este artículo plantea la utilización de ficheros X3DOM directamente como medio interoperable de información entre plataformas⁴⁴.

1.3.4. 3D-ICONS

De los resultados de CARARE y 3D-COFORM, nace posteriormente el proyecto 3D-ICONS⁴⁵, fundado por 11 países sobre la *European Commission's ICT Policy Support Programme*. Sin duda, se trata del proyecto que mejor centra su actividad en el método y técnicas de digitalización tridimensional ya que registra alrededor de 4000 modelos entre monumentos arquitectónicos y arqueológicos. Asimismo, consigue la visualización a través de Internet de una serie de objetos patrimoniales. El proyecto está dividido en 5 secciones que se consideran interrelacionadas, de esta manera se intenta dar un mayor protagonismo a cómo obtener una metodología de publicación *online* de los diferentes modelos 3D, y, en función de esta metodología, distinguir las técnicas más adecuadas de captura y modelado 3D.

Las 5 secciones del proyecto son las siguientes:

1. Técnicas de captura de datos 3D
2. Postproceso del contenido 3D
3. Metodología para publicar *online* la información 3D
4. Metadatos
5. Licencias y derechos de propiedad intelectual

1.3.4.1. Técnicas de registro de datos 3D

Estas técnicas variarán en cada proyecto según la respuesta a los siguientes criterios de trabajo:

- Resolución mínima exigida

41 <http://carare.eu/eng/Media/Files/3D-Training-Materials> (último acceso: noviembre de 2017).

42 *Vid. apdo. 3.7.2.A, Gestión de modelos mediante archivos PDF3D.*

43 <http://www.carare.eu/eng/Resources/3D-Virtual-Reality> (último acceso: noviembre de 2017).

44 *Vid. apdo. 3.7.2.B, Sistemas basados en Web Graphics Library (WebGL).*

45 <http://www.3dicons-project.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

- Precisión necesaria
- Distancia de trabajo
- Tiempo de trabajo
- Costes del sistema empleado
- Condiciones ambientales de trabajo
- ¿Cuál es el objetivo de estos datos 3D: científico o divulgativo?
- ¿Qué tipo de materiales vamos a digitalizar?

La correcta definición de cada uno de estos criterios resulta fundamental para poder fijar los objetivos en cada proyecto. Si, por ejemplo, requerimos una gran resolución respecto a la información tridimensional, necesitaremos emplear sistemas de registro 3D de objeto cercano (triangulación, luz blanca estructurada o fotogrametría de objeto cercano) que incrementarán los costes temporales ya que estas técnicas se emplean generalmente a menos de un metro sobre la superficie a digitalizar.

Los tipos de herramientas para digitalizar podemos dividirlos en:

- Técnicas de objeto cercano: escáner de triangulación y luz blanca estructurada.
- Técnicas de medio y largo alcance: láser escáner 3D de diferencia de fase y tiempo de vuelo.
- Técnicas basados en la imagen:
 - Fotogrametría aérea: sistemas UAV.
 - Fotogrametría terrestre.

Una de las virtudes del proyecto 3D-ICONS es que consigue sistematizar una metodología tanto de las técnicas de digitalización tridimensional del trabajo de campo como en las fases metodológicas del postproceso que hay que realizar de digitalización tridimensional, desde lo puramente geométrico hasta las últimas aplicaciones divulgativas que pueden derivarse de cada registro.

El postproceso como primer punto para obtener una representación 3D del objeto lo dividimos en:

a) Reconstrucción geométrica

- Nubes de puntos
- Generación de una malla desde una nube de puntos
- Limpieza de la malla
- Simplificación de la malla
- Mapeado y texturizado

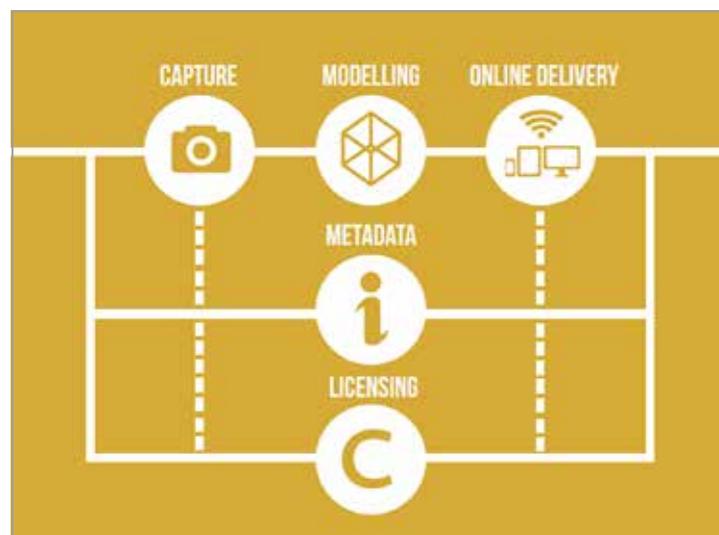


FIG. 9. Esquema de las fases principales que integran el proyecto 3D-ICONS. FUENTE: <http://3dicons-project.eu/>

b) Estructuración del modelo

c) Enriquecimientos de los modelos 3D

- Mejoras en la texturización del modelo
- Creación de plantas, secciones y alzados que enriquezcan el resultado final

d) Hipótesis de reconstrucción

e) Creación de otro tipo de complementos derivados del modelo 3D

IMÁGENES ESTÁTICAS

- Imágenes sobre el modelo 3D. Perspectivas isométricas

ANIMACIÓN

- Videos sobre la base tridimensional

IMÁGENES INTERACTIVAS

- Recorridos virtuales. Imágenes esféricas
- Recorridos de realidad virtual

La estructura de clasificación que propone 3D-ICONS, además de la captura 3D, modelado y publicación *online*, se centra en la organización de la información mediante metadatos. Este punto fundamental representa la llave para relacionar la información contextual y los datos 3D en una clasificación de cinco áreas:

- Describe en detalle los detalles del objeto o bien mueble.
- Describe en detalle la representación digital y su localización *online*.
- Proporciona información técnica y certificado de calidad sobre los procesos y metodología utilizados en su digitalización.
- Proporciona información sobre los derechos intelectuales de utilización.
- Los datos quedan interrelacionados con otras Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) como por ejemplo la *Europeana Data Model* (EDM).

Para la construcción sobre esta clasificación de cinco áreas se ha utilizado como esquema seleccionado el mismo del proyecto CARARE 2.0 *Metadata*.

Este proyecto fue desarrollado durante tres años, siendo financiado por la Unión Europea con el objetivo de crear unos estándares sobre la organización de la información digital, tales que monumentos arqueológicos, objetos, arquitectura y paisajes para los usuarios del *Europeana Data Model* para:

- Asegurar la interoperatividad de metadatos nativos proporcionados por diferentes organizaciones de patrimonio europeas.
- Creación de un esquema de metadatos que pueda tener una salida de datos comunes.
- Soportar toda la variedad de información descriptiva sobre cualquier tipo de información arqueológica. En la digitalización llevada a cabo por el Instituto Universitario de Investigación en Arqueología Ibérica de la Universidad de Jaén, también dentro del proyecto 3D-ICONS, basan su experiencia (Sánchez, 2014: 137-138) en la fase anterior de CARARE (versión 2.0), estableciendo las siguientes categorías de metadatos con un esquema común al resto de miembros del proyecto:

Bien patrimonial: incorpora la descripción y la información espacio-temporal de los yacimientos arqueológicos, monumentos, edificios históricos, bienes industriales, paisajes arqueológicos, pecios, artefactos y ecofactos, así como libros, mapas, dibujos, fotografías, películas relacionados con el patrimonio arqueológico y arquitectónico.

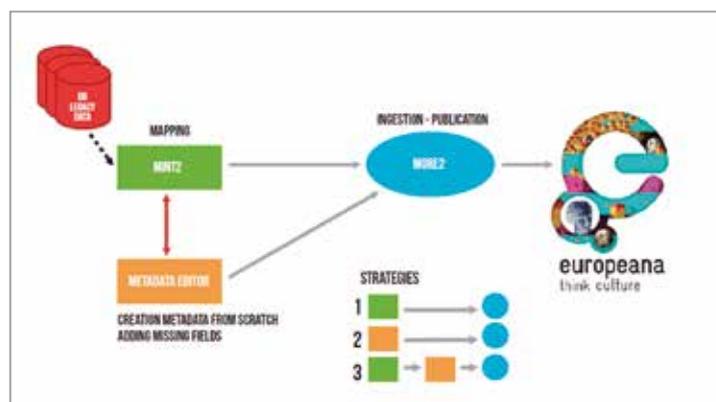


FIG. 10. Diferentes estrategias en la creación de metadatos en el proyecto 3D-ICONS. FUENTE: <http://3dicons-project.eu/>

Recurso digital: incluye las imágenes, dibujos, planos, mapas, archivos, publicaciones y modelos 3D *online* asociados a los bienes patrimoniales.

Información de la colección: describe la colección a la que pertenece el contenido suministrado.

Actividad: se incluyen tanto los acontecimientos históricos que tuvieron lugar en el bien patrimonial (tales como construcción, alteración, demolición, batallas, etc), como las actividades arqueológicas (excavaciones, prospecciones, etc).

Finalmente toda esta información queda codificada mediante un formato XML para posteriormente transformarlo al formato EDM de Europeana y poder publicarlo *online* (Sánchez, 2014: 137-138).

El esquema que propone el proyecto 3D-ICONS sobre el establecimiento de licencias y derechos de propiedad intelectual está integrado en cada una de las fases de registro 3D desde la captura de los datos hasta la visualización *online* del contenido tridimensional.

Los principales puntos que representan esta relación son los siguientes:

- Gestor del bien mueble o inmueble (Institución, museo, etc.)
- Toma de datos
- Proceso de datos
- Acuerdo de distribución de la información
- Acuerdo de comercialización (si fuese el caso)

En este proceso hay varios puntos referentes a las licencias y derechos de propiedad sobre los que resulta necesario establecer algunas precisiones:

ACUERDOS DE ACCESO

Según la experiencia de 3D-ICONS es necesario establecer en una primera fase un acuerdo de acceso al centro institucional donde se encuentren los objetos muebles o inmuebles que se van a digitalizar y que nivel de control tiene cada parte en los datos capturados.

ACUERDOS DERIVADOS

Sobre todo cuando se refiere a la información original capturada y a su utilización de productos derivados en fases sucesivas o en trabajos diferentes.

ACUERDOS EN LOS METADATOS

Estos metadatos están proporcionados por los creadores del registro tridimensional con el objetivo de incrementar la visibilidad en su reutilización bajo licencias de *Creative Commons*.

ACUERDOS DE ACCESO PÚBLICO

Para evitar usos inapropiados con la información que se distribuya mediante acceso público libre, es recomendable apli-

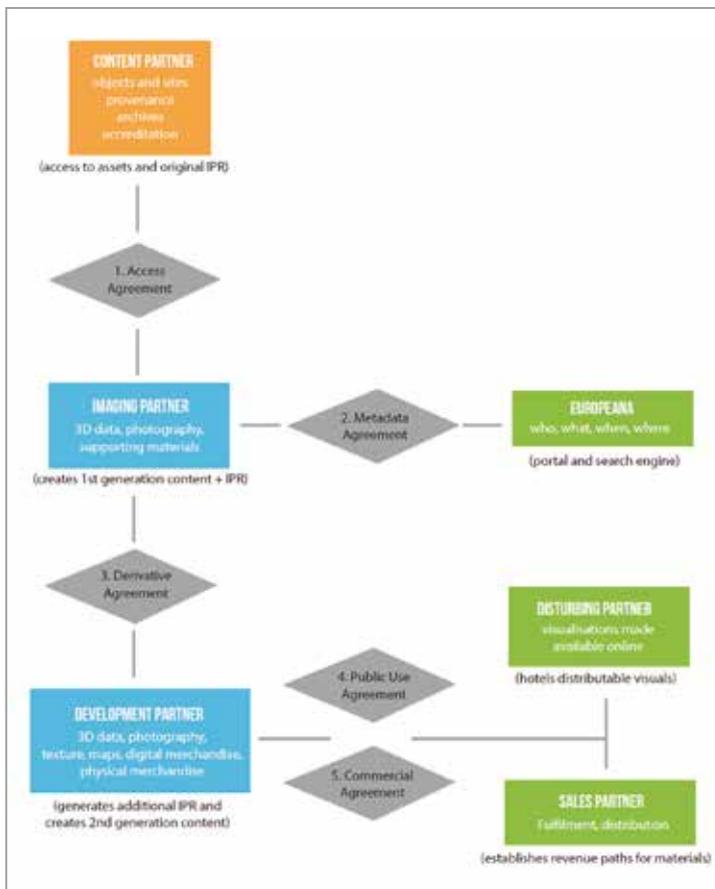


FIG. 11. Visualización de los diferentes acuerdos y licencias que pueden ser adoptados en la captura, modelado y utilización de la información. FUENTE: <http://3dicons-project.eu/>

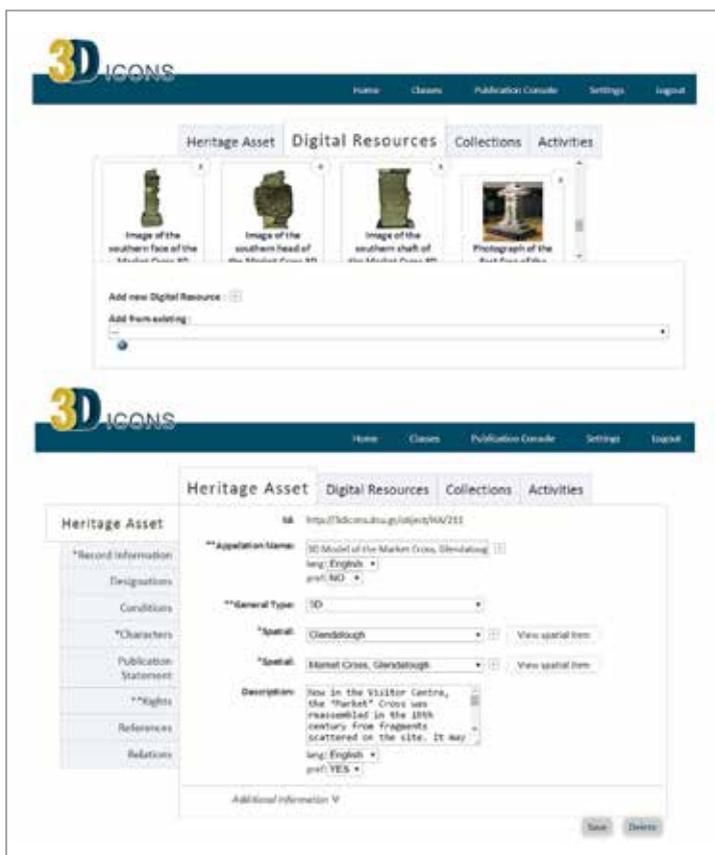


FIG. 12. Sistema de gestión e introducción de información en el repositorio 3D-ICONS. FUENTE: <http://3dicons-project.eu/eng/Guidelines-Case-Studies>

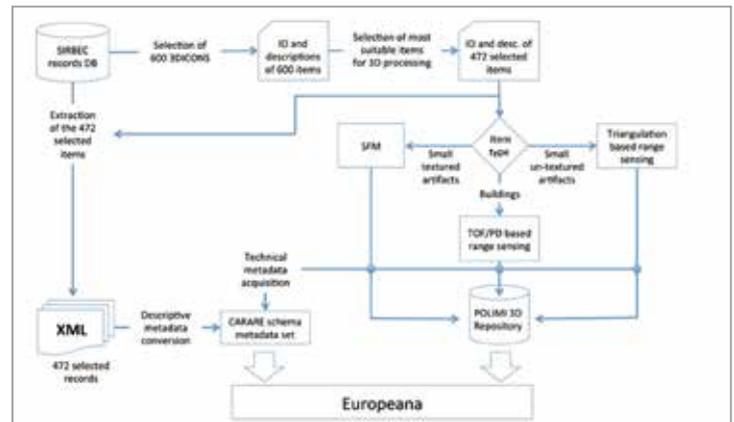


FIG. 13. Estrategia de trabajo y organización en la digitalización realizada por el Politecnico di Milano para CARARE y 3D-ICONS para dotar de esta información a EUROPEANA (Guidi et al., 2015: 339).

car en los propios metadatos de los archivos *Creative Commons Attribution-Non-Commercial-No-Derivatives* (CC-BY-NC-ND)⁴⁶.

ACUERDOS COMERCIALES

Establecer este tipo de acuerdos tanto comerciales como no comerciales en la distribución final de la información.

1.3.5. Otros proyectos desarrollados de referencia

1.3.5.1. Prototipo QueryArch3D

Fuera del ámbito europeo destacamos el proyecto MayaArch3D⁴⁷ como estudio de un espacio cultural concreto del yacimiento arqueológico maya de Copán (Honduras). La peculiaridad de este proyecto de investigación reside en aglutinar dos escalas diferentes de información: datos de modelos tridimensionales de objetos que se encuentran en diferentes colecciones distribuidas por el mundo, de diferentes resoluciones y tamaños con datos cartográficos mediante sistemas de información geográfica (SIG)⁴⁸. Esta relación la consigue a través de una infraestructura de búsqueda de datos *online* tanto en 2D como en 3D⁴⁹, de mapas de asentamientos, de acceso y visibilidad, de la topografía, de alineaciones arquitectónicas y del paisaje, como el estudio de distribuciones espacio-temporales.

El paisaje arqueológico documentado es de 2400 hectáreas con aproximadamente 3000 estructuras arquitectónicas del Valle de Copán.

El registro documental se realizó en el año 2009, utilizando sistemas láser escáner 3D y técnicas fotogramétricas (Agugiaro y Remondino, 2014: 145-150).

Para la creación de las bases de datos se ha utilizado una adaptación de la base de datos del Instituto Arqueológico Alemán (DAI), el *software* Geomajas – Open-Source-GIS-Framework para la web y un prototipo de sistema de consulta realizado mediante Unity 3D denominado QueryArch3D 1.0. Además utiliza la librería Three.js

46 <http://pro.europeana.eu/web/guest/available-rights-statements> (último acceso: noviembre de 2017).

47 *QueryArch3d: querying and visualising 3D models of a maya archaeological site in a web-based interface* (Agugiaro et al., 2013).

48 En el apartado dedicado a los SIG (3.7.1) se hace una breve reflexión acerca de las dificultades de estos programas para trabajar con grandes mallas tridimensionales y el uso de los nuevos sistemas *web mapping*.

49 Los integrantes de este proyecto han sido el Instituto Arqueológico Alemán (DAI), IT. Prof. Dr. Reinhard Förtsch, 3D Optical Metrology Unit, Fundación Bruno Kessler (FBK) (Trento, Italia) y el Instituto Hondureño de Antropología e Historia (IHAI) mediante financiación del Ministerio Alemán para la Educación y la Investigación (BMBF).



FIG. 14. Base de datos estructurada mediante FileMaker Pro realizada por el Instituto Arqueológico Alemán que muestra las relaciones de las tablas. FUENTE: <http://www.mayaarch3d.org>

en JavaScript bajo la especificación para navegadores de WebGL⁵⁰ (Auer, 2014: 33-39) que permite realizar mediciones directamente en los ejemplos documentados y localizar coordenadas dentro de un navegador compatible con la especificación estándar WebGL.

La base de datos de consulta web descentralizada que se propone es una combinación entre la base de datos del Instituto Arqueológico Alemán i.DAIfield (Filemaker Pro) y la base de datos de los objetos (Postgresql/PostGIS) cuyo objetivo es poder importar y exportar diferentes datos de información tridimensional, realizando análisis de mapas de visibilidad, asentamientos, topografía, alineaciones, la organización espacio-temporal de objetos, iconografía e inscripciones.

Sin duda, se trata de un proyecto que proporciona un punto de avance a la problemática actual: asociación de datos SIG con modelos tridimensionales mediante WebGL. El factor negativo es que la consulta no resulta libre y únicamente se tiene acceso a unos pocos modelos tridimensionales muy simplificados que ofrecen muy poca información. Se trata de una problemática recurrente prácticamente en todos los proyectos analizados: la limitación en la consulta de la información y la falta de actualización. Exclusivamente se financia una primera parte del mismo pero requerirían de una actualización periódica para dotarlos de una utilidad completa.

1.3.5.2. Huma-Num. La TGIR des humanités numérique

Con la creación del proyecto francés Huma-Num (conformado por diferentes socios en un consorcio) se ha querido llevar a cabo la validación de un procedimiento de trabajo en materia documental del patrimonio. Ante la diversidad de datos geométricos generados (sistemas de obtención, formatos, tratamiento, procesados, etc.) se hace hincapié en la necesidad de estructurar el uso de las herramientas tridimensionales. Si bien este aspecto ya ha sido tratado en otros estudios y trabajos, centrados sobre todo en la documentación del arte rupestre (*vid. infra* apdo. 1.3-6), dentro del programa Huma-Num se han querido destacar algunos puntos:

- abarcar el conjunto de usos de la tecnología 3D para el estudio de las sociedades humanas en general.
- coordinar y estructurar a nivel nacional la producción de modelos tridimensionales.

⁵⁰ Véase la utilización en varias experimentaciones de esta librería en la publicación de modelos 3D de manera *online* (*vid. apdo. 3.7.3*).

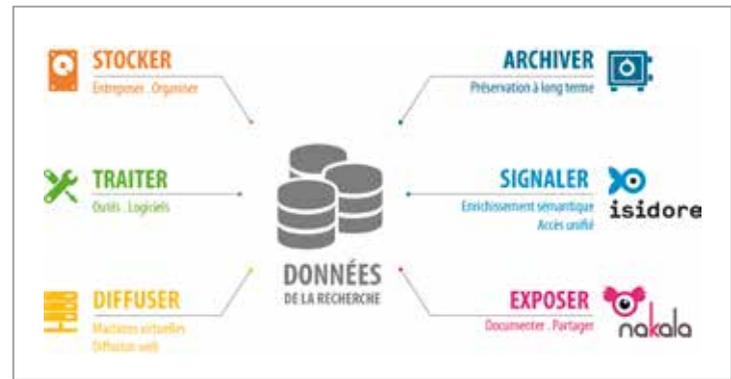


FIG. 15. Estructura de las características que quiere integrar Huma-Num. FUENTE: <http://www.huma-num.fr/services-et-outils>

- difundir las recomendaciones para el uso de modelos tridimensionales.

En general, se pretende llevar a cabo una estandarización del procedimiento de obtención de datos, así como de la terminología empleada, de los formatos y de los metadatos y su perdurabilidad en el tiempo. Los datos homogeneizados serían puestos a disposición del público en general a través de una plataforma web. El proyecto todavía no está operativo aunque se ha publicado en la página web la estructura que constará el servicio del consorcio⁵¹.

De entre los once miembros que componen el proyecto, destacamos el que está encargado de la gestión de la información tridimensional (2014-2018)⁵² dirigido por Archeovision de la Universidad de Burdeos.

1.3.6. Proyectos dedicados al Arte Rupestre

Uno de los aspectos más importantes, tanto para la investigación como para la administración en el estudio y gestión del arte rupestre, es la documentación de las manifestaciones, su reproducción gráfica, almacenamiento, organización y accesibilidad a los datos y metadatos generados. Sin embargo, y en líneas generales, se presenta como uno de los apartados más desatendidos o, cuando menos, desigualmente tratados.

A pesar de que el almacenamiento de datos y el acceso a los mismos resulta de máxima importancia para toda aquella institución que trabaja con grandes cantidades de datos y de naturaleza muy diversa, en lo referente al arte rupestre, existe una tendencia generalizada a planteamientos básicos de organización y, casi siempre, individualizados y cerrados.

En el mundo de la investigación cada investigador puede confeccionar su propia base de datos, más o menos compleja en función del objeto y finalidad de la investigación y de los medios disponibles, casi siempre relacionados con el acceso a determinado *software*, ya sea de gestión de datos (tipo Access, Excel, Filemaker) o SIG (Arcview, ArcGIS, ManifoldGIS, GvSIG, Kosmo, QGIS, SAGA GIS) que llevan ya implementados sus propios sistemas de registro

⁵¹ <http://www.huma-num.fr/services-et-outils> (último acceso: noviembre de 2017).

⁵² Partenaire 1: ARCHEOVISION-UMS 3657 (Bordeaux)-Pilotage du consortium. Partenaire 2: MAP-UMR 3495 (Marseille). Partenaire 3: CIREVE (Normandie/Caen). Partenaire 4: EPOTEC [UMR CNRS 6597 (IRCCyN)-EA 1161 (Centre François Viète)] (Nantes). Partenaire 5: LARA-UMR 6566 (Nantes/Rennes). Partenaire 6: MSH Val-de-Loire (Tours). Partenaire 7: ASM - UMR 5140 (Montpellier). Partenaire 8: INRAP-Direction Scientifique et Technique (Paris). Partenaire 9: MOM-UMR 5138 (Lyon). Partenaire 10: CEPAM-UMR 7254 (Nice).

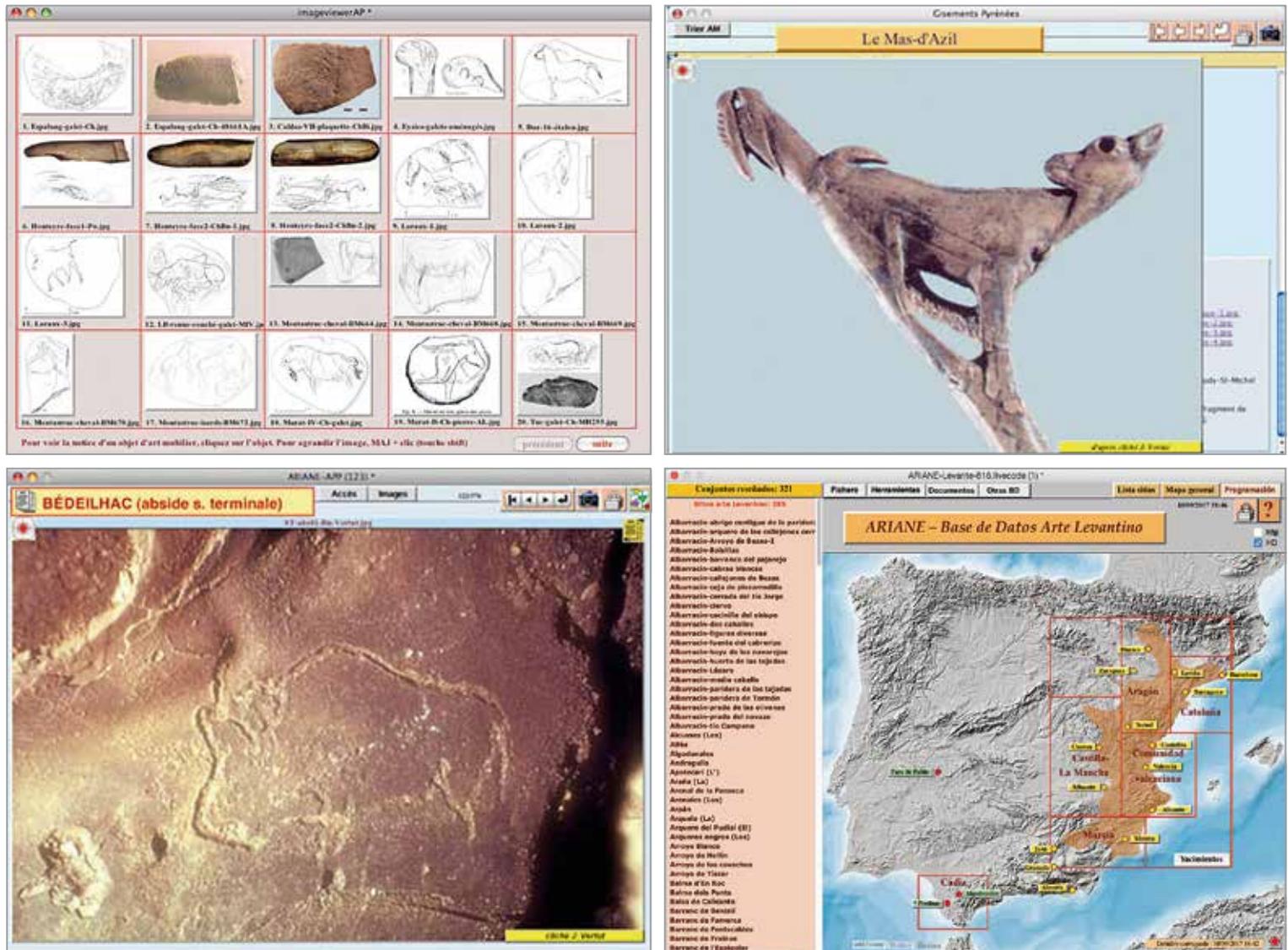


FIG. 16. Ejemplo de distribución de la base de datos de ARIANE formada por textos e imágenes. FUENTE: <http://www.creap.fr/Ariane.htm>

de datos. Los programas SIG empleados en el estudio, documentación y gestión del arte rupestre son programas adoptados, no son en ningún caso, generados por y para el arte rupestre sino que se centran en un análisis esencialmente orientado al territorio. Con todo, la generalización de estas tecnologías y la realización de nuevos análisis relacionados con el arte rupestre ha permitido que, en los últimos años, haya proliferado el uso de herramientas SIG que trascienden el mero análisis estrictamente geográfico, atendiendo a otros aspectos que relacionan los diferentes metadatos relacionados con los elementos que conforman el cuerpo informativo de las bases de datos.

Conviene, en todo caso, realizar una apreciación acerca de las bases de datos relacionadas con la investigación, y es que son, casi siempre, bases de datos cerradas. Incluso cuando se da cuenta de la existencia de las mismas, se especifica la restricción en su acceso. Es el caso de la base de datos ARIANE (*Art Rupestre: Iconographie et Archéologie par Navigation Electronique*) desarrollado por el *Centre de Recherche et d'Études pour l'Art Préhistorique* (Université de Toulouse) y, en concreto, por G. Sauvet. Su propósito es el de generar una base de datos con información precisa acerca de los yacimientos con arte rupestre paleolítico de Europa. La información se ciñe a textos y gráficos que, en principio, estaría destinada tanto a estudiantes como a profesores e investigadores. Como fin último, se señala su utilidad como herramienta de consulta para especialistas e inves-

tigadores, pero también señalando su valor pedagógico y como medio de comunión con el público en general.

Sin embargo, hasta el momento, la base de datos ARIANE no resulta de libre consulta, sino que está centralizada en el servidor de la Universidad de Toulouse-le Mirail y se puede acceder a ella mediante una contraseña disponible sólo para unos pocos usuarios registrados. La naturaleza de servicio público y abierto que se esgrime en la propia descripción del proyecto referido se muestra imposibilitada por cuestiones de propiedad intelectual de los contenidos de la base de datos.

Precisamente aspectos como el de los derechos de imagen y propiedad intelectual de la información aparecen como uno de los grandes obstáculos a salvar. Dicha problemática, muchas veces unida al celo del propio investigador y en ocasiones de la administración gestora, ha sido objeto de análisis específicos (Vitali y Megale, 2009; de Francesco, 2009; Torres y Gómez, 2011).

Por lo referido, la base de datos ARIANE, como casi todas las vinculadas al estudio del arte rupestre y a instituciones investigadoras, se muestra cerrada y orientada principalmente a la investigación. De cualquier manera, la base de datos se centra en el almacenamiento de información mediante fichas con datos generales (localización, bibliografía, etc), arqueológicos y gráficos, exclusivamente fotográficos.

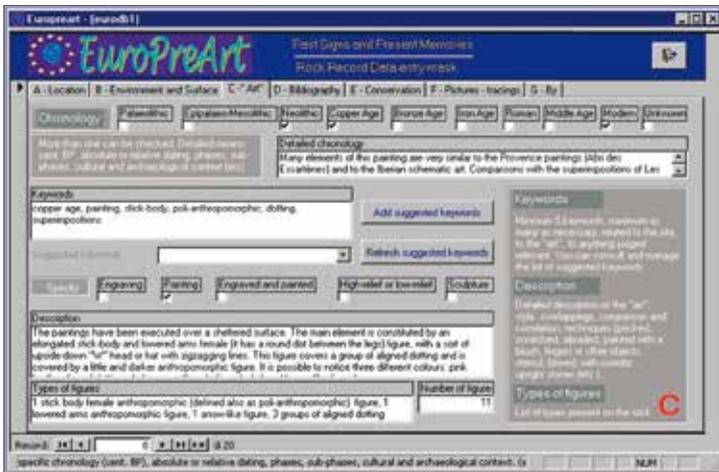


FIG. 17. Visualización de la página web de EuroPreArt. FUENTE: <http://www.europreart.net>

Nuevamente, y dado el carácter esencialmente orientado a la investigación de la propia base de datos y de sus contenidos, cuenta con una herramienta estadística de tratamiento de la información.

Asimismo, han existido otros intentos, a nivel pan-Europeo, de confeccionar una base de datos que recogiera información, esencialmente gráfica, de los conjuntos rupestres prehistóricos. Sin duda, EuroPreArt⁵³ es la más conocida y de mayor desarrollo e importancia, por su propia concepción y por el amplio abanico de muestras recogidas (desde el paleolítico a la Edad del Hierro) (Seglie, 2001 y 2009). El acceso a los contenidos puede llevarse a cabo por medio de un CD-Rom y, también, a través de la plataforma web. El propósito inicial en su creación, en la que participan diversas instituciones, es la de generar un acceso libre y orientado al público en general del arte rupestre europeo. Se recogen 806 yacimientos, 2760 unidades gráficas (fotografías, calcos y mapas) y 2865 citas bibliográficas.

No aparece como una base de datos exhaustiva, no puede serlo, pero aporta información interesante y, sobre todo, de forma abierta. Sin embargo, adolece de algunos elementos que dificultan en parte la accesibilidad a los datos. Así, el sistema de entrada consiste en la descarga de un archivo de acceso que debe ser instalado en el ordenador.

La estructura de la base de datos se ha realizado en Access, base en la que se encuentran abundantes datos de diferente naturaleza: descripciones, bibliografía, localización, orientación, estilo, superposiciones, conservación, etc. La información gráfica, por cuestiones de almacenamiento, no aparece en la propia base de datos, aunque a través de la aplicación web es posible acceder a parte del contenido fotográfico en baja resolución.

Cabe destacar el acceso libre y sin restricciones de claves de acceso o de versiones de pago a los datos, imágenes e información.

Existen muchas otras bases de datos, generalmente integradas en universidades o grupos de investigación así como en Administraciones Públicas dedicadas a la gestión del patrimonio cultural en general y del arte rupestre en particular. Casi todas ellas, sobre todo las de carácter más administrativo, obedecen a criterios de organización sencilla de los datos: saber qué se tiene y, en el mejor de los casos, información complementaria más o menos actualizada acerca del contenido y estado de conservación e imágenes parciales de los yacimientos. En algunos casos, esta información apenas si se actualiza y no ofrece la posibilidad de realizar búsquedas en las

FIG. 18. Vista de una de las páginas del que consta el inventario de arte rupestre del Gobierno de Aragón.

que se relacionen diferentes campos informativos. En todo caso, este tipo de información, aunque pública, no resulta accesible sin la solicitud de consulta, y sólo a técnicos especialistas o con intereses relacionados con la investigación del arte rupestre.

Las limitaciones de la capacidad de los servidores así como el uso de *software* propietario y la falta de personal con dedicación (siquiera parcial) al mantenimiento de las bases de datos, impide, en la mayoría de los casos, el desarrollo de unas bases de datos más ambiciosas y de funcionamiento efectivo.

También, como elemento de acceso libre a información, partiendo de una idea modificada y abierta de base de datos relacionada con el arte rupestre, resulta necesario mencionar el ejemplo del proyecto ARAM: Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia⁵⁴. Este repositorio de conjuntos rupestres aparece como una propuesta conceptual y metodológica, diferente a lo anteriormente expuesto, en la documentación gráfica y geométrica del arte rupestre, tratando de establecer un protocolo en el proceso de documentación del arte rupestre, apostando por la obtención de resultados que favorezcan la transmisión de conocimientos y la difusión del valor histórico y cultural de los conjuntos decorados.

ARAM se presenta como un espacio de consulta científico-técnica, pero también como un almacén de documentación gráfica digital (fotografías del abrigo, del entorno, de los motivos rupestres o de

53 <http://www.europreart.net/> (último acceso: noviembre de 2017).

54 Vid. apdo. 3.2.2, <http://3dscanner.es/proyectoaram> (último acceso: noviembre de 2017).

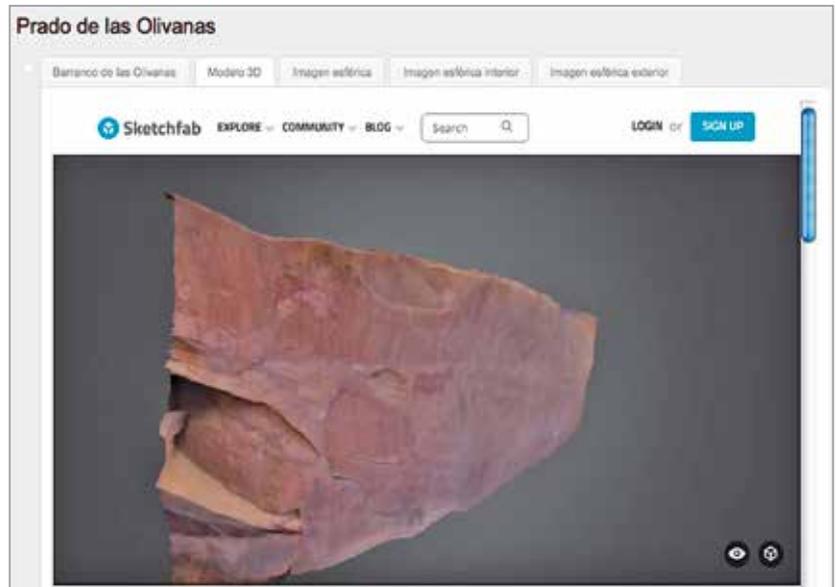
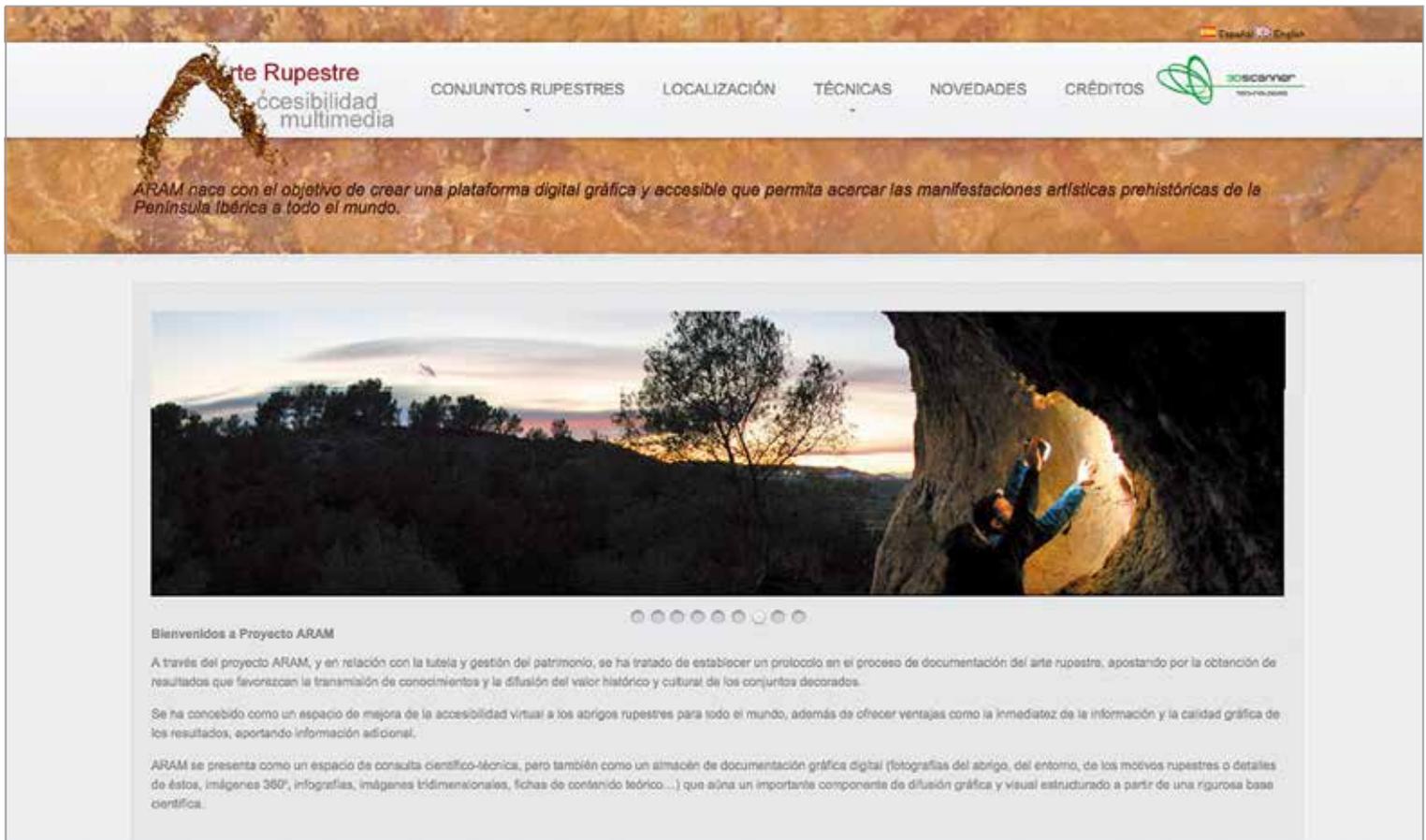


FIG. 19. Ejemplo de tres vistas del tipo de información contenida en el proyecto ARAM: fichas informativas (descripciones, bibliografía, historiografía, etc) y diferentes contenidos gráficos (calcos, fotografías, fotografías esféricas, modelos tridimensionales), todo ello accesible al público en general y de forma libre.

talles de éstos, imágenes esféricas del entorno, modelos tridimensionales, fichas de contenido teórico, etc.) que aúna un importante componente de difusión gráfica y visual estructurado a partir de una metodología científica. El carácter flexible y abierto del proyecto, estructurado bajo la especificación estándar WebGL para visualizar modelos 3D en navegadores junto con un *web mapping*, ha permitido además, incorporar ya en una segunda fase de desarrollo otros conjuntos rupestres documentados en el año 2013, sumando un total de 35 abrigos, distribuidos en España. En este sentido, el principal resultado de esta investigación ha sido aportar un nuevo avance en el registro, análisis y valorización del arte rupestre que permite

un aprovechamiento más exhaustivo de la documentación gráfica y métrica realizada. Asimismo, se contribuye al paulatino cambio de soporte en la propia documentación, de soportes bidimensionales a tridimensionales. Facilitando el intercambio de la información tanto a nivel científico como también divulgativo, con una representación gráfica tridimensional mediante nuevos soportes digitales.

Otro proyecto, dentro del séptimo programa marco europeo, es el denominado 3D PITOTI⁵⁵ *3D acquisition, processing and present-*

55 <http://3d-pitoti.eu/> (último acceso: noviembre de 2017).

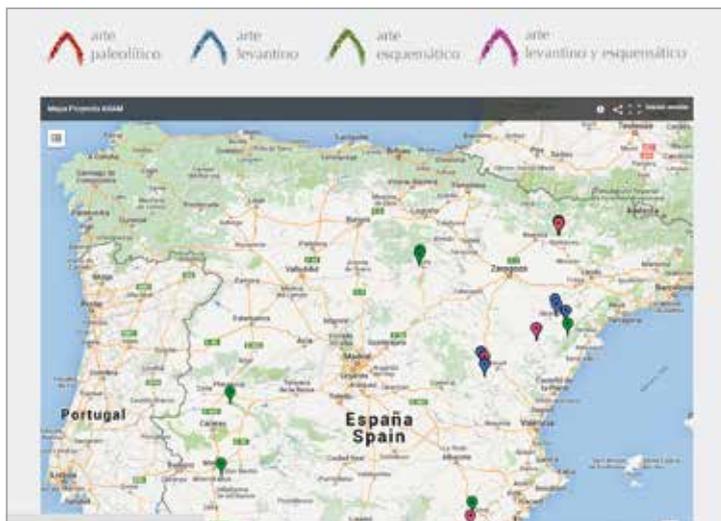


FIG. 20. Localización según tipología artística de cada uno de los abrigos y cuevas. FUENTE: <http://3dscanner.es/proyectoaram>

tation of prehistoric European rock-art que incorpora a la gran mayoría de los socios de los proyectos europeos anteriormente mencionados⁵⁶. Su objetivo fundamental es el registro tridimensional del arte rupestre en el Valle de la Valcamonica (Italia) por medio de diferentes dispositivos de registro tridimensional y drones. Pese a que el proyecto tiene un presupuesto de 2,9 millones de euros, únicamente sus objetivos se centran en el registro tridimensional del arte rupestre y en la divulgación de los resultados, pero no incorpora un marco de gestión de bases de datos relacionales para los modelos y la información generada. De hecho, sólo hemos encontrado cuatro modelos publicados en la plataforma <https://sketchfab.com/3d-pitoti>. Sin embargo, sí que es cierto que de este proyecto han surgido algunos estudios verdaderamente interesantes como Alexander (2015:181-195) sobre el uso e integración de sistemas de registro *in situ* a diferentes rangos para generar modelos 3D.

1.3.6.1. HANDPAS

Como epílogo sobre el conjunto de proyectos revisados destacamos el proyecto europeo HANDPAS⁵⁷ (Collado, coord., 2018), que trata sobre la documentación y difusión de las representaciones de manos paleolíticas en Europa. El proyecto está coordinado por Hipólito Collado de la Dirección General de Bibliotecas, Museos y Patrimonio Cultural de la Junta de Extremadura (España) e intervienen: Secretaría General de Cultura de la Junta de Extremadura, el *Centro Studi e Museo D'Arte Preistorica (CeSMAP)* (Italia) y el *Instituto Terra e Memória* (Portugal). Se concibe inicialmente atendiendo a diversos objetivos científicos y divulgativos. Entre éstos, el más destacado es poner a disposición de los investigadores y de la sociedad en general una información documental, gráfica y teórica mediante una plataforma web de libre acceso. Para ello se establece como elemento básico en la toma de datos el uso de tecnología escáner 3D de objeto cercano y de técnicas fotogramétricas sobre los principales emplazamientos europeos con representaciones de manos paleolíticas.

56 University of Nottingham, Graz University of Technology, ArcTron 3D GmbH, University of Cambridge, Centro Camuno di Studi Preistorici, Bauhaus-Universität Weimar, St. Pölten University of Applied Sciences.

57 COLLADO, H. (coord.) (2018): *HANDPAS. Manos del pasado. Catálogo de representaciones de manos en el arte rupestre paleolítico de la península ibérica*, Mérida. Dirección web del proyecto: <http://handpas.juntaex.es/> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 21. Portada web del proyecto europeo HANDPAS. FUENTE: <http://handpas.juntaex.es/>

Este proyecto propone la aplicación de un protocolo de documentación geométrica integral y estandarizado que permita conocer y fijar valores volumétricos, colorimétricos y de superficie, con una información objetiva mensurable con una alta resolución gráfica y métrica.

Con la metodología de documentación geométrica propuesta, se obtiene la combinación de un *web mapping* con una topografía tanto 2D (ortofotos) como 3D (modelos tridimensionales) de gran precisión.

Las fases metodológicas se estructuraron en los siguientes apartados:

- **Estudio previo de cada conjunto rupestre**
Recopilación de la información básica, estudios precedentes, planimetrías existentes y definición de los objetivos básicos previos a la documentación con el objetivo de conocer las particularidades de cada conjunto y reducir los tiempos de trabajo en cada cueva.
- **Documentación geométrica y gráfica**
Mediante un protocolo de documentación doble con un escáner 3D de luz blanca estructurada con una precisión de 500 micras, y la utilización de técnicas fotogramétricas de rango cercano. Respecto a la documentación gráfica se documentó mediante un patrón de color estándar que establezca de un modo objetivo las condiciones lumínicas en cada situación y sirva de referencia en cada una de las imágenes tomadas para posteriormente corregir de manera homogénea la temperatura de la luz.
- **Procesamiento de la información**
El método combinado de adquisición de la información, mediante escáner 3D de luz blanca estructurada y correlación automática de imágenes en la fase precedente, tiene como objetivo obtener para cada uno de los paneles pictóricos un modelo con la máxima resolución geométrica y gráfica posible en entornos subterráneos.
En este sentido, se generaron los modelos tridimensionales en varias resoluciones con el fin de establecer un equilibrio entre tamaño y resolución para adaptarse a una publicación *online*, todo en función de la idiosincrasia de cada conjunto rupestre.

El procesamiento de ambas técnicas –las de escáner 3D dedicadas a la parte geométrica y las fotogramétricas a la parte gráfica– se desarrolló de manera paralela para finalmente conjugar ambas. Asimismo, se utilizó la conversión a formatos tridimensionales compatibles con la especificación estándar WebGL que ha sido el sistema seleccionado para su publicación *online* de todos los modelos tri-

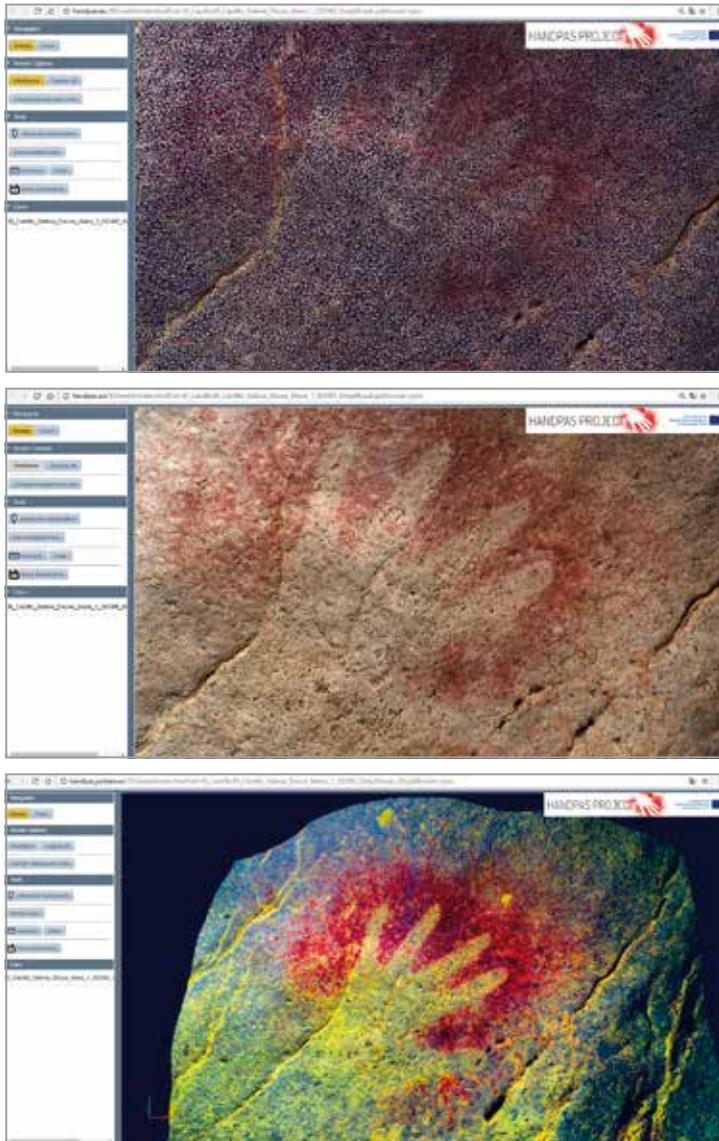


FIG. 22. Ejemplo del modelo 3D del proyecto HANDPAS de la mano paleolítica de la galería de los discos (Cueva del Castillo, Puente Viesgo) en diferentes modos de representación: triangulación del modelo, imagen visible y aplicación de filtros de decorrelación sobre la base de DStretch para una mejor visualización

dimensionales, debido sobre todo a las ventajas que tiene la visualización de un repositorio tridimensional sin necesidad de ningún programa o *plugin* específico.

A través del formato de intercambio JSON y mediante el uso de librerías de conversión del formato tridimensional OBJ, el resultado son modelos tridimensionales compatibles con la mayoría de navegadores web que admitan dicha especificación estándar. Además proporciona diversos filtros de decorrelación basados en el *software* DStretch⁵⁸, para aquellas manifestaciones rupestres que más dificultades tienen en su visualización. Cada una de ellas adaptadas al color de la pintura, tipo y geometría del soporte rocoso.

La conclusión sobre el empleo de este tipo de librerías escritas en JavaScript, en plataformas de desarrollo colaborativo, junto con la combinación del lienzo (*canvas*) de HTML5, permiten un vasto conjunto de posibilidades que facilitan la utilización de estos modelos con información contextual asociada a su inclusión en la web. Asimismo, este tipo de herramientas constituyen una magnífica solución que cumple varias de las premisas que hemos con-

siderado fundamentales en la revisión de los proyectos europeos analizados: alta capacidad métrica y gráfica *online*, aplicación de filtros de decorrelación, elección del ángulo de iluminación, sencillez en su utilización (únicamente con un navegador que admita WebGL sin la necesidad de ningún programa adicional) y, sobre todo, se trata de un sistema abierto y programable a cualquier tipo de implementación que necesitemos desarrollar en un futuro, que se pone a disposición de cualquier usuario de manera totalmente accesible.

⁵⁸ Harman (2005) <http://www.dstretch.com/> (último acceso: noviembre de 2015).

The image is a detailed architectural drawing of a building, likely a church or cathedral. On the left, a tall, slender tower rises, featuring a series of arched windows and a decorative top section. The main body of the building is a large, multi-story structure with a series of arched windows and a prominent entrance. In the foreground, a portico with three large, pointed arches is visible, supported by columns. The drawing is rendered in a fine-line, sketch-like style with some shading to indicate depth and texture. The background is a solid light blue color.

2. Clasificación y análisis de las principales técnicas y herramientas empleadas en la documentación geométrica del patrimonio cultural



2. Clasificación y análisis de las principales técnicas y herramientas empleadas en la documentación geométrica del patrimonio cultural

2.1. Introducción

La evolución en las técnicas de documentación del patrimonio cultural ha sabido aprovechar cada una de las innovaciones tecnológicas surgidas a lo largo de la Historia en beneficio de un mejor y más completo registro documental. Debemos de tener en cuenta que la propia heterogeneidad del patrimonio cultural determina una continua transformación tanto en las técnicas empleadas en el registro como entre el conjunto de los diferentes sectores (químicos, restauradores, historiadores, historiadores del arte, arqueólogos, geólogos, topógrafos, etc.) que intervienen en la investigación del patrimonio.

Podemos ceñirnos al periodo que se abre a partir de mitad del siglo XIX con la invención de la fotografía, cuando realmente empieza a precipitarse una revolución tecnológica con respecto al uso de nuevas herramientas y técnicas en la documentación del patrimonio. Esta revolución ha ido acelerándose hasta el cambio de milenio, culminando con la consolidación de Internet, junto con la inmediatez social, flujo de la información y las TIC.

Al margen de la invención de la imprenta en el siglo XV, como uno de los grandes avances tecnológicos en la gestión y difusión documental, el uso de las TIC constituye actualmente el punto neurálgico en la definición de la documentación y su difusión con fines científicos y divulgativos, aunque este último hito tecnológico ha incrementado el valor de la variable «tiempo», como cuarta dimensión en el proceso de documentación. De esta manera, somos mucho más conscientes de una obsolescencia con respecto al uso de técnicas y herramientas en la documentación de patrimonio, generando un desequilibrio prácticamente constante entre el binomio método y técnica.

Si atendemos a criterios técnicos, para analizar la madurez tecnológica de una determinada herramienta podemos recurrir al denominado ciclo de sobreexpectación¹ de las actuales TIC. El término sobreexpectación *hype cycle* fue acuñado por la consultora analista Gartner a mitad de los años noventa del pasado siglo, coincidiendo con el inicio tecnológico de Internet. Actualmente constituye una de las gráficas de referencia para medir el riesgo de inversión

mediante la relación de dos vectores: expectativas y tiempo. Así, se consigue analizar el ciclo de sobreexpectación de una determinada tecnología de la información y la comunicación (TIC). En este sentido, las diversas fases que componen el ciclo de sobreexpectación que Gartner marca en una determinada tecnología se dividen en:

- a) Lanzamiento o presentación de una determinada tecnología
- b) Pico de expectativas sobredimensionadas
- c) Abismo de desilusión
- d) Rampa de consolidación
- e) Meseta de productividad

En este sentido, cada una de las herramientas que describiremos a continuación podrían ubicarse, dependiendo del grado de madurez, en una de estas fases.

En este capítulo enumeraremos brevemente algunas de las herramientas que han provocado algunos de los cambios más significativos en el periodo descrito y su influencia actual. Estas transformaciones las hemos sintetizado en cuatro grandes bloques:

- a) La invención y desarrollo de la fotografía
- b) La incorporación de la aviación
- c) La era de la computación
- d) El desarrollo de instrumentos óptico-electrónicos

Desde cada uno de estos bloques que ocupan diferentes periodos se han ido desprendiendo otro tipo de progresos tecnológicos y técnicas, siempre confluyendo en un mismo punto, sobre todo a partir de los años 70 del siglo XX, con toda la potencialidad que desprenden la incorporación de los análisis computacionales. Estas innovaciones han sido rápidamente aprovechadas para la representación del patrimonio, generalizándose otro tipo de especializaciones, con un carácter cada vez más híbrido, incorporándose nuevas técnicas de trabajo.

Para concluir este capítulo, se ha incluido un apartado especial por su carácter relevante en la actualidad (*vid.* apdo. 2.5.2), sobre la utilización de herramientas y técnicas de bajo coste junto con un elenco de programas *free software* y *open source*, que permiten su libre modificación y distribución en función de las necesidades de cada usuario. Actualmente constituyen una alternativa cada vez más consolidada, cubriendo un amplio espectro de las necesidades actuales en la documentación del patrimonio.

¹ Vid. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/> gráfica del «ciclo de sobreexpectación» de las tecnologías emergentes, sobre todo las partes relacionadas con Realidad Virtual y drones (último acceso: septiembre de 2017).

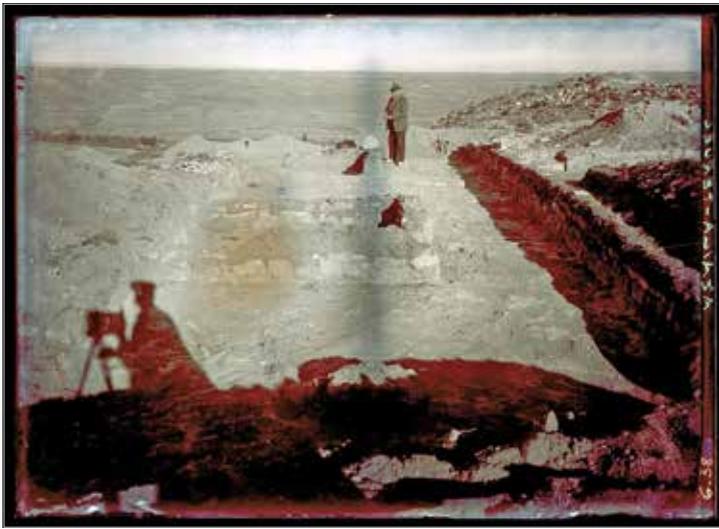


FIG. 23. Fotografía de Cabré en la excavación del Cabezo de Alcalá (Azaila, Teruel) con la sombra del arqueólogo junto con su cámara y Lorenzo Pérez Temprado al fondo, 1916-1932. Inventario núm. CABRE-0038. Fototeca del Patrimonio Histórico.

2.2. La invención y desarrollo de la captura de imágenes en la arqueología: entre el dibujo y la fotografía

Desde la presentación de la invención de la fotografía como una nueva técnica ligada como símbolo de progreso, en el discurso pronunciado por François Arago en la Academia de las Ciencias de París de 1839, insistiendo en su utilidad inmediata, exactitud y rapidez, discurrirán varios decenios con constantes mejoras técnicas, hasta su plena aplicación al mundo de la arqueología (González 2007: 102)². El uso de la fotografía como fuente documental en la arqueología fue generalizándose desde 1860, sustituyendo a los medios de representación gráficos habituales (dibujos, grabados, calcos, vaciados, etc.) y proporcionando varias colecciones, como la del arqueólogo calaceitano Juan Cabré, de 5.558 negativos en placas de vidrio y de nitrato de celulosa que constituyen un documento excepcional tanto arqueológico, metodológico como etnográfico³.

Cabré es uno de los pocos ejemplos que domina las dos tradiciones con una alta calidad técnica: entre el dibujo y la fotografía como registro arqueológico, en una época en la que España se encontraba muy postergada respecto al resto de Europa. Esta calidad técnica como dibujante y fotógrafo le llevó a realizar numerosos dibujos, imágenes y planimetrías. El ejemplo del estudio topográfico del Cabezo de Alcalá (Azaila, Teruel) refleja perfectamente el grado de precisión y detalle que reunía Cabré en sus representaciones, más aún si lo comparamos con el registro actual con las últimas técnicas topográficas (*vid.* FIG. 57).

El uso de la fotografía fue cada vez más intenso, con pequeños avances, como el invento de Richard Madox de la «placa seca» que permitía retrasar el revelado. Además, propició una mejor nitidez,



FIG. 24. Algunas de las cámaras utilizadas por Juan Cabré en sus trabajos de documentación en su museo homónimo en Calaceite, Teruel.

pudiéndose hacer copias ilimitadas de las placas emulsionadas. Posteriormente la llegada de Kodak fue catalogada de «democratización» de la fotografía hacia 1890 (Nir, 1985: 260) y de «revolución» en todos los sentidos como técnica fácil y barata, abierta a todo el mundo con el eslogan de 1888 *you press the button and we do the rest* (González, 2007: 37). Sin duda, a partir de este momento se comenzó a ver la fotografía como una técnica adecuada para la documentación de los hallazgos científicos (Morata, 2010: 5), que ofrecía a la investigación arqueológica tres elementos sobresalientes: eficacia, exactitud y rentabilidad. Conforme avanzó la técnica, surgió una transformación y controversia en cuanto a su uso a mitad del siglo XX entre la tradición positivista, de que sólo creemos lo que vemos, que apostaba por la plena convicción de la fotografía, como los múltiples ejemplos del Marqués de Cerralbo, frente a la tendencia postestructuralista, que esgrimía que una simple reproducción de la realidad no explica ningún aspecto de la misma, haciendo hincapié esta última en la objetividad y los factores sociales, políticos y personales que traducen y recrean cada una de las imágenes. Resulta sumamente interesante atribuir a esta controversia un cierto grado de paralelismo cíclico en los modos de representación que hemos analizado en esta monografía a lo largo de la Historia: desde Vitruvio y sus estándares arquitectónicos, Juan Bautista Labaña y el uso de instrumentos «matemáticos» en la representación cartográfica, José Ortiz y Sanz y su crítica al entusiasmo de las representaciones románticas hasta la actualidad, con la controversia entre la denominada «arqueología virtual» y la documentación geométrica. Suscitándose, de esta manera, prácticamente el mismo debate cíclico sobre la manera de representación del patrimonio en cada uno de estos periodos históricos descritos.

2.3. La incorporación de plataformas aéreas

2.3.1. La fotografía aérea arqueológica

Algunos autores (Musson *et al.*, 2005: 18) (Martín, 2002: 274) atribuyen la primera imagen aérea con objetivos arqueológicos al alemán Franz Stolze –precursor de la marca flotante para apreciar la profundidad en las imágenes utilizando el fenómeno de la fusión binocular–, posiblemente por su ayuda en la realización de varios planos fotogramétricos de Persépolis⁴.

4 Vid. Stolze (1882: 149).

2 Destacamos la investigación de González Reyero (2007), *La Fotografía en la Arqueología Española*, sobre los estudios de las técnicas fotográficas aplicadas a la documentación del patrimonio entre 1860-1960. Además de la exhaustiva evolución de la fotografía arqueológica como técnica de representación gráfica en el siglo XIX y XX en España, la autora aborda, de igual modo, un análisis historiográfico del contexto europeo e imperialismo colonial de la documentación fotográfica en Francia, Alemania, Gran Bretaña e Italia.

3 En 1991 el archivo Cabré fue donado por la familia del arqueólogo calaceitano Juan Cabré al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) <http://ipce.mcu.es/documentacion/fototeca/fondos/cabre.html> (último acceso: septiembre de 2015).



FIG. 25. Primeros estudios monográficos sobre Persépolis, destacando la documentación fotográfica y el conjunto de plantas topográficas realizadas por Franz Stolze (1882) como precursor del uso de las fotografías con fines fotogramétricos.

En Italia, uno de los primeros que intuyeron los beneficios que esta técnica podía ofrecer a la arqueología fue Giacomo Boni⁵, quien, en ocasión de las excavaciones del foro romano en 1899, realiza personalmente una serie de fotos desde un globo cautivo⁶.

En los años sucesivos asistimos a la intensificación de esta actividad donde, según Campana (2011: 18), se hace evidente la principal característica de la fotografía: el valor histórico de un documento objetivo. Este primer desarrollo teórico, unido a la gran disponibilidad del material fotográfico con objetivos bélicos, determinó un salto cualitativo en la investigación arqueológica. Tras los años 20 y el final de la Segunda Guerra Mundial, asistimos a la definición de los fundamentos teóricos de la fotografía aérea arqueológica de la mano de Antoine Poidebard y Osbert Guy Crawford. En este sentido, viene definido el proceso de formación de las *crop marks* y *soil marks*⁷. A partir de estos autores, se supera la fase de la mera visua-

lización para el desarrollo de la etapa deductiva con el reconocimiento de los restos arqueológicos soterrados por la traza anómala que causan en su ambiente circundante (Campana, 2011: 19). De este modo, se genera una cultura científica sobre las técnicas, su aplicación y la interpretación de los datos.

Asimismo, también durante la Segunda Guerra Mundial y debido a la necesidad de individuar objetos mimetizados con el suelo o escondidos, se desarrollan técnicas alternativas como las primeras tomas de fotografías térmicas y la adquisición de datos Radar (Mantovani y Marcolongo 1992: 16-19).

En 1945, como parte del desarrollo de esta técnica, se crea el *Cambridge University Committee for Aerial Archaeology* (CUCAP) para la adquisición de fotografía aérea. Con este organismo se desarrolló la técnica de lectura e interpretación de las imágenes y se creó el primer archivo aéreo fotográfico arqueológico, que hoy cuenta con 500 000 fotogramas (Downey, 1980: 1-21)⁸.

Tras este hito, hasta los años noventa, muchos organismos públicos y universidades se preocuparon por tener una colección de fo-

cia de restos soterrados en el suelo que impiden un comportamiento fenológico similar a aquellas plantas que crecen sobre muros o pozos. En consecuencia, estas «marcas de cosecha» (*crop marks*) o «marcas del suelo» (*soil marks*) han ayudado a los arqueólogos a identificar los restos arqueológicos todavía enterrados e invisibles en superficie.

8 <http://www.geog.cam.ac.uk/cucap/about/> (último acceso: septiembre de 2017).



FIG. 27. Ejemplo de identificación de estructuras arqueológicas documentado en una prospección sobre un ultraligero mediante la individuación de «marcas de cosecha» en el crecimiento diferencial de los cultivos. Fot. Paula Uribe.

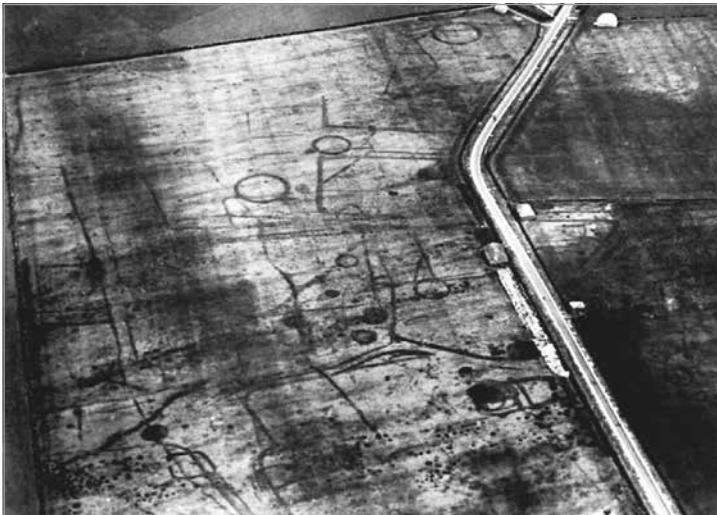


FIG. 26. *Cropmarks* de Stanton Harcourt (Oxfordshire, Gran Bretaña). Restos de época del Bronce fotografiados en 1934 (Nagy *et al.* 2001: 9).

tografías aéreas con la intención de poner en valor los bienes arqueológicos y crear una estructura operativa en el terreno. De esta forma, surgen determinados laboratorios especializados en este campo en Italia, Francia, Alemania o Gran Bretaña, siendo España, nuevamente, la gran ausente dentro de esta especialidad.

Prácticamente, desde los años 90 del siglo pasado hasta la plena implantación de los drones a partir de 2010, el uso de ultraligeros con diferentes técnicas para la documentación y prospección ar-

queológica aérea ha sido de las alternativas, pese a su coste, más utilizadas y eficaces.

Sobre el uso de este tipo de aeronaves para la prospección e individuación de estructuras arqueológicas destacaremos la experimentación realizada en el otoño de 2003 sobre el territorio de la ciudad etrusca de Vulci en la *Maremma* toscana (Italia). De esta manera, realizamos varios ensayos en una prospección arqueológica aérea evaluando las ventajas y desventajas que ofrece el uso de esta técnica⁹. Con este fin sobrevolamos la zona con un sistema clásico de avión ultraligero Partenavia P 66 C y una cámara réflex analógica Canon EOS 300 (Angás, 2005)¹⁰.

El itinerario del vuelo sobre el territorio noroccidental vulcente fue desde el aeródromo militar de Viterbo hasta la localidad de Marsiliana d'Albegna. En este trayecto volamos sobre: Tuscania, Monte Canino, Manciano, Marsiliana D'Albegna, el área arqueológica de

9 Incluimos la experiencia de este trabajo realizado en el agro vulcente (Angás, 2005), ya que sentó un precedente en nuestra línea de investigación arqueológica. Principalmente en la utilización y análisis de las herramientas, emergentes en aquel momento, dedicadas a la teledetección y documentación fotogramétrica de baja altura.

10 El artículo «Santuarios como indicadores de frontera en el territorio noroccidental de Vulci (ss. VII-III a.C. Italia Centro-Tirrenica)» (2005) constituyó la publicación como resumen del DEA (Diploma de Estudios Avanzados) realizado en el Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza.



FIG. 28. Avión ultraligero Partenavia P66 C utilizado en la prospección arqueológica aérea sobre el territorio noroccidental de la ciudad etrusca de Vulci (Italia) en 2003.



FIG. 29. Ruta aérea del vuelo realizado en la prospección aérea sobre el valle del Albegna, considerado el territorio bisagra entre la Etruria Septentrional y Meridional. Realizado sobre la base de *Copernicus Sentinel Satellite* bajo licencia CC BY-SA 3.0 IGO.

Macchiabuia, la llanura de Perazzeta, Albinia, Capalbio, el área urbana de la ciudad etrusca de Vulci, el Lago Bolsena y Viterbo.

Los objetivos de esta prospección arqueológica aérea fueron:

- Recorrer parte de la zona de captación noroccidental del *agro vulcente* y de la propia ciudad etrusca de Vulci.
- Centrar la prospección aérea en la zona arqueológica de Marsiliana D'Albegna. Este valle historiográficamente se ha considerado como la zona bisagra entre la Etruria Septentrional y Meridional. En este sentido, se realizaron diferentes vuelos circundantes sobre la zona arqueológica de Macchiabuia, llanura de Perazzeta y excavación arqueológica de Fontingrande.
- Comprobar los restos arqueológicos de la necrópolis de la Banditella, el Círculo de Perazzeta y la posible relación entre ambas zonas arqueológicas a través de las diferentes coloraciones del terreno.
- Analizar las diferencias entre las variedades de vegetación encina-pino del paisaje circundante, coincidiendo esta última variedad con la localización de zonas de tumbas de cámara excavadas directamente en el travertino.

Los resultados de la prospección arqueológica aérea fueron un conjunto de fotografías centradas en dos grupos: uno, dedicado a la ciudad etrusca de Vulci y, otro, a la zona de estudio de Marsiliana D'Albegna. Los datos más interesantes se obtuvieron en el último

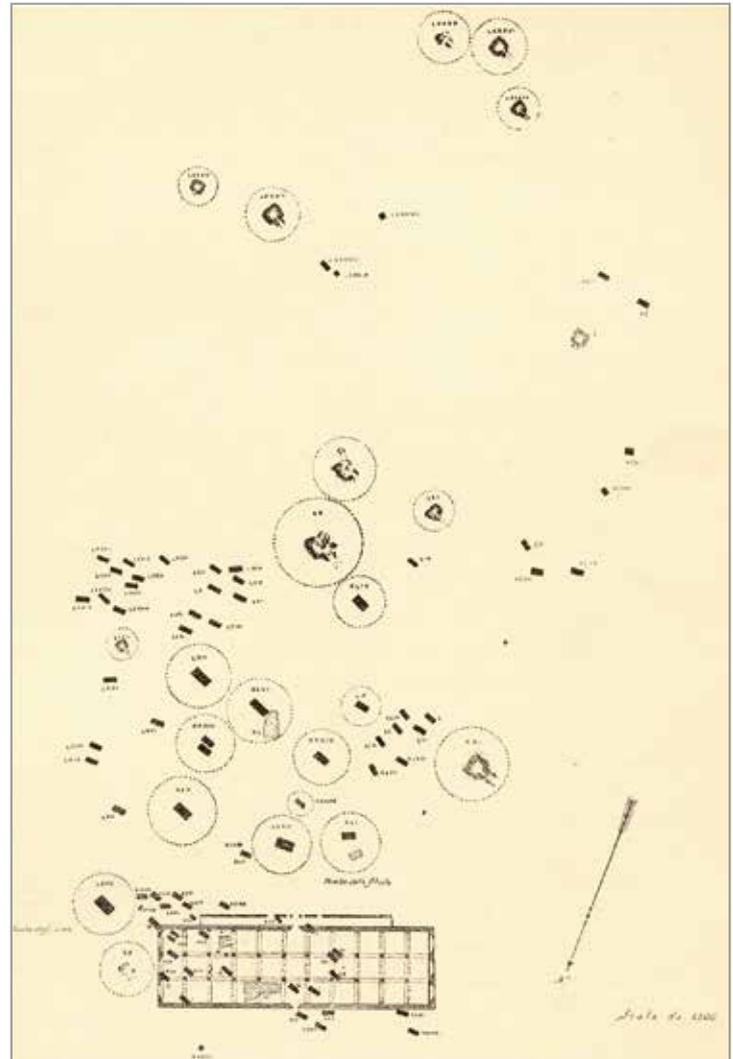


FIG. 30. Planta de la necrópolis etrusca de La Banditella ss. IX-VIII a.C. (Marsiliana D'Albegna, Italia) excavada por Antonio Minto (1921) e imagen de la excavación de los diferentes enterramientos.

grupo, individualizando varias zonas arqueológicas previamente prospectadas, destacando la zona arqueológica de Macchiabuia y la excavación de Fontingrande. Aunque sin duda, los mejores resultados¹¹ fueron obtenidos en la llanura de Perazzeta, descubrien-

11 En referencia a la identificación de estas alteraciones sobre el terreno en la prospección aérea, debemos anotar la contribución del excelente estado fenológico del período otoñal con una alta concentración de humedad en el suelo. Ade-

do las «soil marks» o marcas sobre el terreno de los túmulos entre la zona de la Banditella y Perazzeta (*vid.* figs. 31) según la publicación de Minto (1921).

2.3.2. Las plataformas satelitales

La utilización de imágenes de satélite para la identificación de restos arqueológicos (Lasaponara y Masini, 2012) ha estado relacionado con el incremento de satélites comerciales de mayor resolución espacial y el desarrollo de los tipos de *software* que permiten el análisis y postproceso de estas imágenes.

Esencialmente, según Campana (2011: 28), existen tres fases principales del desarrollo de la aplicación de las imágenes de satélite a la arqueología. El primer periodo, desde 1972 a 1984, utilizaba los datos proporcionados por Landsat MSS (resolución espacial de 79 m. y sensor espectral de cuatro bandas)¹² para el estudio de elementos paleohidrográficos asociados a determinados asentamientos. Entre estos estudios destacan las investigaciones realizadas en la región de Arslantepe-Malatya en Turquía por el CNR y la Universidad de Padua.

Entre 1982 y 1995, con el lanzamiento de Landsat 4, la resolución espacial aumenta a 30 m., hecho que permite un mayor número de aplicaciones al campo arqueológico. Así, se desarrolla el proyecto creado por la propia NASA, en el ámbito del *Global Hydrology and Climate Center* (GHCC), sobre la aplicación de la teledetección en la arqueología¹³. Esta investigación, desarrollada en el área mesoamericana, permitió descubrir una serie de asentamientos Mayas en la Península del Yucatán mediante la clasificación automática de las imágenes. Asimismo, se obtuvieron óptimos resultados con la utilización de las imágenes SPOT, con una resolución espacial de 20 m. y 10 m. en el pancromático, combinadas con las Landsat TM.

La información adquirida con sistemas RADAR también ha resultado útil para la identificación de estructuras arqueológicas en áreas caracterizadas por la densa vegetación como México, Guatemala o Camboya. Quizá, el ejemplo más conocido sea este último en relación con la ciudad de Angkor donde los datos SIR-C/X-SAR han permitido descubrir nuevos templos, vías y canales de irrigación (Palacios / Martín-Bueno, 2004: 331; Palacios, Martín-Bueno, Uribe, 2017:140-164).

La tercera fase de desarrollo viene definida por la disponibilidad de imágenes obtenidas con satélites comerciales de alta resolución espacial. Varios proyectos de investigación internacionales han basado sus estudios en imágenes obtenidas por *Ikonos* o *Quickbird*¹⁴ (Universidad de Siena, Universidad de Durham o la NASA). Las imágenes procesadas han sido posteriormente integradas en un SIG arqueológico, permitiendo de esta forma la realización de estudios sobre la evolución del paisaje. También en estos últimos años se han aplicado sistemas aerotransportados en naves tripuladas como SLAR, LiDAR o AIS (*Airbone Imaging Spectroscopy*). Todas ellas han permitido obtener amplios resultados; sin embargo, todavía sigue siendo complicado llevar a cabo este tipo de investigaciones si no se cuenta con un amplio presupuesto para ello.

Por último, cabe mencionar la tendencia actual en el procesamiento por técnicas SfM (*Structure from Motion*) de diversas fuentes de

imágenes antiguas para generar reconstrucciones tridimensionales. Está técnica la hemos constatado igualmente, en su uso con imágenes satelitales desde finales de los años 60 del pasado siglo XX. Un ejemplo interesante es la utilización de las imágenes procedentes del satélite CORONA (1960-1972), utilizado en la Guerra Fría y desclasificado a finales del siglo XX. De esta manera, encontramos varios ejemplos de resultados procesados con este tipo de técnicas SfM para su interpretación con fines arqueológicos (Watanabe *et al.*, 2017).

2.3.3. La fotografía aérea a baja altura: los sistemas RPAS o drones

Los denominados RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*)¹⁵ o drones han contribuido notablemente a la preservación del patrimonio, haciendo posible la obtención de información métrica y gráfica cada vez más rápida, precisa y de bajo coste para la documentación e investigación del patrimonio cultural, permitiendo obtener imágenes con una alta resolución espacial. A este hecho, se suma un avance análogo de *software*, que proporciona un vasto conjunto de posibilidades fotogramétricas para reconstrucciones geométricas y de teledetección mediante diferentes análisis espectrales. Además, la evolución de los sensores comerciales adaptados a estos sistemas, sobre todo, relacionados con el campo de la agricultura de precisión, permiten utilizar cámaras multispectrales que abarcan las longitudes de onda del visible, del infrarrojo cercano o del térmico. Todas ellas son similares a las proporcionadas por las imágenes de satélite pero con una clara ventaja de resolución, inmediatez y, por ende, versatilidad y menor coste. Fiel reflejo de este conjunto de nuevas herramientas son las publicaciones científicas que analizan estas aplicaciones en el patrimonio cultural, por citar algunos ejemplos: Uribe *et al.* (2018) (2015), Farjas *et al.* (2015), Campana (2011), Verhoeven *et al.* (2013), Hill (2013) o Eisenbeiss / Zhang (2006).

Los drones tienen en la actualidad numerosas aplicaciones relacionadas con la robótica, inteligencia artificial, agricultura de precisión, monitorización de recursos naturales, inspección, industria aeroespacial, defensa, etc. En función de la aplicación, es posible encontrar una vasta nomenclatura referida a este tipo de vehículos, como *Remotely Piloted Vehicle* (RPV), *Remotely Operated Aircraft* (ROA), *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) o *Unmanned Vehicle Systems* (UVS). En general, aunque existen diferentes tipos de matices, todos ellos describen un vehículo aéreo que puede describir de manera autónoma o programada, determinadas planificaciones de vuelo, existiendo diferencias en la configuración mecánica, principio de vuelo y altura máxima, según el campo de aplicación.

La oportunidad que ofrece esta herramienta en la integración de diferentes tipos de sensores ha ayudado a desarrollar proyectos de diferente índole, apostando sobre todo por un sistema donde prima la autogestión en comparación con los sistemas de registro anteriores. En este sentido, un único investigador puede gestionar todo el proceso completo desde la toma de la información hasta la clasificación e interpretación de los resultados obtenidos. De esta manera, se redonda en una optimización del tiempo, los resultados

más debemos añadir como otro factor relevante, la realización del vuelo en un día nublado sin prácticamente luz solar directa.

12 En realidad la resolución era de 68 x 83 m, *vid.* <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3227> (último acceso: noviembre de 2017).

13 *Vid.* <http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/archeology/> (último acceso: septiembre de 2017).

14 Sobre la utilización de estas imágenes, *vid.* Lasaponara / Masini (2012).

15 El Concepto operacional de gestión del tránsito aéreo mundial ICAO define un RPAS como: «un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave sin piloto (UA), en el sentido del artículo 8 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra, otra aeronave, espacio) (RPAS), o que ha sido programada y es plenamente autónoma (UAS)» ([http://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854_cons_en\[1\].pdf](http://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854_cons_en[1].pdf)). Doc. 9854. Hay tres subconjuntos o categorías de UA: (1) Aeronaves pilotadas a distancia (RPA); (2) Aeronaves programables plenamente autónomas (UAV); (3) Aeronaves que reúnen características de ambas (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 31. Fotografía superior (E-O) del área arqueológica de Marsiliana D'Albegna en 2003 donde se puede apreciar, en el centro de la imagen, las diferencias de coloración sobre el terreno de los túmulos etruscos en la Necrópolis de Perazzeta y la Banditella. Fotografía inferior (O-E) apreciándose al fondo el Castillo Corsini y el río Albegna junto con el núcleo de Marsiliana. Advértase la propuesta marcada con una línea blanca discontinua sobre las coloraciones circulares del terreno*.

* Fotografías (FIG. 31) de noviembre de 2003 de la zona del *Magazino* de Marsiliana D'Albegna (Italia) y de la carretera S.P. 63 que se aleja hacia Capalbio en dirección suroeste. En esta imagen general se puede contemplar las diferentes zonas de la intervención arqueológica de la campaña de 2003, con el límite de la Necrópolis de *Fontingrande* y la excavación en el *Podere 145*. En la zona de *Perazzeta* se aprecian claramente diversas tonalidades más claras como consecuencia de los bloques de tufo blanco que describe Antonio Minto (1921), los cuales servirían para delimitar los círculos funerarios. En la zona de la *Banditella* se propone una hipótesis reconstructiva del emplazamiento de la antigua Necrópolis de la *Banditella* mediante la superposición a escala de la planta que dibuja Minto entre 1909 y 1919. Para ello se ha trazado un dibujo planimétrico previo, utilizando como base las anotaciones de Minto (Angás, 2005).



FIG. 32. Imagen de un dron multirrotor (modelo albris) con sensor térmico y visible en el yacimiento arqueológico de *Bilbilis* (Calatayud)*.

y finalmente en los costes, ya que nos permite disponer de lo que podríamos denominar un «satélite a la medida» en poco tiempo.

En consecuencia, este tipo de herramientas proporcionan un conjunto de resultados gráficos y geométricos a una alta resolución, incluso por debajo del centímetro por píxel dependiendo del sensor y la altura de vuelo. Dentro de este proceso podemos distinguir claramente dos partes que se han desarrollado en esta investigación de un modo independiente. La primera, relacionada con la mecánica, ingeniería electrónica y *software* de planificación de vuelo, está dedicada exclusivamente al funcionamiento interno de cada dron, elementos que se han desarrollado y comparado con sistemas comerciales. Se compone de una parte mecánica, transmisión y recepción de vídeo y otra parte relacionada con la asociación de la planificación de vuelo por sensores GNSS y la incorporación de diferentes tipos de sensores. La segunda parte está exclusivamente relacionada con el *software* de tratamiento de las imágenes capturadas desde el dron. La utilización de esta tecnología en la documentación de yacimientos arqueológicos se conjuga principalmente, con el objetivo de crear una plataforma de medida fotogramétrica y multispectral que permita la digitalización de cada área a través de los diferentes sensores, mediante programación de las trayectorias de vuelo necesarias, denominándose «planificación de vuelo». Para cada vuelo programado resulta necesario tener en cuenta algunas características técnicas, dependiendo del tipo de terreno, el solape longitudinal y transversal entre imágenes, altura de vuelo, tamaño del sensor para obtener el tamaño de píxel requerido GSD (*Ground Sample Distance*), etc. Para el cálculo del GSD seguiremos la siguiente fórmula:

$$\text{GSD (cm/píxel)} = \frac{(\text{anchura del sensor en mm}) \times (\text{altura de vuelo}) \times 100}{(\text{longitud focal}) \times (\text{ancho en píxeles de la imagen})}$$

La alta capacidad de carga de aproximadamente dos kilogramos en los sistemas multirrotos que hemos utilizado permite incorporar cámaras de alta resolución *full frame* y micro-cuatro tercios que hace que los modelos obtenidos posean una alta resolución gráfica. De este modo, se pueden obtener, dependiendo del número de imágenes y de la altura del vuelo, resoluciones por debajo del centímetro por píxel.

* Proyecto dirigido por los responsables científicos Manuel Martín-Bueno y Carlos Sáenz del Grupo Consolidado de Investigación URBS, CONSI+ID (Gobierno de Aragón), del Instituto IUCA (Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón). Este proyecto ha sido financiado por el Programa HAR.2013-48456-C3-1-P.: URBS III: Repertorios ornamentales públicos y privados en el NE de Hispania (MINECO).



FIG. 33. Secuencia de lanzamiento (montaje sobre un *time-lapse*) de un dron de ala fija (eBee) con sensor GNSS RTK (imagen inferior) en el registro fotogramétrico completo del yacimiento de *Bilbilis*.

Uno de los factores que ha permitido una cierta revolución al uso y gestión de este tipo de tecnología, en comparación con la calibración tradicional en la fotogrametría aérea clásica, reside en los métodos de autocalibración para cada vuelo que realizan la gran mayoría de los programas fotogramétricos de autocorrelación de imágenes.

2.3.3.1. Clasificación de los RPAS o drones

Si atendemos a los criterios de clasificación de los drones, encontramos una gran variedad con respecto a los diferentes organismos encargados del control y supervisión.

La Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) trabaja actualmente en la normalización de un sistema de licencias para las aeronaves no tripuladas. En consecuencia, su clasificación se basa en un doble criterio: en la masa máxima al despegue y en la altitud normal de operación.

El organismo que se encarga de la regulación de operaciones con drones de hasta 150 kg en España es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) del Ministerio de Fomento¹⁶. Después de la ley transitoria 18/2014, de 15 de octubre, se ha aprobado el Real Decreto 1036/2017 que modifica el anterior y permite las misiones civiles de aeronaves pilotadas por control remoto (RPA).

Este nuevo marco jurídico en España establece las condiciones de explotación de este tipo de aeronaves, sus requisitos legales y limitaciones en la operación.

¹⁶ Disponible en: http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/default.aspx (último acceso: septiembre de 2016).

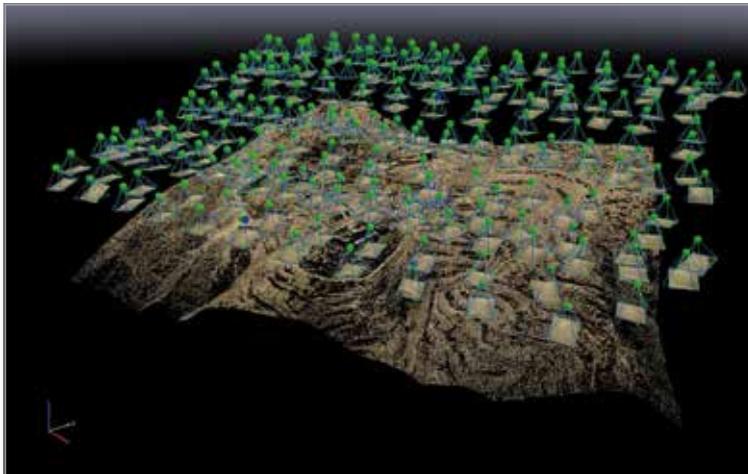


FIG. 34. Proceso de correlación automática de imágenes para generación de una nube de puntos densa de Bilbilis. Modelo tridimensional final de todo el yacimiento realizado con dron de ala fija eBee RTK.

Si atendemos a otro tipo de criterios como la clasificación según el principio de sustentación en el aire de las aeronaves distinguimos entre:

A. Aerostatos

Son naves más ligeras que el propio aire debido a que contienen gas y se sustentan por el principio de Arquímedes. Dentro de este grupo podríamos citar los globos aerostáticos y dirigibles. Los globos cautivos fueron muy utilizados sobre todo en los años precedentes a la plena comercialización de drones y su variedad de sensores a partir de 2010. Pese a la dependencia del gas helio y su dificultad en la maniobrabilidad para obtener un correcto solape longitudinal y transversal fueron frecuentemente usados con fines patrimoniales antes de la implantación de los drones.

B. Aerodinós

En este caso, las naves son más pesadas que el propio aire y deben su sustentación a las fuerzas aerodinámicas que generan en sus superficies sustentadoras (alas y palas). Este hecho les otorga una alta capacidad de maniobra. A su vez, este tipo se clasifica según la movilidad o no de sus alas:

- Ala fija: poseen unas alas fijas unidas al resto de la estructura. A esta categoría pertenecen los aeroplanos (propulsados por motores), los planeadores o veleros (sin motorización), parapentes, ultraligeros, alas delta y diferentes modelos de drones que veremos a lo largo de esta investigación.
- Ala rotatoria, obtienen sus fuerzas de sustentación y tracción mediante alas móviles o palas que giran alrededor de un eje. A esta categoría pertenecen los helicópteros (con palas impulsadas por un motor), los autogiros (sistemas híbridos) o multirrotores, utilizado en varios trabajos aquí presentados, como el prototipo de ocho motores (*vid.* FIG. 43).

Otro tipo de clasificación se centra según su forma de control. El Grupo de Estudio sobre Sistemas de Aeronaves no Tripuladas de la ICAO establece una clasificación de estos sistemas de aeronaves en función del papel que juega el piloto al mando:

- **Aeronaves sin piloto** (*Unmanned Aircrafts*)
Las aeronaves sin piloto no requieren de la intervención de un piloto para operar, ni siquiera remoto. En este caso podríamos citar los globos aerostáticos libres (no tripulados), como los utilizados para realizar sondeos atmosféricos capaces de volar de manera completamente automática o autónoma.

- **Aeronaves pilotadas a distancia**

En concreto, son los sistemas de aeronave pilotados por control remoto (RPAS *Remotely Piloted Aircraft System*). En este apartado se tienen en cuenta las aeronaves controladas a distancia por un piloto mediante un sistema de enlace de radio. Asimismo, existen sistemas que combinan las dos capacidades: control manual por un piloto remoto y vuelo automático. En nuestro caso, este es el sistema que hemos utilizado en este proyecto cuya operación sí está permitida por la normativa actual, siempre y cuando el piloto al mando pueda retomar el control manual de la aeronave en cualquier momento.

TABLA 1

Clasificación de diferentes tipos de drones con y sin energía eléctrica modificado según Eisenbeiss (2007)

		PESADO > AIRE			
		LIGERO > AIRE	ALA FLEXIBLE	ALA FIJA	ALA ROTATIVA
Sin motor	Globo		Ala delta	Planeadores	Rotor-kite
			Parapente		
			Cometas		
Con motor	Dirigible		Parapente	Hélice	Rotores únicos
				Motores a reacción	Coaxial
					Tipo <i>quad</i>
					Multirrotores

Desde el año 2009-2010, el avance surgido con la proliferación de múltiples sistemas de drones, tanto del tipo multirrotores como de ala fija, ha permitido un avance paralelo, igualmente necesario y obligado, respecto al *software* y sus aplicaciones. Las diferencias entre ambas tipologías, más comunes de drones, son claras: los multirrotores, más generalizados, permiten un aterrizaje y despegue vertical y con ello un control prácticamente a cualquier altura. Este factor permite, generalmente, la obtención de una mejor resolución espacial. Por el contrario, suelen ser aeronaves más sensibles al viento, con una menor autonomía que las alas fijas y con ello cubren una menor extensión. En cambio, los sistemas de ala fija son menos sensibles al viento que los sistemas anteriores, proporcionan una mayor superficie de actuación debido fundamentalmente a su autonomía, utilizándose en actividades generalmente relacionadas con la agricultura de precisión, cartografía y topografía.

Por otro lado, si atendemos a los avances de los componentes eléctricos y electrónicos, debemos de tener en cuenta fundamental-

TABLA 2

Síntesis sobre las ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de drones
modificado según Eisenbeiss (2007)

TIPO DE AERONAVE	RANGO	RESISTENCIA	DEPENDENCIA DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS (LLUVIA / VIENTO)	MANIOBRABILIDAD
Globo	0	++	0	0
Dirigible	++	++	0	+
Planeadores / Cometas	+	0	0	0
Ala fija	++	+	+	+
Hélices y motores a reacción	++	++	+	+
Rotor-kite	++	+	0	+
Rotor único (helicóptero)	+	+	+	++
Coaxial	+	++	+	++
Tipo quad	0	0	0	++
Multirrotor	+	+	+	++

0: valor más bajo; +: valor medio; ++: óptimo

mente: la utilización de baterías de polímeros de litio (LiPo)¹⁷, que ofrecen una buena relación entre su peso y la autonomía, y el uso y abaratamiento de los autopilotos que integran un sistema de navegación GNSS, giróscopos y acelerómetros. Una de las causas del uso extensivo de estos sistemas se debe principalmente a la comercialización a gran escala de los acelerómetros que poseen cualquier tipo de dron. Éstos fueron introducidos en el mercado a gran escala por otro tipo de dispositivos electrónicos, como fue el lanzamiento de la consola Wii y el teléfono móvil Iphone en 2006 y 2007 respectivamente. Con estos tres avances tecnológicos se resuelven, técnicamente, los principios básicos en los que se basa este tipo de aeronaves:

- Mejora de la autonomía de las baterías (LiPo) proporcionando un mayor tiempo de vuelo.
- Vuelo asistido por sensores GNSS¹⁸, RTK y PPK en un sistema de georreferenciación que permite la planificación y automatización detallada del registro.
- Rotación y orientación de la aeronave mediante una unidad de medición inercial (IMU)¹⁹.

Generalmente el posicionamiento de este tipo de aeronaves queda establecido por sistemas GNSS con una precisión de aproximadamente entre dos a cinco metros. Este factor, ligado a actividades

topográficas y cartográficas, hace necesario un apoyo fotogramétrico de puntos de control sobre el terreno, adquiridos con otro tipo de instrumentos topográficos (estaciones totales o sistemas GNSS RTK) con una precisión centimétrica. Actualmente han surgido soluciones de aeronaves tanto del tipo multirrotor como de ala fija que ya integran este otro de sistemas GNSS RTK y PPK²⁰. Esta solución técnica proporciona un claro avance, ya que evita la colocación de puntos de control sobre el terreno, permitiendo una clara mejora cuantitativa en tiempo de trabajo y acceso a zonas inaccesibles por tierra. Asimismo, con este tipo de drones se pueden obtener precisiones centimétricas en tiempo real mediante el empleo de diferentes tipos de soluciones:

- Enlace directo con una estación de tierra GNSS RTK normalmente mediante el protocolo estándar RTCM RTK.
- Conexión de telefonía móvil enlazado a una red de geodesia activa.
- Postproceso de archivos RINEX con una estación de tierra GNSS RTK.
- Almacenamiento directo en la aeronave de observaciones brutas y postproceso mediante el sistema GNSS PPK.

Respecto al uso del sistema GNSS PPK con drones, se trata de una de las técnicas de procesamiento más avanzadas actualmente. Permite el uso fotogramétrico de un dron con precisiones centimétricas sin la necesidad de transportar una base propia GNSS RTK de referencia o bien para zonas inaccesibles donde no es posible trabajar con correcciones en tiempo real RTK con telefonía móvil. El dron, en este caso, durante el vuelo almacena un archivo de observaciones estandarizado (RINEX), con todas las mediciones GNSS, que posteriormente será relacionado y postprocesado, una vez finalizado el vuelo, con diferentes archivos de observaciones de las redes permanentes GNSS más cercanas, dentro de la misma franja horaria²¹. El uso de esta técnica se debe principalmente al incremento y dispersión de redes GNSS de estaciones permanentes por todo el territorio. De esta manera, resulta relativamente sencillo

17 La aparición de este tipo de baterías de Litio-Polímero (LiPo) ha revolucionado el sistema de vuelo de los drones. Éstas se caracterizan por su capacidad para almacenar alta densidad de energía y tener unos ratios de descarga muy altos que permiten atender altas demandas instantáneas de intensidad. Sus ventajas adicionales son: su ligereza y la capacidad de poder fabricarse adaptadas a cualquier forma geométrica. Estas baterías tienen una densidad de energía de entre 5 y 12 veces más que las tradicionales de Ni-Cd o Ni-Mh. Esta optimización energética sumada a su ligereza ha contribuido a aumentar la autonomía y con ello la superficie de trabajo mediante una programación georreferida con *waypoints*.

18 Receptor GNSS/GPS (*Global Navigation Satellite System*) que permite conocer sus coordenadas geográficas, con mayor o menor precisión dependiendo del tipo de sensor diferencial o bifrecuencia (RTK, PPK).

19 Para conocer su posición, velocidad y actitud los drones están equipados con un sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) o unidad de medición inercial que permite medir los giros, traslaciones y otras aceleraciones a las que se ve sometida la aeronave. Estas mediciones se realizan mediante acelerómetros, magnetómetros y giróscopos instalados en la placa base de la aeronave. Esta unidad inercial va conectada a un procesador de datos conformándose, de este modo, el INS (*Inertial Navigation System*). Mediante este tipo de sensor podemos extraer los ángulos de cada una de las imágenes *yaw*, *pitch*, *roll* (*omega*, *phi*, *kappa*) que junto con la coordenada del fotocentro (*x*, *y*, *z*) de cada una de las imágenes que ha adquirido el sensor GNSS ayudan al procesamiento fotogramétrico de las imágenes.

20 *Global Navigation Satellite System RTK (Real Time Kinematic)* y *PPK (Post-processing Kinematic)*.

21 Para el procesamiento y relación de los datos del vuelo del dron con los datos de la estación más cercana GNSS permanente o CORS (*Continuously Operating Reference Station*) necesitaremos descargar un archivo de mediciones estandarizado RINEX con los datos de: navegación, observación y Glonass. En España esta información está distribuida entre las redes del Instituto Geográfico Nacional, las diferentes redes de la Comunidades Autónomas y redes privadas. <http://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-tiempo-real>

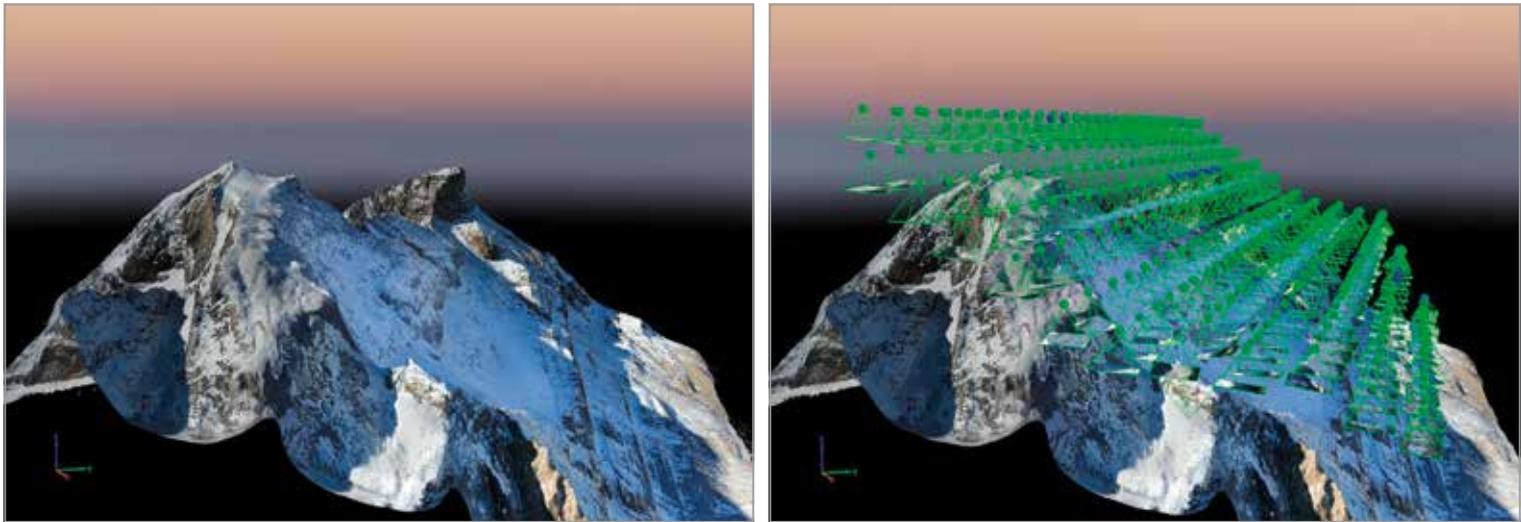


FIG. 35. Reconstrucción mediante técnicas fotogramétricas de los fotocentros y orientaciones de las imágenes captadas con un dron de ala fija con sensor GNSS RTK / PPK sobre el glaciar de Monte Perdido (Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, Huesca) para monitorización del retroceso del mismo. Alineación de las imágenes para generación de una nube de puntos densa y modelo mallado tridimensional final.

poder descargar datos RINEX de una estación permanente con una línea base de la zona de vuelo relativamente cercana que nos permita procesar con un error centimétrico.

Como ejemplo de su utilización, destacamos el proyecto que realizamos en noviembre de 2016 para la monitorización mediante fotogrametría aérea de baja altura, con un dron de ala fija, para determinar la evolución geomorfológica del Glaciar de Monte Perdido (Huesca). En este sentido, es necesario destacar que el Parque de Ordesa y Monte Perdido se encuentran dentro de la lista de bienes culturales y naturales del Patrimonio Mundial aragonés desde 1997, junto con el Arte Mudéjar de Teruel (1986), Múdejar Aragonés (2001), el Camino de Santiago (1993) y el Arte Rupestre del Arco Mediterráneo (1998).

El proyecto dirigido por el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) y la Universidad de Zaragoza se inserta dentro de una monitorización desde hace varios años con técnicas de láser escáner 3D de largo alcance (*ultra long-range* TLS), para registrar y comparar el volumen del glaciar de una manera diacrónica (López-Moreno *et al.*, 2016). Este hecho se debe al retroceso del espesor del glaciar²². El uso del dron como herramienta de registro tridimensional, junto con la tecnología GNSS PPK ha permitido la digitalización en un único vuelo de 45 minutos de 300 hectáreas del glaciar de Monte Perdido con una precisión en RTK de tres centímetros y en PPK de siete centímetros.

Respecto a su uso, a diferencia de la utilización del láser escáner 3D, tiene como ventajas: mayor resolución y, por ende, precisión de la nube de puntos, adquisición de la textura, mayor versatilidad en el transporte por su optimización de peso y rapidez en la toma de datos²³.

Todo este conjunto de avances de hardware y *software* han contribuido, igualmente, a una de las tendencias sociales que mayor implantación han tenido en la sociedad actual desde el cambio de milenio: la democratización tecnológica. Así, uno de los conceptos básicos que lleva implícito este término es la propia accesibilidad

de una determinada tecnología, permitiendo una autogestión con fines profesionales de cada uno de los procesos de trabajo.

Posteriormente, como respuesta al avance progresivo de los drones, han surgido, de un modo paralelo, tipos de sensores de muy poco peso diseñados para poder integrar en cada una de estas plataformas, que abarcan diferentes longitudes de onda desde el visible (VIS), borde del rojo (RE), infrarrojo cercano (NIR) y térmico. De esta manera, las posibilidades de aplicación que ofrece el empleo de todas estas longitudes de onda contribuyen a una amplia longitud espectral y una mejor resolución espacial. Sobre todo, si lo comparamos, por ejemplo, con imágenes aéreas convencionales, que podemos obtener del PNOA²⁴, o la información proporcionada por los satélites en la teledetección. Igualmente el uso de esta tecnología está aportando unos resultados operativos en otro tipo de disciplinas como la agricultura de precisión y la cartografía.

La información derivada de este tipo de herramientas en el patrimonio cultural podemos sintetizarla en tres bloques: (1) desde la toma de imágenes aéreas visibles (VIS) como documentación meramente visual que nos permite una mejor comprensión del espacio patrimonial, (2) con el mismo tipo de imágenes (VIS) nos proporciona su utilización para reconstrucciones tridimensionales mediante correlación automática de imágenes por técnicas fotogramétricas, (3) el uso de otro tipo de sensores multispectrales combinados (VIS, NIR y térmico), que recogen una longitud de onda concreta que podemos separar posteriormente por canales e interpretar con herramientas de teledetección (composiciones de falso color, filtros, análisis de componentes principales, índices de vegetación, etc.), aportando nueva información a la prospección aérea.

El resultado final que nos ofrece cada uno de estos bloques al patrimonio cultural abarca: desde una simple toma fotográfica o bien la generación de un ortofoto, un modelo tridimensional (DSM y DTM según algoritmos de filtrado) o un análisis de los diferentes canales que podemos interpretar mediante técnicas de teledetección.

Para esta investigación se ha trabajado con diferentes sistemas desarrollados *ex profeso*, y sistemas comerciales con la finalidad de integrar diversos tipos de sensores para cada una de las necesidades en la documentación patrimonial que hemos abordado. Desde el año 2009 hemos visto como ha crecido exponencialmente la varie-

22 Los datos calculados por el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) del último año entre octubre de 2016 y octubre de 2017 reflejaron un retroceso del glaciar de 2,3 m.

23 Vídeo documental del proyecto realizado por la empresa Tecnitop, SA, con la colaboración de Drone Adventures y el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido con la dirección científica del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) y la Universidad de Zaragoza: <https://youtu.be/LmFXOKf-TKE> (último acceso: noviembre de 2017).

24 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con una resolución entre 25 y 50 cm. Fuente: <http://pnoa.ign.es/> (último acceso: septiembre de 2016).



FIG. 36. Descripción de las principales partes de uno de los drones desarrollados del tipo multirrotor.

dad de sistemas y tipos de sensores en el mercado. De esta manera, hemos pasado en pocos años de una variedad muy limitada a una multitud de sistemas. No obstante, los sistemas comerciales se ciñen exclusivamente a los sensores profesionales más demandados, razón que nos motivó a la adaptación de varios desarrollos propios para esta investigación de acuerdo a unas necesidades:

En este sentido, se han utilizado cinco sistemas diferentes de drones entre los sistemas fabricados y los sistemas comerciales: dos alas fijas y tres multirrotores. Mientras que los sistemas rotatorios se han podido desarrollar con un diseño de chasis de fibra de carbono y POM de fabricación propia, con autopilotos Mikrokopter y APM 2.6, se contó además con el sistema comercial albris de la marca senseFly. Respecto a los drones de ala fija, uno de los sistemas con autopiloto APM fue desechado para la investigación por la inestabilidad en la navegabilidad con la consiguiente trepidación de las imágenes obtenidas. Debido a este motivo, se sustituyó éste último, utilizando finalmente los sistemas comerciales de ala fija eBee RTK y eBee Plus RTK / PPK de la marca suiza senseFly.

Los drones de ala fija presentan una clara ventaja respecto a las aeronaves del tipo multirrotor. Es un sistema mucho más extensivo debido a un menor consumo de energía por su aerodinámica. El sistema comercial utilizado eBee RTK tiene una autonomía máxima de hasta 45 minutos de vuelo con una velocidad de hasta 25 metros/segundo. Estas prestaciones le confiere un registro fotogramétrico de una zona mucho más amplia que la tipología multirrotor²⁵.

Sin embargo, los sensores utilizados con esta aeronave están limitados únicamente a las posibilidades que nos ofrece el fabricante. Por esta razón no hemos podido adaptar ninguno de los sensores anteriormente mencionados en los dos sistemas rotatorios. En concreto, las cámaras utilizadas han sido una Sony WX de 18 Mpx. para el RGB y una cámara con filtro de infrarrojo cercano NIR Canon S110 de 12 Mpx.

25 Otro tipo de actividades de investigación se han realizado en varios yacimientos arqueológicos (Alto de la Cruz y Morredón en el término municipal de Fréscano) distribuidos por el valle medio del Ebro en un proyecto dirigido por el Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza junto con el Gobierno de Aragón. En este sentido, se han desarrollado una comparativa de resultados entre ambos sistemas, sobre todo, respecto a las diferentes cámaras multispectrales.

Para este sistema comercial de ala fija eBee se puede integrar otro tipo de soluciones como una cámara multispectral *multispec 4C* y *Sequoia* con cuatro longitudes de onda: verde (550 nm, FWHM de 40 nm), rojo (660 nm, FWHM de 40 nm), borde del rojo (735 nm, FWHM de 10 nm) e infrarroja (790 nm, FWHM de 40 nm) y una cámara térmica *thermoMap* (7500-13500 nm).



FIG. 37. Desarrollo de un dron multirrotor con integración de un sensor multispectral Tetracam Mini MCA 6 en el yacimiento arqueológico del Alto de la Cruz (Fréscano, Zaragoza).

En cambio, el trabajo con estos sensores garantizan una integración absoluta tanto con el equilibrado de la aeronave con la correcta distribución del centro de gravedad, el programa de planificación de vuelo, la sincronización de las imágenes y sus coordenadas y, por último, el *software* de postproceso, en este caso Pix4D. Una de las claves de este sistema es la gestión en la propia planificación de vuelo a través del programa eMotion2 y 3 ya que una vez definida la zona de interés patrimonial, el tipo de GSD que queremos obtener y los solapes transversales y longitudinales, el sistema realiza una simulación teniendo en cuenta el modelo digital del terreno (MDT) de la zona, realizando el vuelo a una altura constante. Dadas las características particulares de este tipo de aeronave de ala fija, deberemos restringirnos a realizar los vuelos en zonas diáfanas con una amplia superficie sin interferencias, tanto para el despegue como para el aterrizaje. Este factor contribuye a una cierta desventaja respecto al tipo de despegue vertical de los sistemas multirrotores y VTOL (*Vertical Take-Off*), sin embargo, se trata de un sistema mucho más extensivo que nos permite documentar yacimientos de grandes extensiones en un único vuelo. Este punto sin duda resulta clave, ya que su rápida adquisición de imágenes en zonas amplias permite reproducir las mismas condiciones de luminosidad para el análisis arqueológico final en un ortomosaico.

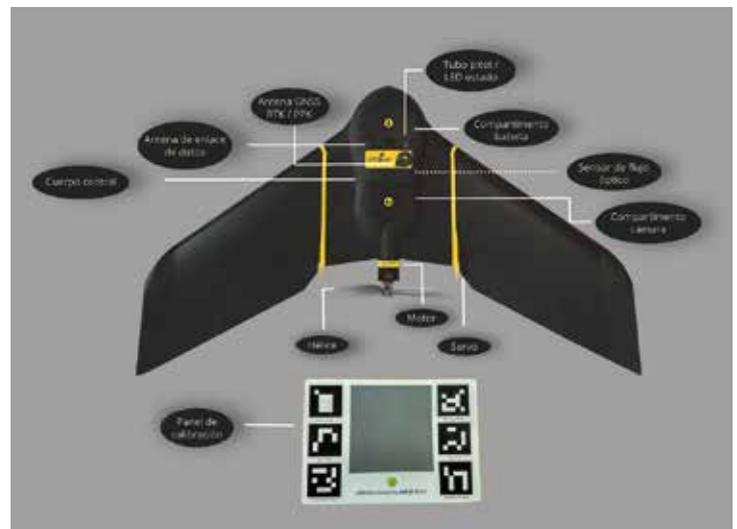


FIG. 38. Partes principales del sistema de ala fija eBee Plus RTK / PPK con sistema GNSS de doble frecuencia.

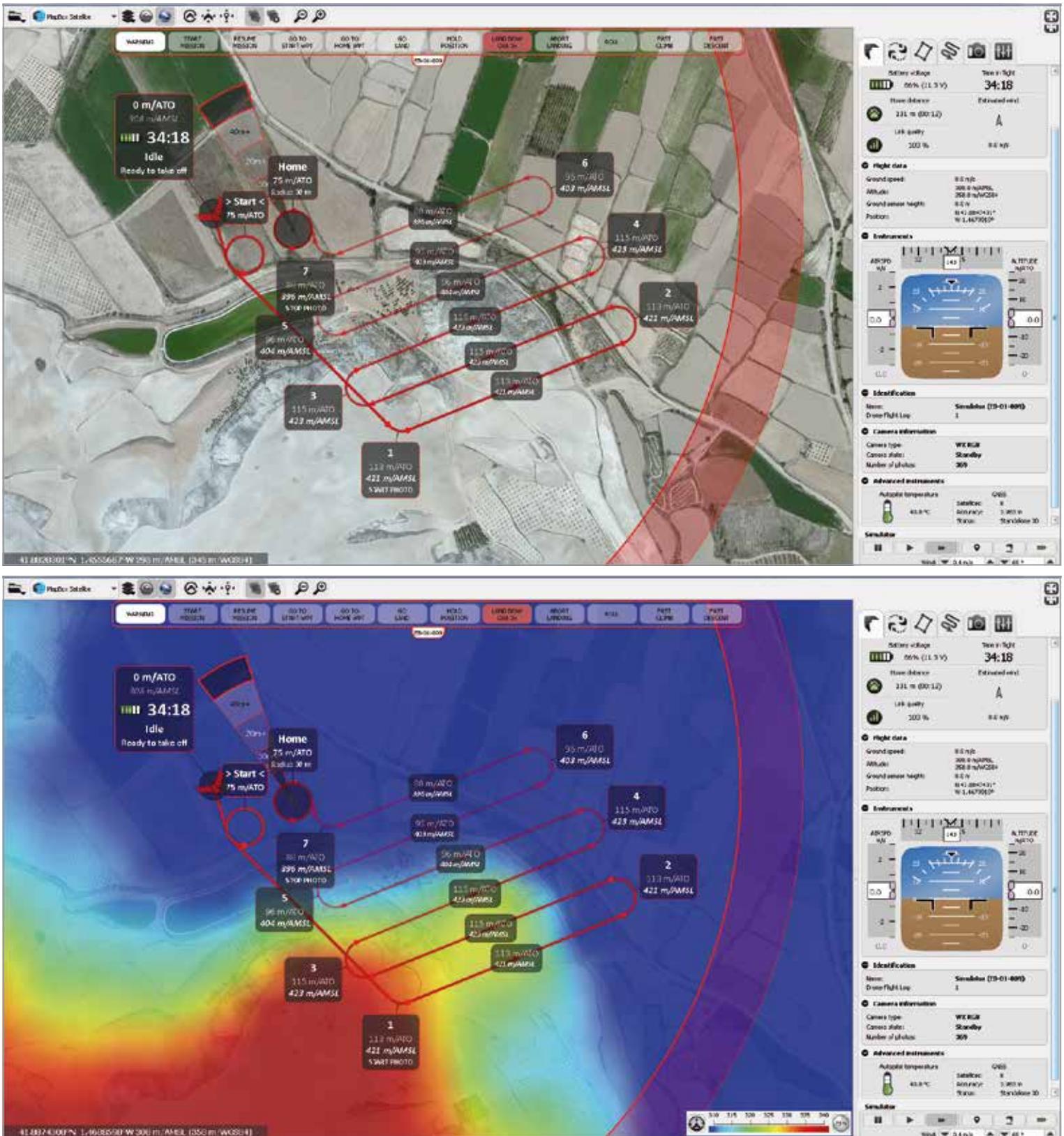


FIG. 39. Planificación de vuelo sobre ortofoto con modelo digital del terreno (MDT) realizado sobre el yacimiento arqueológico del Alto de la Cruz (Fréscano, Zaragoza) en junio de 2014 con el software eMotion2.

FIG. 40. Desarrollo de un dron tipo multirrotor «quad» sin *gimbal* en la toma de datos de la fortaleza de Rustaq (Sultanato de Omán).

TABLA 3
 Tabla relacional de las tipologías, longitudes de onda y resoluciones de los sensores utilizados

	TIPO DE SENSOR Y RESOLUCIÓN	LONGITUD DE ONDA (nm) Y ANCHO DE BANDA (nm)	RESOLUCIÓN PÍXEL A 120m (GSD)	TIPO DE DRON
Olympus EPM-2	VIS, 16Mpx	RGB	3,5 cm /px	Multirrotor
S.O.D.A. senseFly	VIS, 20Mpx	RGB	2,8 cm /px	Ala Fija
Olympus EPM-1 IR Longpass 1'' Edmund Optics	NIR, 12 Mpx	700-1000	4 cm /px	Multirrotor
Canon S110 senseFly	NIR, 12 Mpx	560 (70) 625 (90) 850 (100)	4,2 cm /px	Ala Fija
MultiSpec senseFly	Multiespectral, 1,3 Mpx	550 (40) 660 (40) 735 (10) 790 (40)	12,5 cm /px	Ala Fija
Tetracam Mini MCA 6	Multiespectral, 1,3 Mpx	490 (10) 550 (10) 680 (10) 720 (10) 800 (10) 920 (20)	12,7 cm /px	Multirrotor
Sequoia Parrot	Multiespectral, 1,3 Mpx / VIS, 16 Mpx	550 (40) 660 (40) 735 (10) 790 (40) RGB	11,4 cm /px; 3,3 cm /px (RGB)	Multirrotor /Ala Fija
ThemoMap senseFly	Termográfica, 650 x 512 píxeles	7500-13500	22 cm /px	Ala Fija

2.3.3.2. Tipologías y usos de sensores

Los tipos de sensores integrados en esta investigación para los sistemas multirrotor corresponden a dos cámaras sin espejo del tipo micro cuatro tercios para la obtención de la longitud de onda VIS-NIR y el sensor multiespectral *Tetracam Mini-MCA 6*.

A. Visible

La cámara utilizada para esta investigación fue una Olympus E-PM 2. Se trata de un sensor micro cuatro tercios con objetivo intercambiable con sensor Live MOS de 16 megapíxeles (resolución máxima de 17,2 megapíxeles) y procesador TruePic VI. Para la obtención de la longitud de onda del visible posee un filtro de colores primario (RGB), denominado como filtro Bayer. Las características del equilibrio de este tipo de cámaras entre su calidad, bajo peso e intercambio de objetivos contribuyen a que sea una de las mejores alternativas para este tipo de sistemas.

Para este tipo de filtros la respuesta espectral relativa (*Relative Spectral Response*) es tal y como se muestra en la siguiente figura:

Como podemos observar necesitábamos también integrar los datos del NIR para procesar posteriormente diferentes índices de vegetación. La solución fue contar con la siguiente DSLR adaptada para nuestro estudio.

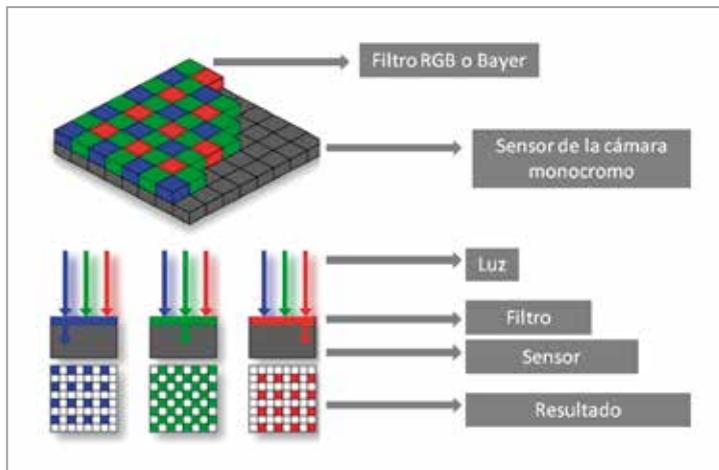


FIG. 41. Funcionamiento del filtro Bayer de la Olympus E-PM2.

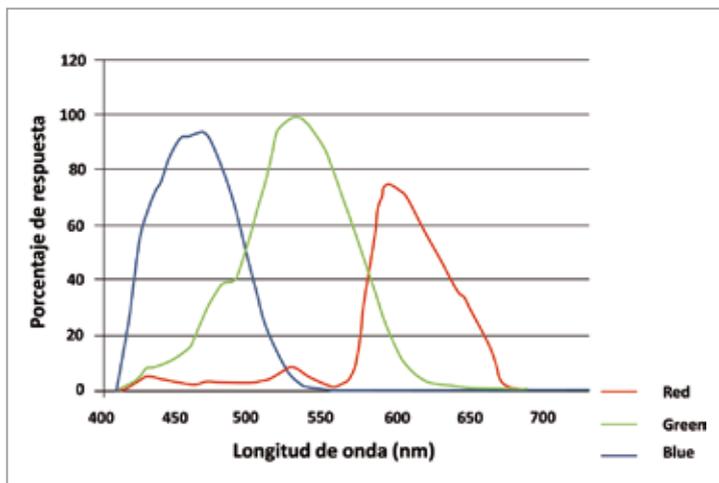


FIG. 42. Ejemplo de la respuesta espectral de un filtro Bayer*.

* Adaptación realizada sobre: <http://www.dxomark.com/About/In-depth-measurements/Measurements/Color-sensitivity> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 43. Adaptación e integración del sistema multirrotor desarrollado con un sensor multiespectral *Tetracam Mini-MCA 6* en el yacimiento arqueológico de El Morredón (Fréscano, Zaragoza).

B. Infrarrojo cercano (NIR)

Olympus E-PM1 con un filtro de paso alto de IR (*optical cast plastic IR longpass filter 1" diámetro de Edmund Optics*).

En este caso, para conseguir los datos del NIR mediante la Olympus E-PM1²⁶ (similar a la anteriormente comentada, *vid. supra*), el filtro Bayer se sustituyó por un filtro que recogiese la longitud de onda del infrarrojo cercano. En consecuencia, a la DSLR se le dotó con un filtro óptico IR Long Pass de 1 pulgada de diámetro de la marca *Edmund Optics*²⁷.

El problema de este sensor es que desconocemos cuáles son los rangos de longitud de onda de cada banda. En nuestro caso, al tratarse de imágenes TIF-RGB, Erdas las descompone en tres bandas. El razonamiento más lógico sería que la primera banda estuviese comprendida entre los 700-800 nm; la segunda entre los 800-900 nm y la última entre los 900 y 1000 nm. Sin embargo, este hecho no lo hemos podido comprobar. No obstante, con el siguiente sensor que hemos utilizado en este estudio, *Tetracam Mini-MCA 6*, este problema se ha podido resolver ya que tiene un ancho de banda entre los 10 y 20 nm por cada canal.

C. Multiespectral

a) Cámara *Tetracam Mini-MCA 6*

La *Tetracam MINI-MCA 6*²⁸ es una cámara multiespectral de seis canales apta por su funcionamiento, tamaño y peso para ser utilizada de manera aérea en un avión convencional, en un RPAS o en tierra, sobre un trípode²⁹.

Cuenta con seis canales que corresponden a diferentes filtros con distintas longitudes de onda. El sistema funciona con una cámara

26 Para más información consúltese: http://www.olympus.es/site/es/c/cameras/om_d_system_cameras/

27 Para conocer el rango de longitud de onda que exactamente captaba nuestro sensor con este tipo de filtro tuvimos que ponernos en contacto con el propio fabricante Edmund Optics. Éste nos pudo asegurar que uniendo la sensibilidad del CMOS de la cámara E-PM1, entre los 300 y 1000 nm, y el rango de longitud que puede captar el filtro, 700 a 2250 nm, el resultado sería que la radiación más alta que captaría este sensor se situaría entre los 700 a 1000 nm, siendo la radiación inexistente o muy baja entre los 300 y 700 nm.

28 Sobre este sensor consúltese la información disponible en: http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm

29 Queremos agradecer al Ministerio de Educación y al Campus de Excelencia Internacional del valle del Ebro (*Iberus*) la ayuda concedida para la adquisición de este equipamiento.

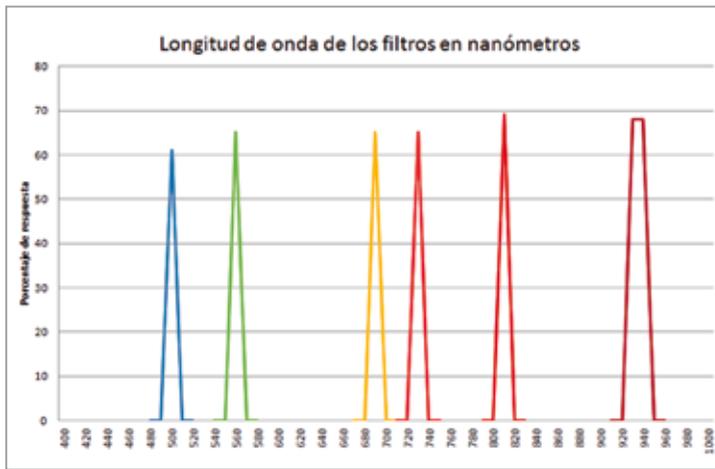


FIG. 44. Gráfico de la respuesta espectral relativa (*Relative Spectral Response*) de los filtros de la *Tetracam MCA-Mini 6*.

ra máster que es la responsable de sincronizar el resto de las cámaras (esclavas) calculando la exposición y la sincronización del GNSS/GPS externo para obtener la información georreferida de cada imagen³⁰.

Cada cámara tiene su propio filtro (filtro espectroscópico de *Andover*), con un ancho de banda entre los 10 y 20 nm, teniendo como resultado una longitud de onda que alcanza desde los 490 hasta 940 nm.

TABLA 4

Características de las longitudes de onda de los canales de la *Tetracam MCA-Mini 6*

BANDA	λ_{\min} (nm)	λ_{\max} (nm)	ANCHO DE BANDA (nm)
Slave 1	490	500	10
Slave 2	550	560	10
Slave 3	680	690	10
Slave 4	720	730	10
Master	800	810	10
Slave 5	920	940	20

b) Cámara multispectral Sequoia

La proliferación de diversos tipos de usos con este tipo de sensores, principalmente en la denominada agricultura de precisión, junto con un aumento de programas y soluciones de procesamiento en la «nube»³¹, ha facilitado un factor «democratizador», muy recurrente a lo largo de este apartado. Tanto en las herramientas como en las técnicas. Este momento de explosión con el uso de las imágenes multispectrales lo hemos visto, sobre todo, desde el año 2015 cuando se comienzan a fabricar este tipo de sensores a un precio más bajo que los sensores multispectrales anteriores (*Tetracam MCA, Mini 6*).

Se trata de una de las cámaras multispectrales más empleadas en el mercado, debido principalmente a diferencias frente a otras cámaras multispectrales, con la incorporación de un sensor de luminosidad, bajo peso y una fácil compatibilidad con los drones más utilizados en el mercado.

³⁰ Las diferentes velocidades de baudios en la tasa de transferencia de bits del sensor GNSS tuvo como consecuencia la utilización de un GNSS externo adicional, únicamente para este sensor, además del utilizado para el piloto automático.

³¹ Existen varias alternativas en este sentido donde destacamos <https://cloud.pix4d.com/login> y <https://www.dronedeploy.com/> (último acceso: septiembre de 2017).



FIG. 45. Dron de ala fija eBee Plus RTK / PPK con un sensor multispectral Sequoia, sensor de luminosidad y tablilla de calibración.

La cámara incorpora cuatro sensores monocromos de 1,2 Mpx sincronizados que trabajan en las longitudes de onda del verde, rojo, borde del rojo e infrarrojo cercano. Además, cuenta con un sensor RGB (*roller shutter*) de 16 Mpx, lo cual significa que puede capturar hasta cinco imágenes por disparo.

Los sensores, a excepción del RGB, almacenan las imágenes en formato TIFF (RAW) para evitar pérdidas de información radiométrica debido al formato de captura y sus correspondientes compresiones, de esta manera las imágenes se almacenan sin ningún tipo de compresión.

Sin embargo, cuando se trabaja con cámaras multispectrales con varios sensores, las imágenes no dejan de estar exentas a una serie de errores, siendo estos algunos de ellos:

- El efecto viñeteado, que produce un oscurecimiento y decaimiento radial de los niveles digitales partiendo desde el punto central de la imagen.
- La distorsión geométrica introducida por la lente.
- El registro de las imágenes por cada sensor y la distancia entre los centros ópticos de los sensores. De los cuatro sensores, la Sequoia toma el verde como referencia con una posición y una orientación dada.

Es en este tipo de aspectos en los que la cámara Sequoia destaca frente a otras, puesto que los posibles errores comentados se corrigen en el programa Pix4D³² a partir de los metadatos de las imágenes.

Los ortomosaicos son generados en valores de reflectividad, y esta es otra de sus ventajas al ser el tipo de parámetros con los que se calculan variables biofísicas como por ejemplo el vigor vegetal. A partir de esta información se pueden detectar las anomalías en el crecimiento de la vegetación debido principalmente a estructuras o fosos. El proceso seguido por Pix4D para lograr los ortomosaicos en valores de reflectividad es, en primer lugar, el paso de niveles digitales a radiancia, y en segundo lugar, el paso a reflectividad utilizando las imágenes tomadas del panel de calibración.

³² Pix4D es un *software* de fotogrametría profesional donde, además de otros usos, este sensor multispectral tiene una integración más avanzada. Este *software* permite el procesamiento de las imágenes para conseguir los ortomosaicos y mapas de índices con una alta resolución. A modo de referencia un vuelo realizado a 70 m se alcanza un GSD cercano a 8 cm/pix. <https://pix4d.com/>

Por último, recientes estudios de la Universidad de Zaragoza (Cano, 2017) han demostrado mediante calibraciones radiométricas en yacimientos arqueológicos, que la cámara es apta para la estimación de dichas variables biofísicas, al estar los niveles digitales de las imágenes directamente relacionados con la reflectividad que se facilita en postproceso a partir de los ortomosaicos. Únicamente se destaca una leve infraestimación que sufre el canal del verde, el cual no se utiliza en el índice de vegetación más utilizado, el NDVI.

2.4. El desarrollo de los instrumentos óptico-electrónicos

2.4.1. Técnicas de topografía clásica

Nos referiremos a continuación a las técnicas empleadas en la denominada topografía clásica. Normalmente estas herramientas se encuentran divididas según las técnicas de registro planimétricas (x,y), altimétricas (z) o combinadas (x, y, z), incorporando ambos tipos de registro. Los equipos que entran dentro de esta categoría denominada «topografía clásica» son fundamentalmente la estación total y el teodolito, el equaltímetro o nivel topográfico, distanciómetros láser y sistemas de posicionamiento satelital GNSS *Global Navigation Satellite System*.

La difusión y «democratización» de las técnicas e instrumentos topográficos tuvieron una diversificación entre un conjunto profesional más heterogéneo con la comercialización de la estación total, una vez integrado el distanciómetro coaxial en la década de los años ochenta del siglo XX. Debemos considerar otros hitos tecnológicos a lo largo de los años noventa con el primer distanciómetro láser de mano en 1993. Más tarde, en abril de 1995, fue cuando los sistemas de posicionamiento satelital (GNSS), adquieren su plena capacidad operacional. Al finalizar el siglo XX, en 1999 se comercializa Cyrax como el primer láser escáner 3D que captura 1000 puntos por segundo. Todos estos cambios tecnológicos a finales del siglo XX redundaron en la utilización de este tipo de herramientas por sectores profesionales no especializados, fomentando un uso comercial, privado y lúdico, impulsando de esta manera, una fuerte demanda por parte de la sociedad de la información sobre el patrimonio. En este sentido, estos condicionantes han promovido el interés del patrimonio como seña de identidad de una cultura, convirtiéndolo en un fuerte medio de difusión turístico y cultural. Además, todos estos avances fueron acompañados de un gran número de desarrollos de nuevos sistemas informáticos, relacionados con programas CAD y SIG enfocados a la documentación del propio objeto y a la arqueología del paisaje.

2.4.1.1. Teodolito

Comúnmente en arqueología se tiende a confundir el teodolito con la estación total, denominando al primero para las funcionalidades del segundo. El teodolito es un instrumento de medición óptico que se utiliza para obtener ángulos verticales y horizontales con una gran precisión pero desprovisto, normalmente, de distanciómetro integrado. Actualmente su principal uso es en la construcción para definir ángulos y planos verticales, y en industria para alineaciones de maquinarias. Su utilización sobre trípode nos permite fundamentalmente registrar ángulos que pueden usarse para crear una cuadrícula en una excavación arqueológica junto con una cinta métrica o flexómetro. Utilizando esta técnica, podemos combinar las distancias con los ángulos del teodolito y obtener coordenadas. Se trata de un método algo lento pero totalmente válido que se utiliza todavía en la documentación de algunas excavaciones arqueológicas.

2.4.1.2. Nivel

Se trata del sistema más usado y extendido en actividades de registro patrimonial. Mediante el nivel obtenemos diferencias de altura (z) entre puntos, por ejemplo, de una excavación arqueológica con la ayuda de una mira estadimétrica. Existen tres tipos diferentes de niveles divididos en: ópticos, ópticos-digitales y láser.

Normalmente la distancia máxima para el cálculo de diferencia de altura entre el nivel y la mira suele ir asociado a los aumentos de la óptica del nivel. Y su precisión suele ser expresada en el error acumulado de un kilómetro de nivelación de ida y vuelta. Suele ser el instrumento de medición más común en una excavación arqueológica, junto con un flexómetro, ya que nos indica las diferencias de cota en las diferentes unidades estratigráficas o entre los objetos hallados. Para ello, siempre estableceremos un punto de referencia fijo que llamaremos «punto cero». Habitualmente suelen disponer de un goniómetro en la base de fijación al trípode expresado en un sistema centesimal o sexagesimal para obtener, de un modo menos preciso que el teodolito, ángulos horizontales aproximados.

Una función algo menos conocida de los niveles ópticos pero no por ello menos importante, dependiendo del tipo de trabajo y precisión que tengamos que realizar, es la medición óptica de distancia con el nivel. El retículo de la lente posee un hilo superior y otro inferior dispuestos de manera simétrica al hilo central. Si leemos el espacio entre ambos hilos en la mira estadimétrica y lo multiplicamos por 100 obtendremos la distancia del punto donde hemos situado el nivel con respecto a la mira. La utilización de este sistema representa un error algo elevado en la precisión de distancias de entre 10 y 30 centímetros, pero puede ser de gran ayuda para obtener una aproximación entre las diferentes distancias de los objetos o estructuras para hacer una planimetría.

El uso del nivel, además del registro de las diferencias de altura en una excavación, se ha usado y se utiliza frecuentemente para la realización de perfiles longitudinales y transversales en una zona arqueológica. La anotación de las diferencias de altura registradas a intervalos regulares, bien por el método óptico mencionado o mediante una cinta métrica, nos permitirán el dibujo en sistemas CAD o en planimetrías sobre papel milimetrado del perfil y por consiguiente se pueden establecer cálculos de desmonte o terraplén para cuantificar metros cúbicos.

La fórmula más empleada para el cálculo de volúmenes en una excavación arqueológica por el método clásico entre perfiles es la siguiente:

$$V = \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \times d, \text{ en m}^3$$

donde:

V = volumen en m³

A1 = área del perfil anterior

A2 = área del perfil posterior

d = distancia entre perfiles

Otro sistema para el cálculo de volúmenes es el método de diferencia de mallas en una superficie previamente cuadrículada.

De este modo se compara un modelo digital del terreno (MDT) generado con los datos obtenidos como terreno actual y se compara con un MDT final.

El proceso de cálculo realizado es el siguiente: para cada dos celdas cuyas coordenadas en 2D coinciden, se calcula la cota media a partir de sus cuatro vértices. Después se comparan las cotas, y si la diferencia es superior a la tolerancia configurada, se calcula el volu-

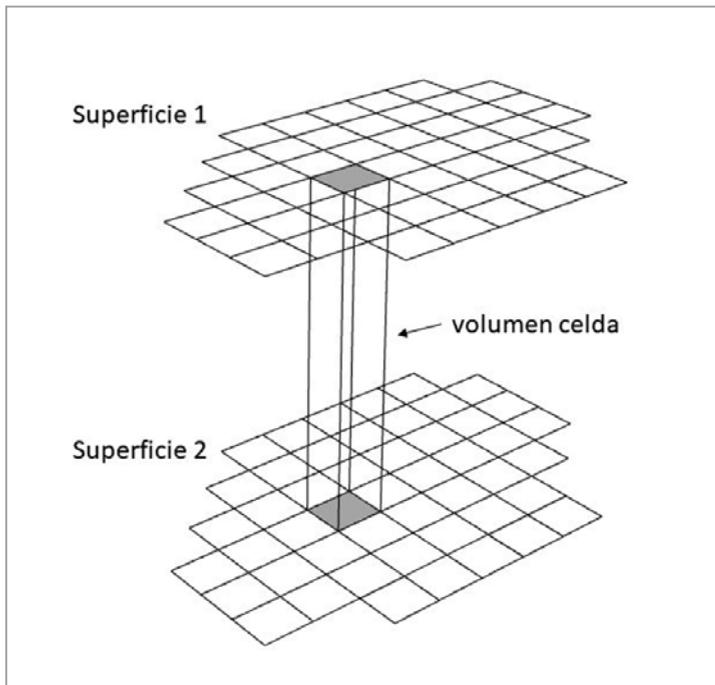


FIG. 46.

men entre ambas celdas y se añade al volumen de desmonte o terraplén, según el signo.

La fórmula para calcular el volumen por diferencia de mallas es:

$$V_i = D^2 (z_1 - z_2)$$

V_i = Volumen de la celda o cuadrícula i

D = Dimensión de la celda o cuadrícula

z_1 = Cota media de la celda en la superficie 1

z_2 = Cota media de la celda en la superficie 2

Por otro lado los niveles ópticos-digitales representan un avance notable, ya que la medición, además de óptica, tiene como característica esencial la realización de una mira de código de barras y normalmente incorpora una memoria interna. En este sentido, se consigue eliminar cualquier error, tanto de lectura como de transcripción de datos. La información aparece además en una pantalla digital que nos indica diferencia de altura y distancia, y si posee memoria podremos descargar toda la información en una hoja de cálculo para facilitar su uso.

Finalmente los niveles láser están cada vez más extendidos en excavaciones arqueológicas extensivas ya que permiten el trabajo de varias personas simultáneamente en diferentes puntos con el mismo instrumento. El principio de nivelación es común a los dos sistemas anteriormente descritos, y una vez establecida la diferencia al punto cero, un haz láser rotatorio nos marca la nivelación donde una única persona con un detector y una mira puede anotar diferencias de cotas. Este sistema, aunque algo menos preciso que el sistema óptico, es mucho más rápido puesto que diferentes técnicos pueden registrar información de manera individual al mismo tiempo.

2.4.1.3. Estación total

La diferencia fundamental con el teodolito es que la estación total incorpora un distanciómetro integrado y una memoria interna para almacenar la información. Así, se trata de un instrumento óptico-electrónico que registra ángulos y distancias, por lo que obtenemos coordenadas x , y , z de cada punto almacenado. Existe una vasta tipología que incorporan, además de la medición a un prisma, un distanciómetro láser para registrar un punto sin necesidad de un prisma. Esta técnica permite registrar puntos directamente en cualquier superficie donde incide el punto láser. Este tipo de instrumentos son muy útiles en la toma de puntos en fachadas arquitectónicas o cuevas, como elementos para delineación o como apoyo fotogramétrico. Otra tipología de estación total son las motorizadas, muy versátiles para replanteos topográficos y las estacio-

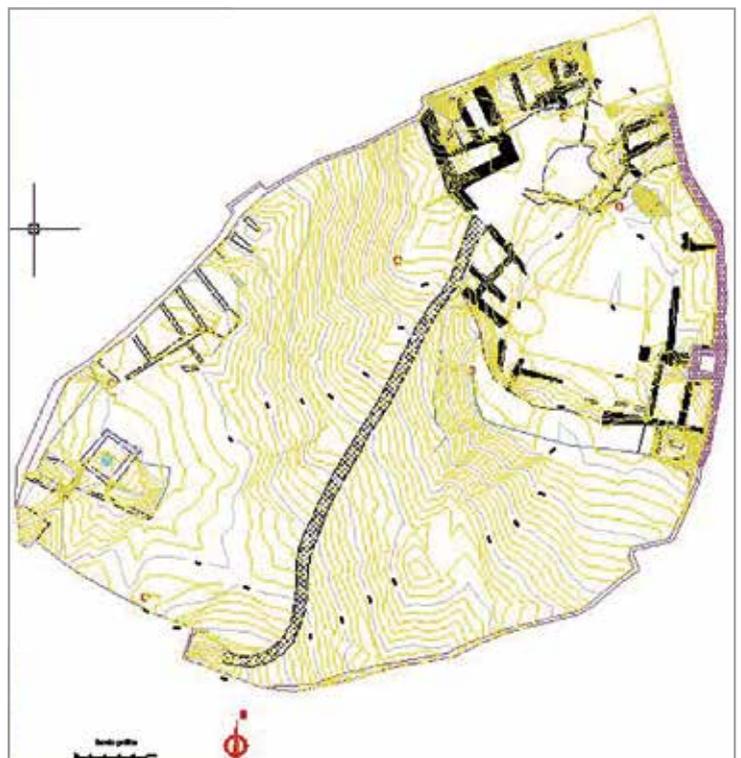


FIG. 47. Ejemplo de estación total robotizada en el levantamiento topográfico del Castillo de Uncastillo (Torre del Homenaje y Palacio) en la Peña de Ayllón (Uncastillo, Zaragoza) para la Fundación Uncastillo.



FIG. 48. Sistemas GNSS RTK de doble frecuencia: con radio enlace a estación fija topografiando el Castillo de Losares (Pozondón, Teruel) (dcha.) y el yacimiento de La Caridad (Caminreal, Teruel) colocando puntos de apoyo con conexión a la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón ARAGEA para vuelo fotogramétrico (izda.).

nes robotizadas con seguimiento a prisma. Este tipo facilita su uso por una única persona con una libreta electrónica que se comunica con la estación mediante radio enlace. Son muy útiles en una excavación arqueológica puesto que previenen confusiones a la hora de delinear los puntos tomados ya que su uso es gestionado por una única persona y con ello evita errores de interpretación o transcripción de los puntos tomados.

Actualmente, han surgido, en los últimos años, estaciones mixtas o multiestaciones que incorporan funcionalidades de escáner tridimensional, realizando barridos a una velocidad máxima de 1000 puntos por segundo (véase a modo de ejemplo la multiestación Leica Nova MS50³³). Si bien la velocidad está muy por debajo de los escáneres actuales, se trata de una tendencia donde cada vez se incorporan nuevos avances técnicos y se disminuyen el tamaño y el peso, por lo que creemos que en los próximos años confluirán escáneres tridimensionales y estaciones totales en un único instrumento.

2.4.1.4. Sistemas de posicionamiento global satelital GNSS

En abril de 1995 se declaraba la «capacidad operativa completa» del sistema GPS. Este hito abrió un nuevo sistema que en la actualidad sigue siendo la base de múltiples instrumentos de localización mediante coordenadas, como por ejemplo los drones o sistemas RPAS y los sistemas de navegación portátiles. Este avance se completó por los Estados Unidos en el año 2000 bajo la administración Clinton, derogando la «disponibilidad selectiva» y contribuyendo a una mejor precisión para usos civiles. Los sistemas de posicionamiento actuales GNSS se nutren fundamentalmente de las observaciones del sistema NAVSTAR-GPS (Estados Unidos) y GLONASS (Rusia). Existen otros proyectos como, por ejemplo, el de la República Popular China denominado BEIDOU/Compass que estará plenamente operativo en 2020 y otros proyectos como el QZSS (Japón) y IRNSS (India). El sistema desarrollado por la

Unión Europea GALILEO se puso en marcha el 15 de diciembre de 2016 con un total de 18 satélites, sin embargo acumula varios años de retraso y se prevé que comercialice plenamente sus servicios a partir de 2020, alcanzando de esta manera su plena capacidad operativa con 30 satélites.

La aplicación de esta herramienta ha constituido toda una revolución para la documentación del patrimonio cultural tanto de manera directa como en aplicaciones indirectas (Campana, 2006: 201-225). Hoy no podemos concebir la investigación arqueológica sin la utilización de sistemas de información geográfica (SIG) como bases de datos, geolocalización de una prospección arqueológica, la documentación topográfica de un yacimiento o la planificación de vuelo de un sistema dron o RPAS para un área arqueológica. Todos ellos se nutren de diferentes tipologías de sistemas GPS/GNSS con diferentes precisiones. Por otro lado, también ha tenido efectos negativos, ya que la aparente facilidad, en muchos casos, en cuanto a su uso sin cursos y/o formación específica ha repercutido en un menor aprovechamiento e incluso desconocimiento sobre los sistemas de coordenadas empleados en la codificación de la información que nos proporciona, llevando a confusiones de localización de yacimientos en la arqueología preventiva³⁴.

La utilización en el presente estudio de este tipo de sistemas se ha centrado fundamentalmente en los sistemas GNSS de doble frecuencia mediante RTK (*Real Time Kinematic*), aprovechando en algunos casos las redes de geodesia activa con conexión GPRS de las Comunidades Autónomas que integran este tipo de servicios, muchas veces de uso libre³⁵. En otros casos utilizando una base de re-

34 Citaremos a modo de referencia como en los últimos años hemos asistido a geolocalizaciones de yacimientos desafortunadas, bien por un error en la localización o bien por el uso erróneo de la nomenclatura del sistema de coordenadas, citando únicamente la proyección UTM y el huso pero sin precisar, por ejemplo, si se trataba de un sistema de referencia geodésico ED50 o ETRS89. La desviación media de un sistema a otro es de aproximadamente 100 metros en la coordenada X y 200 en la coordenada Y.

35 Citaremos algunos ejemplos de este tipo de redes utilizadas en Aragón <http://gnss.aragon.es/> Navarra <http://www.navarra.es/appsext/rgan/default.aspx> y Castilla y León <http://gnss.itacyl.es/>

33 http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Nova-MS50_103592.htm (último acceso: noviembre de 2017).

ferencia con conexión de radio o realizando técnicas de postproceso de archivos RINEX cuando no existía cobertura móvil, o, por el contrario, el acceso a un vértice geodésico era complejo, para posteriormente trasladar y rotar el sistema de coordenadas empleado.

2.4.2. Escáner tridimensional: tipología

La plena irrupción de la tecnología escáner 3D en el siglo XXI ha contribuido como punto de avance que, sin duda, complementa al resto de técnicas que hemos descrito anteriormente. Aunque su utilización en los primeros años de desarrollo fue principalmente industrial³⁶, rápidamente el patrimonio cultural utilizó, muy tempranamente, este tipo de sistemas de registro (Campana / Francovich, 2006). A través de la información generada por esta herramienta se obtiene un modelo tridimensional del cual se pueden realizar una gran cantidad de análisis posteriores para optimizar el conocimiento y la documentación del monumento. Esta técnica permite afrontar nuevos enfoques metodológicos pero, sin duda, el actual reto lo constituye el avance de lo puramente gráfico a lo funcional con la creación de bases de datos tridimensionales (*vid. infra* apdo. 3.7). Actualmente la utilización de los escáneres 3D se encuentra de igual modo en una diversificación tal, que es necesario establecer una división y clasificación en cuanto su utilización y relación con unos objetivos establecidos. El equilibrio entre la resolución, precisión, tiempo y costes debe ser el resultado respecto a la adaptación de la escala de trabajo exigida. La diversificación y multiplicidad de opciones obliga a seleccionar muy bien el tipo de tecnología que mejor se adapta a cada proyecto debido a su variedad tipológica: aéreas ALS (drones, tecnología LiDAR), terrestres TLS y MLS (láser tiempo de vuelo y diferencia de fase), objeto cercano y metrología dimensional (láser de triangulación, escáner de luz blanca estructurada y láser tracker).

En general, el avance del escáner 3D en el último decenio ha supuesto una innovación en cuanto a método y resultados en el registro, documentación y análisis geométrico del patrimonio cultural, a través de una recogida y almacenaje masivo de datos. Los resultados que se obtienen forman la base de un archivo documental geométrico totalmente reproducible en cualquier momento. Del mismo modo, se utiliza como una herramienta de control dimensional diacrónico para cualquier tipo de alteración o patología estructural. Esta ventaja le confiere un valor preventivo, realizando de la misma manera un modo de registro que no requiere un contacto directo con la superficie de la estructura o elemento analizado, permitiendo así un sistema de registro totalmente inocuo.

Su aplicación se realiza con el fin de documentar y analizar cualquier objeto o estructura en múltiples campos o disciplinas, bien sean relacionadas con la documentación, conservación y restauración del patrimonio cultural (arqueología, arquitectura, paleontología), bien conectados con otros sectores afines a la ingeniería inversa y generación de planimetrías *as built*, industria u obra civil (*vid. infra*). El propio carácter interdisciplinar permite su relación con otro tipo de aplicaciones pioneras relacionadas con estudios medioambientales, con el fin de predecir y controlar la erosión de suelos, documentación del paisaje y SIG, estudios sobre la biomasa, análisis de zonas de difícil acceso y estudios hidráulicos³⁷. Al



FIG. 49. Escáner de triangulación Next Engine documentando el bloque de Abautz en el Museo de Arqueología de Navarra.

margen del objeto de estudio en cada una de estas disciplinas, totalmente exógenas entre sí, las técnicas de trabajo son paralelas y se pueden establecer puntos de enlace comunes.

La diversidad entre las técnicas topográficas empleadas junto con las tipologías de escáneres y programas informáticos hace que muchas veces la solución proporcionada deba ser combinada y desarrollada para cada tipo de trabajo concreto. Por ello, existe una heterogeneidad respecto a las diferentes clases de escáneres para objeto cercano, terrestres (TLS), aéreas (ALS) y móviles (MLS), cada uno con sus particularidades tipológicas que desarrollaremos en los siguientes puntos:

2.4.2.1. Objeto cercano

A. Escáner de triangulación

Utilizados para el escaneado de elementos de dimensiones reducidas, denominados también como láseres de objeto cercano. Tienen una precisión, superior a los sistemas anteriores, por debajo del milímetro. Su utilización debe hacerse a poca distancia del objeto o estructura. El funcionamiento se basa en la iluminación del objeto con un barrido láser que es captado desde una cámara CCD calibrada. Como es conocida la distancia entre la cámara que capta el láser y por otra parte se conoce el ángulo de incidencia de ese rayo captado por la cámara CCD, permite calcular con mucha precisión los puntos que forman el conjunto del cuerpo a escanear. Disponen de una cámara óptica como parte de su funcionamiento, y por esta razón, junto con la corta distancia de actuación, son capaces de capturar la textura de cualquier elemento con mejor resolución. Por otro lado, la exigua distancia de actuación (normalmente no superior a 1 metro) representa una limitación del campo visual de escaneado. Otra casuística específica son las dificultades que tiene a la hora de capturar cuerpos cuya textura es brillante o muy oscura, ya que la cámara no capta correctamente la iluminación láser con la que se iluminan estos tipos de cuerpos brillantes u oscuros.

Para los bienes patrimoniales con unas dimensiones superiores, su aplicación se puede combinar con los otros dos sistemas anteriores de diferencia de fase y de tiempo de vuelo³⁸. Por esta técnica se consigue que las nubes de puntos se unifiquen mejorando de igual

36 Este tipo de sistemas ha sido principalmente muy utilizado en aplicaciones industriales para el registro de tuberías y diagramas de su morfología o *piping*.

37 Consúltense como ejemplo relacionado con otros usos innovadores de esta tecnología, la utilización de un escáner 3D de tiempo de vuelo para aplicaciones en ingeniería de riegos, por el CSIC y la Escuela Politécnica Superior de Huesca de la Universidad de Zaragoza; Salvador, R. / Bautista-Capetillo, C. / Burguete J. / Zapata, N. / Serreta, A. / Playán, E. (2009): «A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers», *Irrigation Science*, 27, pp. 307-317.

38 Véase un ejemplo de combinación de escáneres en la digitalización del Arco de Benevento. En este caso se utiliza un escáner de objeto cercano para el friso, y uno de tiempo de vuelo para la estructura general con el fin de encajar ambos, Alessandri / Uccelli (2006): «The Traiano Triumphal Arch in Benevento», pp. 83-89.



FIG. 50. Proceso de documentación de grabados rupestres paleolíticos en la diacasa decorada de la Cueva de Roucadour (Thémines, Francia) con escáneres de luz blanca estructurada. Imagen superior: sistema *Open Technologies* con una precisión de 85 micras. Imagen inferior: Modelo Artec MHT con una resolución de 500 micras (Angás / Le Guillou / Mauduit, 2014: 28).

manera el encaje geométrico global. A partir de esta combinación se establece una diferenciación o equilibrio entre cada parte de la estructura y su detalle, y la precisión necesaria para cada zona.

B. Escáner de luz blanca estructurada

Su funcionamiento es similar a los escáneres de triangulación, consiguiendo un mayor protagonismo en los últimos años por su mayor rapidez en la adquisición. Utilizan luz blanca estructurada en vez de láser, según unos patrones conocidos que iluminan el cuerpo. El objeto debe ser, al igual que los escáneres de triangulación, de tamaño reducido. Las texturas se pueden captar de igual modo gracias a cámaras métricas integradas en el propio aparato. Obtiene muy buenos resultados de pequeños elementos, consiguiendo precisiones de pocas micras. Su uso está muy extendido en aplicaciones industriales y dentro de la escultura o elementos patrimoniales de dimensiones similares gracias a su agilidad y portabilidad manual. Este carácter portátil en algunos modelos, como por ejemplo la marca Artec³⁹, le confiere como una herramienta muy versátil para la documentación en zonas de difícil acceso con la combinación de otro tipo de sistemas como los TLS.

39 <http://www.artec3d.com/es/> (último acceso: noviembre de 2017).

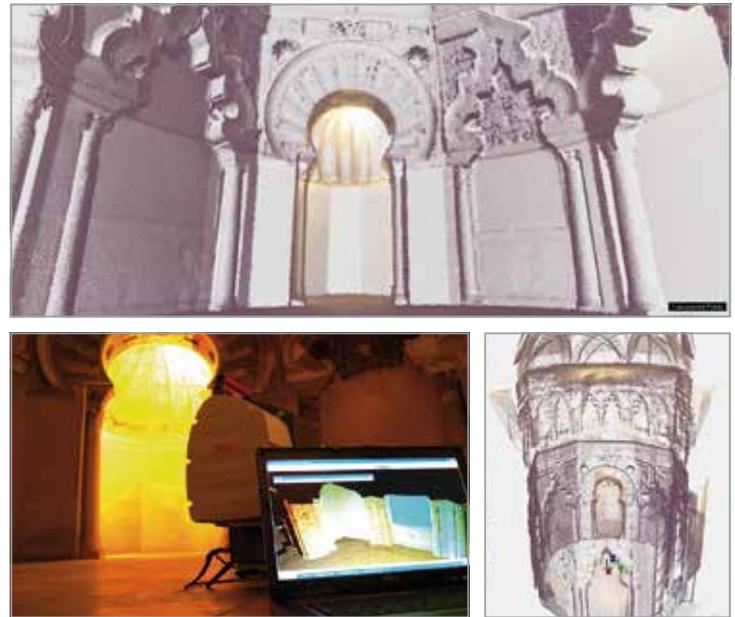


FIG. 51. Nube de puntos del modelo 3D y toma de datos con un láser escáner 3D de tiempo de vuelo del *mirhab* del Palacio de la Aljafería (Zaragoza).

Para el registro de superficies brillantes tienen problemas similares como los escáneres de triangulación, por lo que, dependiendo de la naturaleza del bien patrimonial, se puede aplicar un tipo de spray especial⁴⁰, con una película que posteriormente se retira, para la digitalización tridimensional, atenuando totalmente los brillos y facilitando el registro.

2.4.2.2. Terrestrial Laser Scanning (TLS)

A. Escáner de tiempo de vuelo (TOF, time-of-flight)

Utilizan un pulso láser emitido y lanzado a través de un espejo rotatorio. Este pulso es reflejado en la superficie escaneada y retorna al escáner. A partir del tiempo de ida y vuelta de dicho pulso y su retorno es calculada la distancia, por esta razón se les denomina de tiempo de vuelo. Dependiendo del grado de inclinación y giro del espejo se conocen los ángulos de incidencia de dicho pulso láser, necesarios para poder calcular una posición en un sistema cartesiano x, y, z .

Son los más extendidos dentro de la documentación del patrimonio debido a su versatilidad, tanto por su larga distancia de adquisición en exteriores como por su calidad y depuración en la toma de datos. Suelen incorporar una cámara integrada que proporciona el color (RGB) a cada punto adquirido. En este estudio han sido empleados, por ejemplo, en la documentación a una distancia superior de 200 metros de la presa romana de Muel (apdo. 3.4.1) o en la contextualización del anfiteatro de *Florentia* desde la *Piazza della Signoria* (apdo. 3.4.2).

Los últimos avances de esta tecnología es su combinación híbrida con la tecnología *Wave Form Digitizer (WFD)*⁴¹, como el sistema Leica BLK 360, diseñado principalmente para la arquitectura de interiores y generación de BIM. La razón de instrumentos diseñados principalmente para su uso con BIM, se traduce por el nuevo marco legislativo europeo que se inició en Inglaterra en 2011 y que prevé su plena integración legislativa en proyectos de edificación en España entre 2018 y 2019.

40 Un ejemplo es la marca *Helling Anti Glare Spray* para evitar brillos en superficies metálicas cuando se trabaja con diferentes tipos de escáner 3D.

41 La combinación de ambas tecnologías en un instrumento de medición puede verse en Maar, H. / Zogg, H.M. (2014).

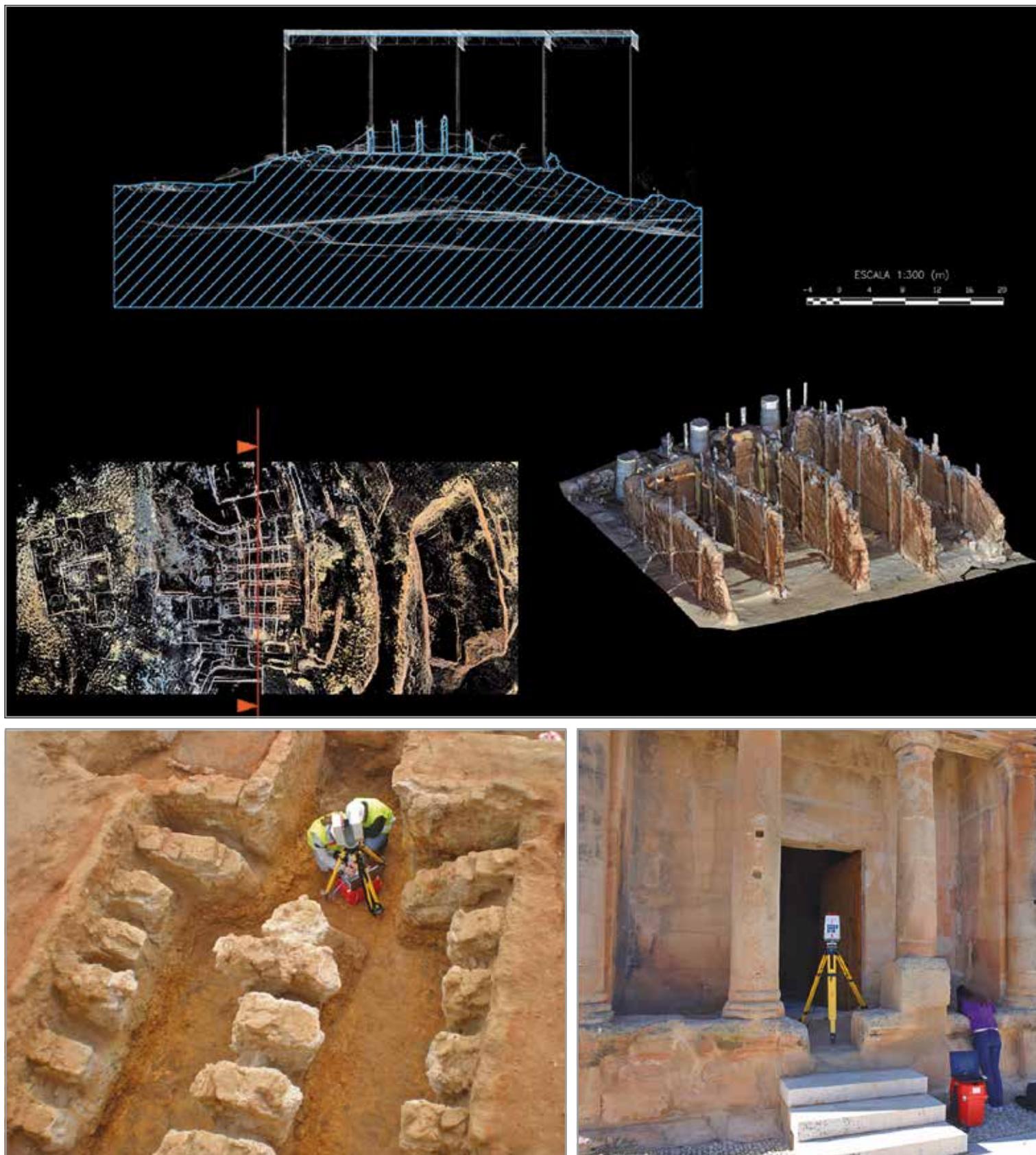


FIG. 52. Imagen superior: sección, planta y vista en perspectiva sobre el modelo 3D registrado con un escáner de diferencia de fase del yacimiento de *Contrèbia Belaisca* (Botorríta) realizado para los responsables científicos de la excavación (2006-2011) José Antonio Hernández Vera y Francisco Javier Gutiérrez. Imágenes inferiores: escáner de diferencia de fase en: una excavación arqueológica de urgencia en las obras del metro de Badalona de 2009 documentando varios hornos romanos (izda.) para la empresa CODEX. Proceso de documentación geométrica del Mausoleo romano de Fabara en 2014 (Fabara, Zaragoza) (dcha.).

B. Escáner de diferencia de fase (Phase-shift)

Su funcionamiento se basa en la emisión de una serie de ondas láser de diferente longitud de onda sobre el objeto medido, que al ser reflejadas y recibidas de nuevo en el escáner se puede determinar la distancia al objeto, comparando la fase de las ondas emitidas con las recibidas. Se utilizan sobre todo en industria para la generación de planos *as built* de plantas industriales y en interiores arquitectónicos. Este tipo de escáneres resultan mucho más rápidos en la adquisición de datos, pero presentan limitaciones en la distancia de trabajo, que no excede normalmente de 200 metros de radio, dependiendo de las condiciones de reflectividad de la superficie donde incide. Pueden generar «puntos de ruido» que exige un posterior postproceso de filtro y limpieza de la nube de puntos del modelo tridimensional.

Su aplicación dentro del campo patrimonial se está introduciendo en los últimos años debido a su mayor velocidad, supliendo el valor cromático con cámaras métricas calibradas y realizando posteriormente el mapeado de la nube de puntos. Las principales marcas pioneras que existen en el mercado son Leica, Faro y Z+F, aunque estamos comprobando un aumento en los últimos años con una alta variedad de sistemas y alternativas comerciales.

La combinación de este sistema con los escáneres de tiempo de vuelo se consolida como una alternativa muy útil para afrontar proyectos que requieran dos rangos diferentes de registro en poco tiempo.

2.4.2.3. Aerial Laser Scanning (ALS)

El uso de los sensores aerotransportados en arqueología ha permitido la obtención de una información geométrica de grandes áreas que, de este modo, permite discriminar diferentes tipos de informaciones mediante una clasificación. Desde 2007 se liberalizó el uso de ortofotos aéreas con la aplicación de la directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*)⁴². Paulatinamente en estos últimos diez años se ha democratizado totalmente su uso con diferentes plataformas que permiten incluso la comparación diacrónica de una misma zona (Comparador del PNOA Histórico)⁴³, completándose con el uso de datos LiDAR. Este tipo de información se puede definir como nubes de puntos obtenidas por haces de luz emitidos por un sensor aerotransportado activo para la captación de información por pulsos. Actualmente existen sistemas que capturan alrededor de un millón de puntos por segundo (serie ALS de Leica Geosystems), siendo la cota el atributo adquirido más utilizado ya que permite la posibilidad de crear Modelos Digitales del Terreno (DTM) y de superficie (DSM) por debajo de los 5m de paso de malla que no se han visto afectados por sombras causadas por otros objetos o cubiertas, como les ocurre a los obtenidos mediante fotogrametría (Hyde *et al.* 2006). La ventaja de estos sistemas extensivos frente a las técnicas fotogramétricas se debe a que gracias a su sensor activo permite discriminar los diferentes pulsos láser y con ello diferenciar y clasificar diferente tipo de información. Sin embargo, los costes son mayores y la densidad de las nubes de puntos es mucho menor que los sistemas basados únicamente en técnicas fotogramétricas. Su uso poco a poco se está extendiendo gracias a la facilidad en la descarga de información y uso en programas *open source*, como por ejemplo SAGA GIS (*System for Automated Geoscientific Analyses*)⁴⁴.

42 <http://www.ideo.es/europeo-inspire> (último acceso: noviembre de 2017).

43 http://www.ign.es/web/comparador_pnoa/#map=5/-670143.33/4551210.92/0

44 <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (último acceso: noviembre de 2017).

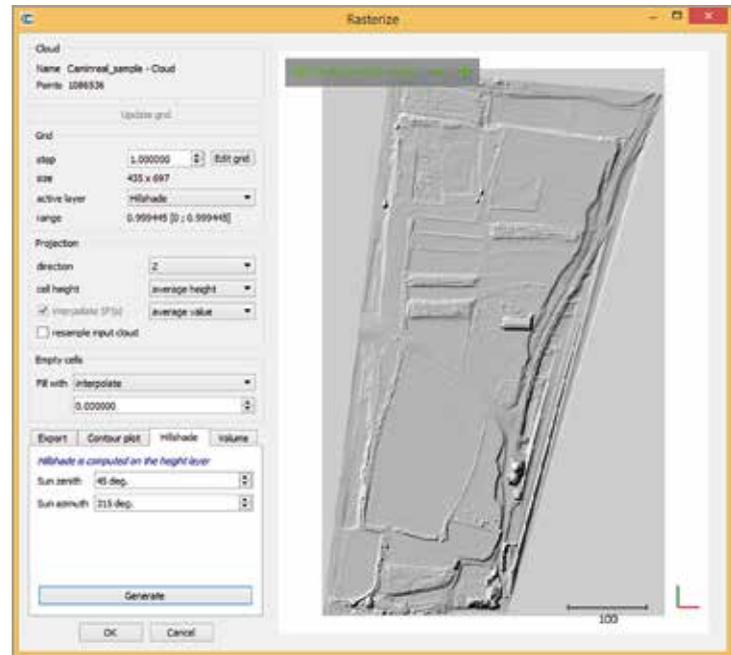


FIG. 53. Tratamiento de los datos LiDAR del yacimiento arqueológico de La Caridad (Caminreal) con *software* de código abierto CloudCompare. Proyecto realizado con la colaboración y dirección científica del Museo de Teruel. Cartografía de Joan Cano.

2.4.2.4. Mobile Laser Scanning (MLS)

Por último dentro de los sistemas *Scanning* destacamos la proliferación de sistemas móviles (motorizados, en carro o de mochila) para interior y exterior, denominados MLS. Estos sistemas trabajan de manera cinemática gracias a una unidad de medición inercial (IMU), provista con varios acelerómetros y giróscopos que orientan de un modo automático, en tiempo real, la nube de puntos que va adquiriendo el haz láser. Si además, a estos sistemas le sumamos un sistema de posicionamiento referido a un sistema de coordenadas, con un sensor GNSS o estación total, proporciona una gran versatilidad y velocidad para la documentación geométrica, tanto de grandes espacios si lo motorizamos, por ejemplo en un vehículo, o bien en espacios interiores arquitectónicos complejos o cuevas. La precisión horizontal y vertical de estos sistemas puede variar



FIG. 54. Adquisición de datos con el sistema *mobile laser scanning* GeoSlam para documentación tridimensional en entonos subterráneos.

dependiendo del sistema entre uno y cinco centímetros. Verdaderamente constituyen el futuro de los sistemas denominados *scanning* y, en los próximos años pronosticamos una mayor implantación sobre los TLS.

Dentro de estos sistemas destacamos la tecnología SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) que igualmente mezcla datos de medición de un escáner con datos de la posición de la IMU y mediante el reconocimiento de características u objetos por medio del algoritmo SLAM, proporciona una nube de puntos registrada. Este sistema es muy apropiado para documentar espacios complejos interiores o subterráneos cuando no necesitamos una precisión mayor de dos a tres centímetros.

2.5. La era de la computación y el desarrollo del software

2.5.1. Técnicas de correlación automática de imágenes (SfM) para reconstrucciones tridimensionales: aeronaves RPAS o drones

Resulta necesario matizar, a modo de preámbulo de este apartado, que este tipo de técnicas se aplican actualmente tanto al registro de objetos (*vid. infra* apdo. 3.1.1), como a arquitectura o estructuras arqueológicas (*vid. infra* apdo. 2.5.2). Por consiguiente, dado que estos ejemplos se explicarán a lo largo de este estudio, el siguiente punto se centrará en su aplicación mediante drones.

Dentro del panorama actual de nuevas herramientas usadas para la documentación de bienes muebles e inmuebles en patrimonio, destacamos la proliferación de múltiples tipos de *software* (citaremos a modo de ejemplo: Photoscan⁴⁵, APS⁴⁶, Pix4D⁴⁷, Ensomosaic⁴⁸) basados en técnicas fotogramétricas de correlación automática de imágenes (SfM), comerciales y *open source*, como factor que ha permitido, prácticamente desde el surgimiento de los drones, un gran avance para procesar las imágenes aéreas y terrestres con el objetivo de realizar desde reconstrucciones 3D, clasificaciones de nubes de puntos y con ello propiciar una marcada autogestión del proceso de trabajo.

Para obtener una correcta documentación fotogramétrica de una zona arqueológica es necesario realizar, en primer lugar, una estrategia en la planificación del vuelo, teniendo en cuenta el GSD que queremos obtener. De esta manera, si partimos de un *software* de planificación automático como eMotion3 o Mission Planner, nos calculará, dependiendo del tipo de cámara y focal, el solape necesario longitudinal-transversal y la altura de vuelo para obtener esa resolución. En cambio, otro tipo de *software* de planificación como MK-Tool únicamente calcula *waypoints* y altura de vuelo, por lo que será necesario establecer unos cálculos que introduciremos posteriormente en el programa, teniendo en cuenta las características del tipo de sensor que utilizemos. En la planificación situaremos los puntos programados que debe seguir el dron: velocidad de ascenso, velocidad de desplazamiento x,y, altura en cada posición, y paradas para cada toma fotográfica, que una vez planificadas enviaremos mediante un enlace radio a la memoria interna del autopiloto del dron. Además, habrá que tener en cuenta el cálculo de varios parámetros con los cuales determinaremos la calidad final de la ortofoto, estos factores son: altura de vuelo, resolución de la cámara,

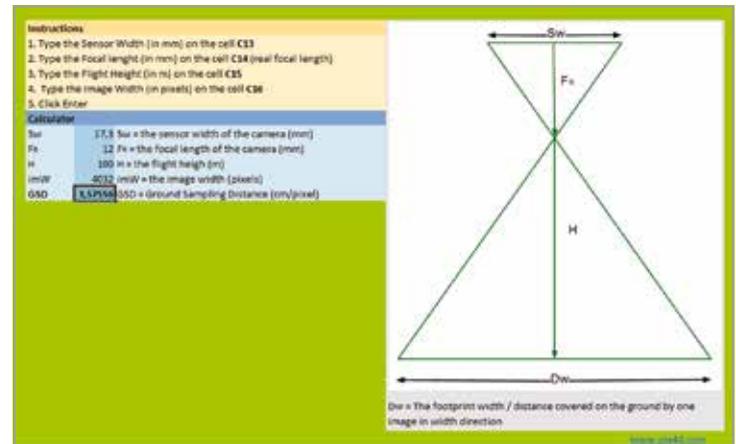


FIG. 55. Ejemplo de hoja de cálculo libre del programa Pix4D donde se pueden extraer los parámetros del GSD, introduciendo las características del sensor, resolución, longitud focal y la altura de vuelo. Cálculo de un ejemplo de vuelo con una cámara Olympus EPM 1 y un objetivo de 12 mm a 100 m de altura. Adaptación de: www.pix4d.com

ra, longitud focal y cálculo del solape necesario entre imágenes. El análisis de todos estos parámetros sirve para calcular la resolución final del píxel de la ortofoto.

Asimismo existe la opción de realizar un control manual del dispositivo a través de un sistema de vídeo con gafas virtuales o monitor del propio ordenador, con el fin de realizar un control y toma de imágenes mediante la técnica FPV (*First Person View*). Incluso se pueden administrar diferentes cámaras en el dron (normalmente una frontal en el avance y la propia cámara colocada en el servo) con el fin de conmutar las diferentes cámaras para realizar las tomas fotográficas de un modo manual desde la emisora.

Respecto al dibujo tridimensional sobre la colección de imágenes que proporciona el dron, sigue perdurando el sistema de dibujo mediante técnicas estereoscópicas. Estas técnicas no resultan una novedad en sí mismas, puesto que la fotogrametría aérea clásica lleva décadas usándose con esta finalidad. El avance actual ha sido poder utilizar este tipo de información con datos de un dron para poder desarrollar un dibujo planimétrico contemplando además la cota. Los programas clásicos de dibujo estereoscópico tienen problemas a la hora de importar este tipo de información recopilada por drones, principalmente por las variaciones e inestabilidad entre los tres ejes angulares (actitud)⁴⁹ que existen en la trayectoria de un dron (Yang, 2016). Normalmente este tipo de programas importan las imágenes con un preprocesamiento previo de las imágenes con las orientaciones adquiridas. De esta manera, resulta más sencillo, rápido y preciso dibujar con unas gafas 3D y una pantalla de 120 Hz. mediante este tipo de imágenes que sobre una nube de puntos.

Por último, conviene destacar, a modo de nuevas perspectivas en este apartado, las funcionalidades recientes de «clasificación por objeto» basadas en nubes de puntos obtenidas por técnicas de fotogrametría aérea. Este tipo de procesos más propios de la clasificación digital de la teledetección (Chuvienco, 2010:383) y de otro tipo de *software* como Erdas (*Imagine Objective*) centrados en imagen de satélite, está teniendo un calado profundo en los programas basados en técnicas SfM (eCognition, Photoscan). Pix4D, por ejemplo, en las últimas actualizaciones (4.0) ofrece una clasificación de las nubes de puntos mediante técnicas de aprendizaje automático ba-

45 <http://www.agisoft.com/> (último acceso: noviembre de 2017).

46 <http://www.menci.com/>

47 <https://pix4d.com/>

48 <http://www.mosaicmill.com/>

49 La actitud en aeronáutica es la posición que define la aeronave respecto al horizonte y resulta esencial para mantener su control. Los 3 ángulos se denominan cabeceo (pitch), alabeo (roll) y guiñada (yaw). Para las técnicas de fotogrametría aérea, resultan igualmente claves junto con el solape longitudinal y lateral en la trayectoria del vuelo.

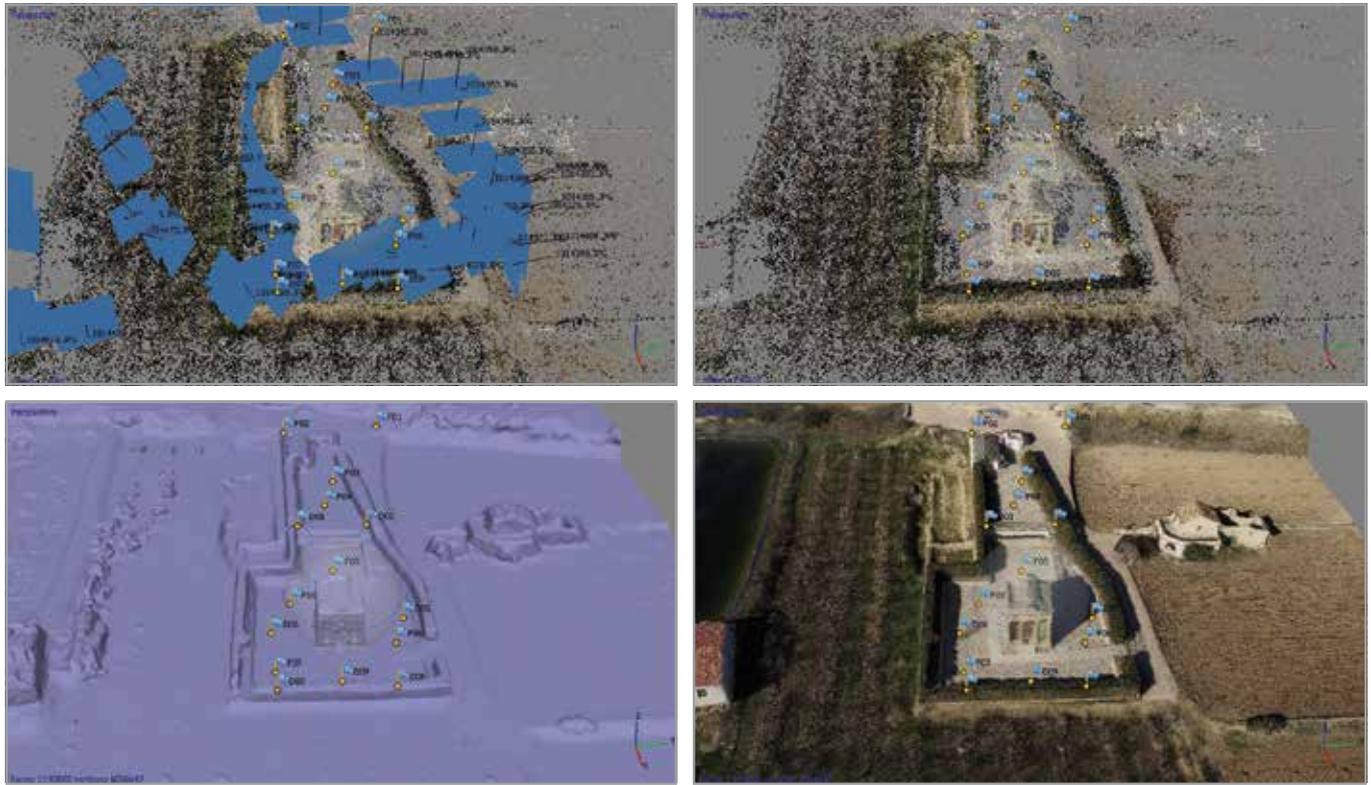


FIG. 56. Proceso de reconstrucción tridimensional con el programa *Agisoft Photoscan* por correlación automática de imágenes aéreas (orientación, generación de una nube de puntos densa, mallado y aplicación de textura) del Mausoleo romano de Fabara (Zaragoza). Documentación geométrica combinada con un TLS de diferencia de fase para la arquitectura interior*.

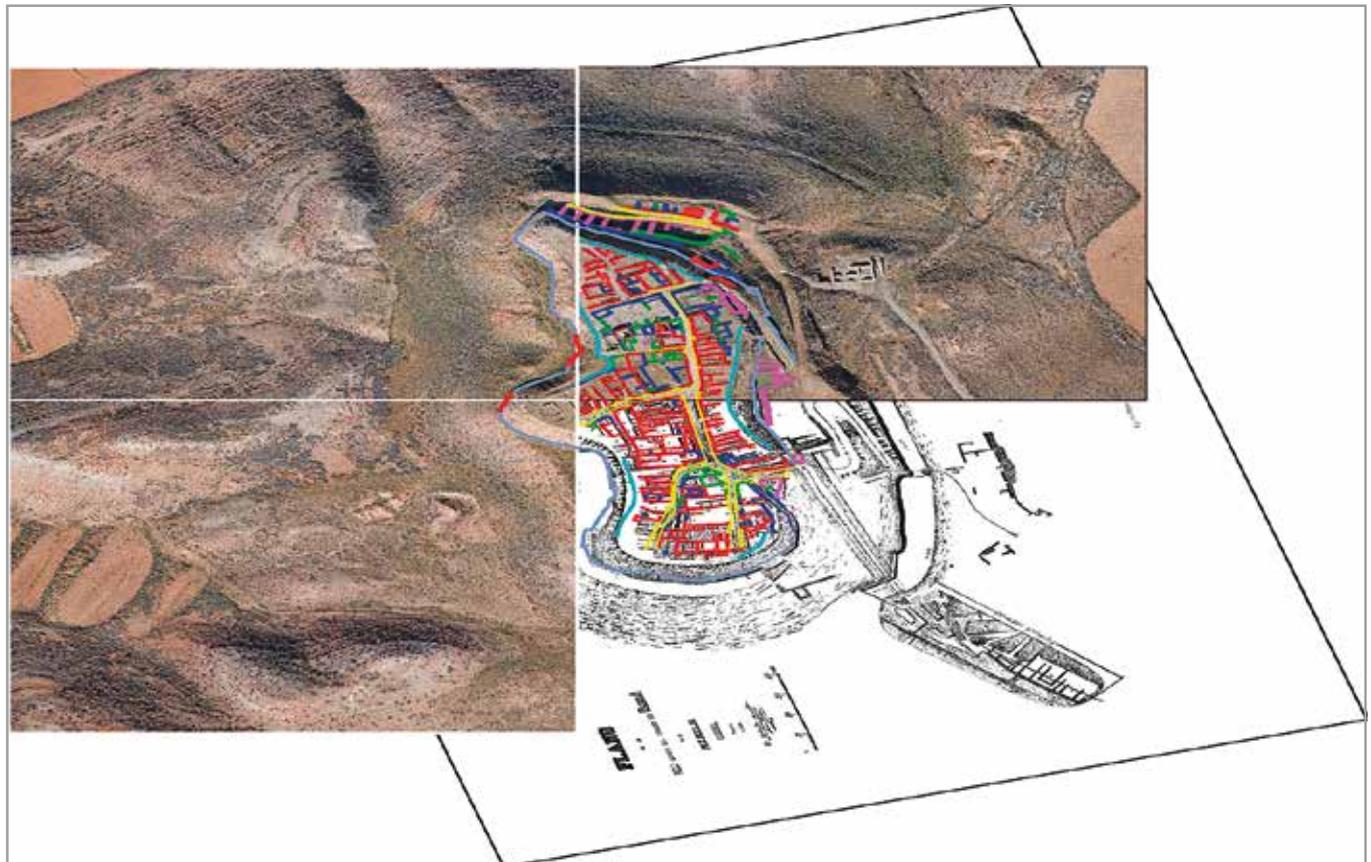


FIG. 57. Dibujo mediante técnicas estereoscópicas con el *software* StereoCAD (<http://www.menci.com/en/mapping-editing/stereocad.html>) de la planimetría del yacimiento arqueológico del Cabezo de Alcalá (Azailla, Teruel) en 3 dimensiones sobre las imágenes orientadas del vuelo realizado con un sistema de ala fija eBee Plus RTK / PPK. En este dibujo se ha incluido una capa con la planimetría (alineada y georreferenciada) realizada por el arqueólogo calaceitano Juan Cabré en 1944 (Beltrán, 1976: 26) para comprobar las discrepancias con los restos arqueológicos existentes.

* Proyecto de documentación geométrica realizado conjuntamente con la arquitecta Beatriz Gimeno.

sado en la geometría e información del color⁵⁰. Clasificando la nube de puntos densa, por el momento, en cinco grupos: tierra, carreteras, edificios, vegetación alta y estructuras u objetos artificiales.

Sin embargo, hemos realizado varias experimentaciones con datos recolectados en diferentes periodos fenológicos y diferentes yacimientos arqueológicos en el valle medio del Ebro, y por el momento resulta una técnica que no proporciona unos datos relevantes en la arqueología, principalmente por la alta heterogeneidad espacial y complejidad espectral de los suelos arqueológicos. No obstante, el aprendizaje de este tipo de técnicas *machine learning* y *e-learning*, mezclando información geométrica, espectral y patrones conocidos representará un punto de avance que al menos servirá para generar modelos predictivos en la arqueología de los próximos años.

Todas estas técnicas anteriormente descritas se complementan perfectamente con otro rango de técnicas de prospección geofísica. La combinación de datos de cada una de ellas proporciona una cartografía muy precisa sobre los posibles resultados que podemos encontrar soterrados en yacimientos arqueológicos. Este factor proporciona una modelización previa a cualquier intervención que permita determinar «a la carta» la mayor información posible para determinar la viabilidad o no de cualquier excavación arqueológica.

En conclusión, este hecho redunda en un mayor conocimiento y preservación del patrimonio soterrado sin necesidad de una intervención física.

2.5.2. Técnicas de registro geométrico de bajo coste

Existe un amplio abanico de técnicas de bajo coste para la documentación del patrimonio cultural que se suman a la cada vez más numerosa cantidad de *software* de gestión *open source* y *free software*. En algunos casos, la existencia de este tipo de alternativas abiertas están enfocadas a propiciar un mayor consumo de otra clase de productos, sin embargo, en muchos casos son verdaderas iniciativas por sí mismas, y algunas como plataformas de desarrollo colaborativas, dirigidas a la utilización de esta alternativa cada vez más influyente para la adaptación de las necesidades de cada usuario. En la arqueología, por ejemplo, existe desde el año 2006 una tendencia vinculada al *workshop* y posterior congreso ArcheoFOSS (*vid. infra*) centrado en «Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica». Toda esta nueva tendencia surge como respuesta al aumento tecnológico donde en muchas ocasiones resultan verdaderamente útiles gracias a las plataformas de desarrollo colaborativo como GitHub (<https://github.com>).

En consecuencia, podemos observar como estas herramientas de bajo coste, sobre todo ligados a técnicas de fotogrametría, han adquirido un gran interés en los últimos diez años en diferentes campos del patrimonio cultural y sobre todo en la rápida documentación arqueológica (Mascione, 2006: 33-37)⁵¹. Si bien el empleo de técnicas clásicas, como la triangulación con cintas métricas y niveles sigue perdurando como método rápido para localizar estructuras u objetos dentro de una zona arqueológica (Sancharico, 2007:

50 Vid. Becker, et al. (2017): «Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds», *Scientific White paper Pix4D*. <https://arxiv.org/pdf/1705.08374.pdf> (último acceso: octubre de 2017).

51 Mascione (2006) divide claramente las fases del proyecto desde el levantamiento topográfico en la definición del método y técnicas de documentación directa y a través de instrumentos topográficos, el trabajo en campo y el trabajo en laboratorio.

TABLA 5

Relación y clasificación de los principales programas *open source* y *free software* consultados

PROGRAMA INFORMÁTICO	CLASIFICACIÓN
GLC Player ⁵²	Visualizador de modelos 3D
Vrml viewer ⁵³	Visualizador de modelos 3D
MeshLAB ⁵⁴	Editor de información 3D
CloudCompare ⁵⁵	<i>Software</i> de edición de nubes de puntos
Blender ⁵⁶	Editor y modelado 3D
3D Vem ⁵⁷	Editor de modelos 3D
Leica Truview ⁵⁸	Plug-in para visualizador de datos de escáner 3D Leica
ICE. Image Composite Editor ⁵⁹	Creación de imágenes panorámicas
Arc 3D ⁶⁰	Reconstrucción 3D mediante imágenes
U3D ⁶¹	Gestor de modelos 3D
Robotics Lab ⁶²	Simulación, control y visión artificial
Microsoft Photosynth ⁶³	Correlación de imágenes para reconstrucción 3D
ReCap Photo ⁶⁴	Correlación de imágenes para reconstrucción 3D
Poivilliers F ⁶⁵	Fotogrametría
Adobe Acrobat Reader DC ⁶⁶	Gestor de modelos PDF3D
Notepad ++ ⁶⁷	Gestor de plantillas xml o html
CatMDedit ⁶⁸	Editor metadatos
Geonetwork ⁶⁹	Catálogo de recursos geoespaciales
Arduino ⁷⁰	Programación robótica
Gvsig ⁷¹	Sistemas de información geográfica
QGIS ⁷²	Sistemas de información geográfica
SAGA GIS ⁷³	Sistemas de información geográfica
Openstreetmap ⁷⁴	Sistemas de información geográfica

52 <http://www.glc-player.net/> (último acceso: octubre de 2017).

53 <http://sourceforge.net/projects/vrmlviewer/>

54 <http://meshlab.sourceforge.net/>

55 <http://www.danielgm.net/cc/>

56 <https://www.blender.org/>

57 http://www.gifle.webs.upv.es/3dvemregister_en.html

58 http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-TruView_63960.htm

59 <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/projects/ice/>

60 <http://www.arc3d.be/>

61 <http://sourceforge.net/projects/u3d/>

62 <http://sourceforge.net/projects/roboticslab/?source=directory>

63 <https://photosynth.net/>

64 <http://blogs.autodesk.com/recap/introducing-recap-photo/>

65 <http://yves.egels.free.fr/Soft/telecharger.html>

66 <http://www.adobe.com/es/>

67 <https://notepad-plus-plus.org/>

68 <http://catmdedit.sourceforge.net/>

69 <http://geonetwork-opensource.org/>

70 <https://www.arduino.cc/>

71 <http://www.gvsig.com/es>

72 <http://www.qgis.org/es/site/>

73 <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

74 <http://www.openstreetmap.es/>

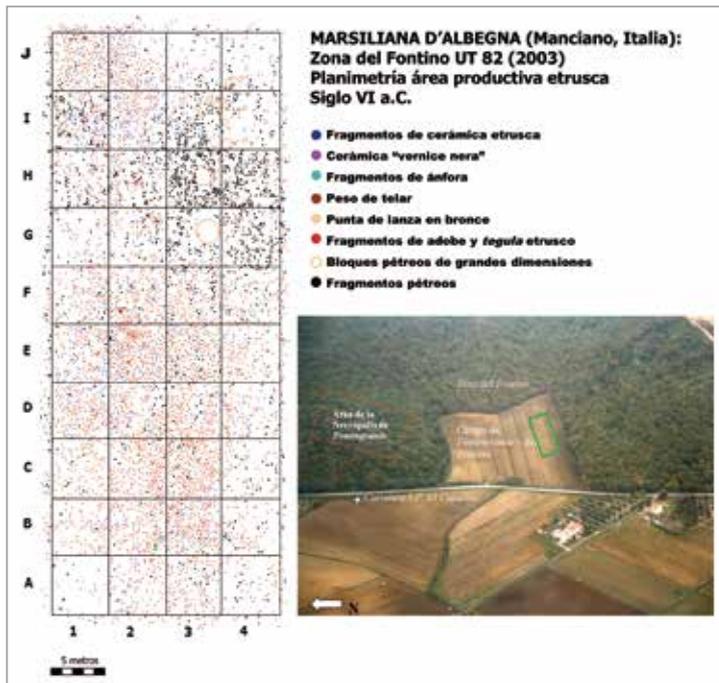


FIG. 58. Planimetría sobre la concentración de un área productiva etrusca del siglo VI a.C. y prospección aérea con su ubicación (delimitación verde) junto a la necrópolis de Fontingrande (Marsiliana D'Albegna) (Angás, 2005: 84).

101-104)⁷⁵. Por otro lado, la topografía de cuevas ha sido históricamente bien documentada gracias, sobre todo, a los grupos de espeleología, desde aproximadamente los años 70 del pasado siglo. Se han realizado verdaderas planimetrías con un alto grado de detalle mediante simples brújulas, clinómetros y cintas métricas. Actualmente estas herramientas han sido suplidas por pequeños distanciómetros láser que poseen además de medición por láser un clinómetro integrado y una brújula. Para toda esta disciplina existen manuales específicos como por ejemplo *Topografía Espeleológica* de Albert Martínez (1992) editado por la Federación Española de Espeleología.

Como ejemplo de documentación, destacaremos varias registros realizados en el año 2003, mediante el empleo de sistemas de registro básicos: la individuación de la necrópolis etrusca de Fontingrande (Marsiliana D'Albegna, Italia) situada en una colina con una densa vegetación en paralelo al kilómetro 18,8 de la carretera S.P. 63 Marsiliana-Capalbio. En este caso se documentaron 250 tumbas de cámara, excavadas directamente en la roca de travertino, mediante la localización del punto central o centroide de acceso con técnicas de triangulación en una superficie de aproximadamente una hectárea (Angas 2005: 65-94)⁷⁶. La dificultad en el empleo de otro tipo de técnicas (estación total o sistemas GNSS) por la densa vegetación

75 El manual dedicado a los conceptos y elementos básicos de topografía aplicados a la arqueología de Sanchirico (2007) es un excelente ejemplo introductorio, aunque más básico que el anterior de Mascione (2006). Describe conceptos elementales como una primera aproximación, desde un punto de vista práctico para una excavación o prospección arqueológica. En este sentido, describe el uso y preparación de la cartografía general para una prospección a instrumentos topográficos en una excavación arqueológica para realizar perfiles, triangulaciones, toma de coordenadas, etc.

76 Este ejemplo corresponde al trabajo realizado para el Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en el año 2004 titulado «Hacia una definición de la frontera noroccidental del territorio vulcente siglos VIII-III a.C.» (Universidad de Zaragoza), completado en los dos primeros años predoctorales cursados en la *Università degli Studi di Siena* (Italia). El trabajo de campo es el resultado de cuatro campañas (2002-2005) de prospección y excavación dirigidas por Andrea Zifferero en la zona de Marsiliana d'Albegna (Manciano, Grosseto. Región de la Toscana) con el *Insegnamento di Etruscologia e Antichità Italiane. Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti (Università degli Studi di Siena)*.

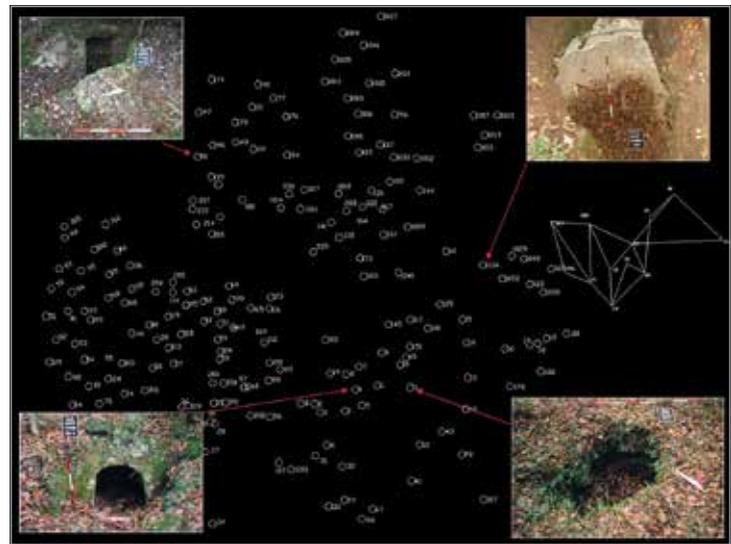


FIG. 59. Ejemplo de la metodología aplicada y dibujo en CAD del «Progetto Marsiliana d'Albegna» dirigido por Andrea Zifferero, mediante técnicas de triangulación de las 250 tumbas etruscas de cámara en la necrópolis etrusca de Fontingrande (Marsiliana d'Albegna) de finales del siglo VII-VI a.C.

permitió apostar por este clásico planteamiento con óptimos resultados. La técnica de aplicación en campo de este sistema es relativamente sencilla, mediante la localización de una línea base con puntos georreferenciados se van estableciendo triangulaciones con una cinta métrica nivelada que posteriormente dibujaremos coordenadas (x,y) sin la cota en un sistema CAD. La delineación en laboratorio, con las medidas anotadas, se realizó mediante el dibujo de dos círculos desde dos puntos o línea base, previamente medidos, trazados con la medida del radio anotada en campo, donde se cortan refleja el punto que queremos localizar. La desventaja en la utilización de esta técnica es que podemos acumular bastantes errores si únicamente partimos de una línea base y no comprobamos otras medidas de referencia. Sin embargo, permite la localización de diferentes elementos con muy pocos medios. Además, si posteriormente realizamos una nivelación doble de la zona mediante un nivel óptico, podemos establecer las cotas de cada una de las tumbas.

Como ejemplo de otra técnica de registro de bajo coste arqueológica, citaremos la que emplea Valle (2007: 117-154), dirigida a la creación de un protocolo de métodos alternativos de documentación geométrica para excavaciones arqueológicas que permita un ahorro de recursos en campo mediante la automatización de un proceso. En concreto, desarrolla un protocolo para los 250 enterramientos del yacimiento de «La Inquisición de Logroño». Para ello se adopta un método sencillo basado en la introducción ordenada de datos en una hoja de cálculo asociando una medidas entre dianas a unas fotografías, con el objetivo final de vectorizar una imagen rectificadas y conseguir un ahorro de los recursos en campo y en gabinete del orden del 50%.

En la arquitectura destacamos varios trabajos de Almagro (2010: 26-45) y (2013: 13-18) en la búsqueda de unas técnicas de bajo coste que permitan una rápida documentación sin una planificación previa y con una instrumentación básica (distanciómetro láser y una cámara de fotos). Almagro en estos trabajos utiliza el programa libre *Povilliers F*, muy extendido en excavaciones arqueológicas en Francia, desarrollado por el ingeniero del *Institut Geographique National* (Francia) Yves Egels⁷⁷. Permite un sistema de visión tridimensional tanto por las clásicas gafas de anaglifo como por pantallas más avanzadas de 120 Hz con gafas 3D Nvidia. Si analizamos otro tipo de técnicas de documentación, encontra-

77 <http://yves.egels.free.fr/Soft/telecharger.html> (último acceso: septiembre de 2017).

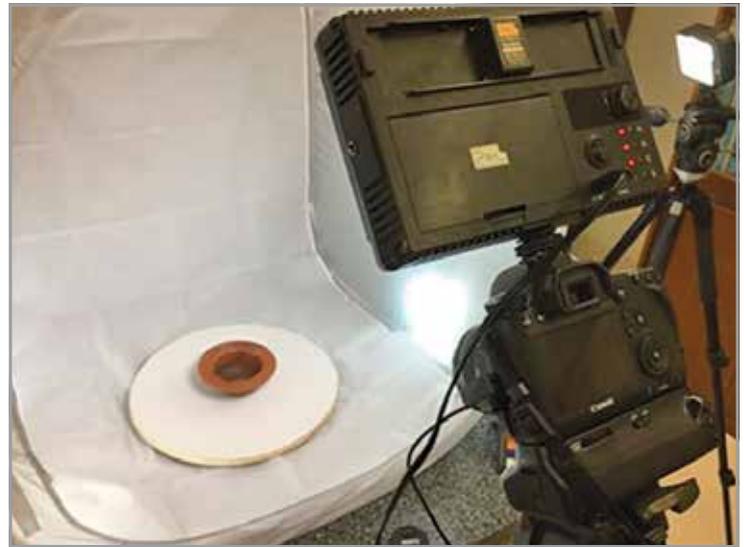


FIG. 60. Técnicas de documentación fotogramétrica aplicadas para bienes muebles en el Laboratorio del Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología de la Universidad de Salamanca.

mos varios ejemplos de técnicas de bajo coste con el empleo de drones, que sin duda son una excelente plataforma de arqueología aérea de baja altura Hill (2013: 25-29), algunas de estas propuestas utilizan sensores modificados de infrarrojo cercano (NIR) Verhoeven (2008: 3087-3100) como una herramienta muy útil y económica en la teledetección de estructuras arqueológicas no visibles por sensores RGB convencionales. Sobre todo, si comparamos la modificación de este tipo de filtros en una cámara convencional con otro tipo de cámaras multispectrales profesionales (Tetracam, MultiSpec).

Analizando los ejemplos anteriormente citados, extraemos a modo de reflexión que no existe duda sobre cómo la fotogrametría ha recuperado cierto protagonismo, frente a otros sistemas como los escáneres tridimensionales, mediante las técnicas de correlación automática de imágenes y reconstrucción tridimensional. Actualmente es la técnica que mejores resultados puede proporcionar para solventar con pocos recursos una documentación con una precisión centimétrica, aplicable tanto en una excavación arqueológica como en un objeto mueble o en un alzado arquitectónico. Únicamente necesitaremos una cámara de fotos y, si queremos el modelo escalado, será ineludible tomar varias medidas sobre el objeto, excavación arqueológica o zona del inmueble que sirvan de patrón para el resto del modelo. Para la toma de imágenes existen varios métodos dependiendo de la naturaleza del objeto:

a) Para objetos deberemos recorrer con el suficiente solape la zona a documentar y preferiblemente a varias alturas, foto-

grafando de manera perpendicular el objeto conservando siempre la misma distancia al mismo.

b) Si se trata de una planta, por ejemplo de una excavación arqueológica, la técnica es similar a la de un sistema dron o RPAS pero para una zona mucho más reducida, por lo que será necesario realizar una buena planificación teniendo en cuenta la longitud focal de la cámara, resolución que utilizamos y la altura para establecer el GSD que obtendremos. Para ello, resulta frecuente y recurrente el uso de miras topográficas, de entre cuatro o cinco metros, reutilizadas para incorporar en su extremo una rótula con una cámara fotográfica. Una vez seleccionado el ángulo que fije la cámara perpendicular al terreno, y asegurándonos de que la huella de la imagen no captura otro tipo de elementos externos, el disparo de la cámara se puede realizar a intervalos regulares utilizando sistemas externos de intervalómetro incorporado, programado o mediante un sistema inalámbrico⁷⁸. Para la elaboración del caso de es-

78 Existen varias alternativas al clásico sistema de intervalómetro externo en varios modelos de cámaras si no poseen la función de programación del disparo a intervalos. Por ejemplo, para Canon existen aplicaciones de desarrollo en las gamas bajas de cámaras compactas con los programas *open source* CHDK <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK> y en las gamas más altas con cámaras réflex y *full frame* con Magic Lantern <http://www.magiclantern.fm/>. Ambos sistemas se instalan en la tarjeta de la cámara e incorporan un gran número de funcionalidades, entre ellas el intervalómetro integrado. Para Olympus, por ejemplo, no existen estos programas pero se puede recurrir a programar la elevación del espejo de la cámara y disparo continuo, mediante ráfaga controlada por tiempo. Con este sistema podemos controlar cada cuántos segundos adquirimos una foto-

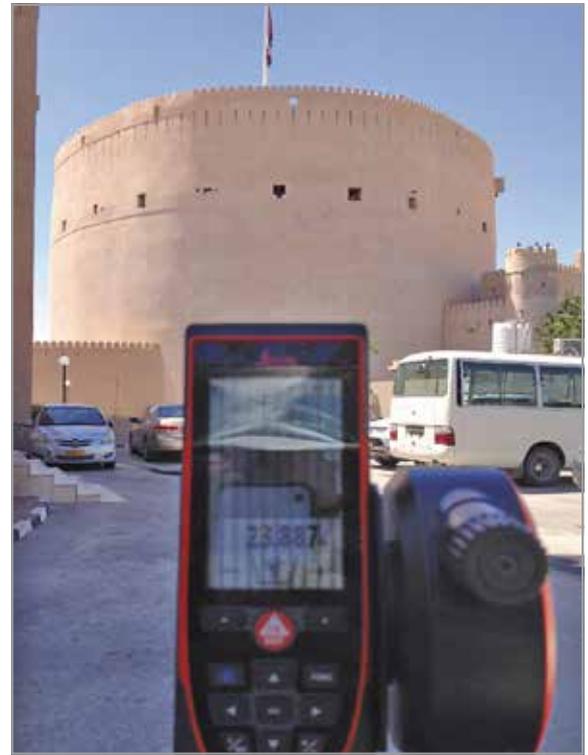


FIG. 61. Ejemplo de documentación con técnicas de bajo coste. Utilización de un distanciómetro láser con sensor de inclinación sobre trípode para modelado tridimensional arquitectónico de la torre de Nizwa (izda.) y el fuerte de Khandaq en Buraimi (dcha.) en el Sultanato de Omán.

tudio del Valdeherrera y Labitolosa (*vid. infra*) se ha utilizado este sistema debido a la automatización, reducción en costes y su flexibilidad en la toma de datos. El material más común suele ser fibra de vidrio o aluminio que permite cierta elasticidad en el cimbreo de la cámara en su extremo. Pese al movimiento de la cámara, la combinación de velocidades altas de disparo con un diafragma adecuado, evita la trepidación de las imágenes en zonas con alta luminosidad.

- c) En arquitectura la técnica aplicada es la misma, tomando imágenes a intervalos de distancias y alturas regulares con el suficiente solape entre imágenes manteniendo la misma distancia al objeto a documentar. Para la toma de medidas se pueden utilizar distanciómetros láser que proporcionan diferentes cálculos de alturas, distancias entre puntos y radios para estructuras circulares como en el ejemplo (*vid. infra*) de la torre de Nizwa (Sultanato de Omán). En este caso la documentación con herramientas de bajo coste fue una constante, por la escasez de tiempo y logística del territorio, para la generación de un modelo a escala basándose en medidas reales e imágenes.



FIG. 62. Sistema de pértiga portátil extensible de 5 metros para su uso mediante técnicas fotogramétricas en áreas arqueológicas. Yacimiento arqueológico «El Castillo» Villarroya del Campo (Zaragoza). Fot. Francisco Javier Gutiérrez.

grafía. Actualmente existe una gran diversidad en modelos de cámaras y programas (EOS Connect y EOS Remote) que incorporan conexión inalámbrica wifi permitiendo el control a distancia desde un dispositivo móvil o si lleva un sensor GNSS integrado, mediante disparo por intervalo de coordenada como el sensor multiespectral Sequoia (*vid. supra*).



3. Ensayos metodológicos en el proceso documental



3. Ensayos metodológicos en el proceso documental

La representación tridimensional no constituye por sí sola un cambio conceptual ni metodológico frente a la clásica representación bidimensional del patrimonio. El verdadero cambio tecnológico reside en la sustitución de la representación mediante un soporte físico por un conjunto de posibilidades digitales. Ahora bien, las clásicas representaciones de perspectiva axonométrica utilizadas recurrentemente en arquitectura de planta, alzado y sección no han quedado obsoletas puesto que las mismas representaciones en modelos tridimensionales están subyugadas a la utilización de un soporte físico para su estudio. Este problema lo hemos visto constantemente en publicaciones arqueológicas, si bien, resulta un largo proceso discordante entre tecnología y metodología donde las posibilidades de aplicación únicamente vienen establecidas por una estandarización de los procesos y la capacidad de interrelación con otras disciplinas¹. El desarrollo tecnológico movido por la propia economía ha ido un paso por delante de cualquier nueva implantación metodológica. Por esta razón, la mayor dificultad ha consistido en el tratamiento postprocesual y en la gestión de la información tridimensional, como, por ejemplo, la utilización de nubes de puntos generadas por el barrido láser, las mallas de escáneres de luz blanca estructurada o modelos tridimensionales generados por correlación automática de imágenes tanto aéreas como terrestres mediante *Structure From Motion* (SfM) que utiliza únicamente fotografías con un solape longitudinal y transversal (Photoscan, Pix4D, Photomodeler, ReCap Photo, etc)². Por ello, es preciso un trabajo combinado y relacionado con diferentes programas informáticos dentro del conjunto de ciencias que integran el concepto de Geomática para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica (también denominada espacial o geoespacial): la Topografía, la Geodesia, la Cartografía, la Fotogrametría y la Teledetección³.

En muchas ocasiones resulta necesario convertir el modelo tridimensional en un fichero bidimensional para su representación y con ello facilitar su gestión en otro tipo de programas informáti-

1 Vid. Forte, M. (2006): "Tra conoscenza e comunicazione in archeologia: considerazioni in margine alla terza dimensione", pp. 23-40.

2 Actualmente existe una gran variedad de este tipo de *software* tanto para aplicaciones aéreas como terrestres que permiten la generación de modelos de un modo sencillo incluso para usuarios sin unos conocimientos previos con sistemas de procesamiento *online*. Esta variedad también ha contribuido a la denominada democratización de los modelos tridimensionales.

3 Vid. n. 2, apdo. Introducción.



FIG. 63. Evolución diacrónica de las técnicas de documentación del patrimonio cultural en los últimos 150 años y su relación con las necesidades actuales.

cos, también estas necesidades son requeridas en el modo de representación gráfica de los soportes físicos. En este sentido, trabajar con modelos tridimensionales requiere previamente una permeabilización conceptual del espacio donde queremos representar el bien mueble o inmueble. Tenemos, por ejemplo, la capacidad de interpretar el paso de un modelo tridimensional de cualquier paramento arquitectónico a una ortofotografía y con ello representarlo en un soporte bidimensional⁴, desde aquí podremos delinearlo en cualquier sistema vectorial y obtener mediante su interpretación una lectura de paramentos. No obstante, se trata de un proceso no destructivo ya que siempre podremos retomar la nube de puntos original y realizar cualquier otro tipo de análisis. El uso de este proceso de abstracción e interpretación resulta subjetivo, pero necesario para comprender, una vez finalizada la documentación, cualquier monumento arquitectónico: «el dibujo de línea obliga a una simplificación del objeto basada en una selección de los elementos más significativos, que pese a su subjetivismo, facilita la compren-

4 Mediante mapas de elevación o disparidad se obtiene una conceptualización del espacio tridimensional en un soporte bidimensional. Se consigue asociando una degradación de colores a una leyenda métrica determinando el plano vertical.

sión del edificio» (Almagro, 2011: 36). Esta abstracción como instrumento de comprensión resulta una constante si requerimos de una interpretación del modelo (*vid.* apdo. 4.1. «Clasificación de los resultados obtenidos») y FIG. 223).

Si atendemos, por ejemplo, a qué nos proporciona la información de un escáner tridimensional, debemos entenderlo como un conjunto de datos brutos almacenados a modo de repositorio documental de los cuales extraeremos o compararemos información en cualquier periodo para cualquier estudio o análisis más exhaustivo, con el fin de establecer una documentación registrada y clasificada, de cualquier tipo de estructura ya sea mueble o inmueble, sin por ello olvidar su valía como documentación gráfica. Al mismo tiempo, permite crear dentro del campo patrimonial un verdadero archivo documental geométrico totalmente objetivo, desligado de cualquier tipo de interpretación por parte del técnico. Del mismo modo, es posible generar un modelo o réplica mediante técnicas de impresión 3D o mecanizado, de fabricación aditiva o sustractiva, a cualquier escala, de manera eficaz y sobre todo de manera fiel al elemento, pudiéndose detectar cualquier tipo de alteración o patología milimétrica en su morfología.

Mediante el modelo tridimensional de cualquier objeto o monumento arquitectónico resulta fácilmente reproducir este en cualquiera de los materiales y escala que nos permitan las impresoras tridimensionales, siempre y cuando el grado de precisión fijado al realizar el escaneado haya sido acorde con los objetivos a representar, estableciendo con ello una concordancia con la escala (Lodeiro, 1995:11)⁵. Desde el punto de vista de la historia de la arquitectura, prácticamente todos los autores coinciden con Almagro (2011: 36) en la importancia de la línea, pese a su subjetivismo, para interpretar un monumento arquitectónico y en su disección en planta, alzado y sección como un uso coordinado para comprender el carácter tridimensional, mediante la descomposición del edificio en proyecciones planas (Ortega, 2011:53). Como avanzaremos más tarde (FIG. 223), esta singularidad es exclusiva de la arquitectura puesto que la disección en proyecciones planas resulta mucho más compleja en otros tipos de bienes patrimoniales con geometrías con múltiples planos o caras complejas, como las cuevas y los abrigos con arte rupestre.

Tratamiento de la información

El capítulo dedicado a la topografía clásica dentro del análisis de las técnicas utilizadas (mediante estación total, nivel óptico y sistemas de posicionamiento satelital GNSS) representa el eje vertebral que fundamenta e incorpora geoméricamente todo el trabajo posterior del registro de los sistemas de escáner y fotogrametría ya que georreferencia, registra y controla la precisión del modelo. El carácter relevante del proceso previo de topografía clásica se establece al proporcionar los diferentes puntos de control (normalmente dianas o esferas) para unir los diferentes escaneados dentro de un mismo sistema de coordenadas; además, sirve también de referencia externa que permite controlar la precisión y ampliar, con la toma de más datos, periódicamente la estructura o cualquier fase de excavación arqueológica o estructura arquitectónica. Este factor implica un control dimensional sobre el modelo previo; por esta razón, es el elemento prioritario que garantiza la precisión final del modelo obtenido.

La información y datos generados tienen que estar estrechamente relacionados con los objetivos fijados del trabajo previo. La redacción de un anteproyecto o definición de objetivos puede resultar

5 La precisión es inherente a la escala de representación que vamos a necesitar para cada proyecto por lo que se establece una relación directamente proporcional entre la precisión y los costes de medios en campo, laboratorio y, en definitiva, costes globales del proyecto.

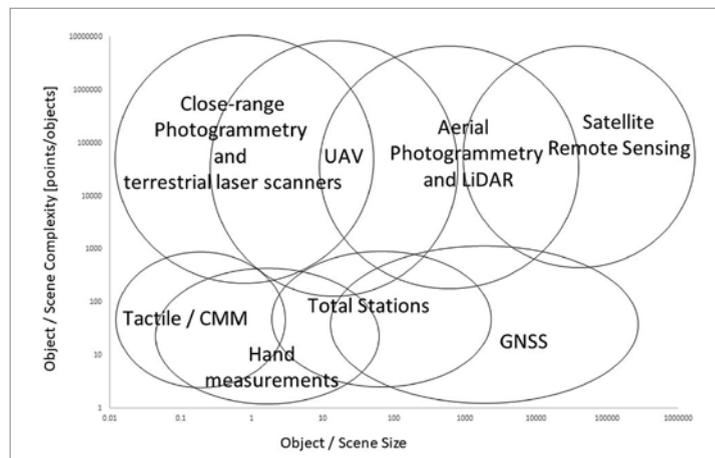


FIG. 64. Diagrama de las diferentes técnicas geomáticas para la captura tridimensional teniendo en cuenta dos vectores: el tamaño del objeto y la complejidad del modelo. Adaptación según Remondino (2014: 14).

obvio, pero frecuentemente encontramos un desajuste en la base a los planteamientos previos a la ejecución de cualquier proyecto de investigación. En los procesos de escaneado queda en ocasiones empañado el objetivo prioritario, que sin duda debe ser totalmente independiente de cualquier técnica y no quedar subordinado al medio al objetivo y con ello generar una discordancia. Por esta razón, el orden lógico es que, una vez fijados los objetivos y resultados, se establecerá la técnica o técnicas necesarias. Respecto a los datos generados, cada trabajo dentro del patrimonio es totalmente específico con una idiosincrasia particular y requiere de una técnica adaptada a los problemas que se quieren solventar.

Valorización y difusión de la información tridimensional: democratización de resultados en la sociedad de la información actual

Una vez postprocesados los datos, los resultados deben ser convertidos en archivos que puedan ser visualizados, gestionados y analizados mediante estándares informáticos. Esta simplificación o democratización es uno de los principales retos actuales ya que permitiría una investigación científica más amplia. A través de la creación de estos estándares se solventaría una de las claves del proceso metodológico, toda vez que este hecho además contribuye poco a poco a un cambio conceptual y metodológico que hace fácilmente intercambiable la información procesada. La normalización de un método a través de modelos contribuye a un proceso de permeabilización y comprensión técnica. Por ello, el resto de datos generados en el análisis de cualquier estructura u objeto a través de archivos del tipo de formato PDF3D o compatibles con navegadores que admitan WebGL (*vid. infra* apdo. 3.7) facilitarían la gestión tridimensional. Un camino por descubrir e investigar en los próximos años va directamente ligado a la gestión de los mismos archivos en bases de datos o servidores comunes a modo de fuente o archivo documental con un conjunto de metadatos, que en cualquier tiempo o espacio se pudiese extraer la información necesaria y poder reproducir gráfica y métricamente cualquier elemento o estructura patrimonial. Se trataría, sin duda, de un reto que debería de asumir las instituciones públicas. Sin embargo, la escasez de medios obliga a no disponer de la infraestructura adecuada para este almacenaje digital.

Como punto de avance dentro del conjunto de procedimientos, deberían contemplarse las siguientes premisas básicas:

- Unificación, a través de bases de datos utilizando estándares con formatos o lenguajes de programación con código abierto como JavaScript.

- Simplificación, con formatos comunes e intercambiables de software libre fácilmente comprensibles (*vid.* apdo. 3.7). Contribuyendo de este modo a un fácil entendimiento y por consiguiente a una mejor conceptualización de la información tridimensional con información accesible.

El efecto denominado «democratizador» de la sociedad de la información actual no es como hemos visto en la fotografía, que permite una amplia difusión y con ello una comprensión de cualquier usuario. Los denominados *open source* han contribuido a esta divulgación. Recordemos que existen ya congresos específicos dentro del campo arqueológico dirigidos hacia los formatos denominados de código abierto como el *ArcheoFoss 2015*⁶ (*vid. supra* apdo. 2.6): *Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica in Siena* (Italia) dentro del *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (CAA).

- Por último, es necesaria una especificación que recoja unas recomendaciones para la comprobación procesual, geométrica y, sobre todo, de la verificación de sus objetivos a través de un orden lógico de equilibrio y desarrollo.

3.1. Bienes muebles: digitalización y reproducción

3.1.1. Aplicaciones

El siguiente apartado expone las posibilidades de aplicación que ofrece la digitalización de objetos muebles en la documentación, el análisis y el intercambio de información. Estas técnicas permiten una rápida reproducción de colecciones completas en museos (Sánchez, 2014: 124-141) o en centros de investigación, constituyendo verdaderos repositorios digitales y documentales de información (Pletinckx *et al.* 2011). Igualmente la información procesada puede servir para un uso científico, como, por ejemplo, para la toma de medidas, secciones, análisis morfológicos de cada pieza o aplicación de filtros de decorrelación sin necesidad de utilizar el original. De todos estos factores se desprenden la «usabilidad y dinamización de la información», pudiendo enviar y publicar este tipo de archivos digitales a otros centros para su investigación. De este modo, se abre un amplio abanico de posibilidades de investigación y difusión que podemos denominar «réplicas digitales».

Sin duda, se establece toda una revolución puesto que en cuestión de segundos podemos analizar un modelo 3D de cualquier parte del mundo para su estudio, evitando cualquier tipo de riesgo en el transporte de la pieza arqueológica o escultórica. Además, constituye un ahorro en desplazamientos para su análisis, contratación de seguros para su traslado y, en definitiva, un flujo mucho más flexible y dinámico en la investigación arqueológica (Guidi *et al.*, 2015: 335-346).

En este sentido, hemos seleccionado tres ejemplos característicos de bienes muebles, realizados con diferentes técnicas, con fines relacionados con la docencia a modo de aprendizaje para el alumno a través de diferentes plataformas que admiten WebGL y PDF3D para la gestión de modelos tridimensionales:

⁶ ArcheoFOSS *Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica* arranca como workshop en el año 2006 en la sede de Grosseto de la Universidad de Siena organizado por el «Laboratorio di Analisi Spaziale e Informatica Applicata all'Archeologia» y el «Dipartimento di Matematica dell'Università di Parma» con el objetivo de tener un punto de partida de la situación relativa a la aplicación del software libre y *open source* en la arqueología <http://www.archeofoss.org/>. A raíz de este primer *workshop*, se ha ido consolidando con un carácter anual en diferentes universidades italianas.



FIG. 65. Detalle del modelo 3D realizado sobre la réplica de una lucerna romana mediante escáner de luz blanca estructurada del yacimiento arqueológico El Palao (Alcañiz, Teruel) s. I d.C.*.

- a) Digitalización de un objeto cerámico restaurado del yacimiento de Los Collados (Jaulín, Zaragoza) mediante un sistema portátil de escáner de luz blanca estructurada.



FIG. 66. Escaneado de un vaso de cerámica restaurado, mediante un escáner de luz blanca estructurada. La anchura de la boca permitió realizar el escaneado interior, obteniendo el modelo completo, apreciándose el grosor de las paredes. Imagen de la derecha: modelo en PDF3D y diferentes secciones de los ejes x, y, z.

* Modelo tridimensional adquirido con un escáner 3D de luz blanca estructurada sobre la réplica realizada y amablemente prestada por el ceramista Javier Fanlo del taller Lahuerva de Muel (Zaragoza).

- b) Digitalización de una réplica de cráneo del Laboratorio de Ciencias Histórico Geográficas de la Universidad de Zaragoza a través de un sistema combinado de escáner 3D de luz blanca estructurada y escáner de triangulación.
- c) Digitalización de un conjunto de piezas de cerámica romana como repositorio tipológico web con fines docentes en el Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología de la Universidad de Salamanca. El objetivo de este proyecto se centra en la creación de una colección digitalizada de cerámicas romanas para que el alumno se familiarice con las diferentes tipologías (*campaniense*, *terra sigillata* itálica, hispánica, gálica, ánfora, lucernas, etc.) a través de una plataforma de modelos tridimensionales de acceso libre *online*: <https://sketchfab.com/paula.uribe>

Las técnicas utilizadas en los dos primeros ejemplos podemos considerarlas análogas con tres sistemas de escáner 3D: dos diferentes de luz blanca estructurada y un tercero de triangulación con una precisión entre 200 y 500 micras dependiendo del tipo de configuración utilizada. En el tercer caso se ha experimentado principalmente con técnicas fotogramétricas y de escáner de luz estructurada para las piezas de mayor tamaño como las ánforas.

En el resto de piezas se ha utilizado un sistema de bajo coste, basado en una caja de luz, una cámara o varias cámaras sincronizadas con una longitud focal fija, un sistema de iluminación de planchas de led y una peana giratoria (*vid.* FIG. 60).

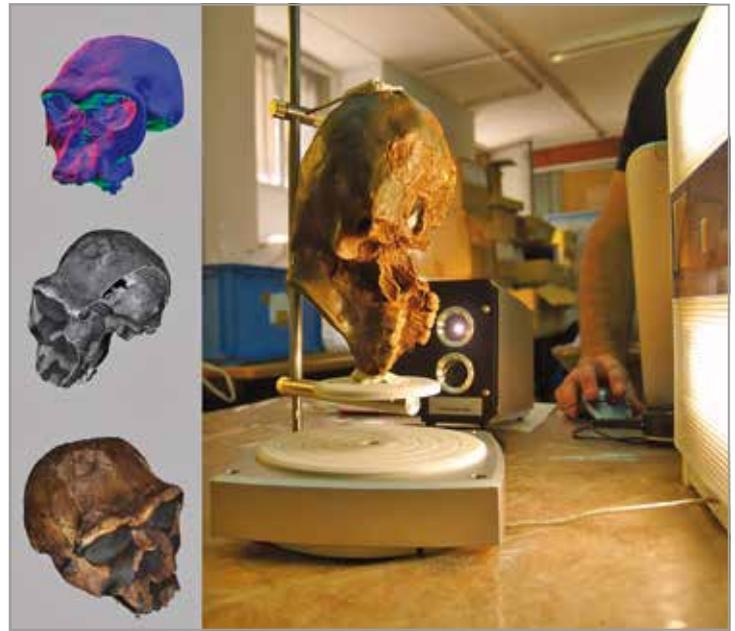


FIG. 67. Proceso de registro y texturización (izquierda) del modelo 3D de una réplica de cráneo de *Australopithecus afarensis*. Detalle de la digitalización realizada mediante una técnica combinada de escáneres 3D de objeto cercano de triangulación (modelo NextEngine a la derecha) y luz blanca estructurada (modelo Artec S al fondo) de un modo sincronizado con una peana circular motorizada.

TABLA 6
Relación entre la distancia óptima al objeto y las resoluciones de los escáneres empleados para objetos muebles

MOD. ESCÁNER	DISTANCIA DE TRABAJO	RESOLUCIÓN 3D	ADQUISICIÓN DE TEXTURA	TECNOLOGÍA	RANGO
NextEngine	Entre 0,4 y 0,8 m	Entre 0,1 y 0,3 mm	Si	Triangulación	Objeto mueble
Artec S	Entre 0,15 y 0,25 m	Entre 0,2 y 0,5 mm	No	Luz estructurada	Objeto mueble
Artec MHT	Entre 0,4 y 1 m	Hasta 0,5 mm	Si	Luz estructurada	Objeto mueble y pequeñas estructuras

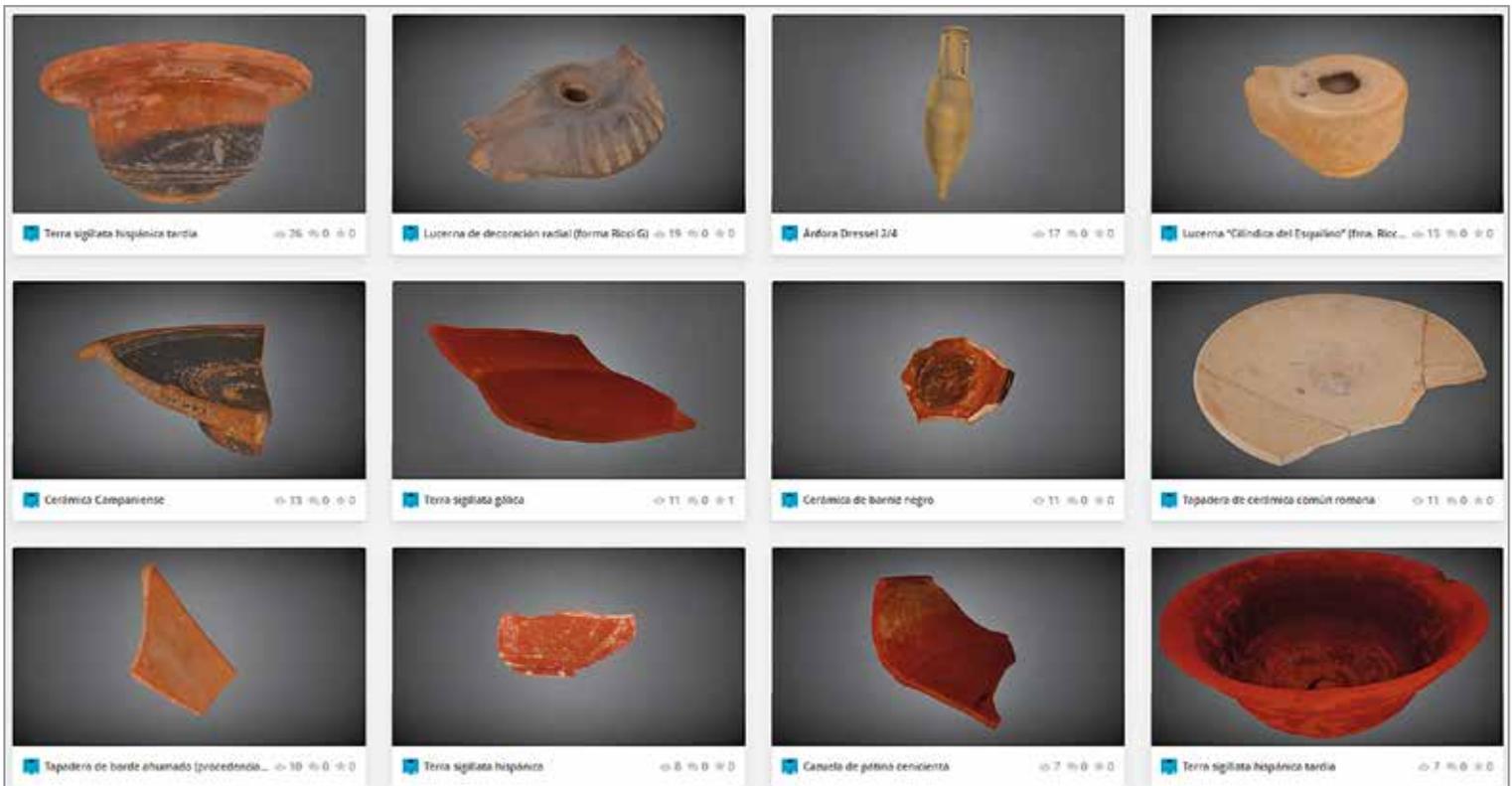


FIG. 68. Portal de acceso al repositorio web de tipologías de cerámicas romanas digitalizadas en la plataforma de modelos tridimensionales *sketchfab*.



FIG. 69. Detalle de la réplica del David de Miguel Ángel en la Piazza della Signoria (Florencia) sobre la nube de puntos del alzado compuesto del Palazzo Vecchio y la terza corte. Registro realizado con un escáner de tiempo de vuelo Leica ScanStation.

3.1.2. Digitalización de esculturas

En este apartado abordaremos uno de los puntos más demandados en la actualidad en la documentación del patrimonio cultural. La digitalización tridimensional de esculturas es uno de los procedimientos más extendidos debido a la versatilidad en la reproducción física en varios tipos de soportes. Principalmente los objetivos son muy variados, desde la preservación de las piezas originales por réplicas con fines museísticos, análisis de patologías estructurales para su restauración o, simplemente, a modo de generación de repositorios de modelos que garantice su conservación con la finalidad de establecer un análisis periódico⁷.

Las técnicas de digitalización se centran sobre todo en los sistemas de escáner 3D, concretamente en los últimos años el uso de escáneres de luz estructurada se ha impuesto al resto de sistemas dada la rapidez y precisión geométrica.

Respecto a la reproducción física abordaremos el ejemplo de la documentación geométrica de la escultura de *La Piedad* en el Valle de los Caídos (San Lorenzo de El Escorial, Madrid). El objetivo de este proyecto consistió en proporcionar una copia tridimensional de la escultura que sirviese de base como réplica física y digital para posteriores trabajos de restauración y preservación digital⁸. Aunque las características del ejemplo que hemos abordado responden a una idiosincrasia muy particular, dado su tamaño y emplazamiento, la selección de esta escultura como parte integrante de este estudio

destaca como ejemplo del proceso completo de digitalización y reproducción mediante ingeniería inversa de dos tipologías de réplicas realizadas con diferentes técnicas: mecanizado (sustracción) y prototipado rápido (adición). El objetivo del mismo es aportar un tipo de documentación que nos permita la adquisición tridimensional del bien mueble (en este caso adosado al conjunto arquitectónico) con la máxima resolución posible para cada uno de los sistemas de reproducción.

Por sus dimensiones y localización fue necesario emplear una combinación de técnicas para su registro que se pueden sintetizar en estas acciones: uso de técnicas de topografía clásica mediante una estación total con distanciómetro láser, empleo de un escáner de largo alcance de tiempo de vuelo para la contextualización tridimensional del entorno, complementado con otro escáner de diferencia de fase para su utilización a corto y medio alcance.

La obra fue realizada por el escultor emeritense Juan de Ávalos, finalizándola en 1959 como suma a un conjunto de nueve obras del monumento arquitectónico. La composición estructural está realizada en hormigón armado recubierta a modo de encofrado por placas de piedra caliza negra de Calatorao (Zaragoza), esculpidas con un espesor variable de aproximadamente 20 centímetros dependiendo de la zona. El tipo de unión entre las placas de caliza que forman la escultura, con mortero de yeso sin áridos, junto a los materiales del interior de hormigón con áridos de granito con feldespatos alcalinos sódicos, ha constituido uno de los principales problemas en su conservación. Este factor se debe a la porosidad de la roca y a los continuos ciclos de congelación y descongelación que sufre la escultura a lo largo del año, propias de un enclave de montaña. La mezcla de «materiales de construcción incompatibles» (García-Guinea *et al.*, 2012) ha provocado continuas grietas y diversas fragmentaciones en su estructura, debido principalmente por expansión térmica, hinchazón salina y cristalización del hielo

⁷ Uno de los primeros trabajos que proporciona un marco general sobre las posibilidades de digitalización tridimensional de esculturas se describe en Scipigno (2006) pp. 41-68 en Campana y Francovich (eds.): *Laser scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e tecnologie digitali 1*, Firenze.

⁸ Proyecto realizado en abril de 2010 promovido por el Departamento de Restauración de Patrimonio Nacional. En este sentido, agradecemos la ayuda y disponibilidad prestada por Ángel Balao González.

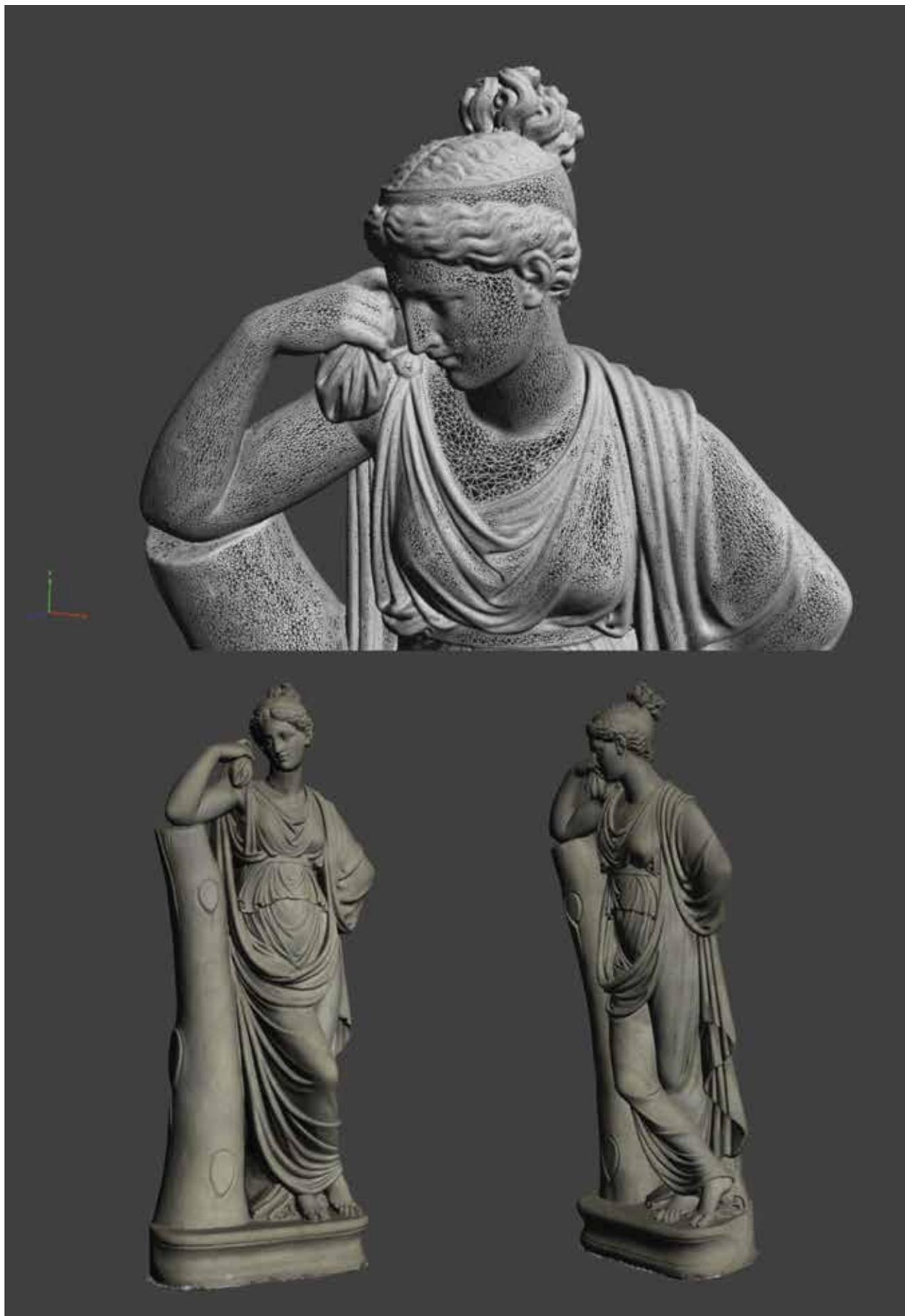


FIG. 70. Escultura romana de la *terza corte* del *Palazzo Vecchio* (Florencia), digitalizada con un escáner de luz estructurada. Para consulta del modelo 3D véase: <https://skfb.ly/DB9s>



FIG. 71. Boceto de *La Piedad* de Juan de Ávalos junto a su ayudante Tomás Martín en su taller*.

(García-Guinea *et al.*, 2012:127-128). Dentro de este deterioro progresivo de fisuras y pérdida de masa se encuentra un desplazado del antebrazo derecho del Cristo yacente.

3.1.3. Diferentes estrategias en la documentación

La estrategia desarrollada en la adquisición de la información sobre el emplazamiento se basó en la creación de una red topográfica de apoyo con diferentes bases que permitiese una buena distribución geométrica para cada uno de los puntos que posteriormente se utilizaron para estacionar los diferentes tipos de escáneres empleados. Las dificultades del registro quedaron plenamente constatadas debido a la propia complejidad orográfica de la zona con un fuerte desnivel. Para ello, se realizó una distribución de bases topográficas, rodeando la zona de la escultura, adquiridas mediante una poligonal con una estación total. De este modo, se aprovechó cada estacionamiento para la colocación de elementos que sirviesen de nexo entre un sistema de coordenadas local, generado por la estación total, y el sistema relativo de cada escaneado. La unión entre los dos sistemas se realizó colocando una serie de dianas «Black&White» por toda la zona de registro. De esta manera, la estación total capta el centro de estas dianas mediante el puntero láser para posteriormente adquirirlo de igual manera con el láser escáner 3D de manera automática por la diferencia cromática. Estas dianas nos permiten unir los distintos modelos en un único re-

gistro ya que son puntos característicos en los diversos escaneados. Además, este sistema, a diferencia de otro tipo de técnicas como las que se realizan por medio de esferas, tiene la ventaja de su versatilidad ya que no quedamos ceñidos por un número limitado de elementos característicos. La ventaja de este tipo de dianas se establece en su propia sencillez ya que se pueden imprimir fácilmente con

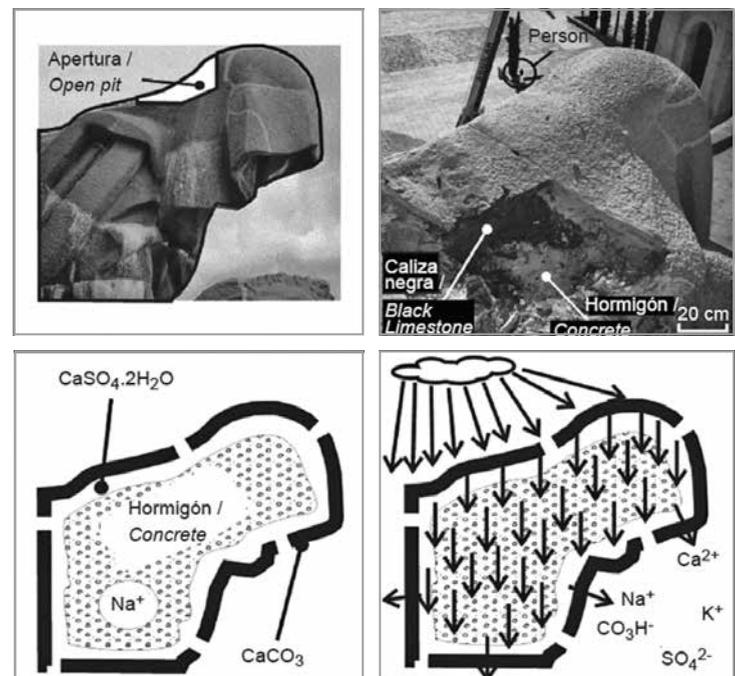


FIG. 72. Esquema explicativo sobre la relación entre la composición de los materiales, procesos de meteorización que afectan a la escultura y su progresivo deterioro estructural. FUENTE: FIG. 2 según García-Guinea *et al.* (2013:119).

* Imagen procedente del Archivo Fundación Juan de Ávalos (información facilitada gracias a Pablo Linares de la ADVC), posiblemente realizada por Ramón Ventura Matas (información facilitada gracias a José Manuel Lodeiro y José Luis Municio del IPCE). Adviértase el montaje fotográfico realizado sobre esta imagen en tres partes desiguales debido, probablemente, a la dificultad de adquirir, con la correspondiente longitud focal de la cámara utilizada, la escultura completa en una sola imagen sin distorsión.

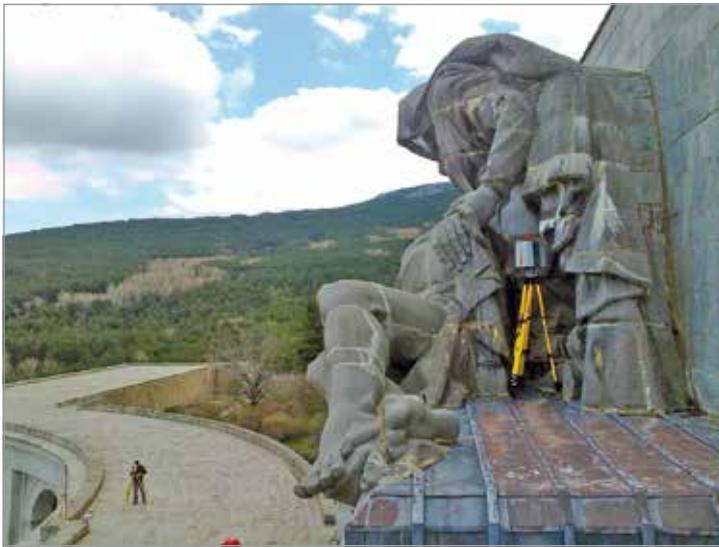


FIG. 73. Toma de datos con un escáner de diferencia de fase en la base de la escultura y con una estación total desde uno de los extremos de las exedras inferiores.

una plantilla en folios adhesivos y adherirlos a cualquier superficie de manera totalmente inocua para el bien patrimonial. Este detalle nos permitió una redundancia mayor en los puntos característicos de control, pudiendo desechar cualquiera que no nos proporcionase la calidad establecida por debajo de cinco milímetros. Además, este tipo de marcadores nos permite hacer el ajuste de cada imagen equirectangular para el mapeado de la nube de puntos con la adquisición de las tomas fotográficas mediante una coincidencia del eje nodal del escáner con el sensor CCD de la cámara.

El registro tridimensional, dadas las dimensiones, distancias, diferencias de altura y, en definitiva, complejidad del entorno, se realizó, como ya hemos avanzado, por medio de la combinación de un escáner 3D de diferencia de fase y otro escáner de tiempo de vuelo.

La razón de esta elección se debió a las características técnicas de cada uno de ellos ya que el escáner 3D de tiempo de vuelo nos permitió, dada la morfología del terreno, conseguir un mayor retranqueo, no superior a 200 metros, en la zona de acceso a la basílica permitiendo un registro de la parte frontal de la escultura. De esta manera, resulta proporcional adquirir un equilibrio sobre una mayor distancia sobre la escultura que evite las zonas de sombra de la parte frontal de la misma. Asimismo, conviene detallar que la escultura se encuentra a 22 metros de altura de la puerta de acceso a la basílica. Para solventar este problema se realizó de un modo complementario el registro lateral desde cada una de las exedras superiores, con diferentes estacionamientos, completando los escaneados realizados desde una posición lateral más alejada.

El resto de escaneados se realizaron con un escáner de diferencia de fase que no dispone de tanta distancia de captura como el sistema anterior, pero tiene la ventaja de realizar escaneados a una mayor velocidad. En este sentido, este tipo de escáner se utilizó, tanto para la zona localizada al mismo nivel de la escultura como en el balcón superior de la misma, con el objetivo de documentar el plano dorsal de la Virgen.

3.1.4. Postproceso y tipos de réplicas

Para registrar las diferentes nubes de puntos de cada uno de los escaneados realizados fue necesario calcular las coordenadas de cada una de las dianas tomadas por la estación total. Esta red constituyó la base de cada uno de los escaneados posteriores. De esta manera, antes de alinear las nubes de puntos fue necesario nombrar cada una



FIG. 74. Adquisición de dianas (Black&White) por ambos sistemas de registro: estación total y la combinación de TLS desde una de las exedras a mitad de altura.

de las dianas capturadas por el escáner, con el objetivo de alinear estos puntos con los mismos puntos de referencia. El resultado fue una nube de puntos con una densidad de 2 a 3 milímetros entre puntos.

Puesto que el objetivo último fue la reproducción de la escultura, no se aplicó la textura de cada uno de los puntos al modelo 3D. En este sentido, el resultado para ambos sistemas de reproducción por sustracción y adición se obtuvo a diferentes escalas mediante un modelo tridimensional en el formato STL. Por ello, el color fue únicamente utilizado en la recreación de cada uno de los escaneados realizados en un servidor web bajo Internet Explorer mediante el *plugin Leica TruView*. Permitiendo tareas básicas para realizar mediciones y localización de coordenadas x , y , z .

3.1.4.1. Tipos de réplicas

Las técnicas utilizadas en la reproducción de una réplica de esta escultura fueron las dos principales que encontramos actualmente: de (1) sustracción de un bloque de poliuretano y de (2) adición de resinas.

Con la tecnología actual, materializar una réplica de estas características representa un problema con los sistemas más comunes de adición de las impresoras tridimensionales, debido principalmente, al tamaño y al coste del material. Por ello, se mecanizó, una pri-

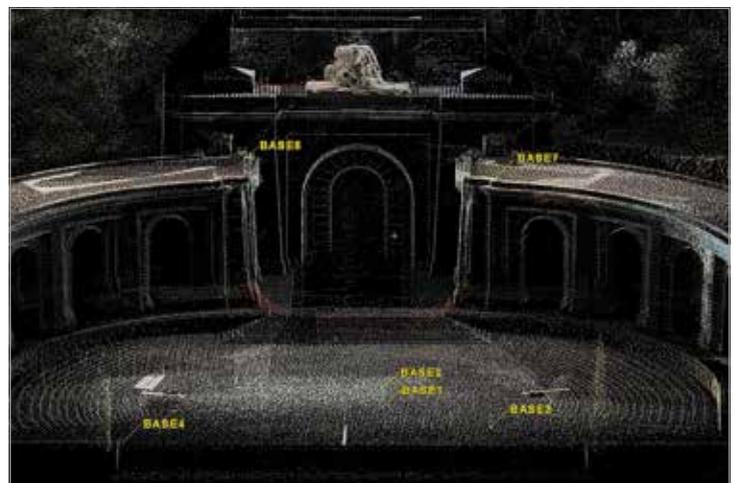


FIG. 75. Distribución de las bases localizadas en la nube de puntos para su alineación.



FIG. 76. Modelo tridimensional de la malla final en formato STL para su impresión 3D o mecanizado.

mera réplica, aproximadamente a escala 1/10 mediante sustracción de un bloque de poliuretano de alta densidad D80. Pese a que es un material frágil, ya que es conveniente algún tipo de imprimación posterior, su porosidad como material blando proporciona la utilización de diferentes tamaños de fresas que permiten realizar, con una muy buena resolución, los detalles escultóricos más representativos en el proceso de mecanización.

Posteriormente se realizó otra réplica mediante la técnica de adición con una impresora OBJET EDEN 350V mediante tecnología Polyjet⁹. El material utilizado fue RGD720 que se trata de una mezcla de resinas en forma de monómeros y oligómeros con un agente catalizador que se activa al recibir luz en un determinado rango de longitudes de onda, haciendo que los monómeros se combinen en forma de polímeros, endureciendo por tanto la resina.

Además de todos los resultados citados anteriormente, se realizaron otro tipo de soluciones complementarias que son aplicables a cualquier otro tipo de registro de un bien mueble:

- Creación de un servidor web que integre la información tridimensional para realizar mediciones y localización de coordenadas desde el punto de vista de cada escaneado.
- Generación de un archivo estándar con el modelo 3D en formato PDF3D y STL con diferentes secciones horizontales y verticales gestionadas en un árbol con diferentes capas.
- Imágenes equirectangulares que reproducen la vista de cada uno de los estacionamientos realizados con ambos sistemas de escáneres tridimensionales. Este tipo de imágenes, con una alta calidad gráfica, se pueden reproducir y aprovechar para cualquier tipo de inspecciones del bien patrimonial.

En conclusión, la documentación de los bienes muebles responde a una multitud de necesidades con diversos fines: museísticos, didácticos, de conservación, reproducción, científicos o simplemente como fuente documental. Respecto a las técnicas de registro, son igualmente variadas, dependiendo de las características físicas de la pieza. Los usos tecnológicos más habituales son las colecciones museísticas en plataformas *online* basadas en la especificación estándar, como por ejemplo *Sketchfab*¹⁰. Sin duda, proporcionan una difusión a nivel científico-divulgativo sin precedentes para el estudio de colecciones arqueológicas. Sin embargo, el siguiente paso que veremos en los próximos años deberá vincular los modelos

⁹ Dentro de las clasificaciones oficiales del comité ASTM F42, esta tecnología recibe el nombre de Material *jetting* (gotas de material de modelo se expulsan por un cabezal para formar el objeto).

¹⁰ <https://sketchfab.com/museums> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 77. Reproducción de la escultura a escala 1:10 en poliuretano D80 de alta densidad realizado mediante técnicas de sustracción.



FIG. 78. Reproducción con técnicas aditivas de impresión 3D de la escultura a escala 1:50 en resina RGD720 realizada por el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza*.

con bases de datos que relacionen información de un modo más detallado y contextualizado.

3.2. Arte Rupestre

3.2.1. Introducción

El objetivo de este apartado es analizar mediante los diferentes ensayos realizados en varios proyectos, el estado actual de la documentación gráfica y geométrica del arte rupestre. Igualmente, existen otros ejemplos que se encuentran repartidos a lo largo de esta investigación en diferentes capítulos: bloque de Abautz (*vid.* apdo. 1.2), abrigos del barranco de Calapatá (*vid.* apdo. 3.6.2), abrigo del Plano del Pulido, proyecto HANDPAS (*vid.* apdo. 1.3-6), cuevas de Roucadour y Niaux, bases de datos en arte rupestre (*vid.* apdo. 3.7).

Sin duda, el arte rupestre es uno de los tipos de patrimonio que más dificultades presenta a la hora de su documentación. Por esta razón, no existe a día de hoy una normativa homogénea, aceptada por la mayoría de la comunidad científica, que recopile un conjunto de técnicas y procedimientos para su documentación. No nos limitamos únicamente a enumerar y comparar esta dificultad en el registro del arte rupestre dentro del patrimonio cultural, nos referimos a cómo su documentación comprende una mayor complejidad geométrica y gráfica frente al resto de bienes patrimoniales y

* Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA). Universidad de Zaragoza.

otras disciplinas tales como las industriales, ambientales o de ingeniería. Sobre todo, si tenemos en cuenta varios factores:

A. La localización de los conjuntos tanto en entornos subterráneos como en abrigos. Muchos de ellos con problemas de acceso, humedad e iluminación, y con una idiosincrasia muy heterogénea para cada caso particular. La localización y acceso, sin duda, condicionan notablemente tanto las capacidades como los medios técnicos de trabajo. En consecuencia, resulta imprescindible adaptar los procedimientos y las técnicas de registro de manera específica a cada caso.

B. Dificultades para registrar mediante técnicas objetivas no sólo la geometría sino también los valores colorimétricos de las pinturas. Resulta imprescindible para su caracterización diacrónica la medición con sistemas que permitan una trazabilidad para cuantificar, igualmente, cualquier tipo de alteraciones colorimétricas (Pereira, 2013).

C. El posible grado de deterioro de la pigmentación está estrechamente vinculado con el soporte geomorfológico. Fundamentalmente esta complejidad se encuentra en la importancia del registro objetivo de cada motivo pintado o grabado, así como su relación con la geometría concreta del lugar y soporte donde se inscriben. Esta categoría resulta vital ya que la reproducción fidedigna, desligada de cualquier interpretación, tanto del carácter gráfico como del métrico, nos permite investigar e interpretar la semiótica de cada conjunto rupestre.

En los últimos años, sobre todo con la implementación de herramientas digitales (Clogg *et al.*, 2000; Cooper, 2000; David *et al.*, 2001; Fritz / Tosello, 2007), se han realizado importantes logros que han permitido mejorar la calidad de la documentación gráfica de los conjuntos decorados, con avances muy notables en la documentación tridimensional rupestre (D'Errico, 1996; Simpson *et al.*, 2005; Lerma *et al.*, 2006; Mudge *et al.*, 2006; Bednarik, 2007: 55-84; Angás / Serreta, 2009; Angás *et al.*, 2010; Farjas *et al.*, 2009; Díaz-Andreu, 2010; Bea / Angás, 2012; Azéma *et al.*, 2010-2011; López, 2010; Domingo *et al.*, 2013; Angás, *et al.*, 2014). Esta mejora en la captación de los datos ha permitido perfeccionar su presentación e incluso la percepción real de lo representado. Sin embargo, no existe una estandarización metodológica, aceptada por todos, que nos sirva para documentar, investigar, difundir y conservar el arte rupestre. La aparición de tal variedad de tecnologías aplicadas al patrimonio ha inducido, en muchas ocasiones, a que el propio objetivo científico del proyecto quedase subordinado a la técnica empleada. Este fenómeno no es diferente al resto de clasificaciones patrimoniales, ha provocado una falta en la explotación de los recursos empleados, sobre todo en su representación, con la consiguiente pérdida de información tanto para la comunidad científica como para el conjunto de la sociedad.

D. Asimismo, resulta fundamental representar y relacionar el propio yacimiento con una lógica espacial a través de una contextualización y documentación de su entorno inmediato. Entender su semiótica, en buena parte, depende del entorno físico donde se encuentra, por ello resulta igualmente necesaria la documentación métrica y gráfica del entorno.

Dentro de estas nuevas técnicas destinadas a la documentación del arte rupestre destaca la combinación de escáner 3D, utilizando todas sus diferentes tipologías ya explicadas en el análisis de las herramientas (*vid. supra* cap. 2)¹¹, con técnicas fotogramétricas de correlación automática de imágenes y to-

pográficas en general¹². A través de la información generada por esta herramienta se obtiene un modelo 3D con diferentes precisiones, del cual se pueden realizar una gran cantidad de análisis posteriores para optimizar el conocimiento y la documentación del arte rupestre registrado. Esta técnica permite afrontar nuevos enfoques metodológicos gracias a la creación de bases de datos 3D como el proyecto europeo 3D-PITOTI¹³. Asimismo, esta documentación se puede utilizar como nuevo soporte científico transdisciplinar, tanto en su labor de prevención, protección y conservación, como en su posterior difusión cultural a través de diferentes plataformas digitales.

Todos estos factores, así como el trabajo de un equipo multidisciplinar, permiten establecer una lógica espacial, a través de un modelo tridimensional, del cual se originan y ramifican diferentes datos, siendo estos de carácter tan diverso que pueden ser utilizados por diferentes disciplinas.

Respecto a la problemática de fijar unos procedimientos metodológicos adecuados, Valle, en su tesis doctoral (2011:155), contribuye a su resolución con algunas propuestas conceptuales sobre el «establecimiento de unos criterios de organización y estandarización de los resultados de la documentación geométrica del patrimonio». Todo ello debe suponer un avance en la gestión de la información obtenida, alejándonos de aquella etapa en la que únicamente se enumeraba minuciosamente la instrumentación y metodología utilizada para cada proyecto, sin intentar establecer una normalización y sobre todo una interrelación con las problemáticas concretas de cada yacimiento. La escasez de estos procesos normalizados que incluyan una relación con la geometría, la resolución empleada o los datos arqueológicos, tanto en el desarrollo como en la gestión de los modelos tridimensionales, ha derivado en el menor aprovechamiento de todos sus recursos *a posteriori*.

Los intentos de generar unas recomendaciones básicas (*vid. supra* cap. 1) hacen que se soliciten con mayor frecuencia estudios previos o anteproyectos sobre el establecimiento de procedimientos que en base a una experiencia determinen un método de trabajo que tenga una trazabilidad o verificación (Valle, 2006:19; D'Anna, 2015:4). Sobre todo, debido a la propia disparidad existente entre entidades internacionales, organismos gubernamentales y centros de investigación. A ello se suma la divergencia que muchas veces encontramos entre la gestión institucional y la investigación¹⁴.

Aunque se pueden extrapolar todos los procedimientos desarrollados en los últimos proyectos europeos de documentación –*vid. apdo. 1.3-*, concretamente en el arte rupestre encontramos pocos casos conocidos, destacando, a modo de ejemplo, la realización de un convenio en el año 2010 entre la Universidad de Zaragoza y *Convention Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) de Midi-Pyrénées* (Francia)¹⁵, con el objetivo de establecer un primer pliego

11 Tal como se nombra en el apartado dedicado a las técnicas, los tipos de escáner de sintetizan a grandes rasgos en: diferencia de fase, tiempo de vuelo, WFD, triangulación y luz blanca estructurada.

12 En muy pocas ocasiones asistimos a una aproximación entre diferentes magnitudes de escala entre la topografía y la cartografía en arte rupestre (Alexander *et al.*, 2015). Quizá por falta de entendimiento entre disciplinas no suelen ser muy frecuentes los estudios de documentación geométricos y los sistemas de información geográficos (SIG). En los próximos años se deberá avanzar en este sentido, quizá ayudado por el avance de los sistemas SIG *online* y *web mapping*, integrando módulos en los que sea más fácil gestionar modelos tridimensionales relacionales.

13 *Vid. apdo. 1.3-6* relacionado con las bases de datos y en concreto el proyecto 3DPitoti <http://3d-pitoti.eu/> (último acceso: octubre de 2017).

14 Desde el año 2014 en el Parque Cultural Río Vero (Huesca) se han puesto en marcha varios proyectos de documentación integral y estudios alterológicos que definen el estado actual y, en todo caso, los principios de intervención en los abrigos rupestres de Mallata, Lecina Superior, Arpán y recientemente en la cueva de la Fuente del Trucho.

15 Redacción de un estudio técnico sobre las condiciones de un registro 3D en cuevas con arte rupestre (DRAC. Midi-Pyrénées), 2010. Fundamentalmente, constituye un ejemplo internacional de colaboración interdisciplinar con tres



FIG. 79. Documentación geométrica de los paneles 5-3 de la cueva de Niaux en el *Salon Noir* con diferentes técnicas y herramientas (de izda. a dcha.): toma de puntos de apoyo con estación total para ajuste fotogramétrico, escáner de tiempo de vuelo (centro imagen) y escáner de luz blanca estructurada (Angás / Le Guillou / Mauduit, 2014: 27).

de prescripciones técnicas en el que se determinasen el tratamiento de la documentación geométrica para el arte rupestre en entornos subterráneos con el título *Étude de faisabilité relative à la réalisation d'un système géographique (SIG-3D) appliqué au patrimoine souterrain* (Angás *et al.*, 2010). Gracias a este convenio se elaboró la redacción de un estudio técnico sobre los parámetros necesarios para la documentación geométrica y el tratamiento postprocesual en cuevas con arte rupestre. En segundo lugar, resulta ineludible mencionar las *Jornadas Técnicas para la Gestión del Arte Rupestre, Patrimonio Mundial* celebradas en Alquézar (Huesca) en el año 2012 (Juste *et al.*, 2012). En ellas se reunieron un conjunto de especialistas, de ámbito público y privado, que establecieron unas conclusiones, a modo preliminar, distribuidas en cuatro categorías o mesas de trabajo sobre el arte rupestre: documentación, conservación, protección y difusión. En concreto, las conclusiones sobre la mesa de documentación permitieron realizar un primer borrador sobre unos requisitos mínimos en la toma de información tanto gráfica como métrica (2012: 85).

Todo ello fue plasmado en un documento marco inicial para la elaboración de un sistema de gestión del arte rupestre declarado Patrimonio Mundial en el Arco Mediterráneo de la Península Ibérica (ARAMPI), donde se planteó una homologación de los sistemas de registro en el punto primero dentro del apartado de Documentación que se puede sintetizar en:

- a) Discusión y propuesta de un modelo de calco directo o indirecto. Diferenciando una escala micro y una escala macro, con unas recomendaciones sobre el tratamiento de la documentación en abrigos rupestres.
- b) Definición y homologación de documentación fotográfica del entorno, del enclave y de los paneles decorados. Especificando el formato de captura y el orden y disposición de las imágenes.
- c) Conclusiones finales generales para la documentación. Donde se añade además la utilización del sistema oficial de coordenadas en España UTM ETRS89.

En los siguientes apartados de las jornadas se abordaron temas de igual importancia como la homologación de los sistemas de registro de datos, inventarios y fichas de los enclaves, el tratamiento de los datos y la imagen y la aplicación de los sistemas de información geográfica¹⁶.

En tercer y último lugar, destacamos el proyecto *Projet Calypso: Mémoire prospectif d'aide à la définition des caractéristiques techniques d'une base de données sur les grottes ornées de Midi-Pyrénées, associée aux modèles scan 3D* (Angás *et al.*, 2015) realizado para la *Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) de Midi-Pyrénées* (Francia). Se trata de un estudio teórico que define las posibilidades de la creación de un sistema de gestión espacial *online* que vincula ba-

vértices claves en el consenso sobre la documentación del arte rupestre: la gestión administrativa, la investigación y el sector privado.

16 https://jornadastecnicasarterupestre.files.wordpress.com/2012/04/documento-marco-a_rupestre.pdf (último acceso: octubre de 2017).

ses de datos relacionales con modelos tridimensionales creados a partir de registro de escáneres 3D. Su aplicación en cuevas con arte rupestre permitiría generar una herramienta científica para archivar y relacionar diferente información en diferentes escalas. Este aspecto, sin duda, mejoraría la conservación y posteriormente permitiría una valorización de cada conjunto rupestre. El esquema propuesto quedaría definido por diferentes escalas de acceso, cada una de ellas con toda la información necesaria que permita vincular e interrelacionar los datos arqueológicos, biológicos, historio-gráficos, etc.

Asimismo, desde el año 2010 han surgido proyectos europeos vinculados a *Europeana*¹⁷, de entre todos ellos surge 3D-PITOTI (*vid. supra* apdo. 1.3-6) (*3D acquisition, processing and presentation of prehistoric European rock-art*), como ejemplo centrado en la documentación de grabados rupestres en el Valle de la Valcamónica (Italia), permitiendo generar diferentes ensayos de trabajo en la digitalización tridimensional, que sin duda contribuyen a la redacción de un conjunto de recomendaciones en la gestión de un proyecto de documentación del arte rupestre.

Por último, mencionaremos nuevamente en este apartado, el proyecto HANDPAS, sobre la documentación y la difusión de las representaciones de manos paleolíticas en Europa (*vid. supra* apdo. 1.3-6.1). El proyecto se concibe inicialmente atendiendo a diversos objetivos, entre los cuales el más destacado es poner a disposición de los investigadores y del público en general una información documental, gráfica y teórica mediante una plataforma digital de libre acceso. Para ello, se establece como elemento básico en la toma de datos el uso de tecnología escáner 3D de alta resolución de los principales emplazamientos europeos con representaciones de manos paleolíticas.

3.2.1.1. La documentación gráfica y geométrica del arte rupestre y la necesidad de su organización

Resulta incuestionable establecer en cada proyecto unos objetivos bien definidos y constituir un equilibrio entre tiempo, costes y escala de trabajo (Lodeiro, 1995). Respecto a este último, resulta un factor determinante el tipo de escala aplicada en su representación. La relación entre la adecuación de la resolución y el tiempo de post-proceso de los datos es directamente proporcional a los datos obtenidos. Resulta obvio, subrayar en este sentido, la adecuación del proyecto al medio físico o virtual donde finalmente se va a representar¹⁸.

Si analizamos qué uso se ha extraído de la representación del medio desde la prehistoria, observamos cómo ha sido siempre uno de los objetivos perseguidos por el hombre. Esa representación nos sirve hoy en día como fuente documental de los aspectos físicos del entorno. Por ello, en muchas ocasiones carece de significado extraerla del contexto donde fue realizado y del que forma parte integrante. De este modo, actualmente habría que entender el propio concepto de documentación geométrica, intentando incluir todos aquellos aspectos indispensables que nos permitiera comprender desde una perspectiva global el medio físico donde se generó.

17 Repositorio constituido como biblioteca digital sobre la cultura europea que inicia su actividad en 2008 *vid. apdo. 1.3*.

18 Uno de los ejemplos más notorio de los últimos años es la réplica realizada en 2007 a escala 1:1 del friso magdaleniense medio esculpido en la falda de un abrigo rocoso junto al lecho fluvial del Angles (Vienna, Francia). Este yacimiento, conocido como Roc-aux-sorciers (Iakovleva y Pinçon, 1999: 549-568), ha sido reproducido doblemente, con una resolución y una finalidad diferente –científico y divulgativa–, en el centro de interpretación de Angles sur l'Anglin. Para mayor referencia véase el resumen de la mesa redonda celebrada en Angles sur l'Anglin en junio de 2008 «*Art rupestre: la 3D un outil de médiation du réel invisible!*» Institut National du Patrimoine http://www.roc-aux-sorciers.com/dybat_discussions.php (último acceso: mayo de 2017).



FIG. 80. Proceso de documentación del bloque de Abauntz mediante escáner triangulación (1-3) de luz blanca estructurada (2) y brazo de medición de siete ejes (4)*.

En este sentido, conviene destacar uno de los ejemplos más notable, ya mencionado en el capítulo referente al estado de la cuestión, sobre cartografía prehistórica en el denominado bloque de Abauntz (Navarra). Este bloque, datado en el periodo Magdaleniense (13 660 calBP), representa a través de micrograbados diversos zoomorfos y un croquis cartográfico sobre el entorno inmediato donde fue hallado (Utrilla *et al.*, 2009: 99-111). Resulta un ejemplo excelente para explicar el doble valor que posee un objeto mueble arqueológico hallado dentro de su contexto cultural. Por una parte, sin duda, es el ejemplo más antiguo conocido de representación cartográfica del hombre del paleolítico en un objeto mueble en la Europa occidental. Sin embargo, además, este útil carecería de significado si hubiese sido privado del contexto cultural al que perteneció. Tiene por ello una relación directa con el conjunto de cultura material, unidades estratigráficas y medio físico donde fue hallado. Sobre estos últimos datos de contextualización arqueológica podemos establecer un paralelismo conceptual, relacionándolos como los diversos metadatos de la representación del entorno que incorpora el propio bloque. En consecuencia, estos metadatos constituyen la parte fundamental que explican, el cómo, dónde y cuándo fue configurada la propia representación del medio. Ignorar esta información codificada descontextualiza el objeto y deriva en un desaprovechamiento casi total de toda la documentación que hace falta transmitir¹⁹.

Paralelamente a esta metáfora sobre el uso de la información contextual de la propia documentación (metadatos), expondremos a continuación el proceso de documentación geométrica del bloque de Abauntz. Este proceso fue realizado desde el año 2007 hasta el 2012, con diversas técnicas escáner 3D hasta obtener el modelo completo con suficiente detalle: escáner de triangulación (2007 y 2008), luz blanca estructurada (2011) y por último, el empleo de un brazo de medición de siete ejes con sensor láser de triangulación (2012). Los resultados han sido heterogéneos hasta finalmente ob-

19 No hay duda que la perdurabilidad de la información, con el ejemplo de documentación del paisaje del bloque de Abauntz, resulta insuperable si lo comparamos con cualquier ejemplo actual. En los próximos años la interoperabilidad de la información va a ser uno de los principales campos de aplicación y desarrollo (*vid. infra* apdo. 3.7).

* Realizado con la colaboración de Jorge Santolaria del Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA) del Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) de la Universidad de Zaragoza.

TABLA 7

Propuesta relacional para abrigos o cuevas con arte rupestre entre el tipo de objeto documentado, la escala de representación, técnica e instrumentación necesaria

OBJETO	ESCALA DE REPRESENTACIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTACIÓN	RESOLUCIÓN
ÚTILES	2:1 / 1:1	Correlación de imágenes SfM-fotografía	Cámara fotogramétrica	0,5-2 mm
Líticos		Metrología	Escáner triangulación	0,2-0,5 mm
Óseos		Metrología	Luz blanca estructurada	0,5-2 mm
ARTE MUEBLE	2:1 / 1:1	Correlación de imágenes SfM-fotografía	Cámara fotogramétrica	0,5-2 mm
		Metrología	Escáner triangulación	0,2-0,5 mm
		Metrología	Luz blanca estructurada	0,5-2 mm
ARTE PARIETAL	1:2 / 1:5 / 1:10	Correlación de imágenes SfM-fotografía	Cámara fotogramétrica	
Micrograbados		Metrología	Escáner triangulación	0,1 mm
Grabados		Metrología	Luz blanca estructurada	0,5-1 mm
Pinturas		Topografía	Estación total / GNSS / TLS (fase, TOF)	0,3-3 cm
EXCAVACIONES	1:20	Topografía	Estación total / GNSS / TLS (fase, TOF)	0,3-3 cm
SONDEOS		Correlación de imágenes SfM-fotografía aérea	Drones, sensores VIS-NIR-Térmico	1-14 cm
GEOMORFOLOGÍA	1:20 / 1:50 / 1:100			
Abrigos Rupestres		Topografía / SfM / Escáner 3D	Estación total / GNSS / TLS (fase, TOF)	0,3-3 cm
Cavidades / Salas		Topografía / Escáner 3D	Estación total / TLS (fase, TOF) / MLS	0,3-3 cm
Cuevas completas		Topografía / Escáner 3D	Estación total / TLS (fase, TOF) / MLS	0,3-3 cm
ENTORNO INMEDIATO	1:500 / 1:100	Topografía	Estación total / GNSS / TLS (fase, TOF)	0,3-3 cm
		Correlación de imágenes SfM-fotografía aérea	Drones, sensores VIS-NIR-Térmico	3-14 cm
PAISAJE	1:2000 / 1:5000	Topografía-Cartografía (SIG)	GNSS / TLS (fase, TOF)	5-8 cm
		Correlación de imágenes SfM-fotografía aérea	Drones, sensores VIS-NIR-Térmico	4-14 cm
ARQUEOLOGÍA	1:10000 / 1:25000			
ESPACIAL*		Teledetección-Cartografía (SIG)	LiDAR / sensores aerotransportados	0,5-1 m
		Teledetección-Cartografía (SIG)	Satélites	1,5-30 m

* Relación con otros yacimientos.

Valores aproximados tomando como patrón de referencia los diferentes ensayos realizados para esta investigación.

tener el modelo completo en 2012. Sobre todo respecto al nivel de representación, ya que los grabados que posee son de aproximadamente 0,3 mm. La gran ventaja ha sido poder generar un fichero gestionable a nivel de usuario totalmente accesible e integrable en cualquier base de datos mediante ficheros PDF3D y JSON.

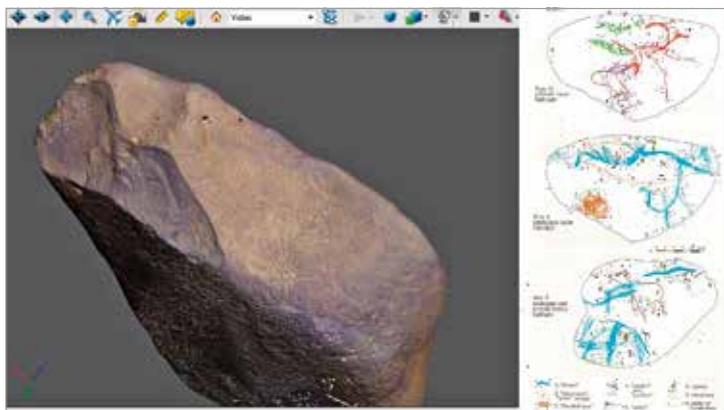


FIG. 81. Calcos de Utrilla *et al.* (2009:102) y modelo tridimensional final del bloque de Abauntz gestionado a través de un formato estandarizado PDF3D (izda.).

A modo de reflexión final, el problema acuciante que se plantea en la actualidad sobre la documentación geométrica del arte rupestre y su organización no es ajeno al resto de clasificaciones patrimoniales que exponemos en esta monografía. Sin embargo, tiene unos factores propios por su singularidad, fragilidad y localización que hace necesario emplear otro conjunto de técnicas y herramientas. Por ejemplo, para el control geomorfológico de paneles, existe un tipo de solución para representar el volumen mediante mapas de elevación o disparidad sobre un plano de referencia que representa cualquier posible alteración morfológica a través de una escala cromática relacionada con diversas tolerancias métricas. De esta manera, exponemos de un modo sintético las premisas básicas, ya aportadas para otros bienes, que debería cumplir cualquier proyecto de documentación de arte rupestre:

- a) Facilitando en primer lugar, la integración de bases de datos compatibles con servidores web actualizables con diferentes escalas de acceso y edición (*vid. infra* apdo. 3.7).
- b) Estandarización con formatos comunes e intercambiables de *software* fácilmente comprensibles a nivel de usuario. Contribuyendo a un fácil entendimiento y por consiguiente conceptualización de la información tridimensional con formatos accesibles.

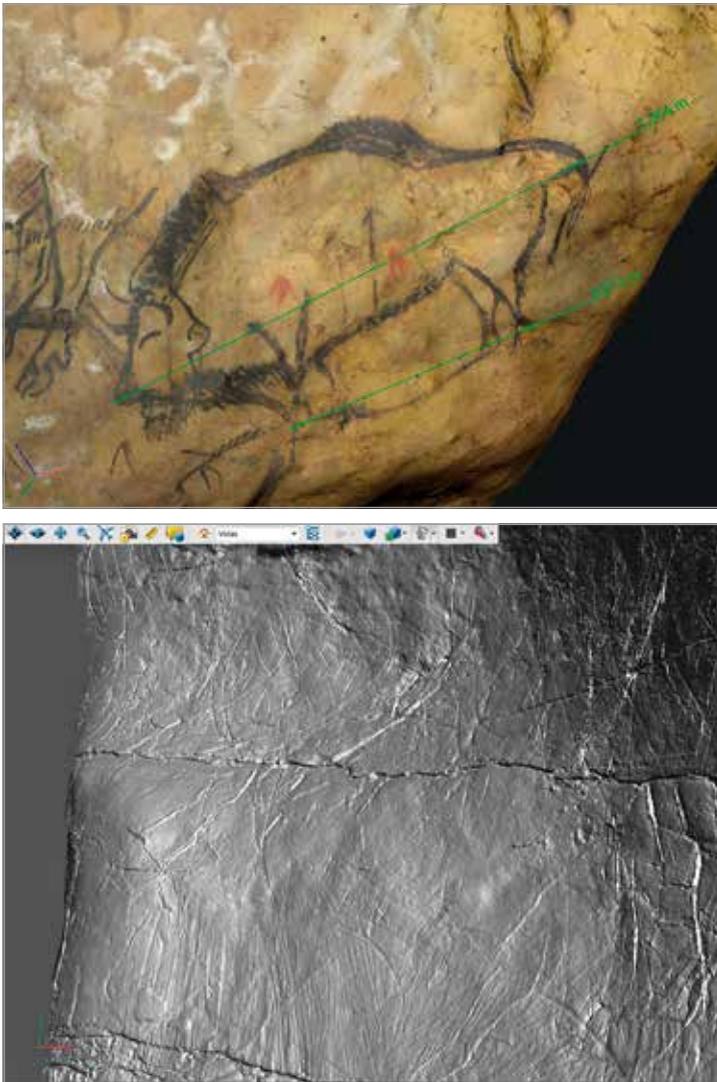


FIG. 82. Ejemplos de ficheros tridimensionales gestionados en formato estándar PDF3D. Imagen superior: medición de una figura del panel núm. 4 del *Salon Noir* de la cueva de Niaux. Imagen inferior: modelo 3D sin textura de los grabados de la diaclasa lateral decorada de la cueva francesa de Roucadour, Thémimes (Angás / Le Guillou / Mauduit, 2014: 30).

- c) El carácter métrico en cada proyecto resulta fundamental para poder obtener medidas y localizar coordenadas absolutas o relativas que permitan monitorizar cualquier patología estructural en cualquier momento. En este sentido, se deberían de generar estándares, reconocidos por la administración, que recojan las recomendaciones necesarias para la verificación de su geometría, tanto de un modo explícito a través de informes como implícito con la inclusión de metadatos.

3.2.2. Abrigos rupestres: proyecto ARAM

JORGE ANGÁS / MANUEL BEA

3.2.2.1. Antecedentes

A través del proyecto ARAM (Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia)²⁰, y en relación con la tutela y gestión del patrimonio, se ha tratado de establecer un protocolo en el proceso de documentación del arte rupestre Paleolítico, Levantino y Esquemático, apostando por la obtención de un método que proporcione unos

²⁰ Proyecto financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

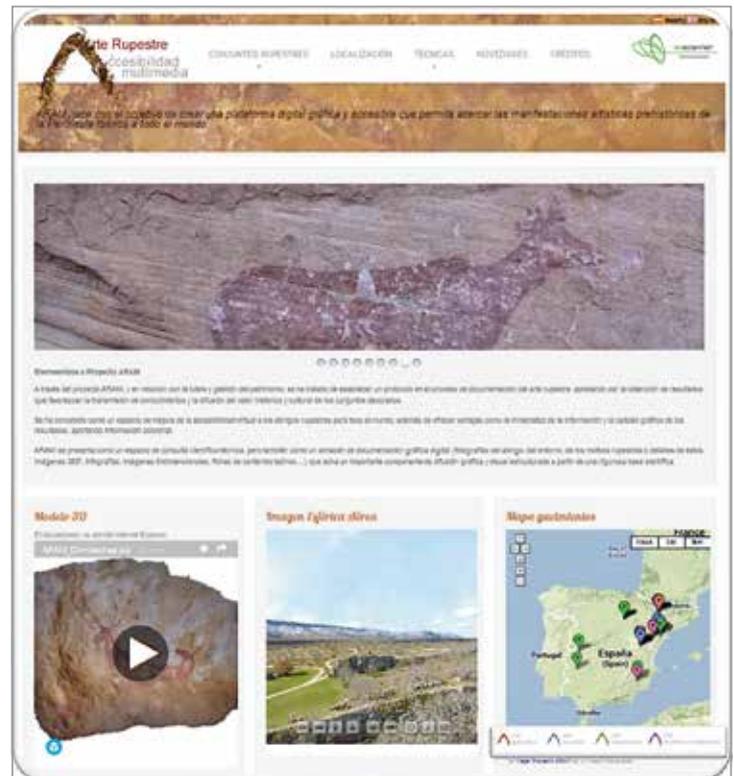


FIG. 83. Portal web de acceso al proyecto ARAM (Arte rupestre y accesibilidad multimedia)*.

resultados que favorezcan la transmisión de conocimientos y la difusión del valor histórico y cultural de los conjuntos decorados.

Se ha concebido como un espacio de mejora de la accesibilidad digital a un conjunto de abrigos rupestres para toda la sociedad, además de ofrecer ventajas como la inmediatez de la información y la calidad gráfica de los resultados, aportando información adicional de diversa índole.

ARAM se presenta como un espacio de consulta científico-técnica, pero también como un almacén de documentación gráfica digital (fotografías del abrigo, del entorno, de los motivos rupestres o detalles de éstos, imágenes esféricas del entorno, modelos tridimensionales, fichas de contenido teórico, etc.) que aúna un importante componente de difusión gráfica y visual estructurado a partir de una metodología científica.

Este proyecto tuvo además como objetivo plasmar de un modo práctico las conclusiones anotadas en la mesa de documentación de las *Jornadas Técnicas para la Gestión del Arte Rupestre, Patrimonio Mundial* celebradas en Alquézar (Huesca) en mayo de 2012 dentro del marco rupestre del Parque Cultural del Río Vero²¹.

El carácter flexible y abierto del proyecto ha permitido, además, incorporar en una segunda fase de documentación otros conjuntos rupestres, sumando un total de 35 abrigos, distribuidos en las zonas geográficas del Parque Cultural del río Vero (Huesca), Núcleo rupestre de Valonsadero (Soria), Parque Cultural de Albarracín, Extremadura y Murcia. En este sentido, el principal resultado de esta investigación ha sido aportar un concepto diferente en el registro, análisis y valorización del arte rupestre que ha permitido un aprovechamiento más exhaustivo de la documentación gráfica y métrica realizada. Asimismo, se contribuye al paulatino cambio en el es-

²¹ Vid. apdo. 3.2.1 <http://jornadastecnicasarterupestre.files.wordpress.com/2012/04/jornadas-tecnicas-arte-rupestre.pdf> (último acceso: septiembre de 2017).

* <http://3dscanner.es/proyectoaram> (último acceso: agosto de 2017).

pacio de representación de la propia documentación, de soportes bidimensionales a tridimensionales, y se facilita el intercambio de la información tanto a nivel científico como también divulgativo, con una representación gráfica tridimensional mediante nuevos soportes digitales (Angás / Bea 2014, 2015).

3.2.2.2. Metodología

Aglutinar innovación tecnológica con una metodología madurada y contrastada no siempre son dos parámetros que se conjugan perfectamente. Muchas veces vienen asociadas a la novedad técnica destacada del momento para el estudio del arte rupestre con el objetivo de certificar una justificación científica de un determinado proyecto. Todos estos parámetros están produciendo un desaprovechamiento de todos los recursos que actualmente poseemos para la documentación del arte rupestre. Uno de estos problemas se debe a la inmediatez de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). La denominada obsolescencia programada afecta tanto a los dispositivos físicos como a la tecnología que los articula. Esta innovación tecnológica ha originado ciertos desajustes en cuanto a su utilización y, sin duda, avanza mucho más rápidamente que su propio aprendizaje, análisis, comprobación y, sobre todo, verificación de resultados. Si hablamos, por ejemplo, de un *corpus* procedimental que organice los procesos no encontraremos una unanimidad en cuanto a su gestión. Por ello, la línea de investigación y procesos que hemos desarrollado ha tenido como objetivo final la

realización de un método que sea equilibrado con la finalidad y la gestión de la información.

Antes de comenzar, deberíamos formularnos varias preguntas y en función de las respuestas articularemos un método de registro u otro, por ello no resulta en absoluto obvio preguntarnos qué queremos obtener y cómo vamos a organizar la información final.

No debemos olvidar que la documentación geométrica del arte rupestre no solo constituye una herramienta esencial para el análisis científico de la representación gráfica de las ideas de las sociedades prehistóricas que lo generaron sino que también representa una herramienta para analizar su conservación y con ello la preservación del arte rupestre. Además, de la documentación y la conservación se desprende un tercer aspecto, no menos importante, dirigido a la sociedad de la información actual: la difusión y puesta en valor del arte rupestre gracias a la aportación de la información gráfica obtenida dentro del mismo proceso metodológico.

La innovación técnica ha sido posible gracias a la incorporación de nuevos elementos, tanto de *hardware* como de *software*, que se han puesto en relación con la geomática en los últimos años en el proceso de documentación del arte rupestre. Sin embargo, la carencia de estándares o procesos normalizados tanto en el método de registro como en su análisis ha tenido como resultado un conjunto de datos dispersos. Concretamente, la reciente tendencia de aplicar técnicas tridimensionales ha generado cierto desequilibrio en proyectos de documentación geométrica. La razón de este desequili-

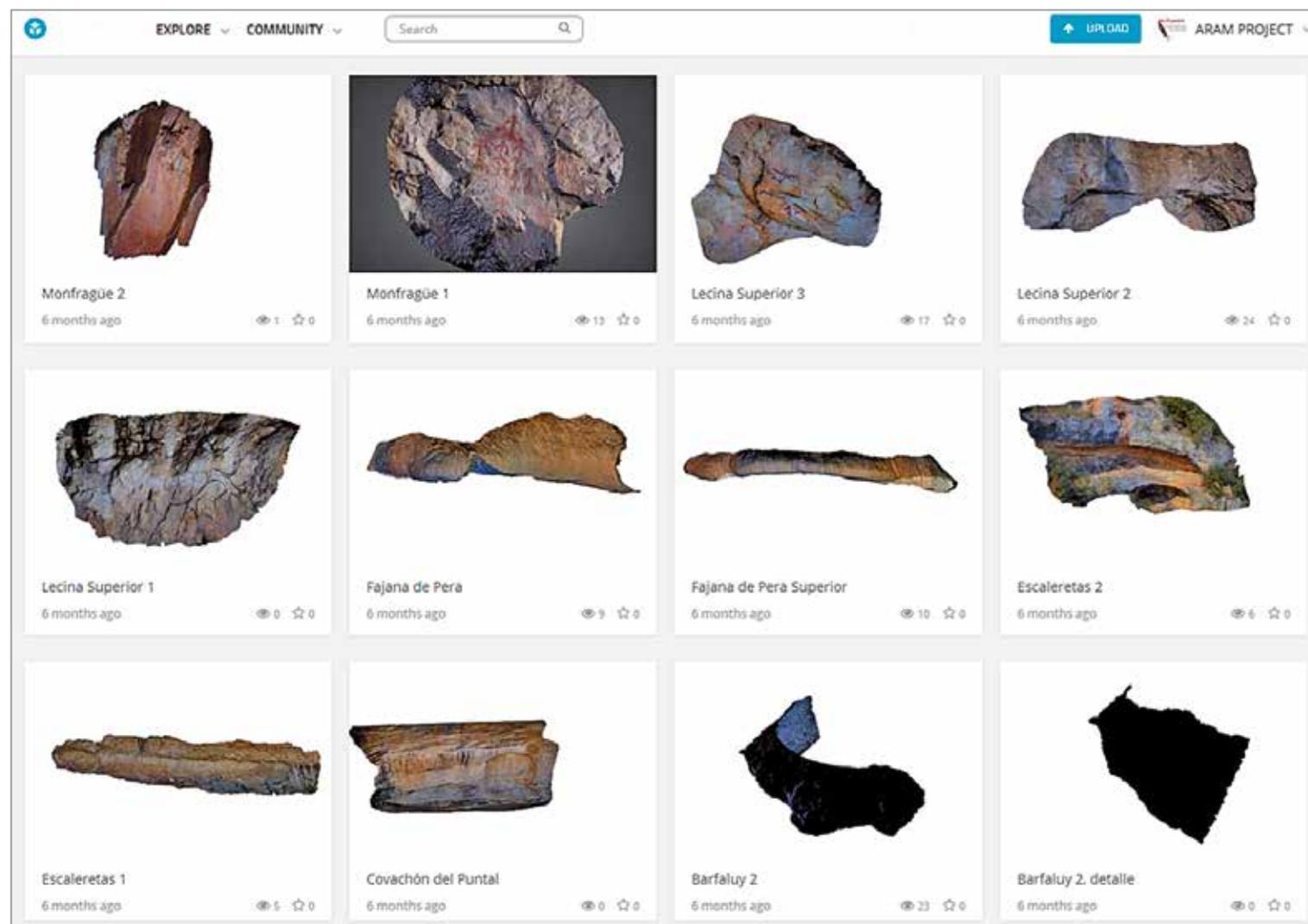


FIG. 84. Repositorio web tridimensional de cada abrigo y cueva rupestre del proyecto ARAM dentro del gestor de modelos 3D *Sketchfab* (vid. supra).

brio ha sido favorecer las técnicas o medios empleados como fruto de una tendencia social sin tener en cuenta una reflexión metodológica contrastada. Es cierto que, en los últimos años, las técnicas tridimensionales han propiciado también un cierto escepticismo en la investigación científica respecto a sus resultados cuando no ha habido un análisis previo de los objetivos de cada trabajo. Esta es la razón por la que debemos preguntarnos: ¿es necesario un registro tridimensional para generar únicamente un video o una simulación infográfica?, ¿existen otras técnicas más asequibles si sólo perseguimos un objetivo divulgativo?

Así, del mismo modo que se genera una documentación con los datos registrados, que equivaldría al almacenamiento de la información registrada, hemos buscado herramientas que sean válidas para su adaptación en repositorios web que no presenten restricciones. Para ello, se ha trabajado en la línea de establecer tipos de formatos métricos y gráficos, en formatos asequibles y fáciles de manejar que permiten obtener una mayor difusión del abrigo rupestre y de la misma manera proporcionan una mayor comprensión del yacimiento al público en general, especialmente teniendo en cuenta que muchos de ellos se encuentran en zonas de difícil accesibilidad.

Los soportes que se han utilizado para su difusión han sido gestores web de modelos tridimensionales²². Estos gestores permiten el intercambio y visualización de abrigos y paneles rupestres en una parte o en su totalidad. Sin embargo, existen actualmente condicionantes que de algún modo limitan su plena visualización e interacción plena. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, por lo que ha sido necesario comprimir la información prescindiendo de una mayor resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; y (3), la adopción de formatos que fuesen fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario.

3.2.2.3. Fases de realización

Las diferentes etapas de actuación establecidas en el proyecto han quedado divididas en tres períodos iniciales desde octubre de 2012 y en las que se han analizado los siguientes factores: el estudio previo de cada abrigo rupestre, el registro tridimensional y de calcos digitales, la gestión de la información recogida y, por último, la adaptación de los resultados a una plataforma web. Posteriormente, a partir de marzo de 2013, se incorporó una nueva fase junto con el Departamento de Ingeniería Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, dedicada a la documentación mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron. Esta última etapa se realizó gracias a una ayuda de investigación de la Fundación de la Agencia Aragonesa para la Investigación y Desarrollo (ARAID). El objetivo fue la documentación del paisaje inmediato de algunos conjuntos rupestres desde una perspectiva aérea que definiese una contextualización y estudio del paisaje donde se encuentran las estaciones rupestres²³.

3.2.2.4. Herramientas utilizadas en la documentación gráfica y geométrica

Para cada uno de estos trabajos se utilizaron tecnologías adaptadas a las necesidades y precisiones requeridas en cada uno de los

soportes geomorfológicos donde se encontraban las manifestaciones artísticas, teniendo muy en cuenta todos los problemas que entrañaba la utilización de este tipo de técnicas. De esta manera, los requisitos metodológicos resultaban meridianos: por un lado era necesario obtener una utilidad científica con la máxima calidad gráfica y métrica que proporcionase una herramienta que resultase de fácil gestión, mientras que, por otro lado, dentro del mismo proceso metodológico, era necesario que toda esa información estuviese organizada a través de unos estándares básicos que permitiesen en un futuro su trazabilidad y puesta en valor.

Respecto a la metodología y tratamiento de la información adquirida en campo, podemos dividirla en tres grandes grupos interrelacionados, extrayendo de cada uno de ellos diferentes niveles de información métrica y gráfica. Para cada uno de estos grupos se utilizaron unas herramientas adaptadas al registro y su organización. Podemos sintetizarlas en:

A. Topografía de apoyo, que constituye la base y, por consiguiente, la columna vertebral en la que se apoyó el resto de técnicas. Para esta fase se utilizaron sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) en modo cinemático y estático para la georreferenciación exterior y, además, una estación total para el control de puntos singulares en los diferentes paneles pictóricos. Este sistema tiene un valor doble ya que, por un lado, sirve de patrón para comprobar los resultados geométricos y, además, discrimina la calidad de la información. Este factor permitirá la posibilidad, en un futuro, de ampliar y monitorizar el área documentada.

B. Combinación de diferentes tipos de escáneres tridimensionales, dependiendo siempre del tipo de soporte y detalle necesario, con unas tolerancias desde un centímetro para las zonas generales hasta 84 micras en los grabados y pinturas que precisaron de una exhaustiva documentación. Dentro de estas nuevas técnicas de escáner 3D destinadas a la documentación del arte rupestre, podemos distinguir diferentes tecnologías tecnológicas utilizadas tales como: diferencia de fase, tiempo de vuelo, triangulación y luz blanca estructurada. La experiencia en los últimos años ha permitido el aprovechamiento de esta tecnología siempre en combinación con otras técnicas de documentación como la topografía, la fotogrametría y los estudios relacionados con sistemas de información geográfica. A través de la información generada por esta herramienta, se obtiene un modelo 3D con la precisión acorde al objeto, del cual se pueden realizar una gran cantidad de análisis posteriores para optimizar el conocimiento y la documentación del arte rupestre. Esta técnica permite afrontar nuevos enfoques metodológicos gracias a la creación de bases de datos (*vid. apdo. 3.7*). Asimismo, este registro se puede utilizar como un nuevo soporte científico transdisciplinar, tanto en su labor de prevención, protección y conservación como en su posterior difusión cultural a través de diferentes plataformas digitales.

C. Técnicas de fotogrametría terrestre con apoyo topográfico. La aplicación de estas técnicas ha sido de gran valor para mejorar la calidad gráfica de los datos aportados por los diferentes tipos de escáner 3D en la fase precedente. La utilización de la fotogrametría en entornos rupestres se puede emplear para la mejora gráfica y métrica de determinados conjuntos. De esta manera, a diferencia con otras disciplinas, como la arquitectura con algo más de independencia, en entornos rupestres siempre deberá combinarse con técnicas de escáner 3D o estación total como control singular de los puntos de apoyo. Para esta etapa se han utilizado diferentes cámaras y objetivos calibrados, siempre con el apoyo de puntos de control extraídos

²² Para el proyecto ARAM se ha utilizado la plataforma <https://sketchfab.com/jorge.angas> que además de ser gratuita proporciona una alta compatibilidad con ficheros tridimensionales, navegadores y dispositivos móviles. Sin embargo, el número de este tipo de gestores está creciendo en los últimos años articulados como repositorios de intercambio de modelos tridimensionales (*vid. apdo. 3.7.2*), pese a la carencia métrica en la mayoría de ellos.

²³ Véase el ejemplo de una imagen esférica programada para dispositivos móviles en el núcleo rupestre de Valonsadero (Soria) en <http://3dscanner.es/usuarios/360/valonsadero/Valonsadero.html> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 85. Ejemplo de las técnicas utilizadas en la calibración del color mediante diferentes tipos de patrones de cartas de color estandarizadas con la asignación de los diferentes valores usados. Ejemplos del *Salon Noir* en la cueva de Niaux (abajo izquierda) y en la cueva de Roucadour (arriba derecha) (Angás et al., 2014: 28, FIG. 3).

con dos técnicas: modelo 3D y puntos singulares registrados por medio de una estación total. Igualmente, la aplicación de estas técnicas ha permitido la creación de un modelo geométrico paralelo de cada uno de los paneles, desarrollando de esta manera una herramienta dual de comparación analítica verdaderamente útil.

Una vez establecidos los diferentes grupos tecnológicos, podemos hacer una metáfora conceptual del sistema empleado, con el ejemplo de las muñecas *matrioskas* rusas, una propuesta metodológica encajada donde todo está relacionado dentro de un mismo sistema desde una escala cartográfica exterior a otra micro topográfica de cada uno de los paneles. Asimismo podemos establecer la siguiente relación macro/micro:

Fotogrametría aérea > Sistema GNSS (exterior) > estación total > escáner de tiempo de vuelo > escáner de diferencia de fase > fotogrametría > dos tipologías diferentes de escáner de luz blanca estructurada.

Esta relación, en la documentación del arte rupestre, resulta de una importancia significativa ya que nos permitirá en cualquier periodo futuro la comparación de modelos y, con ello, la detección de cualquier cambio geomorfológico mediante estas dos actuaciones:

- Ampliando el estudio a otras zonas, siempre dentro del mismo sistema de coordenadas empleado.
- Controlando y cuantificando cualquier tipo de alteración tanto del soporte como de las pinturas y grabados rupestres.

La aplicación de la técnica escáner 3D en la fase de documentación de campo se planteó únicamente como nexo que conjugó e integró otras técnicas de documentación (como la fotogrametría y la topografía), constituyendo un mismo esquema metodológico.

Para la correcta elección de la técnica utilizada, existen unos factores heterogéneos dependiendo de las características particulares de cada estación rupestre documentada. Por ello, resulta necesario distinguir diferentes tipologías instrumentales empleadas, que citamos a continuación:

- Escáner láser (utilizando equipos de tiempo de vuelo mod. *Leica Scanstation* y equipos de diferencia de fase mod. *Leica HDS 6100* dependiendo del abrigo, distancia al panel y entorno inmediato). La utilización de cámaras externas en combinación con escáneres de tecnología de tiempo de vuelo y diferencia de fase resulta trascendental en abrigos con arte rupestre. Normalmente las cámaras internas de los escáneres no reúnen la suficiente calidad gráfica para la docu-

mentación del arte rupestre. Por este motivo, decidimos utilizar esta combinación con un sistema externo, permitiéndonos controlar perfectamente el proceso de los siguientes vectores: velocidad de disparo, control de obturación, ISO, condiciones lumínicas, balances de blancos, temperatura del color mediante carta de color calibrada, etc.

- Escáner de luz blanca estructurada (mod. *Artec MHT*) para representar los detalles más significativos en cada abrigo con una resolución de 500 micras. Este escáner se utilizó únicamente para la digitalización de paneles rupestres. La gran ventaja de este sistema es su portabilidad y versatilidad para zonas que no excedan más de 4 m². Aunque dispone de una cámara para la captura de la textura, esta fue mejorada en algunos casos por técnicas fotogramétricas.
- Sistemas GNSS (para georreferenciar la localización). Utilizado únicamente en aquellos casos en los cuales su localización representa algún tipo de problema, como el caso de la cueva de la Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca). En este caso, concretamente, se empleó la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón (ARAGEA) permitiendo un ahorro técnico considerable utilizando como estación base las diferentes antenas instaladas en el territorio aragonés²⁴.

Por último, se realizó el encaje final de los diferentes estacionamientos del láser escáner a través de dianas (*Black&White*) previamente adquiridas con una estación total (mod. *Leica TS151 3*). La creación independiente de un sistema de coordenadas propio para cada conjunto permitió tanto controlar la precisión final del registro de cada modelo como ampliar y monitorizar, en futuras campañas, la zona de documentación en cada uno de los abrigos registrados²⁵. Aunque la aplicación del escáner 3D permite generar una textura original de los paneles que componen cada abrigo, se optimizó cada valor cromático RGB de cada punto adquirido, agregando una capa de texturas al modelo tridimensional. Estas texturas se obtuvieron a partir de la toma de imágenes con una cámara (*Canon EOS 600 D* y *Canon 6D*) con diferentes focales fijas de 24 mm., 50 mm. y 90 mm. La técnica utilizada para la adquisición de la textura en cada abrigo fue diferente, dependiendo de sus características, utilizando elementos auxiliares adaptados a cada morfología concreta. Para el posterior ajuste radiométrico de las imágenes, se utilizó una carta de calibración de 24 colores estandarizada. La utilización de este patrón permite adaptar el ajuste radiométrico y conseguir la máxima homogeneidad para cada uno de los paneles y en el modelo general obtenido. Del mismo modo, resultó necesario tomar las fotografías en formato RAW, donde quedan registrados todos los valores en un «negativo digital» sin modificaciones y sin ningún tipo de compresión de la imagen. Conjuntamente que-

24 La Red de Geodésia Activa de Aragón (ARAGEA) se crea a partir del año 2009 y está compuesta por veintiuna estaciones propias distribuidas por el territorio de la Comunidad Autónoma de Aragón, dando respuesta a una creciente demanda en servicios de posicionamiento por satélite. Es un servicio libre y gratuito de posicionamiento de alta precisión con receptores GNSS (Sistema de Navegación por Satélite) dentro del territorio de Aragón en *datum* ETRS89, y dentro de un marco coherente con la Red REGENTE y las estaciones permanentes del IGN y otros suministradores externos pero públicos. Dicha red proporciona correcciones de código y fase para los sistemas de navegación GPS, GLONASS y GALILEO, tanto en tiempo real RTK como en postproceso a través de ficheros RINEX. Al mismo tiempo, el sistema constituye un marco de referencia geodésico activo en ETRS89, que sustituye y complementa con ventajas a las tradicionales redes geodésicas basadas en vértices fijos. <http://gnss.aragon.es/> (último acceso: noviembre de 2017).

25 Recientemente se ha completado esta investigación con otra paralela, realizando un estudio diacrónico del abrigo rupestre de Arpán, promovido gracias a la Comarca de Somontano de Barbastro y Parque Cultural del Río Vero, permitiendo iniciar un estudio de monitorización geomorfológico. Sin duda, este tipo de iniciativas constituyen un avance puesto que sumadas a datos meteorológicos, geológicos, gráficos y geométricos constituyen la base de la actuación en materia de conservación y prevención.

dan almacenados de un modo independiente los ajustes de luminosidad y temperatura de la luz.

3.2.2.5. Calcos digitales

Como parte integrante del proceso de documentación de los conjuntos rupestres, el proyecto ARAM contempla la revisión de los abrigos decorados y la realización de nuevos calcos digitales. Como se ha destacado en otros estudios, las dificultades para tratar de minimizar al máximo el componente subjetivo en la realización de los calcos han sido objeto de debate y crítica, al fin y al cabo, calcar es elegir (Lorblanchet, 1993: 329; Bea, 2012). De la misma manera, podemos trazar un paralelismo cuando Almagro (2010) definía cierto componente subjetivo para interpretar la arquitectura (*vid. infra* FIG. 220).

En los últimos años, con las mejoras que ofrece el tratamiento digital de la imagen así como la aplicación de nuevas metodologías de documentación, han surgido opiniones que llegan a relativizar el valor del calco como elemento de análisis en los estudios de arte rupestre. Así, apuntan a la toma fotográfica, o derivados de ésta, como el único elemento fiable para aportar información objetiva sobre el conjunto analizado, incidiendo en que el calco arrastra una fuerte carga subjetiva que invalidaría, o relativizaría, su uso. Sin embargo, y precisamente, el uso de las nuevas tecnologías, con especial atención a la fotografía y al uso de determinado *software*, nos permiten eliminar casi por completo el componente subjetivo en la elaboración de calcos. Hoy en día, la confección de calcos digitales a partir de fotografías permite en todo momento contar con una imagen de comprobación del sujeto de estudio. Esta imagen, mejorada con el tratamiento digital mediante diversos programas más que asequibles, como *DStretch* o *HyperCube*, permite obtener una visibilidad fiel del elemento a estudiar sin necesidad de humectar las pinturas, estableciendo las diferencias entre pigmento y soporte (Quesada, 2008-2010; Bea, 2012; Martínez *et al.*, 2013).

Las dificultades reales existentes en materia de visibilidad de determinados motivos rupestres hacen que la presentación de los mismos sólo mediante fotografía aparezca como un recurso insuficiente. En ocasiones, ni siquiera la fotografía convencional directa de los elementos rupestres permite un reconocimiento sencillo de los motivos, si bien el uso de determinadas aplicaciones, como las citadas o análisis multispectrales y de radiometría, pueden ayudar en la lectura del conjunto. Además, la imposibilidad real (física, burocrática, de conservación, etc.) de visitar en persona cada yacimiento hace del calco la herramienta más útil para aproximar al investigador a los conjuntos analizados por otros investigadores.

La subjetividad referida en la elaboración de los calcos se minimiza casi por completo con la metodología digital propuesta (Bea, 2012), atendiendo siempre a la voluntad del investigador que realiza los mismos. Consideramos, por tanto, el calco como una herramienta de estudio, análisis y presentación de resultados perfectamente vigente, necesario para presentar de forma más legible el estudio de cualquier conjunto rupestre. Su valor como elemento de análisis no se puede suplir exclusivamente mediante la fotografía, concibiéndose ambas técnicas y sus resultados como complementarias. Siguiendo estos criterios, hemos tratado de aportar en el proyecto ARAM, en la medida de lo posible, la información generada con la elaboración de calcos digitales.

A tenor de lo expuesto, resulta manifiesta la necesidad de la aplicación de un método específico en función de unos objetivos, dentro de la documentación geométrica del arte rupestre. La diferencia entre los primeros momentos de la realización de una fotografía/calco y los actuales es que la propia interpretación no requería un

manejo técnico de la información y era posible su análisis técnico y divulgativo por cualquier técnico sin una formación en la gestión de herramientas geomáticas. La información podía llegar a cualquier persona técnica y no técnica. Ahora bien, parece una incongruencia que en la denominada «sociedad actual de la información» el problema que encontramos sea, precisamente, la dificultad en cuanto a la gestión de toda esa información generada. Si nos centramos en técnicas puramente tridimensionales, la explosión de técnicas e instrumentación han coincidido en la primera década del siglo XXI, propiciando una subordinación del objetivo perseguido en sí mismo. Por ello, se ha favorecido cada vez más una incipiente estandarización en cuanto a resultados, tanto a nivel de *hardware* como *software*. Es muy probable que esta estandarización tenga más componentes comerciales que técnicos, entre la oferta y la demanda, pero, sin duda, existe una relación directamente proporcional entre el número de personas que utilizan este tipo de información y su intercambio técnico y, por consiguiente, no existiría una fractura tan acusada entre la fase de registro y la interpretación de los datos. Entendiendo siempre el proceso como una democratización del resultado tridimensional (Roecker, 2008: 345), y del mismo modo que se genera un *corpus* científico con los datos obtenidos, resulta necesario contemplar, dentro del mismo proceso interdisciplinar, acciones divulgativas transdisciplinares para su uso por el resto de la sociedad. Para ello, es necesario elaborar ficheros, en formatos de intercambio y con un mínimo nivel de complejidad en su gestión, que permitan obtener una mayor difusión del abrigo o cueva, redundando en una mayor comprensión del conjunto rupestre.

De todo el proceso anteriormente expuesto se desprenden varias cuestiones para reflexionar:

- ¿Podremos trabajar con los datos generados actualmente en los próximos años?
- ¿Es necesario generar ficheros de intercambio en formatos «no propietarios»?
- ¿Cuál tiene que ser el protocolo para almacenar toda esta información? Y en todo caso, ¿quién tiene la responsabilidad?
- ¿Qué relación debemos establecer entre precisión y resultados finales?

3.2.2.6. Modelos tridimensionales

La información obtenida se sintetiza en las denominadas nubes de puntos, proporcionadas por los diferentes escáneres de tiempo de vuelo y diferencia de fase. Los resultados fueron registrados conjuntamente apoyados en las dianas (*Black&White*) tomadas con la estación total. El registro y ajuste de los diferentes escaneados se realizó a través de los diferentes módulos del programa *Cyclone* v.8 con un error medio de alineación entre las nubes de puntos de tres milímetros. La utilización de cada una de las redes GNSS de cada Comunidad Autónoma ha permitido su georreferenciación. Este factor posibilitará su correcta ubicación, control estructural y ampliación de la zona documentada en cualquier período.

El proceso de adquisición de las texturas fotográficas y RGB de la nube de puntos fue realizado de modo dual e independiente con diferentes objetivos finales:

- Por un lado, la adquisición fotográfica para mapeado del modelo triangulado. La textura final ha dado como resultado los recorridos realizados sobre los modelos 3D finales.

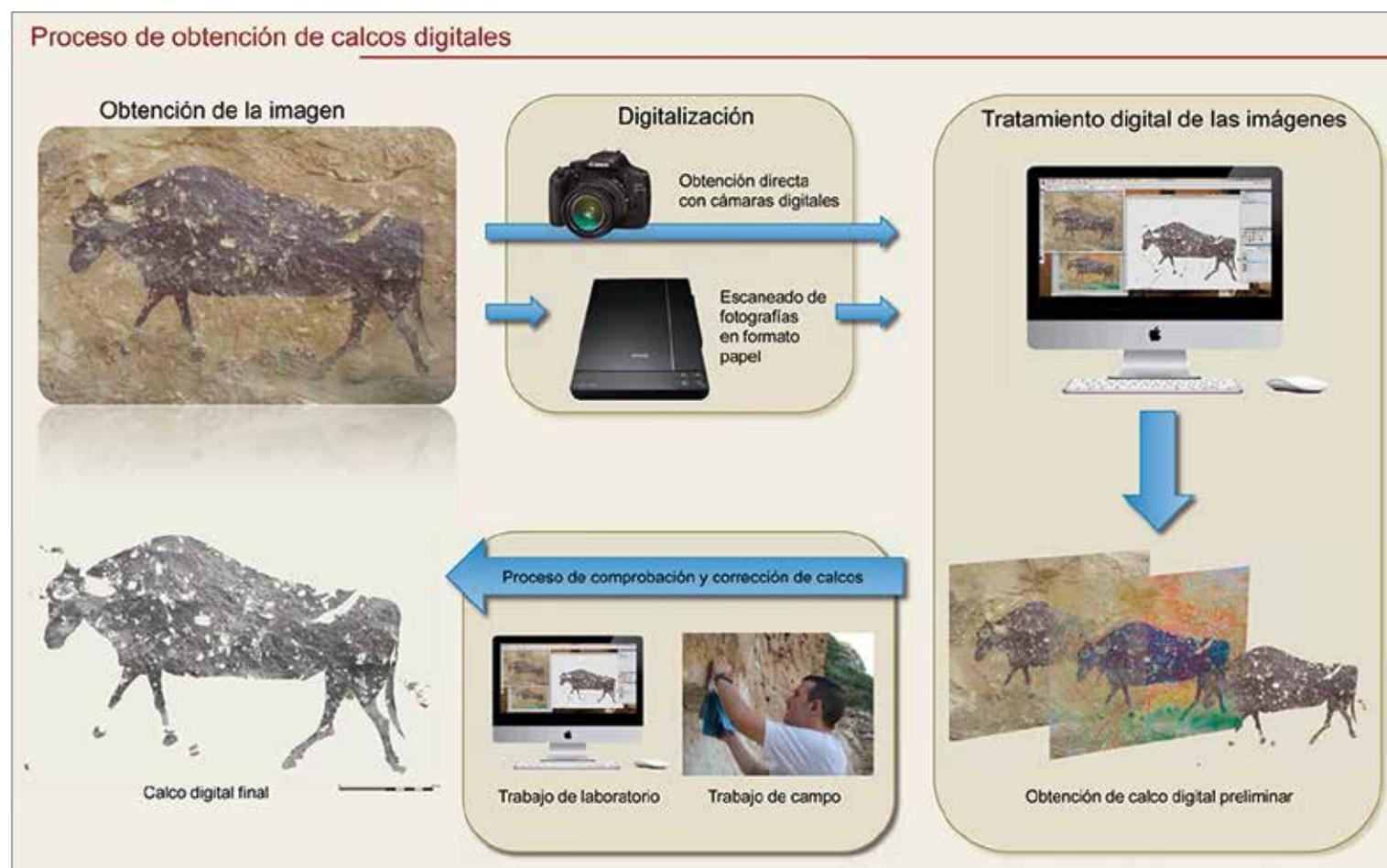


FIG. 86. Esquema del proceso de realización de calcos digitales según Bea (2012).

- De igual modo, para la adquisición del color en cada escaneado, puesto que el modelo de diferencia de fase *Leica HDS 6100* no posee ninguna cámara y la cámara integrada en el modelo de escáner de tiempo de vuelo (*Leica Scanstation*) es de muy baja resolución, se utilizaron diferentes rótulas con una cámara *Canon EOS 550 D / 6D* y un objetivo de 8 milímetros. Cada una de las rótulas y barras son de diferente métrica en función de cada modelo de escáner, con el fin de alinear el eje de muñones del escáner con el centro del sensor CCD de la cámara. El resultado final de este ajuste fue utilizado únicamente para la creación de un servidor web que integraba todos los escaneados y que se ejecutaba a través de *Internet Explorer* mediante el *plugin Leica «Truview»*²⁶. Su fácil accesibilidad le permite realizar cualquier medición y localización de coordenadas a través de un navegador. El trabajo con este tipo de «servidor web integrado» permite autogestionar y vincular cualquier otro tipo de ficheros (imágenes, base de datos, referencias bibliográficas, etc.) en cada uno de los escaneados, como servidor local o directamente en la propia web. Por último, respecto a la incorporación y gestión de metadatos, este tipo de archivos almacena una plantilla en formato xml editable con cualquier otro programa gratuito (*CatMDEdit*²⁷, *XMLNotepad* o *Notepad++*), con los principales datos del proceso de captura de la información.

La triangulación y ajuste cromático del modelo para la generación de los modelos tridimensionales se realizó con el *software 3DReshaper*. Utilizando este último para la reconstrucción de algunos elementos del paisaje.

3.2.2.7. Resultados y conclusiones

Los conjuntos con arte rupestre representan un caso singular de estudio y difusión cultural. Cuestiones relativas a su conservación, visita y actuaciones dirigidas a la adecuación de los mismos y de su entorno resultan siempre complejas, sobre todo en el caso del arte paleolítico. Pero a todas esas dificultades se unen otras nuevas en el caso del arte rupestre postpaleolítico, generalmente al aire libre. La dificultad en el acceso a los sitios, mala conservación general de los conjuntos, la vulnerabilidad ante acciones vandálicas incontroladas e incontrolables, así como, en cierto grado, menor espectacularidad de los contenidos pictóricos hacen que las actuaciones sobre estos bienes culturales aparezcan muy complejas. Resulta, por tanto, muy difícil seguir los propósitos de ICOMOS²⁸, sobre todo, en lo referido a la infraestructura interpretativa. Por ello, el proyecto ARAM plantea una propuesta orientada a la consecución de los siguientes objetivos básicos:

- a) Garantizar la conservación del bien cultural mediante la aplicación de técnicas de documentación no intrusivas.

²⁶ Este *plugin* resulta muy útil en cualquier tipo de documentación patrimonial ya que permite la gestión tridimensional por parte de cualquier usuario, de manera muy simple, utilizando únicamente con el navegador *Internet Explorer*. De esta manera, se pueden extraer coordenadas x, y, z diferencias de alturas y distancias. Además se puede autogestionar una base de datos integrando en el espacio documentado cualquier tipo de documento adicional que explique por ejemplo el estado de conservación, alteraciones o simplemente información adicional http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-TruView_63960.htm (último acceso: octubre de 2017).

²⁷ Herramienta de editor de metadatos *open source* que facilita la descripción de los recursos de la información geográfica. Se desarrolló como resultado de la colaboración científica y técnica entre el IGN y el Grupo de Sistemas de Información Avanzados (IAAA) de la Universidad de Zaragoza y *GeoSpatiumLab* <http://catmdegit.sourceforge.net/> (último acceso: octubre de 2017).

²⁸ *Carta para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural* de Québec (2008).

- b) Facilitar el acceso virtual del público general al bien. Esta fase constituye la materialización de uno de los objetivos primordiales del proyecto: obtener un equilibrio entre la información científica y su propia difusión a través de un repositorio web. La adaptación de los resultados a este tipo de entorno se ha concebido como la continuación del mismo proceso metodológico. Para ello, los resultados han sido adaptados a formatos compatibles con la mayoría de *software* a nivel de usuario, siendo necesario en muchas ocasiones efectuar una compresión y reducción de la calidad gráfica de los mismos en beneficio de una mayor agilidad en un entorno web.
- c) Difundir siempre a partir de evidencias científicamente contrastadas, siendo detalladas y sistemáticas, aunque adaptando el lenguaje a un público real de componente heterogéneo.
- d) Tratar de que la interpretación, y su presentación, englobe algo más que el mero bien cultural, vinculándolo a su contexto geográfico.
- e) Garantizar que el bien patrimonial y los eventos relacionados con él pasen a formar parte activa de la comunidad local a la que pertenece, incentivando un sentimiento de respeto, sensibilización y conciencia con valor patrimonial y afectivo.
- f) Establecer un funcionamiento sostenible desde el punto de vista social, económico y medioambiental, es decir, creando una plataforma web que, a modo de ventana digital, acerque de forma global una propuesta con potencialidad turística.

El principal resultado de esta propuesta ha sido aportar un concepto diferente en el registro, análisis y valorización del arte rupestre, lo que nos ha permitido un aprovechamiento más exhaustivo de la documentación gráfica y métrica realizada. Asimismo, se contribuye al paulatino cambio hacia la representación gráfica tridimensional a través de nuevos soportes digitales. Mediante la creación de una plataforma digital, en forma de página web, se cuenta con una verdadera base de datos gráfica y teórica, de acceso libre, rápido y uso intuitivo. El carácter flexible y de autogestión del diseño permiten incorporar con facilidad las nuevas fichas de aquellos conjuntos rupestres que se documentan, subrayando la importancia de la evolución diacrónica del proyecto, todo ello para conseguir la mejora del acceso de la ciudadanía a un Patrimonio Cultural tan frágil como es el arte rupestre, permitiendo la visita a lugares de difícil acceso (físico o administrativo), con elementos gráficos que aportan información visual del entorno (fotografías equirectangulares), contextualizando el yacimiento en su propio medio, así como un apoyo gráfico (fotográfico, calcos digitales) que mejoran la visibilidad de los motivos rupestres. De esta manera, se pretende huir de la confusión surgida entre lo «virtual» y la «imagen digital» para ayudar a la experimentación de lo sensible tratando de no llevar el objeto al museo sino abrir el museo al objeto (arte rupestre), abrazándolo y contextualizándolo.

El desarrollo de la plataforma digital ARAM, en modo alguno, persigue la sustitución o supresión de la visita a los conjuntos decorados, si bien se ha apuntado al cambio de naturaleza en las visitas a los museos al convertirse en metáfora (Deloche, 2002: 24), sino que persigue una mayor proyección social al hacer más accesibles las salas del museo más grande del mundo. Por otro lado, el carácter singular de este proyecto ha pretendido establecer un nuevo modo de combinación de las nuevas tecnologías de registro patrimonial, con un soporte digital web libre y ofreciendo herramientas sobre todo accesibles, donde cada usuario pueda interactuar con la

información y, además, asegurando una disposición de la información registrada, siguiendo un único método que integre y relacione de un modo recíproco un registro científico y divulgativo para lo cual se han de tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Registro de cada abrigo rupestre en su estado actual. Obtención de modelos métricos tridimensionales de cada conjunto para su documentación, conservación y protección patrimonial, prescindiendo, si es el caso, de otros elementos externos como los propios cerramientos.
- b) Estandarización de procesos. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos, asegurando la interoperabilidad y comunicación de la información por medio de la unificación, especificación y simplificación. Con ello, se facilita la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiéndose analizar de manera individual cada uno de ellos.
- c) Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionen la difusión y divulgación pública, utilizando formatos compatibles con *software* libre y fácil de gestionar. Con este proceso se consigue completar un grado mínimo de acceso y comprensión de la información al resto de la sociedad. Un ejemplo de ello es el *software* libre de procesamiento y edición de mallas tridimensionales desarrollado por el *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR) denominado *Meshlab*. Respecto a la inclusión y trabajo de metadatos con la arqueología existen varios ejemplos consolidados de gestión de bases de datos (*vid.* apdo. 1.3): <http://archaeologydataservice.ac.uk/> de la Universidad de York, o el proyecto Europeana <http://www.europeana.eu/portal/>²⁹.
- d) Metodología interdisciplinar en el proceso de estudio coordinada por cada disciplina. La finalidad fundamental es facilitar la gestión a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso con objeto de alcanzar una mayor divulgación del yacimiento arqueológico de manera gráfica y, sobre todo, geométrica. Esto posibilita, de un modo rápido y preciso, la visualización de cualquier elemento o parte de su estructura. De este modo, se ha logrado un desarrollo combinado, válido para una mayor valorización y divulgación de la información obtenida. Además, se contribuye a la propia investigación transdisciplinar, resolviendo los diferentes vacíos metodológicos y de conceptualización tridimensional, contribuyendo a una perspectiva integradora que evita la segmentación de la cadena informativa. Para ello, se han combinado diferentes técnicas topográficas con distintas tecnologías de escáner 3D, siempre en función de las particularidades de cada uno de los yacimientos documentados.
- e) Integración de aplicaciones gráficas y métricas de cada uno de los yacimientos en una plataforma web libre a través de un nexo didáctico: <http://3dscanner.es/proyectoaram>

A modo de conclusión final sobre la experimentación realizada en el proyecto ARAM, resulta necesario reflexionar acerca de cómo recoger y asimilar los continuos cambios tecnológicos actuales y aplicarlos correctamente, desarrollando un método científico para el arte rupestre. Sin duda, como se ha apuntado con anterioridad, es una carrera continua que requiere un aprendizaje constante ya que esta innovación tecnológica avanza mucho más rápidamente que su propia reflexión y aplicación metodológica, sin un *corpus* procedimental que organice verdaderamente los procesos. Es este un

campo en el que, además, se suelen confundir las múltiples posibilidades de los medios empleados con el objetivo científico último. Resulta por ello necesario asegurar una constante fija que apueste por un continuo aprendizaje e interdisciplinariedad entre el conjunto de investigadores que integran todas las técnicas de documentación, evitando una segmentación del proceso de investigación, transmisión y difusión de la información en beneficio de la propia documentación geométrica y gráfica del arte rupestre.

La idea y las técnicas empleadas, a modo de ensayo, para este proyecto realizado en el año 2012, han constituido la base metodológica de otras investigaciones relacionadas con el arte rupestre, como el apdo. 3.6.2 con la reconstrucción patrimonial mediante modelos tridimensionales de los abrigos rupestres del barranco de Calapatá (Cretas, Teruel) y el proyecto europeo HANDPAS, que pone a disposición de los investigadores y del público en general información teórica y gráfica mediante una plataforma web de libre acceso.

3.2.3. Cuevas paleolíticas: Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca)

JORGE ANGÁS / MANUEL BEA

3.2.3.1. Introducción

En este apartado presentamos una propuesta metodológica para la documentación geométrica centrada en conjuntos rupestres paleolíticos. La experiencia llevada a cabo en la cueva de la Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca) desde el año 2005 nos ha permitido esbozar un registro sistemático y preciso de la realidad física de la cueva. La aplicación de diferentes sistemas de documentación (escáner láser de diferencia de fase, escáner de luz blanca estructurada, microfotogrametría) hace posible obtener modelos tridimensionales de la cueva a diferentes escalas, así como ortofotografías rectificadas y nubes de puntos de alta densidad para las zonas más destacadas. Con el conjunto de estos datos, que proporcionan una alta resolución, es posible conocer la evolución diacrónica del estado de conservación tanto del soporte como de los motivos rupestres.

A pesar de que no se puede considerar, por sus dimensiones, una cueva propiamente dicha, en la cueva de la Fuente del Trucho se documentan representaciones parietales que por su número, temática y estilo hacen que podamos considerarla como un «santuario mayor del arte gravetiense» (Utrilla *et al.*, 2012, 2014a y 2014b; Utrilla / Bea, 2015). Su aparente aislamiento (hasta el momento es la única cueva con arte rupestre paleolítico en Huesca³⁰) no debe ser entendido como tal ya que su conjunto de manifestaciones rupestres, estilo y dataciones (Hoffmann *et al.*, 2017) permiten asimilar este conjunto dentro de los grandes territorios paleolíticos de la Costa Cantábrica y Norte de los Pirineos.

Tras el descubrimiento casual de la cueva en 1978, V. Baldellou coordina las diversas actuaciones llevadas a cabo en la Fuente del Trucho, ocupándose personalmente del estudio directo de las manifestaciones parietales, en colaboración con A. Beltrán (Beltrán / Baldellou, 1981; Beltrán, 1993), con R. Viñas en la elaboración de los calcos entre 1989 y 1991 (Baldellou, 1991 y 1994), con S. Ripoll, F.J. Muñoz y P. Ayuso, en la realización de la documentación fotográfica a partir del 2000 (Ripoll *et al.*, 2001 y 2005), y con P. Utrilla y M. Bea en el tratamiento digital y montaje de los calcos³¹.

30 Recientemente se ha presentado el conjunto pictórico de Cueva Hermosa (Calcaena, Zaragoza) que, muy probablemente, represente el segundo conjunto rupestre paleolítico en Aragón (Bea *et al.*, en prensa).

31 En la cueva se han llevado a cabo diferentes campañas de excavaciones arqueológicas, encargándose inicialmente A. Mir de los niveles musterienses (Mir, 1987) y P. Utrilla de los del Paleolítico Superior. En 2005 y 2014 se han llevado

29 *Vid.* apdo. 1.3 sobre el desarrollo de bases de datos desde principios del siglo XXI en los principales proyectos europeos.

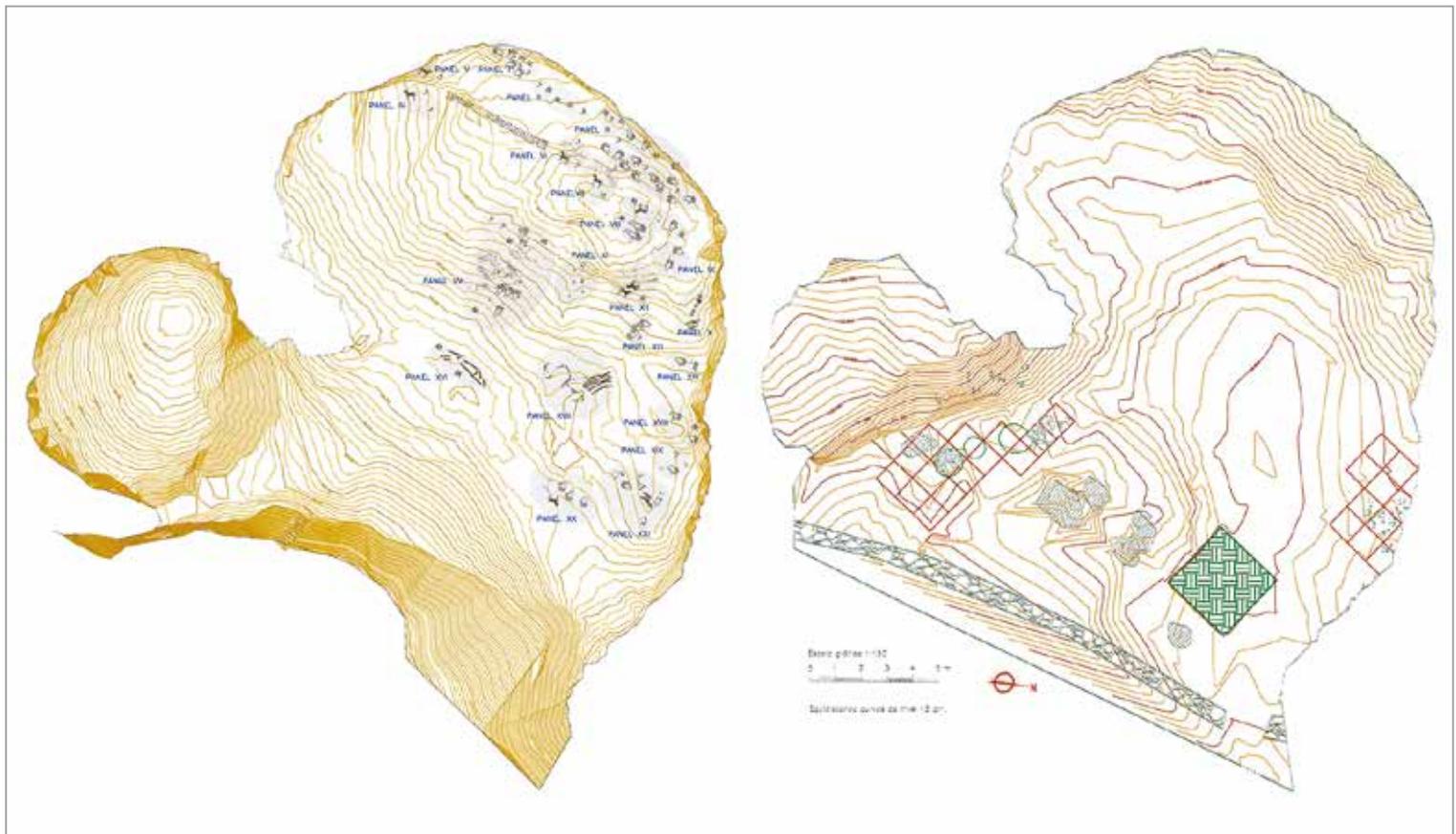


FIG. 87. Topografía de la bóveda y la planta de la cueva de la Fuente del Trucho situando las pinturas y la cuadrícula de la excavación del año 2005.

La importancia de este conjunto³² ha determinado su elección para el desarrollo de una metodología de documentación geométrica exhaustiva, sistemática y estandarizada que presentamos en las siguientes páginas.

La cueva de la Fuente del Trucho se sitúa en el barranco de Villacantal, en la margen izquierda del río Vero. Se trata de una cueva de dimensiones muy reducidas, cuya escasa profundidad determina que el interior de la cavidad permanezca en semipenumbra durante el día. Se aprecian dos zonas bien definidas: el panel exterior de los grabados, a la luz del sol, y los paneles de pinturas, en el interior de la cavidad y distribuidos tanto por el techo como por las paredes, concentrándose esencialmente en el friso más profundo. Con la excepción de tres manos en negativo de color negro, el cuerpo de las figuraciones pictóricas fueron realizadas en color rojo, destacando entre estas las manos en negativo con dedos incompletos así como representaciones zoomorfas (caballos, cérvidos, un cáprido) e ideomorfas (elementos trilobulados, series complejas de puntos).

La temática y el estilo de las figuraciones ya apuntaban a una realización del conjunto en momentos antiguos del Paleolítico, una propuesta confirmada recientemente por las dataciones U-Th de las costras que cubren algunas de las figuras (Utrilla *et al.*, 2014b; Hoffmann *et al.*, 2016; Hoffmann *et al.*, 2017).

Los estudios de documentación geométrica realizados desde el año 2005 han determinado el establecimiento de diferentes fases de aplicación metodológica y el empleo de una variada tipología ins-

trumental, tratando de adaptar los trabajos de documentación a las necesidades científicas en función de la disponibilidad de soluciones técnicas más ambiciosas. En esta línea, resulta necesario establecer un criterio científico técnico que permita discernir entre el medio técnico utilizado y su utilidad al problema planteado. En ningún caso la instrumentación utilizada resulta un fin en sí mismo, y más aún en el caso del arte rupestre, disciplina en la que cada abrigo o cueva representa una singularidad tal que resulta tremendamente difícil extrapolar técnicas a problemáticas de conservación y documentación con una idiosincrasia particular.

Concretamente, en el caso de la Fuente del Trucho y durante los primeros años de investigación, los trabajos se limitaron únicamente al establecimiento de una topografía básica que definiese la morfología de la cueva, con una estación total, diferenciando planta y bóveda, con la proyección de todas las pinturas en una planimetría de la planta de la cavidad. Esta solución fue realmente útil para conocer la distribución de las pinturas dentro de la cueva, además de su posición geométrica, si bien no solucionaba otros problemas como: la orientación de las pinturas (emplazadas en el techo), una visión global por medio de una imagen, la utilización de las ortofotos para su empleo en la generación de calcos, ni tampoco permitió una geolocalización absoluta que resolviese los diferentes problemas catastrales y de propiedad vertical. Posteriormente se fueron estableciendo metodologías específicas más desarrolladas que permitieron establecer un registro completo tridimensional de la bóveda con el fin de identificar todos sus motivos pictóricos mediante una ortofotografía rectificadas de gran resolución.

3.2.3.2. Metodología

La documentación del soporte, y de las diversas afecciones que sufre, debe servir no sólo para determinar con la mayor precisión el estado de conservación actual sino también su evolución diacró-

nuevos sondeos bajo la dirección de P. Utrilla / L. Montes (Montes *et al.*, 2006; Utrilla *et al.*, 2010).

³² Esta documentación se inserta dentro de la línea de investigación centrada en arte rupestre del grupo PPVE (H-07) de la Universidad de Zaragoza y del Proyecto *Repensando viejos yacimientos... ampliando nuevos horizontes en la Prehistoria del Valle Medio del Ebro* (HAR2011-27197).

nica. La aplicación de un protocolo de documentación geométrica integral y estandarizada de alta resolución, como el llevado a cabo, ha permitido conocer y fijar mediante el establecimiento de puntos de control y valores colorimétricos, una monitorización de la superficie conjunto rupestre. Con la metodología aplicada se obtiene una microcartografía, tanto 2D como 3D, de gran precisión en la que se plasman diferentes capas de información, atendiendo a los diversos elementos que componen el objeto de estudio.

Así, se ha llevado a cabo una exhaustiva documentación geométrica mediante diferentes metodologías y tecnologías adaptadas, con un doble objetivo: por un lado, el de crear un modelo tridimensional preciso de la cavidad, generando además una ortofotografía rectificada del techo de gran resolución en la que poder determinar con precisión la ubicación y orientación de cada motivo pictórico; y, por otro lado, contar con los valores métricos precisos en el sistema de coordenadas absoluto UTM

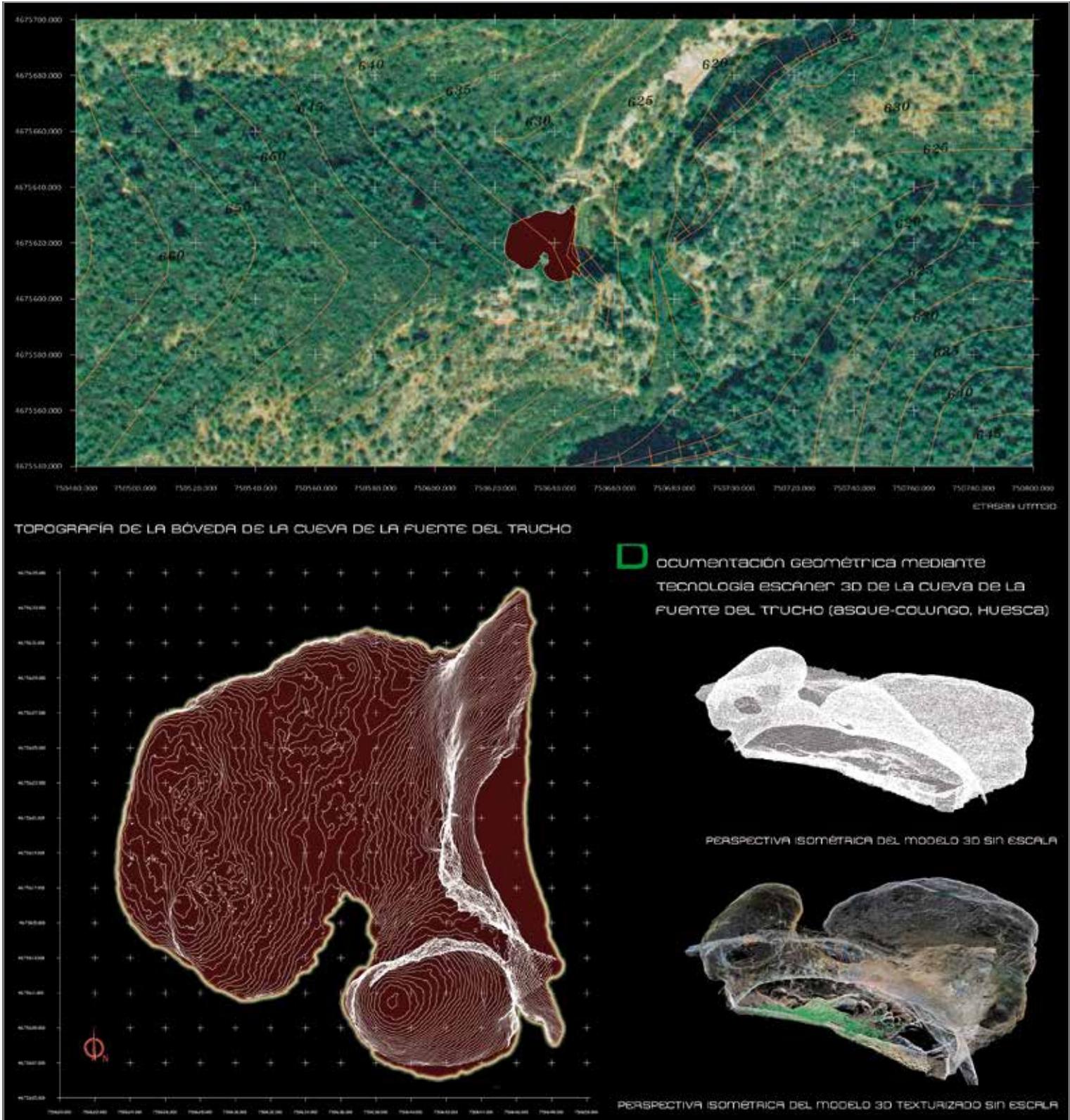


FIG. 88. Localización de la proyección de la planta de la cueva (imagen superior) sobre ortofoto del PNOA (<http://pnoa.ign.es/>) en el sistema de coordenadas UTM ETRS89. Diferentes vistas del curvado y de la nube de puntos del modelo tridimensional.

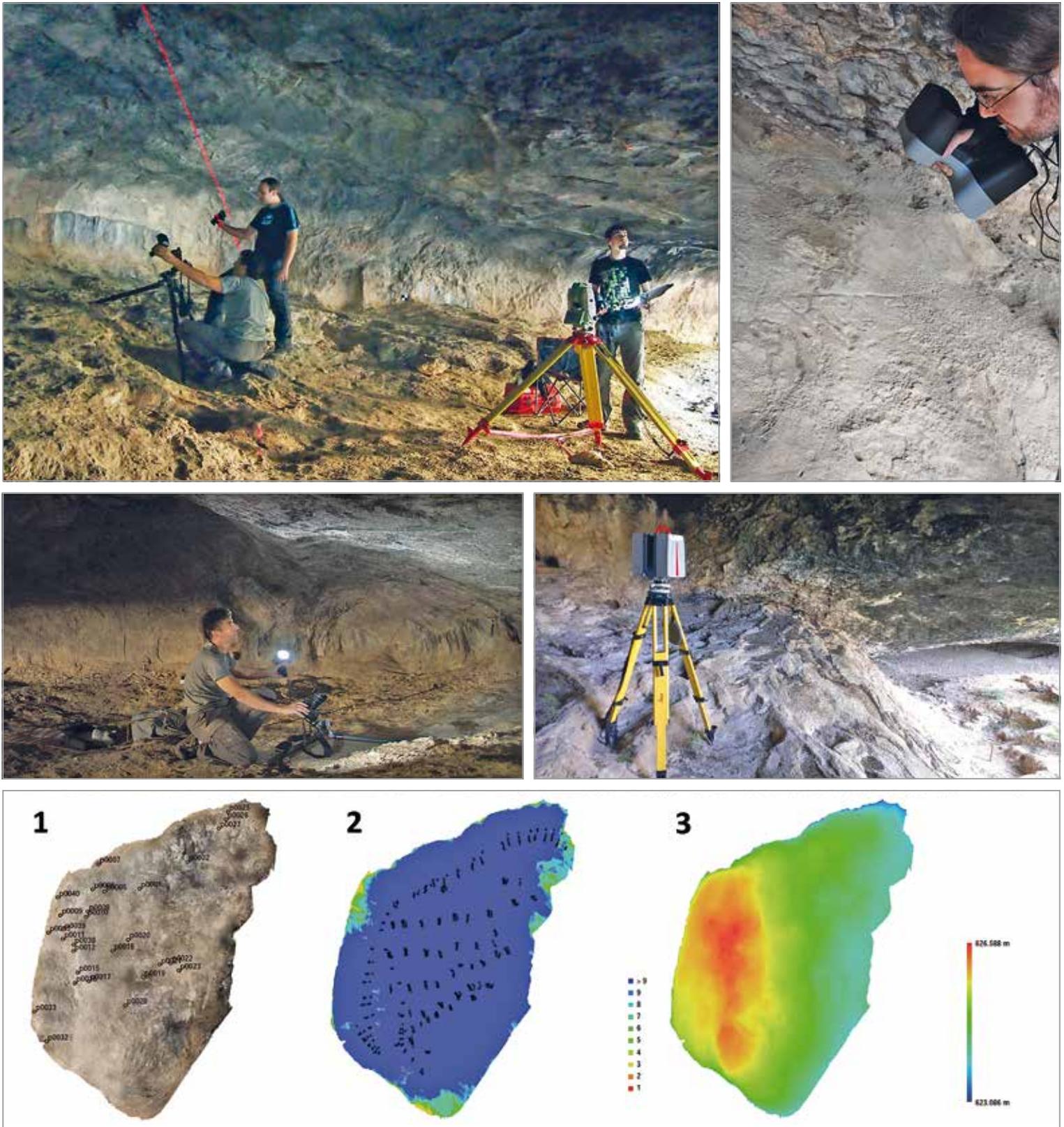


FIG. 89. Fase de documentación con técnicas: fotogramétricas, adquisición de puntos de control –topográficas–, escáner de luz blanca estructurada y de diferencia de fase. Imágenes del proceso de digitalización de la bóveda: (1) asignación de puntos de control, (2) distribución de cada imagen y su solape mediante SfM y (3) modelo digital de elevación (m.s.n.m.).

ETRS89 que permitan conocer la evolución en la conservación del soporte.

La combinación de diferentes metodologías, tanto de topografía clásica (estación total y sistemas GNSS) como sistemas de registro tridimensionales (escáner láser de diferencia de fase, escáner de luz blanca estructurada y microfotogrametría) en la documentación global de la cavidad y de superficies reducidas seleccionadas, da

como resultado una nube de puntos de muy alta densidad y gran resolución con la que reconstruir posteriormente en tres dimensiones las zonas de estudio, aquellas que por cuestiones de conservación deban analizarse con mayor exhaustividad.

Todas las técnicas descritas permiten la obtención de un modelo tridimensional válido tanto para aspectos ligados a la conservación y monitorización de patologías mecánicas como de cada

uno de los motivos pictóricos. La comparación entre nubes de puntos de la misma zona capturadas en instantes de tiempo diferentes nos aportan además datos necesarios para conocer mejor la evolución diacrónica del comportamiento del soporte y de los motivos pictóricos a partir de los cuales determinar y dirigir intervenciones específicas en materia de conservación.

3.2.3.3. Resultados

Actualmente seguimos trabajando en una segunda fase de documentación que permita extraer una resolución mayor por debajo del milímetro de la propia bóveda, organizando su registro en diferentes sectores. No obstante, esta primera fase de documentación ha proporcionado una visión en conjunto tanto gráfica como geométrica de la cueva paleolítica. Los datos obtenidos de la ortofoto de la bóveda han sido los siguientes:

- PERÍMETRO: 60,9 m
- LONGITUD: 21,43 m
- ANCHURA: 16,63 m
- SUPERFICIE: 225,83 m²
- IMÁGENES UTILIZADAS PARA LA BÓVEDA: 843 (Nikon D800 resolución por imagen 7360 x 4912)
- RESOLUCIÓN DE LA ORTOFOTO FINAL: 38 603 x 49 748 equivalente a 1 mm / píxel

3.2.3.4. Conclusiones

El principal resultado obtenido en la documentación realizada entre los años 2005-2015 en la Fuente del Trucho ha sido proporcionar unos datos adaptados a las necesidades de este enclave rupestre que facilitan el registro, análisis y valoración del arte, gracias la experiencia ad-

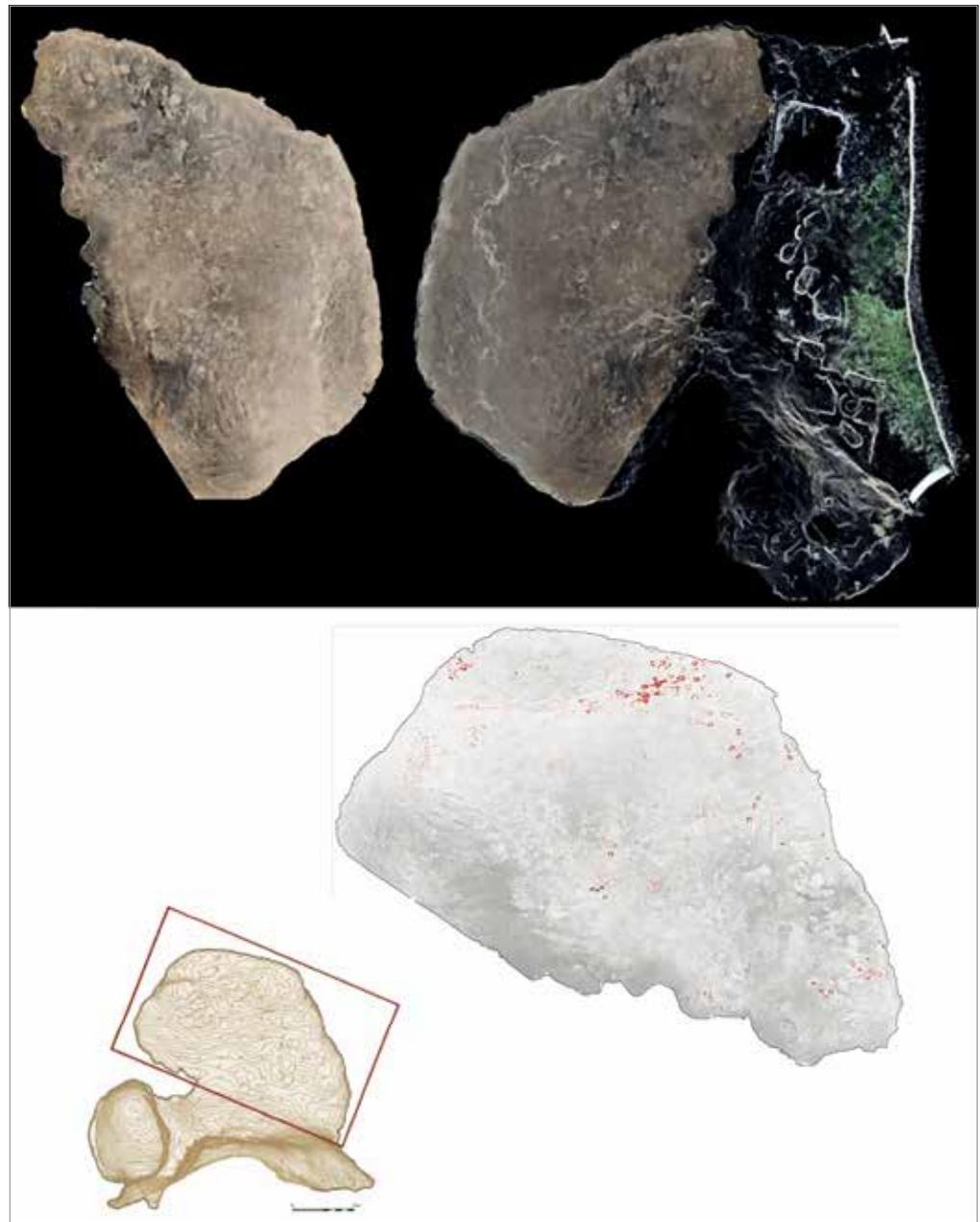


FIG. 90. Ortofoto de la bóveda y su simetría superpuesta a la planta del modelo tridimensional. Imagen inferior: composición en escala de grises de la ortofoto con el encaje en rojo de los calcos de las pinturas (Utrilla et al., 2015).

TABLA 8
Síntesis de la información obtenida clasificada según su tipología

TIPOLOGÍA	FORMATO	TIPO DE FORMATO	SOFTWARE	TIPO DE SOFTWARE	MÉTRICO	GRÁFICO	COMENTARIOS
Nubes de puntos	ASCII	x, y, z, R, G, B	Abierto CloudCompare	Libre-GNU (GPL)	Si	Si	Registro y gestión de puntos
Nubes de puntos	imp	Propietario	Leica Cyclone	Propietario	Si	Si	Formato datos crudos
Malla 3D y texturas	vrml	Abierto	Meshlab ISTI-CNR	Libre-GNU (GPL)	Si	Si	GNU General Public License
Malla 3D y texturas	vrml	Abierto	Vrmlviewer	Propietario	Si	Si	Geomorfología del conjunto
Malla 3D	PDF3D	Estándar	Acrobat DC	Propietario	Si	Si	Limitación 8192 x 8192 píxeles
Visor html	Html XML	Estándar	Internet Explorer (+Plugin Truview)	Propietario-Gratuito	Si	Si	Plantilla XML editable para metadatos
Visor 360°	Mov/Html	Propietario	Quicktime	Gratuito	No	Si	Alternativa Html
Fotografías	RAW	Estándar	IrfanView	Libre (Freeware)	No	Si	Formato de datos crudos
Ortofoto	PSB	Large document format	Photoshop	Propietario	Si	Si	Hasta 300 000 píxeles
Planimetrías	PDF-DXF	Estándar	Acrobat DC-CAD	Mixto	Si	Si	Planta, alzado, sección

quirida en otro tipo de investigaciones³³. Este carácter diacrónico actual entre tecnología y metodología nos ha permitido reflexionar con el objetivo de obtener un aprovechamiento más exhaustivo de la documentación gráfica y métrica realizada para un objetivo científico. Asimismo, se contribuye al paulatino cambio hacia la representación gráfica tridimensional mediante nuevos soportes y plataformas digitales. A través de la vinculación de la Fuente del Trucho en una plataforma digital, circunscrito al proyecto ARAM y al proyecto HANDPAS³⁴, se cuenta con una verdadera base de datos gráfica y teórica, de acceso libre, flexible y uso intuitivo. Combinando información gráfica, el carácter flexible y de autogestión de la plataforma permite además incorporar con facilidad nuevos datos sobre su documentación, subrayando la importancia de la evolución diacrónica y con ello una mejora paulatina de la información contenida en el proyecto.

Los continuos cambios introducidos en el desarrollo de una metodología propia para la cueva de la Fuente del Trucho han permitido establecer diferentes resultados que contribuirán además del propio registro –como base documental– a establecer comparaciones ligadas a la conservación tanto de carácter geométrico como gráfico del arte rupestre. Todo ello contribuirá, sin duda, a una mejor accesibilidad, comprensibilidad y utilidad geométrica de todos los datos aportados en la documentación del arte rupestre en beneficio de una mejor conservación e investigación.

3.3. Yacimientos arqueológicos

3.3.1. Técnicas de documentación geométrica de bajo coste en arqueología: Labillosa (La Puebla de Castro, Huesca) y Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza)

3.3.1.1. Introducción

Dentro del conjunto de técnicas en la documentación geométrica del patrimonio resulta imprescindible describir un conjunto de alternativas que garanticen un tipo de documentación de bajo coste (*vid. supra* apdo. 2.5.2). Además del factor social que está protagonizando este término, como demanda de una tendencia extrapolable a prácticamente cualquier ámbito, es necesario recalcar que este tipo de actuaciones como alternativas no son nuevas en la documentación del patrimonio con el apelativo de «bajo coste» (Dereny, 1993; Valle, 2007; Almagro, 2013). Del mismo modo, si repasamos la historiografía de la documentación del patrimonio, constatamos que se han desarrollado a lo largo de la historia con diferentes objetivos.

33 A finales de 2017 se completó un estudio de anteproyecto para el diagnóstico y planificación de intervenciones en la cueva de la Fuente del Trucho promovido por el Parque Cultural del Río Vero de la Comarca de Somontano de Barbastro (Huesca). El objetivo fue establecer un pre-plan director, que sirviese para plasmar el estado actual e integral del yacimiento, con toda la información documentada hasta el momento, estableciendo las pautas y criterios a aplicar en cada uno de los apartados de investigación, estado de conservación y prevención, y difusión. Planificando las actuaciones a corto, medio y largo plazo, así como establecer la secuencia de acciones necesarias y cuantificación de la realización de los estudios sectoriales que así se requieran en los próximos años.

34 Parte de la documentación realizada en la cueva de la Fuente del Trucho se encuentra vinculada al proyecto ARAM (apdo. 3.2.2), cuyo objetivo trata de establecer un protocolo en el proceso de documentación del arte rupestre, apostando por la obtención de resultados que favorezcan la transmisión de conocimientos y la difusión del valor histórico y cultural de los conjuntos decorados (<http://3dscanner.es/proyectoaram>)

Además se ha incluido dentro del proyecto europeo HANDPAS (<http://handpas.juntaex.es/>), registrando cada una de las representaciones de las manos en una división por paneles. En resumen, se ha generado un repositorio *online* tridimensional libre con información métrica donde se puede aplicar diferentes ángulos de iluminación y filtros de decorrelación.



FIG. 91. Toma de datos en el yacimiento arqueológico de Valdeherrera en la campaña de 2014 mediante sistema de pértiga y apoyo con un sensor GNSS de doble frecuencia.

La exigencia actual de este tipo de alternativas no sólo van ligadas a unos costes inferiores, sino también a una mayor rapidez en escenarios donde no es posible introducir otro tipo de herramientas por razones técnicas, logísticas o temporales. Además, tenemos que añadir que en determinadas circunstancias, como algunos ejemplos propuestos (*vid. caps. 2 y 3.1.1*), la adopción de estas técnicas supera en funcionalidad al empleo de otras herramientas más complejas. El uso por sí mismo de la última tecnología tampoco garantiza mejores resultados, si previamente no se ha hecho un análisis de la problemática que se pretende solucionar.

Según ello, en este apartado se han tomado como casos de estudio dos ejemplos diferentes de documentaciones correspondientes a excavaciones arqueológicas. No obstante, la técnica propuesta se puede extender a cualquier alzado arquitectónico, como el ejemplo del anfiteatro romano de *Florentia* (Florencia) resumido en el apdo. 3.3.2.2 dedicado a la documentación de la arqueología urbana³⁵.

Los yacimientos arqueológicos en los que hemos evaluado el uso de estas técnicas son los siguientes³⁶:

- a) Yacimiento arqueológico de Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza)³⁷.
- b) Yacimiento arqueológico de Labillosa (La Puebla de Castro, Huesca)³⁸.

3.3.1.2. Técnicas empleadas

En primer lugar, analizaremos cómo la campaña de documentación topográfica del año 2014 en Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza) se completó mediante técnicas de correlación automática de

35 En este caso hemos preferido incluir la documentación del anfiteatro romano de *Florentia*, realizado con este tipo de técnicas de bajo coste, dentro del mismo apartado homónimo para ofrecer el conjunto de evaluación de técnicas realizadas dentro del mismo proyecto.

36 Para una descripción del contexto histórico-arqueológico de ambos yacimientos *vid. apdo. 3.5*.

37 Proyecto dirigido por los responsables científicos Manuel Martín-Bueno y Carlos Sáenz del Grupo Consolidado de Investigación URBS, CONSI+ID (Gobierno de Aragón), del Instituto IUCA (Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón). Este proyecto ha sido financiado por el Programa HAR.2013-48456-C3-1-P.: URBS III: Repertorios ornamentales públicos y privados en el NE de Hispania (MINECO).

38 Proyecto dirigido por la responsable científica M^a Ángeles Magallón del Grupo Consolidado de Investigación URBS de la Universidad de Zaragoza.

imágenes para reconstrucción tridimensional, y sistemas de topografía clásica mediante un sistema GNSS, con conexión GPRS a la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón (ARAGEA). Este tipo de técnicas se pueden considerar de bajo coste ya que únicamente con una cámara y un software de postproceso se puede digitalizar geoméricamente cualquier tipo de planta arqueológica. Posteriormente, si queremos escalar el modelo necesitaremos una referencia métrica o varios puntos con coordenadas conocidas. Si además, como es el caso, necesitamos que la zona digitalizada se encuentre dentro del sistema de coordenadas oficial UTM ETRS89 usaremos un sensor GNSS RTK. De este modo, para la toma de datos en el yacimiento se optó por un sistema de pértiga de 5 metros montada con una pequeña rótula en su parte superior, con una cámara micro cuatro tercios Olympus EPM 1 y un objetivo Zuiko Digital ED 12mm f2. La pértiga empleada fue una mira topográfica común de nivelación de 5 metros, modificada en su parte superior para montar una rótula junto con la cámara y asegurar un ángulo perpendicular al suelo. La altura obtenida con este sistema fue de 5,7 metros ya que fijamos la pértiga mediante un arnés de pecho, con un ángulo entre 40° y 45° con el fin de facilitar la toma de datos con un movimiento lineal cada dos metros, tanto en sentido longitudinal como transversal al corte que marca el límite noreste de la excavación. Ello, con el fin de obtener un solape redundante entre imágenes que fuese válido para la reconstrucción tridimensional.

Teniendo en cuenta la altura de la cámara al suelo y las dimensiones del sensor (micro cuatro tercios) empleado (17,3 x 13 mm), la resolución de la cámara (12Mpx.) y la focal (12 mm), obtuvimos una huella de imagen de 8,2 x 6,2 m con una resolución de 2 mm por píxel³⁹, con un solape entre imágenes longitudinal y transversal del 65 %-70 %.

Si se eligió esta técnica fue debido a la superficie de la excavación, de apenas 450 m², que garantizaba una documentación en poco tiempo con una mejor resolución obtenida en el conjunto de la ortofoto final frente a otras alternativas como láser escáner 3D o drones.

La toma de puntos de control (GCP), dada la necesidad de georreferenciar la excavación, se realizó mediante un sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Leica GS14 con telefonía móvil corregido mediante conexión GPRS por la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón ARAGEA (<http://gnss.aragon.es/>). De esta manera, el modelo final tridimensional se ajustó al sistema de coordenadas oficial UTM 30 ETRS89. La obtención de un tipo de información que sea fácilmente comprensible y gestionable por cualquier usuario es el objetivo principal de este sistema de toma de datos. En consecuencia, los resultados tienen una doble vertiente gráfica y métrica dependiendo del tipo de usuario que analice la información⁴⁰. Finalmente obtuvimos una serie de ortofotos en formato jpeg y tiff que se pueden abrir en cualquier software de gestión de imágenes. Además este tipo de ortofotos conservan un fichero asociado (jgw si lleva asociado un fichero jpeg o tfw si lleva asociado un fichero tiff) que contienen el tamaño del píxel en

39 El factor de multiplicación de la distancia focal de este tipo de cámaras micro 4/3 es de 2, por lo que el objetivo fijo de 12 mm empleado equivaldría a un 24 mm convencional.

40 En este caso debemos agradecer la amabilidad y disponibilidad de los responsables científicos de la excavación: Manuel Martín-Bueno y Carlos Sáenz Preciado de la Universidad de Zaragoza.



FIG. 92. Esquema de los puntos de control GCP sobre la ortofoto adquiridos mediante un sensor GNSS de doble frecuencia para la reconstrucción tridimensional mediante correlación automática de imágenes.

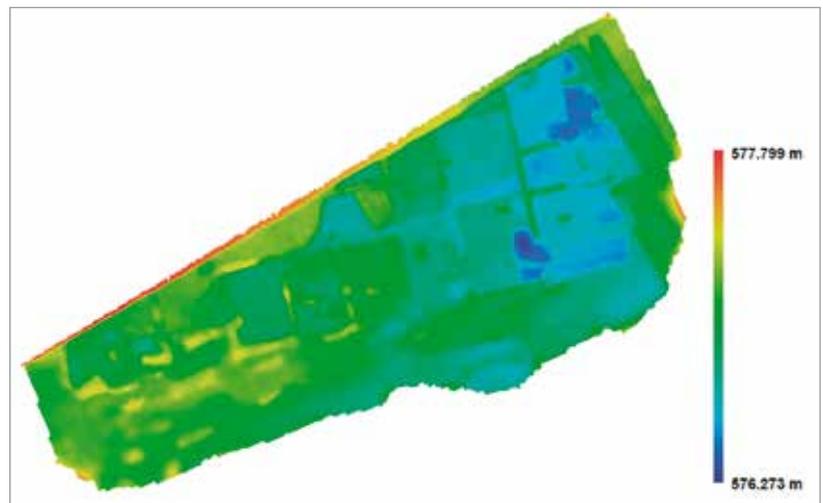


FIG. 93. Modelo digital de elevación basado en el modelo tridimensional realizado en coordenadas absolutas y altimetría s.n.m. Se trata de una técnica de representación bidimensional que permite apreciar el espacio tridimensional a través de una escala de colores asociada a una altimetría absoluta.

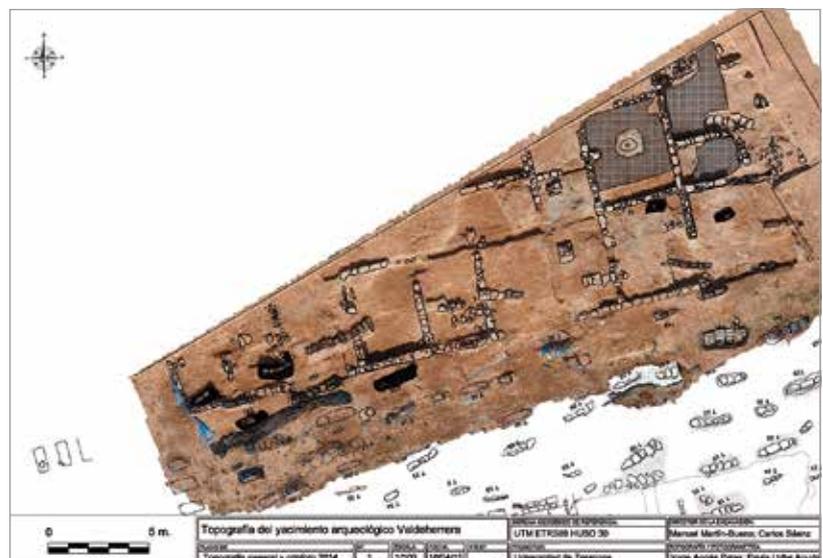


FIG. 94. Dibujo planimétrico sobre la base de la ortofoto obtenida a una escala 1:100 y encaje al resto de la topografía de la excavación a escala 1:200 (topografía y planimetría de fases precedentes realizadas por Luca Lanteri y Corrado Vaccarella).

x (Px), y (Py) y las coordenadas x (Cx), y (Cy) del centro del píxel superior izquierdo. Este tipo de archivo asociado nos resultará útil para la colocación de la ortofoto en un programa tipo CAD o de SIG en el sistema de coordenadas utilizado.

Los ficheros asociados jgw o tfw contienen la georreferenciación de la imagen con el tamaño y la ubicación, los datos que contienen son:

1. Px Tamaño de píxel en X.
2. Parámetro de giro A (no lo utilizamos puesto que la imagen está orientada al norte).
3. Parámetro de giro B (no lo utilizamos).
4. Py Tamaño de píxel en Y (con signo negativo porque las imágenes van de arriba hacia abajo).
5. Cx Coordenada X del centro de píxel superior izquierdo.
6. Cy Coordenada Y del centro de píxel superior izquierdo.

De este modo si realizamos manualmente el proceso de inserción en un sistema CAD tendremos que realizar los siguientes pasos:

El punto de inserción (coordenada inferior izquierda de la imagen):

$$X = Cx - (Px/2)$$

$$Y = Cy + (-Py/2) - (\text{Altura} \times -Py)$$

La escala (ancho de la imagen) será:

$$\text{Escala} = \text{Anchura} \times Px$$

Además de las técnicas manuales para la inserción de este tipo de imágenes en sistemas CAD, existen múltiples programas comerciales que facilitan estas operaciones como el programa MDT de Aplitop, BricsCAD, ArcGIS o el comando Georefmig (fichero vlx) para Autocad. Igualmente existen opciones gratuitas como el programa QGIS⁴¹ que realizan el ajuste automático de escala e inserción al sistema de coordenadas seleccionado de manera automática.

3.3.1.3. Resultados y conclusiones

Los resultados se completaron con el dibujo de todas las estructuras arqueológicas en un sistema CAD a través de la ortofoto, encajando dentro del mismo sistema de coordenadas la información adquirida por técnicas de documentación de topografía clásica, realizadas en campañas anteriores. Para esta alineación fue necesario adquirir puntos comunes que fueron fácilmente identificados gracias a la cuadrícula de la excavación.

Las conclusiones sobre el uso de este sistema permiten una rápida documentación, repercutiendo en un ahorro frente a los sistemas de dibujo arqueológico clásico o incluso a los más avanzados de láser escáner 3D⁴². La utilización de esta técnica posibilita una toma de datos en muy poco tiempo, pudiendo delinear posteriormente un dibujo planimétrico mucho más preciso frente a la toma de datos a través de un dibujo manual con una cuadrícula, y mediante estación total o sistema GNSS, que consiste en la toma de unos pocos puntos y la abstracción de los mismos en polilíneas.

Consecutivamente a este ejemplo, analizaremos brevemente los resultados de la documentación geométrica realizada en la campaña de excavaciones del año 2013 en el yacimiento arqueológico de La-

bitolosa (La Puebla de Castro, Huesca) en la zona conocida como Cerro Calvario.

En este proceso la técnica utilizada fue la misma que en el ejemplo anterior, con la particularidad de que el encaje de esta zona documentada debía realizarse a un modelo tridimensional registrado mediante técnicas de láser escáner 3D en el año 2011. En este sentido, el apoyo topográfico se realizó únicamente con estación total puesto que ya se disponía de una red de bases en el sistema de coordenadas absoluto UTM ETRS89 en el huso 30.

Asimismo, el ejemplo de Labitolosa permite comparar resultados dentro del mismo yacimiento. Sin embargo, las condiciones de esta excavación, al localizarse en una ladera con una fuerte pendiente, permite un ahorro de estacionamientos del sistema láser escáner 3D debido a una mayor visibilidad aprovechando la diferencia de altura. Igualmente el sistema de correlación automática de imágenes se consolida también en este yacimiento como la mejor técnica para este tipo de enclaves arqueológicos debido a su versatilidad frente a los sistemas láser escáner 3D, por su lentitud en la toma de datos de un yacimiento de estas características, y frente a los sistemas RPAS o drones en zonas pequeñas con peor resolución por píxel por su mayor altura. Ambos representan un mayor coste con peores resultados cualitativos. Además, debemos de tener en cuenta que la zona a documentar está atravesada por una línea de alta tensión, por lo que en estas circunstancias no resulta adecuado utilizar drones como sistema de registro de baja altura.

En consecuencia, las ventajas del uso de este sistema en ambos yacimientos arqueológicos se resumen en:

- Obtención de un modelo con una muy alta resolución gráfica por debajo del medio centímetro por píxel, pudiendo dibujar la información en una ortofoto dentro de un sistema CAD. Este grado de detalle, debido a la escasa altura, permite el dibujo, incluso, de los diferentes fragmentos cerámicos que muchas veces encontramos y que difícilmente podemos reproducir exactamente en su posición y orientación geométrica real con los sistemas de topografía clásica.
- Análisis gráfico de las imágenes pudiendo detectar las diferentes unidades estratigráficas por el tipo de materiales y su coloración.

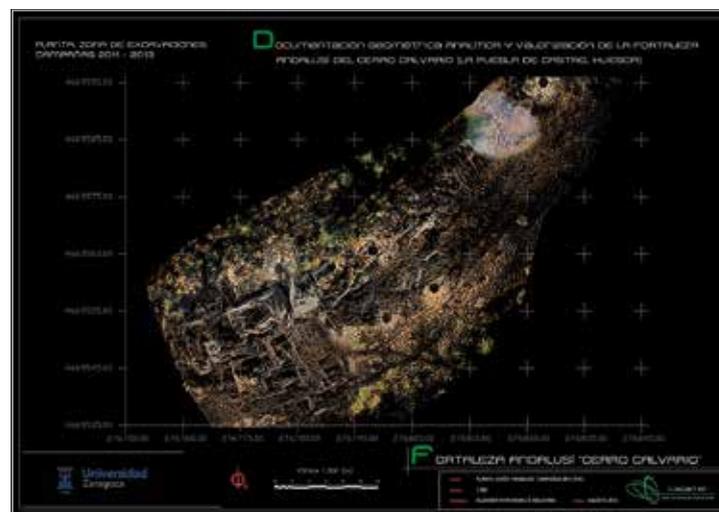


FIG. 95. Ortofoto sobre las nubes de puntos de la zona conocida como Cerro Calvario del yacimiento arqueológico de Labitolosa (La Puebla de Castro, Huesca). Campañas de documentación de 2011 realizada con un sistema TLS; y campaña de 2013 realizada con técnicas de correlación automática de imágenes. Advértase la diferencia de la planta, representada en nube de puntos, en la zona noreste del yacimiento con respecto a la documentación general con láser escáner 3D.

41 <https://www.qgis.org/es/site/> (último acceso: noviembre de 2017).

42 Conviene subrayar la dificultad y largos períodos de tiempo para adquirir con los sistemas TLS excavaciones arqueológicas con muy poca elevación y múltiples zonas de hábitat. Este factor repercute en un aumento de tiempo para estacionar en varios puntos el escáner y conseguir una completa documentación sin sombras de los zócalos que se conservan de las zonas de hábitat y sin diferencias en la densidad de puntos por el ángulo de incidencia del haz láser respecto al terreno.

- Análisis gráfico del modelo digital de elevación (MDE) observando las diferencias de cota, pendientes, estructuras de un modo gráfico a través de estos mapas de elevación. Este tipo de documentos son muy útiles para las interpretaciones y lecturas del yacimiento desde una lógica espacial.
- Ahorro, en definitiva, de tiempo frente a otro tipo de instrumentos más costosos.
- Versatilidad en el uso de la información obtenida, permitiendo al arqueólogo responsable científico de la excavación trabajar de manera autónoma con la ortofoto en cualquier sistema CAD, editor de imágenes, sistema *web mapping* y con el modelo tridimensional en todos los sistemas compatibles con la especificación WebGL (*vid. infra* apdo. 3.7).

3.3.2. Arqueología urbana

3.3.2.1. Documentación geométrica de los restos arqueológicos hallados en el solar del Círculo Católico (Huesca)

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

A. Introducción

Los restos arqueológicos de época romana exhumados en el solar del antiguo Círculo Católico en Huesca constituyen uno de los hallazgos más relevantes de la arqueología urbana oscense para el conocimiento de la antigua *Oscá*. Gracias a la obtención de una ayuda para proyectos de investigación del Instituto de Estudios Altoaragoneses 2011/2012, pudimos realizar un escaneado 3D de los restos. Mediante el uso de esta tecnología se obtuvo la documentación geométrica requerida para las investigaciones científicas así como una serie de productos de fácil y libre acceso que permiten la divulgación de los restos. Los resultados obtenidos permitieron igualmente avanzar en la interpretación arqueológica del entramado urbano romano de la antigua ciudad romana *Oscá*⁴³.

Según Royo *et al.* (2009:159) de todas las intervenciones arqueológicas realizadas en el casco histórico de Huesca, las excavaciones en el solar del antiguo Círculo Católico son las que han supuesto un mayor salto cualitativo y cuantitativo en el modo de ver la arqueología urbana en esta ciudad.

Las actuaciones arqueológicas se iniciaron en la primera mitad de los años noventa del siglo XX, dentro del convenio de excavaciones arqueológicas suscrito entre el Gobierno de Aragón y el Ayuntamiento de Huesca. Los trabajos de campo fueron dirigidos por Nieves Juste y Antonio Turmo entre los años 1992 y 1994. Los resultados más sobresalientes de dichos trabajos, realizados de forma intermitente a lo largo de varias campañas, se han dado a conocer en sucesivos estudios científicos y de divulgación (Juste, 1994 y 2000). Para la realización del trabajo que presentamos nos centramos sobre todo en los restos de época romana⁴⁴: restos parciales de tres viales de época romana republicana junto a una vivienda –denominada como Casa de las Rosetas– localizada en el cruce de dichas calles empedradas. Esta vivienda contó con un pavimento de *opus signinum* y otro de *opus spicatum* (Juste, 1994: 151-158). Pero, sin lugar a dudas, el hallazgo más importante de esta fase fue el

templo o *sacellum in antis* excavado casi por completo entre 1992 y 1994 (Juste, 1994: 142-151, figs. 9-19) y fechado en época sertoriana, aunque el estudio posterior de Asensio (2003: 120-121) plantea, por su especial tipología constructiva, una posible cronología cesariana.

Tras unos años de paralización de los trabajos en el solar y su adquisición por Suelo y Vivienda de Aragón (SVA) para la construcción de viviendas sociales, la ampliación de la superficie edificable aconsejó la continuación de las intervenciones arqueológicas en este espacio. Las intervenciones se ejecutarían en una segunda fase a cargo de dicho organismo y en una tercera con la colaboración y aportación económica de la Dirección General de Patrimonio Cultural, entre los años 2003-2004 (bajo la dirección de Javier García Calvo) y 2005-2006 (dirigidas por José Luis Cebolla Berlanga), excavándose únicamente los niveles superficiales de cronología moderna y contemporánea.

Las últimas intervenciones arqueológicas, entre el 2005 y 2006, se llevaron a cabo durante el proceso de levantamiento y retirada de los abundantes restos de época medieval, moderna y contemporánea, así como durante la adecuación para la conservación del conjunto arqueológico de época romana⁴⁵. En esta última intervención se completa la excavación de los viales romanos⁴⁶ localizados en los años noventa y las estructuras domésticas asociadas al templo sertoriano. Asimismo, se descubren y documentan nuevos edificios de carácter monumental pertenecientes con toda probabilidad al área del foro de la ciudad en época republicana.

Ante la importancia de estos restos, un equipo interdisciplinar decidió, gracias a la concesión de una ayuda para proyectos de investigación del Instituto de Estudios Altoaragoneses 2011/2012, el estudio de los mismos con dos objetivos:

- La necesidad de revisar las diferentes hipótesis que sobre la denominada Casa de las Rosetas se han planteado hasta el momento.
- Difundir estos hallazgos a la sociedad, debido a que se trata de uno de los restos romanos –templo y vivienda– más antiguos descubiertos por el momento en el territorio prepirenaico.

Para solucionar ambas demandas –científica y divulgativa– planteamos que la mejor opción sería realizar un escaneado 3D de los restos para poder generar, en primer lugar, la documentación geométrica requerida para las investigaciones científicas y, en segundo lugar, una serie de resultados divulgativos (vistas inmersivas 360° y modelos tridimensionales métricos). Todos ellos adaptados a formatos web que podrían consultarse a través de Internet o simplemente formar parte de la musealización del monumento en centros de interpretación o museos.

B. Técnicas empleadas

Debido al carácter interdisciplinar del estudio, la metodología aplicada se centró en los aspectos arqueológicos con una doble finalidad científica y divulgativa. En este sentido, el proceso de trabajo realizado fue el siguiente:

- 45 Asimismo se descubre por vez primera en Huesca un fondo de cabaña de tendencia ovalada fechado en la Edad del Bronce (Bronce pleno o medio), con un ajuar cerámico de carácter doméstico abundante y variado en cuanto a su tipología y funcionalidad. En varias zonas del solar, sin presencia de estructuras inmuebles, se documentan niveles de ocupación de la Edad del Hierro, así como ibéricos.
- 46 Construidos con grandes losas calizas que todavía conservan las rodadas de los carros, hecho comprobado en varios viales de dicha época documentados en otros solares del casco histórico.

43 Para una reciente actualización sobre los conocimientos sobre esta ciudad *vid. Uribe et al.*, (2014).

44 Conocemos la existencia de restos islámicos en la fase inicial de la excavación cuyos niveles aportaron un importante lote de material cerámico plenamente representativo de las producciones hispanomusulmanas del siglo XI (Juste, 1994: 164-166).



FIG. 96. Vista del conjunto de restos romanos del Círculo Católico. Proceso de documentación mediante láser escáner 3D de diferencia de fase mod. *Leica HDS 6100*.

METODOLOGÍA ARQUEOLÓGICA

- a) Documentación: consulta de los informes arqueológicos que hoy en día se encuentran depositados en el Gobierno de Aragón y búsqueda de bibliografía.
- b) Comparación de los datos conocidos con los obtenidos mediante el proceso de documentación geométrica mediante tecnología láser escáner 3D.
- c) Planteamiento de las hipótesis.

DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA

Se utilizó un método compuesto de láser escáner 3D con varias cámaras fotogramétricas y objetivos para la captura de la textura de los restos romanos. La metodología de trabajo se apoyó, como referencia de control y alineación, para establecer la unión de todos los modelos 3D adquiridos en el desarrollo del trabajo, en la colocación de una serie de puntos de control estratégicos que se localizaron mediante dianas tipo *Black&White*. Dichos puntos de control fueron adquiridos tanto por una estación total como por láser escáner de diferencia de fase. Los datos obtenidos mediante estación total fueron el eje vertebral sobre el que se apoyó todo el trabajo de escaneado. Estas dianas o puntos de control permitieron unir los distintos modelos obtenidos de cada escaneado entre sí, ya que fueron puntos adquiridos en cada uno de los diversos modelos. Asimismo, gracias a esta metodología, fue posible detectar cualquier anomalía en la precisión del modelo 3D resultante en la zona documentada de cada uno de los escaneados.

Debido a la colocación de las dianas, realizamos el posicionamiento del escáner en coordenadas, ya que éste no se colocó en un

punto de coordenadas conocidas, sino que se estacionó y orientó mediante el método de intersección inversa. Una vez unidos y referenciados cada uno de los escaneados realizados, se efectuó el post-proceso de los datos y la obtención de los resultados finales.

Mediante una cámara fotográfica, en combinación con un objetivo de 8 mm tipo «ojo de pez», se realizó la captura de la textura en cada uno de los escaneados, para poder aplicar la imagen real a la nube de puntos generada. Por otro lado, para mejorar la textura del modelo tridimensional, se procedió a realizar la captura de fotografías de alta resolución mediante cámaras métricas en condiciones de luz homogéneas.

a) Topografía de apoyo utilizada en los restos romanos del Círculo Católico mediante estación total

La topografía de apoyo o clásica realizada en la zona de trabajo adquiere una gran importancia, ya que garantiza todo el trabajo posterior del escáner puesto que registra y controla la precisión del modelo. Esta fase representa la base de todo el proceso metodológico. En este sentido, el carácter del proceso previo de topografía clásica consiste en proporcionar los diferentes puntos de control (dianas) para unir los diferentes escaneados dentro de un mismo sistema de coordenadas. Al mismo tiempo, sirve también de referencia externa que permite controlar la precisión de los datos obtenidos con un resultado final de alineación inferior a 2 mm.

Otro aspecto importante del proceso previo de topografía es la capacidad de controlar estructuralmente el modelo obtenido, es decir, la topografía es capaz de monitorizar cualquier patología estructural que pudiese surgir en los restos arqueológicos en un futuro.



FIG. 97. Estación total en el proceso de documentación y apoyo topográfico.

Por todo ello, la primera fase requiere de una precisión y exactitud que garantice la consecución de unos resultados correctos. La toma de datos de estas dianas se realizó con la estación Leica TCRP 1202+ con una desviación típica a prisma de 2 mm + 2 ppm.

Debido al uso de un sistema topográfico como base del proceso, la documentación geométrica de los restos arqueológicos podrá ser ampliada en cualquier momento o puesta en relación en un SIG, ya que varios puntos fijos permanecen en la zona de trabajo, de manera que si se deseara ampliar el estudio realizado mediante láser escáner 3D, los nuevos datos adquiridos se apoyarían en dicha red topográfica.

En la zona de estudio se colocaron las diferentes referencias (dianas *Black&White*) necesarias para el registro y unión de cada uno de los escaneados llevados a cabo. El número de dianas y la distribución de las mismas varió en función de la posición en que se colocaron el escáner, pudiendo cada diana adquirirse en uno o más escaneados. Gracias a este proceso se obtuvo un modelo 3D con un error final respecto de los puntos de control (dianas) de 2 mm.

b) Documentación mediante láser escáner 3D de los restos romanos del Círculo Católico

Para la documentación mediante tecnología láser escáner 3D se utilizó un escáner de «diferencia de fase», Leica HDS6100, que pro-



FIG. 98. Proceso de documentación con un escáner láser 3D de diferencia de fase de los restos romanos.

porciona una alta velocidad de escaneo junto con una densa nube de puntos. En el conjunto del yacimiento se efectuaron un total de 18 escaneados. La resolución de datos en la nube de puntos se fijó en tres milímetros. Conviene advertir que con la redundancia en la toma de datos, o el solape entre los escaneados, podemos obtener una mayor densidad de datos, existiendo zonas donde puede existir un milímetro de resolución.

Mediante este proceso obtenemos una nube de puntos de alta densidad que nos define de manera milimétrica todo el conjunto del yacimiento, obteniendo la base geométrica sobre la que posteriormente se aplicará la textura propia de dichos restos romanos.

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la adquisición de puntos de control por medio del escáner y de la estación total. Esto nos permite determinar que el error acumulado en la unión de los escaneados no exceda de la tolerancia fijada en 3 mm a 10 m, momento en el que se desecha la unión de los modelos y se comienza de nuevo el proceso de unión. La unificación de los diferentes escaneados se ejecutó sobre la base, como mínimo, de tres puntos de control.

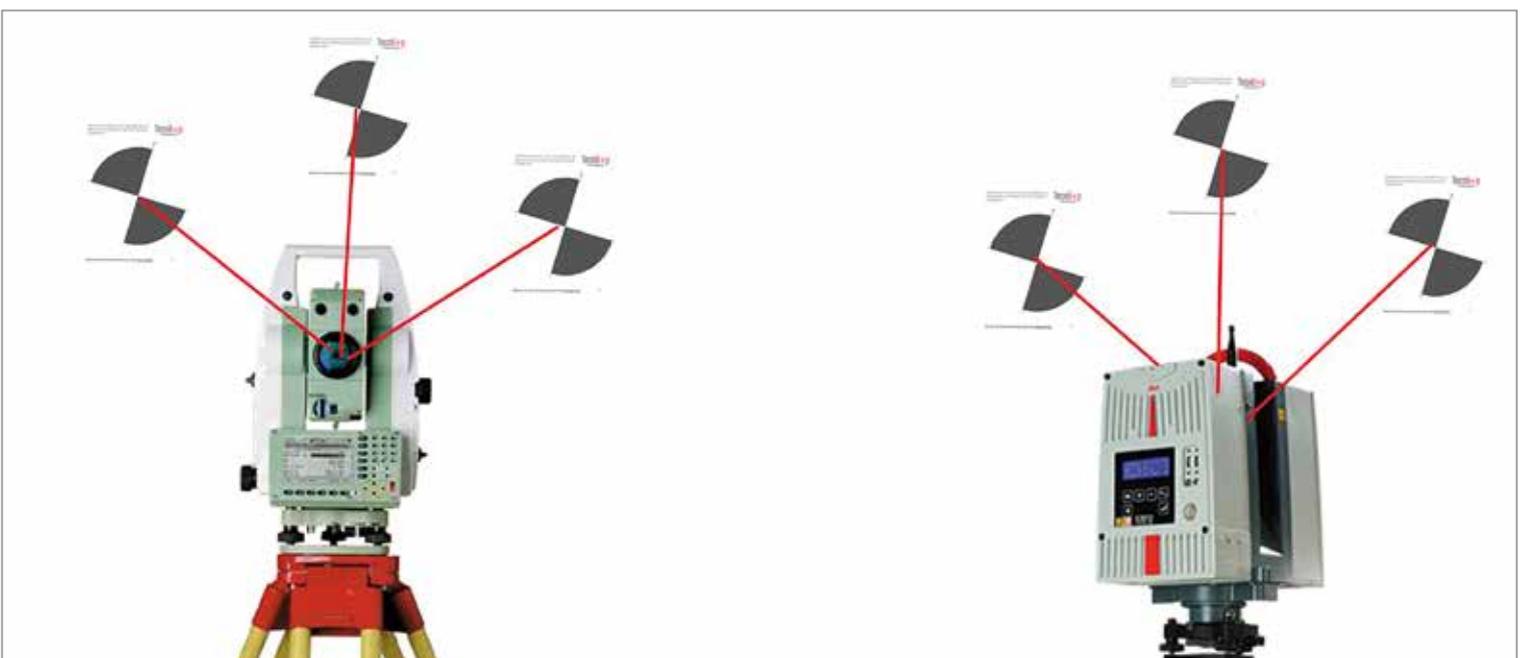


FIG. 99. Esquema de la adquisición de los diferentes puntos de referencia (dianas) por parte de la estación total y del escáner. Los puntos de referencia poseen coordenadas únicas y están relacionadas entre sí, integradas dentro de la misma red topográfica del yacimiento.



FIG. 100. Vista de la nube de puntos registrada de todo el conjunto arqueológico, prescindiendo de los elementos arquitectónicos modernos, con una resolución media de 3 mm.

c) Técnicas fotogramétricas utilizadas

Para proporcionar la textura al modelo, se utilizó una cámara métrica calibrada *Canon EOS 550* de 18.8 mpx. que coincide con ambos ejes (el del escáner y la cámara). De esta manera, se obtiene por separado la textura del modelo para posteriormente incorporarla a la geometría propia de los restos romanos, adquirida mediante escaneado láser 3D. Las condiciones de iluminación fija del entorno de trabajo determinaron el resultado final de la adquisición de la textura, corrigiéndose posteriormente mediante un ajuste radiométrico.

La textura adquirida mediante este proceso aporta el color a la nube de puntos captada. Las fotografías para la generación de cada imagen equirectangular se realizaron con el siguiente material:

- Cámara *Canon EOS550*.
- Objetivo Sigma 8 mm, «ojo de pez».

d) Postproceso de los datos obtenidos por escáner 3D

El primer paso necesario para el tratamiento de la información adquirida es la asignación del color de la nube de puntos obtenida de cada escaneado a través de la textura elaborada de la cámara calibrada. En este proceso se realizó una orientación absoluta de la panorámica obtenida con la cámara, refiriéndose a la nube de puntos a través de una serie de puntos de control identificados, tanto en la nube de puntos como en las fotografías.

El segundo paso consistió en el registro o unión de los diferentes escaneados en un modelo único. Para ello, se emplearon los datos de las referencias topográficas (dianas) adquiridas mediante topografía clásica como una base sobre la que se encajan todos y cada uno de los escaneados realizados.

El tercer paso fue la clasificación y depuración de los datos obtenidos ya que podían aparecer elementos externos al objeto de estudio, tales como estructuras modernas (pilares, tuberías, forjado) o

las propias dianas, que pese a ser claves para el registro de los modelos, no son parte del objeto de estudio y deben omitirse en el modelo final del yacimiento romano.

Posteriormente se efectuó la malla de triángulos irregulares, operación con la que se transformó la nube de puntos en un modelo triangulado con diferentes grados de simplificación, dependiendo de la finalidad y tamaño del archivo resultante.

Finalmente se obtuvieron visores tanto métricos como gráficos de la zona de investigación, que permitieron visualizar los restos romanos en detalle y realizar mediciones tridimensionales sobre los mismos. Los formatos de los ficheros finales fueron *.mov para los visores gráficos y XML-HTML para los visores métricos.

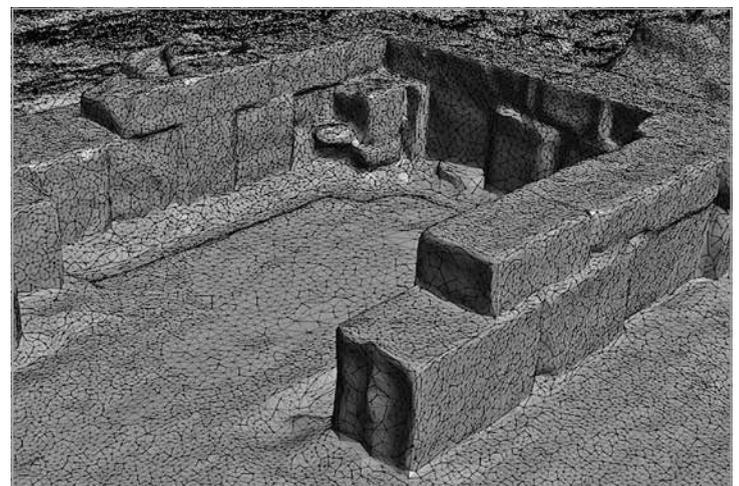


FIG. 101. Triangulación de la nube de puntos. Representación sólida de la malla triangulada y texturizada en formato PDF3D.



FIG. 102. Visor métrico esférico en formato html para su difusión mediante una plataforma web data server con la incorporación de los metadatos clave para su clasificación.



FIG. 103. Detalle de medición tridimensional sobre el modelo panorámico métrico en formato web de la zona del templo y tabla de errores.

A partir de los modelos obtenidos, ya fuera en formato de nube de puntos o de malla, texturizada o sin texturizar, se diseñaron los diversos planos del yacimiento: secciones transversales, secciones longitudinales, vistas en planta, vistas isométricas, etc.

Además, tanto de las fotografías como de los visores métricos, se consiguieron archivos de metadatos XML definiendo diversos datos, constantes y variables, para cada uno de los visores métricos y conjuntos de fotografías.

C. Resultados

Una vez postprocesados todos los datos adquiridos se obtuvieron los siguientes resultados:

Adaptación de los datos a ficheros (métricos) html. Desarrollo de una base de datos 3D de cada escaneado, en formato XML para Internet Explorer y metadatos.

A través de esta operación se realizó un modelo panorámico métrico para la visualización 3D html incorporando para cada escaneado un archivo XML con los metadatos específicos. Este se reproduce directamente a través de Internet Explorer ejecutando el archivo «SiteMap.htm». A través de este visualizador se representa el punto de vista del escáner y la información adquirida. Además, es posible tanto localizar un punto en coordenadas relativas como realizar cualquier medición arquitectónica. El error total de medición sobre este visualizador a una distancia media de 5 metros es apro-



FIG. 104. Visor panorámico gráfico de cada uno de los escaneados realizados.

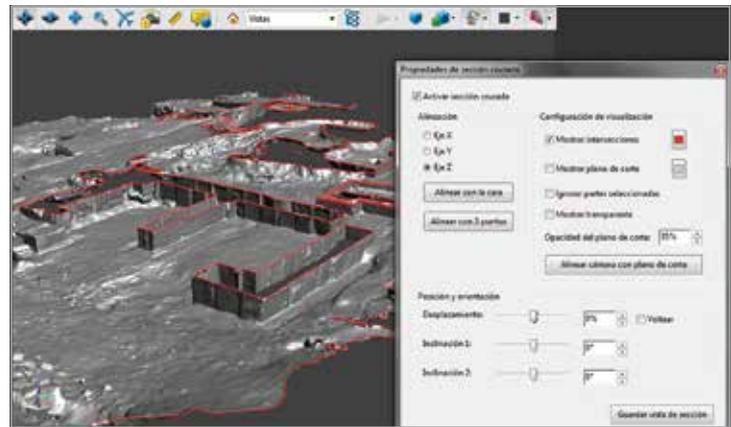


FIG. 105. Ejemplo de procesamiento de un archivo estándar PDF3D con la sección cruzada activada en el eje z.

ximadamente de 7 milímetros según la tabla de errores publicada por Chris Thewalt⁴⁷.

Ficheros gráficos esféricos

Del mismo modo, se efectuaron archivos panorámicos esféricos de cada uno de los estacionamientos del escáner en el yacimiento arqueológico.

Ficheros 3D del yacimiento en formato PDF3D

Los archivos estándar PDF3D del modelo tridimensional fueron creados para conseguir una visualización práctica y sencilla por parte de cualquier usuario, pudiendo realizar cualquier medición, localización de coordenadas y sección en los ejes x, y, z.

Ficheros gráficos 3D del yacimiento en formato VRML

Los archivos VRML del yacimiento romano están texturizados con fotografías de alta calidad para una visualización sencilla, conservando un elevado nivel de detalle en la renderización.

⁴⁷ Para una mayor información sobre la precisión de cada medición, consúltese la gráfica con dos vectores: error y distancia en el siguiente enlace Leica Truview Accuracy: http://www.leica-geosystems.co.uk/downloads/123/hds/general/cyclone/white-tech-paper/Leica_TruView_Accuracy_us.pdf (último acceso: octubre de 2015).



FIG. 106. Malla tridimensional texturizada del conjunto arqueológico del Círculo Católico gestionada mediante el programa *open source* Meshlab.

Planimetrías y secciones. Además se consiguió una amplia colección de planos de secciones transversales, longitudinales, vista en planta y vistas isométricas del conjunto de los restos del Círculo Católico que pueden ser consultados en formato PDF.

D. Conclusiones

Todos los datos obtenidos mediante el uso de la tecnología láser escáner permitieron entonces y después realizar una nueva interpretación arqueológica de la vivienda romana exhumada. Comenzaremos esta discusión describiendo los datos conocidos sobre la Casa de las Rosetas puestos en el trabajo de Juste (1994). El esquema

de la vivienda se adaptó a dos elementos esenciales: el templo y el viario urbano, por lo que cabe suponer que su construcción sería posterior a estos dos infraestructuras urbanas, adaptándose al entramado urbano con su morfología en «L» (Juste, 1994: 153).

Según Juste (1994: 152), en su primera fase constructiva la vivienda se inscribió en un rectángulo de 12 x 7, dispuesto en sentido E-W siguiendo la calle norte. De este momento inicial se conservan: el muro exterior norte, la esquina con el muro este, gran parte de la oeste –que quedó sepultada bajo el pavimento de otra habitación– y sillares aislados de los muros sur, sin poder determinar las estancias que contenía. En esta fase se utilizaron sillares de modulación grande, de formato alargado o cúbico que proporcionan una anchura muraria de 60 cm.

En un segundo momento se amplió la vivienda hacia el oeste, añadiendo la estancia más lujosa con el *opus signinum*. El deterioro de la estancia principal permitió comprobar cómo absorbió y sepultó bajo su pavimento parte del primitivo muro exterior occidental; además, los muros de esta estancia se asentaron sobre el suelo natural que en esta zona se encontraba más bajo. Para alcanzar la cota del resto de la vivienda se rellenó con diversos materiales (barniz negro B y cerámica indígena) y sobre este nivel se asentó la preparación del pavimento. En este caso se utilizaron sillares de una anchura inferior a los anteriores, en torno a los 40-50 cm (Juste, 1994:152).

La última remodelación se sitúa en época romano-imperial, probablemente en los primeros momentos del Alto Imperio. Consistió en el añadido de al menos una estancia con pavimento de ladrillos romboidales (el muro cambia su ortogonalidad para no encontrarse con el templo) y un hogar en la zona sur central. La estancia pavimentada con latericio se asentó sobre una preparación en la que se han recuperado diversos elementos como *terra sigillata*, vidrios y cerámicas indígenas ibéricas anaranjadas y grises.

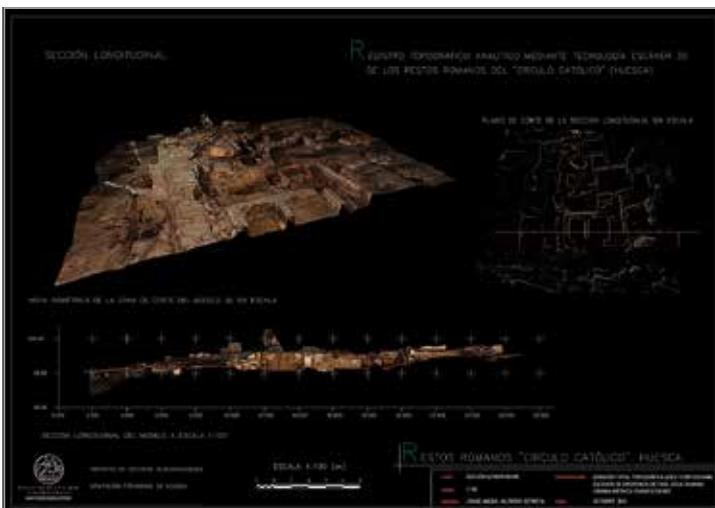


FIG. 107. Detalle de una de las planimetrías realizadas con una vista isométrica, planta sobre el modelo 3D y sección longitudinal del conjunto.

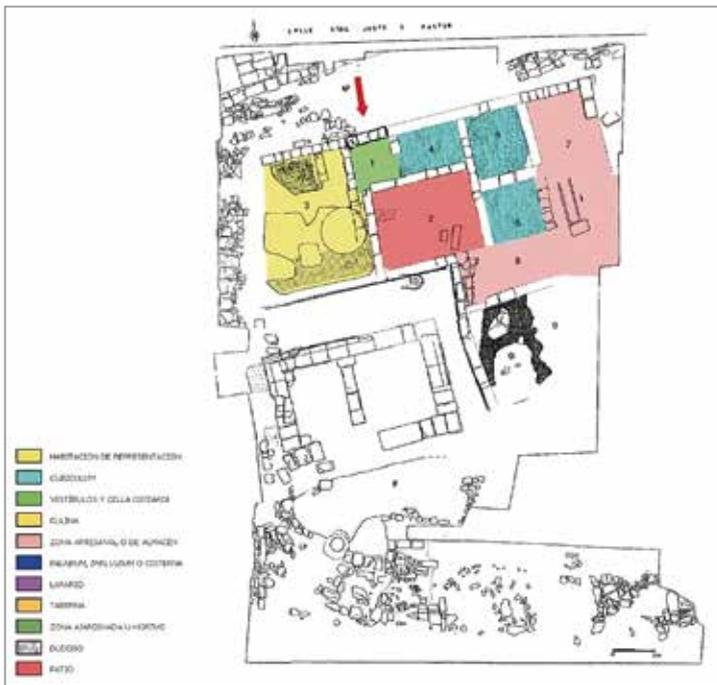


FIG. 108. La funcionalidad de los espacios de la Casa de las Rosetas según Juste (1994: 133-171).

Respecto a la distribución del espacio interior de la vivienda la entrada principal, según Juste (1994: 153) se encontraba en la calle Norte, cerca de uno los extremos, en la esquina del recinto primitivo. En el muro exterior todavía se mantuvieron las muecas del apoyo de la puerta, por la que se accedía a un pequeño vestíbulo cuadrado (1). A la derecha de este se encontraba la habitación más suntuosa de la casa (3). Esta dependencia es la más grande de todas, ocupaba aproximadamente un tercio del módulo superior y es la única pavimentada con *opus signinum*. Ostentó un formato alargado, irregular, de forma trapezoidal, motivado por su adaptación al espacio disponible entre las calles y el templo. El interior de la habitación poseía algunas peculiaridades en la disposición de su pavimento. Este *opus signinum* estuvo dividido en dos partes: un primer recuadro de 2 x 2 m, que ocupaba parcialmente el tercio norte de la sala y que se encontraba remarcado por sillares en la zona este configurando un pequeño espacio rectangular. La segunda parte, el resto del pavimento, abarcaba los dos tercios inferiores completos. La decoración es similar en ambos casos. El motivo del recuadro de 2 x 2 consta de una orla lineal con tres bandas de *te-*



FIG. 109. La funcionalidad de los espacios de la Casa de las Rosetas según Asensio (2003: 93-128).

sellae blancas, blancas y negras y blancas; en el interior, rosetas estilizadas de cuatro pétalos negros y botón central blanco sin aparente esquema compositivo (FIG. 3). El inferior es similar aunque con una única banda lateral de *tesellae* blancas y las rosetas con los colores invertidos. Para Juste (1994:153), según sus características, todo este espacio se conformaría como un *tablinum*.

Frente al vestíbulo, nada más entrar, se hallaba una estancia rectangular (2) que también debió contar con un pavimento de *opus signinum* por los restos que se han conservado. Ocupaba aproximadamente la zona central y desde ella se podía acceder a la mayoría de los espacios, por lo que ejercía la función distribuidora del espacio dentro de la vivienda. De este modo, Juste (1994: 156) lo califica de atrio aunque no haya documentado los elementos esenciales de esta estructura arquitectónica. El resto de las habitaciones de la zona norte obedecen a dos tipos. Un grupo estaría definido por estancias de pequeñas dimensiones, de tendencia cuadrada o rectangular (4, 5 y 6), que pudieron corresponder según Juste (1994: 156) a departamentos auxiliares o *cubicula*. Tampoco descarta que algu-



FIG. 110. Restitución del pavimento de *opus signinum* según Juste (1994:133-171) y fotografía del estado actual.

na de ellas como la habitación 4 pudiese ser una taberna abierta al exterior, debido a que no se ha conservado el muro exterior en esta zona. El segundo grupo pertenece a dos espacios (7 y 8) alargados que se desconoce si estuvieron compartimentados o no. Su principal característica, que los unifica en su función, es la presencia de dos depósitos rectangulares de piedra. Por lo tanto, estas estancias se destinarían a almacenaje o bien al ejercicio de actividades domésticas. Se desconoce si la casa contaba con *hortus*, pero en la esquina noreste se aprecia un rebaje que pudo corresponder con una puerta.

En la tercera fase se amplía la zona sureste con una habitación pavimentada con ladrillos romboidales (9). El interior de la estancia estaba decorado con pintura de la que se ha conservado un fragmento de color rojo perteneciente al zócalo. El otro elemento añadido en esta última reforma fue el hogar (10) que se añade en la estancia 2 y se trata de una pieza de tendencia rectangular con un lateral redondeado y reborde exterior, con arcilla enrojecida y endurecida por el fuego, en cuyo interior se halló una densa capa de carbones. Junto al hogar se documentaron bloques pétreos correspondientes a la configuración del entorno del hogar.

En un estudio posterior, Asensio (2003:95) demostró que en realidad la habitación 3 se estructuraría en dos espacios: un *oecus* decorado con el *signinum* en la zona sur y en la parte norte un *cubiculum* con el mismo tipo de pavimento. A este dormitorio se accedería por el este, a través de una puerta de la que se ha conservado el umbral.

Ante la interpretación de Asensio, nos planteamos para este trabajo revisar la ubicación y decoración exacta de los pavimentos de *opus signinum*. Desgraciadamente no han podido ser examinados directamente porque, desde su excavación en 1994, se han deteriorado tanto que prácticamente han desaparecido. De esta forma, únicamente se pueden observar *in situ* la preparación de los mismos. Ante esta dificultad hemos tenido que referirnos siempre al informe de Juste (1994) y sus fotografías.

Una nueva interpretación de los espacios

En este estado de la argumentación planteamos diferentes hipótesis basadas en los datos contrastados a través de la documentación geométrica mediante laser escáner. En nuestra opinión, el espacio 3 se configuraría también en dos partes diferenciadas tal y como expuso Asensio. Esta afirmación se ve reforzada por el esquema decorativo del *opus signinum*. Ambos espacios se diferenciaron mediante la inversión de colores en la representación de las rosetas: las realizadas en el cuadrado de 2x2 m., espacio 1, tuvieron los pétalos negros y la tesela central negra; mientras que, en la franja rectangular, conservada más al sur, los pétalos fueron blancos y la tesela central negra (Juste, 1994: 153).

En relación a las dimensiones de este cuadrado, tal y como se muestra en la FIG. 111, no es imposible definirlos como *tablinum* como dedujo Juste (1994:153) o un *oecus* como expuso Asensio (2003:95) ya que ambas estancias tendrían un tamaño superior⁴⁸.

Por lo tanto, para el primer espacio planteamos dos posibles soluciones. La primera es que la estancia se extendiese hasta el muro de cierre oeste. Los argumentos a favor para lanzar esta hipótesis es que, según las fotografías consultadas en los informes de excava-

⁴⁸ Los *tablina* más antiguos del valle medio del Ebro son los identificados por Beltrán (1991: 152-153) en *Celsa*: la estancia 6 de la Casa de la Tortuga, la 7 de la Casa A I en su fase inicial, la 4 de la H II y la 7 de la Casa del Emblema. La mayoría de ellos estuvieron adosados al muro perimetral y abiertos en su totalidad al atrio. Igualmente, en todos los casos, se trató de espacios de dimensiones semejantes: de 3,50 m de ancho y longitudes que variaron entre 3,20 y 3,80 m. En el caso del *municipium* de Bilbilis en la *Domus* II el *tablinum* ocupó 3,30 m de anchura por 3,90 m, estuvo abierto totalmente al atrio, ocupando la posición central y el de la *Domus* I tuvo unas dimensiones de 3,60 x 4 m. Martín-Bueno y Sáenz (2001-2002: 127-158).

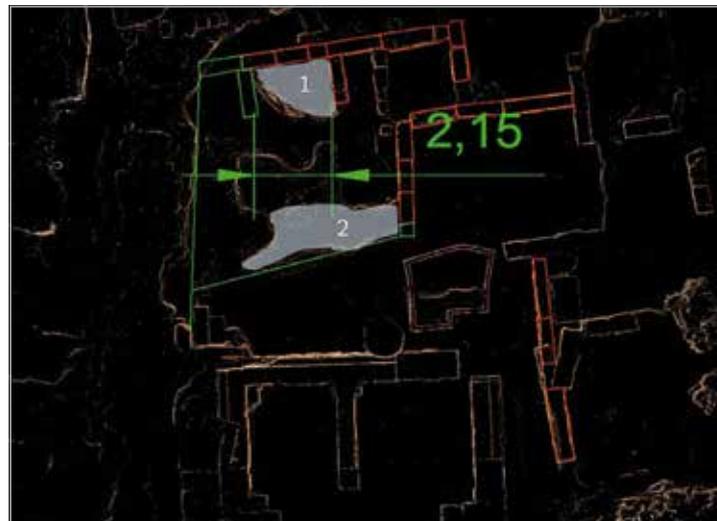


FIG. 111. Esquema de la planta de la vivienda con la ubicación de los *opus signina* extraída de la nube de puntos.

ción (Juste, 1994), se desconoce si la última línea de la orla dibujó un cuadrado o continuó hacia el oeste. Este hecho nos hizo pensar que se podría tratar de un *cubiculum*. De él se conservaría la parte del lecho, correspondiente a un tercio de la habitación. Sin embargo, estudiadas las dimensiones sobre la documentación geométrica recogida por el escáner láser, pensamos que este espacio no sería suficiente para ubicar un dormitorio.

La segunda hipótesis, la más coherente para nosotros, es que este espacio de pequeñas dimensiones estuviese clausurado lateralmente por un muro occidental que ha desaparecido, homólogo al ya existente en su lado oriental. En consecuencia, cabría preguntarse qué espacio de reducidas dimensiones dentro de una vivienda romana estuvo decorado ricamente. La solución es, tal y como expone Pérez (2012, 24), considerarlo como un espacio donde se realizasen las actividades relacionadas con el culto privado, lugar donde pudo estar ubicado un *lararium* o *sacrarium* de madera. De pequeñas dimensiones, con paredes y pavimento decorado podemos citar el paralelo de la Casa d'Argo (II,2) de Herculano, datada en época augustea y con unas dimensiones de 2,9 m por 2,98 m (Bassani, 2010: 112).

La identificación de este espacio 1 como un larario estaría directamente relacionada con el resto del espacio que Juste consideró como una única habitación. La conservación únicamente de una fran-

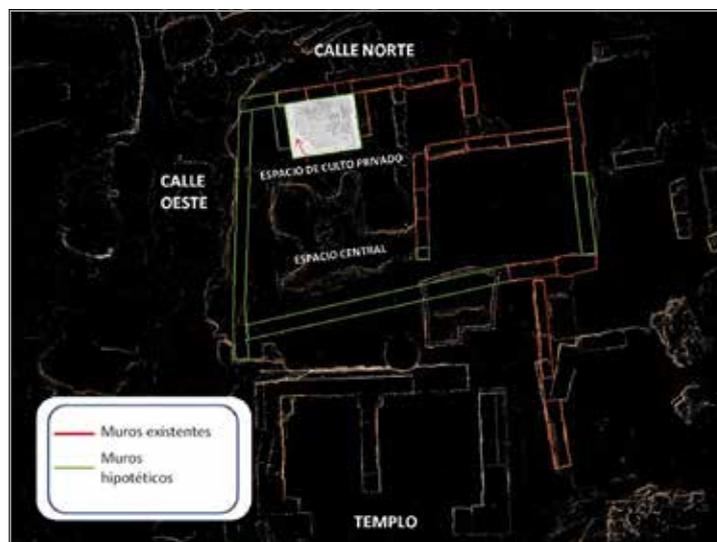


FIG. 112. Hipótesis planteada sobre la funcionalidad de los espacios a través de la planta de una sección horizontal de la nube de puntos.

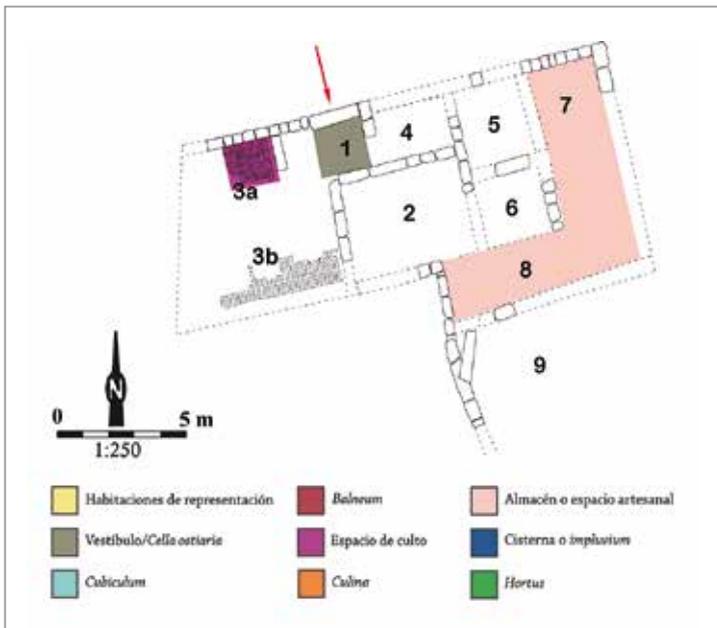


FIG. 113. La funcionalidad de los espacios de la Casa de las Rosetas según Uribe (2015).

ja rectangular de decoración pavimental podría estar indicando una zona de paso. Así sucedió en la estancia A2 de la Villa Prato de Sperlonga (segunda mitad del s. II a.C.), donde la gran cantidad de tejas documentadas y la inserción de teselas en determinados puntos del pavimento hacen pensar a Broise y Lafon (2001: 59) que se tratase

de una especie de patio interior. También conocemos corredores de *peristila* decorados con rosetas blancas y central negra, véanse la Casa VII, 2, 16-17, la Casa de M. *Gavius Rufus* y la Casa VII, 2, 20, 40 todas ellas ubicadas en Pompeya. Consecuentemente, pensamos que estaríamos ante el espacio central de la vivienda, quizá un atrio testudinado o compluviado, al que quedaría abierto el larario.

Para concluir, cabe destacar que esta hipótesis de trabajo, basada en la nueva documentación tridimensional registrada, invita a una prudencia extrema a la hora de interpretar una documentación tan fragmentada. Sin embargo, si esta hipótesis se confirmase estaríamos ante el espacio destinado al culto privado más antiguo del valle medio del Ebro, entendiendo como culto privado el conjunto de ritos dedicados a la veneración de las divinidades del hogar y de la familia que se desarrollaban en un espacio *ad hoc*.

3.3.2.2. *Florentia*: documentación del teatro y anfiteatro romano (Florentia)

JORGE ANGÁS / JACOPO BRUTTINI

A. Introducción

La ciudad de Florentia es mundialmente conocida desde el Renacimiento. Sin embargo, se olvida que fue una ciudad fundada en época romana como *Florentia* (Scampoli, 2010: 9-39) y que se desarrolló posteriormente como una villa hasta el final de la alta Edad Media. A partir del siglo X d.C. se inició un proceso de crecimiento del centro de la ciudad, convirtiéndose posteriormente en la cuna del Renacimiento.



FIG. 114. División arquitectónica (1) de las diferentes fases históricas del Palazzo Vecchio en la actual Piazza della Signoria. La zona marcada en morado corresponde a la *terza corte* objeto del estudio. A escasos metros al Este (2) encontramos la fosilización del antiguo anfiteatro romano en el entramado urbano de la ciudad. FUENTE: Adaptación sobre la base de la ortofoto de 2012 del *Geoportale Nazionale* (Italia).

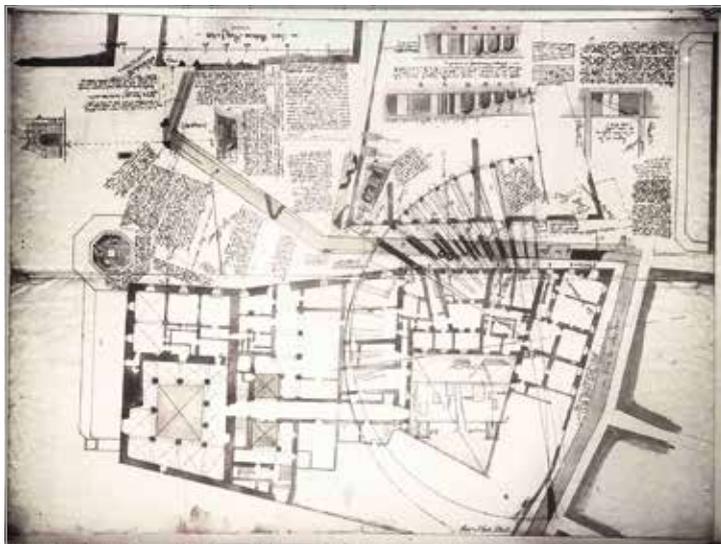


FIG. 115. Planta Frascchetti como hipótesis de la proyección del teatro romano sobre la arquitectura contemporánea a finales del siglo XIX. FUENTE: Archivio Fotografico Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana.

Entre los siglos XI y XIII las familias con mayor poder de la ciudad aprovecharon y construyeron torres y edificios sobre las ruinas de las viejas estructuras arquitectónicas. Más tarde, en el siglo XIV comenzó la construcción del *Palazzo Vecchio* cambiando profundamente el paisaje de la ciudad, hasta el siglo XVI, momento en el que el desarrollo del área urbana culmina con la ampliación del *Palazzo Vecchio* y con la construcción de la denominada *terza corte* que se apoya en las ruinas del teatro romano (Bruttini, 2013: 15).

Desde el año 1997 se iniciaron campañas de excavación en el interior de la *terza corte* del *Palazzo Vecchio*⁴⁹. Esta excavación descubrió los restos del teatro romano que se hundieron y fosilizaron con el resto de la ciudad durante el periodo de la alta Edad Media y que hoy en día se pueden visitar parcialmente, gracias a los trabajos de musealización y valorización de la zona arqueológica.

Objetivos

El objetivo principal de este apartado ha consistido en la documentación geométrica parcial del teatro y anfiteatro romano de la actual Florencia (Italia), localizados en su centro histórico urbano⁵⁰. Cada uno de estos dos ejemplos de arqueología urbana se encuentra en contextos arquitectónicos completamente diferentes. Mientras que los restos arqueológicos del teatro están distribuidos bajo el subsuelo, entre la denominada *terza corte* y la *Piazza della Signoria*, la estructura correspondiente al anfiteatro ha quedado fosilizada en el entramado urbano actual. El tipo de estrategia de campo desarrollada, junto con las herramientas y técnicas utilizadas para cada uno de estos dos ejemplos, fue totalmente diferente, acorde a unas necesidades y objetivos previos que describiremos.

a) Teatro

La documentación de los restos arqueológicos del teatro romano de la antigua *Florentia* surge de la necesidad de obtener una visión geométrica global que sirva de herramienta científica de un espacio otrora diáfano. El espacio destinado al teatro ha sufrido diversas alteraciones y aprovechamientos arquitectónicos (*vid.* FIG.

114), convirtiéndose actualmente en los cimientos de la *terza corte* del *Palazzo Vecchio*. En este sentido, se planteó un análisis que permitiese digitalizar todos los restos arqueológicos posibles de época romana, repartidos en diferentes estancias, alturas y lugares, y con ello reconstruir un espacio arquitectónico que actualmente se encuentra completamente mezclado y fosilizado en el propio edificio. Esta visión nos ha posibilitado, de una manera parcial pero de sumo interés, reconstruir geoméricamente la disposición espacial de los basamentos de los arcos radiales que formaban parte del teatro de la ciudad romana de *Florentia*. Asimismo, nos ha permitido reconstruir las fases arquitectónicas que históricamente sucedieron para la actual conformación del espacio urbano presente.

Para facilitar una comprensión global del espacio interno con respecto al externo, se realizó, igualmente, la digitalización tridimensional de toda la zona exterior que comprende *Via dei Gondi* y la *Piazza della Signoria*. De esta manera, se consigue localizar y apreciar con mejor detalle las diferencias de altura del actual plano de tierra con la base del teatro romano, observándose así una vista, imposible de otra manera, del alzado norte compuesto por el *Palazzo Vecchio* y los restos romanos digitalizados sobre una nube de puntos. Además, este tipo de documentación extensiva permite apreciar y distinguir el actual entramado urbano y ponerlo en relación con la zona arqueológica.

El objetivo del proyecto ha sido identificar los restos globales del basamento radial del teatro a diferentes cotas, con el fin de realizar diferentes secciones horizontales que definiesen su ángulo, orientación, proyección y extensión. De esta manera, el objetivo consistió en proporcionar una información geométrica que permitiese extrapolar las dimensiones y localización exacta del teatro romano en el entramado urbano actual de la ciudad de Florencia.

b) Anfiteatro

El segundo ejemplo que hemos realizado en Florencia ha sido la documentación del alzado arquitectónico correspondiente a la parte sur del otrora anfiteatro de la antigua ciudad romana de *Florentia*. Actualmente se localiza igualmente dentro del núcleo histórico urbano en la *Piazza dei Peruzzi* a tan solo 250 metros al Este de la zona escaneada con los restos arqueológicos del teatro en *Via dei Gondi*. El objetivo de este trabajo ha sido documentar parcialmente uno de los alzados, con un sistema de bajo coste mediante correlación automática de imágenes y una estación total con distanciómetro láser para obtener los puntos de apoyo para la generación del modelo tridimensional. Hemos seleccionado este alzado debido a que se trata de la zona de todo el perímetro del anfiteatro que permite mayor espacio y anchura para la toma de imágenes y puntos de control. Sin embargo, hemos constatado ciertas dificultades técnicas, tanto en la parte más alta del edificio por el ángulo de las imágenes tomadas como en la zona baja por el intenso tráfico urbano.

Asimismo, observando la imagen aérea (FIG. 117) (Musson *et al.*, 2005: FIG. portada) constatamos cómo representa uno de los ejemplos más claros que podemos obtener hoy en día, mediante una fotografía que define el trazado perfecto de un anfiteatro romano y su fosilización urbana, prácticamente en todo su perímetro como impronta arquitectónica. Sin duda, se trata de los ejemplos arquitectónicos más claros en la transformación paulatina de la ciudad fusionando la topografía arquitectónica antigua con un trazado urbano moderno⁵¹.

⁴⁹ Iniciado por la *Fabbrica di Palazzo Vecchio*, con un acuerdo con la *Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana*.

⁵⁰ Queremos agradecer a Emiliano Scampoli y a Bruno Ulivi por la ayuda prestada, disponibilidad y facilidades durante la realización de este proyecto.

⁵¹ Destacamos otro ejemplo con características similares de una estructura arquitectónica romana fosilizada en un entorno urbano moderno, como el anfiteatro romano *Palais Gallien* de la ciudad de Burdeos (Francia) antigua *Burdigala*.

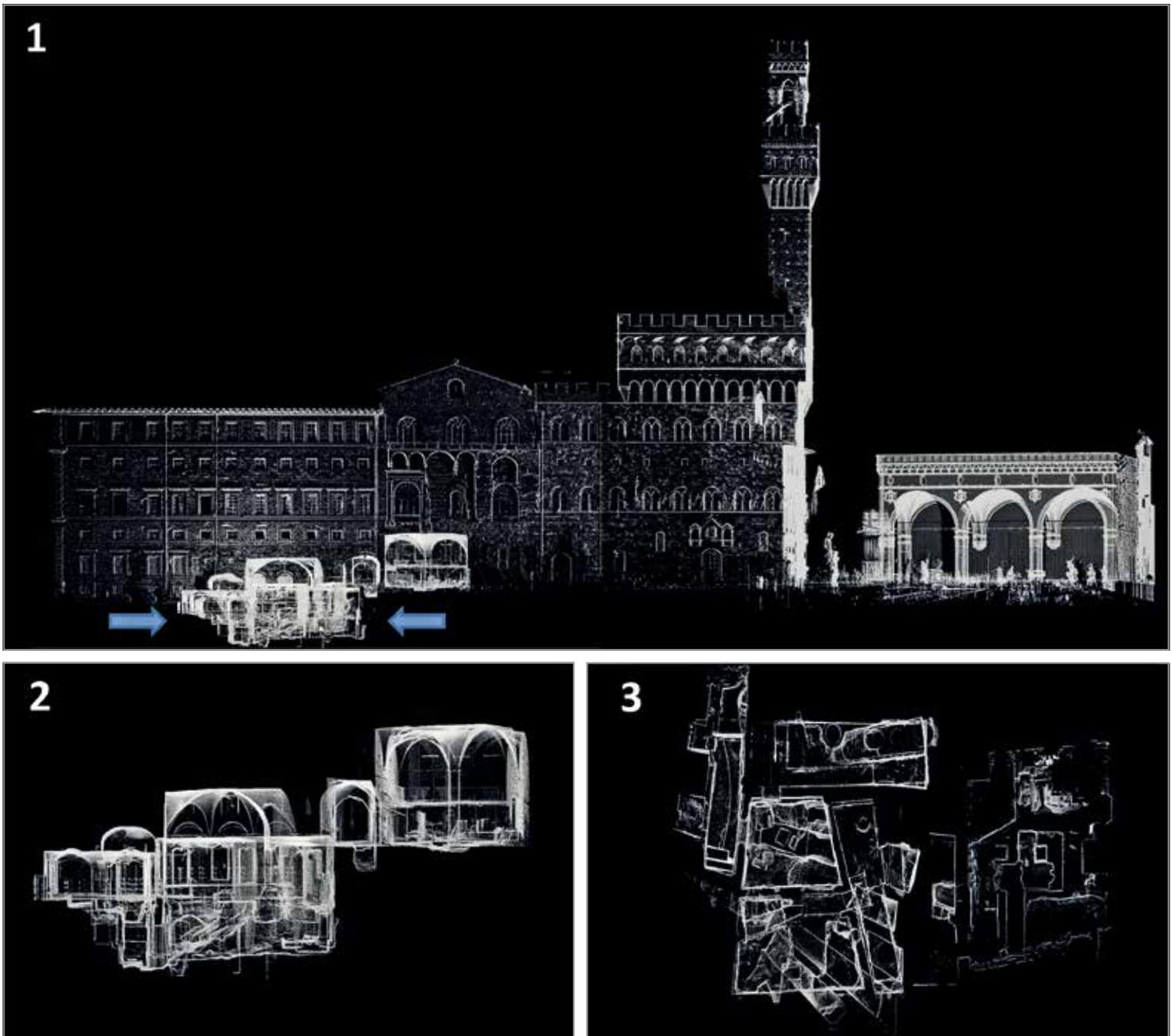


FIG. 116. Alzado norte compuesto del *Palazzo Vecchio* y parte de la *Piazza della Signoria*, extraído de la nube de puntos en escala de grises de la fachada exterior y de la zona documentada interior correspondiente a *Via dei Gondi* (1), sección compuesta de la zona interior escaneada (2), y planta seccionada de la zona interior (3).

B. Técnicas empleadas

La digitalización geométrica de la zona denominada *terza corte*, del primer ejemplo que describiremos, representa un espacio interior de dimensiones reducidas que además se inscribe dentro de diferentes compartimentaciones a diferentes alturas. Sin duda, constituye un trabajo con una alta complejidad logística y espacial, condicionada por los múltiples estacionamientos que es necesario realizar a distancias muy cortas donde se acumula un mayor error angular. Por este motivo, se seleccionaron diferentes técnicas que permitiesen una digitalización tridimensional completa basada en la creación de un sistema topográfico de coordenadas local donde apoyase el resto del modelo tridimensional. La elección de este tipo de sistema es el único que ofrece una garantía total en cuanto a la trazabilidad y verificación de los datos obtenidos, a través de la duplicidad en la toma de datos de diferentes elementos comunes repartidos por toda la zona arqueológica;

denominados dianas *Black&White*, permiten la comprobación de la información. De esta manera, la toma previa de datos fue realizada mediante una estación total Leica TS151 con el objetivo de realizar una red poligonal precedente en todas las zonas que posteriormente hubiese que documentar. Más tarde, las herramientas utilizadas para la digitalización tridimensional fueron de dos tipos de láser escáner (TLS): combinando dos tecnologías de tiempo de vuelo para la zona exterior y de diferencia de fase para todos los escaneados realizados a diferentes alturas en el interior de la *terza corte*.

Debido a la complejidad en la documentación de este tipo de espacios interiores, la utilización de la tecnología láser escáner 3D representa la mejor solución sobre otro tipo de técnicas, como las fotogramétricas de correlación automática de imágenes, que, sin embargo, cuando se trata de espacios exteriores pueden ofrecer una mayor versatilidad frente a estos sistemas.



FIG. 117. Adaptación de la imagen aérea (Musson *et al.*, 2005)* de la zona de la ciudad de Florencia que conserva el trazado del antiguo anfiteatro romano. Las flechas señalan el alzado documentado correspondiente a la Piazza Peruzzi.

Las diferentes fases desarrolladas se dividen en:

a) Creación de un sistema de coordenadas local mediante técnicas topográficas

La importancia de establecer y mantener una red de bases bien definidas y repartidas en la documentación de un espacio arqueológico de estas características, fija un protocolo en la toma de datos que garantiza tanto englobar nuevas partes documentadas dentro del mismo sistema como controlar geomorfológicamente cualquier patología estructural de los datos ya tomados y registrados. Además de la utilidad de estos dos puntos, sirve de base científica pudiendo reproducir con las técnicas utilizadas, la diferenciación del registro efectuado en cada fase.



FIG. 118. Toma de puntos de control y dianas mediante estación total con distanciómetro láser.

* Imagen correspondiente a la portada de la monografía Musson, C. / Palmer, R. / Campana, S. (2005): *In volo nel passato. Aerofotografia e cartografia archeologica*, Florencia. Posteriormente reeditado en inglés como Musson, C. / Palmer, R. / Campana, S. (2013): *Flights into the past. Aerial photography, photo interpretation and mapping for archaeology*.



FIG. 119. Toma de datos mediante un escáner de diferencia de fase en una de las zonas interiores y escáner de TOF en la zona exterior desde la Piazza della Signoria con el objetivo de contextualizar el espacio interior dentro del conjunto histórico urbano.

b) Digitalización tridimensional

La combinación de dos tecnologías TLS diferentes pero complementarias de diferencia de fase y tiempo de vuelo permitió documentar con cierta celeridad un total de 35 puntos de estacionamiento interiores y 5 exteriores, con el fin de minimizar las zonas de sombras entre las nubes de puntos. Para ello fue esencial contar con la red de bases y dianas previamente dispuestas con la estación total.

El escáner *Leica HDS6100* carece de cámara externa, siendo imposible obtener la textura con el propio escáner. En este sentido, se ensambló un sistema externo con una cámara *Canon EOS 550* sobre el mismo estacionamiento con una coincidencia de los ejes para evitar el error de paralaje con respecto a la nube de puntos tomada. Esta información, además de proporcionarnos la textura de la nube de puntos, nos ha permitido generar un conjunto de imágenes equirectangulares que se han aprovechado para generar, junto con la nube de puntos, un servidor web 3D sobre el navegador *Internet Explorer* con el *plugin Truview*, ya comentado en el apdo. 3.3.2, además de un recorrido virtual en toda la zona documentada.

Respecto al segundo trabajo, dedicado a la documentación del alzado arquitectónico sur, correspondiente al trazado actual de *Piazza dei Peruzzi*, se realizó dentro de una estrategia que podemos de-

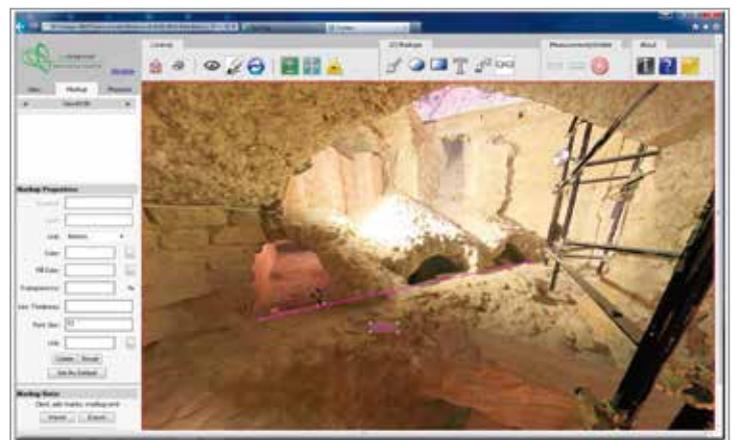


FIG. 120. Servidor web de los ficheros 3D de cada uno de los escaneados. Advértase la medición sobre la nube de puntos en una de las zonas que se conservan los basamentos de los arcos radiales.

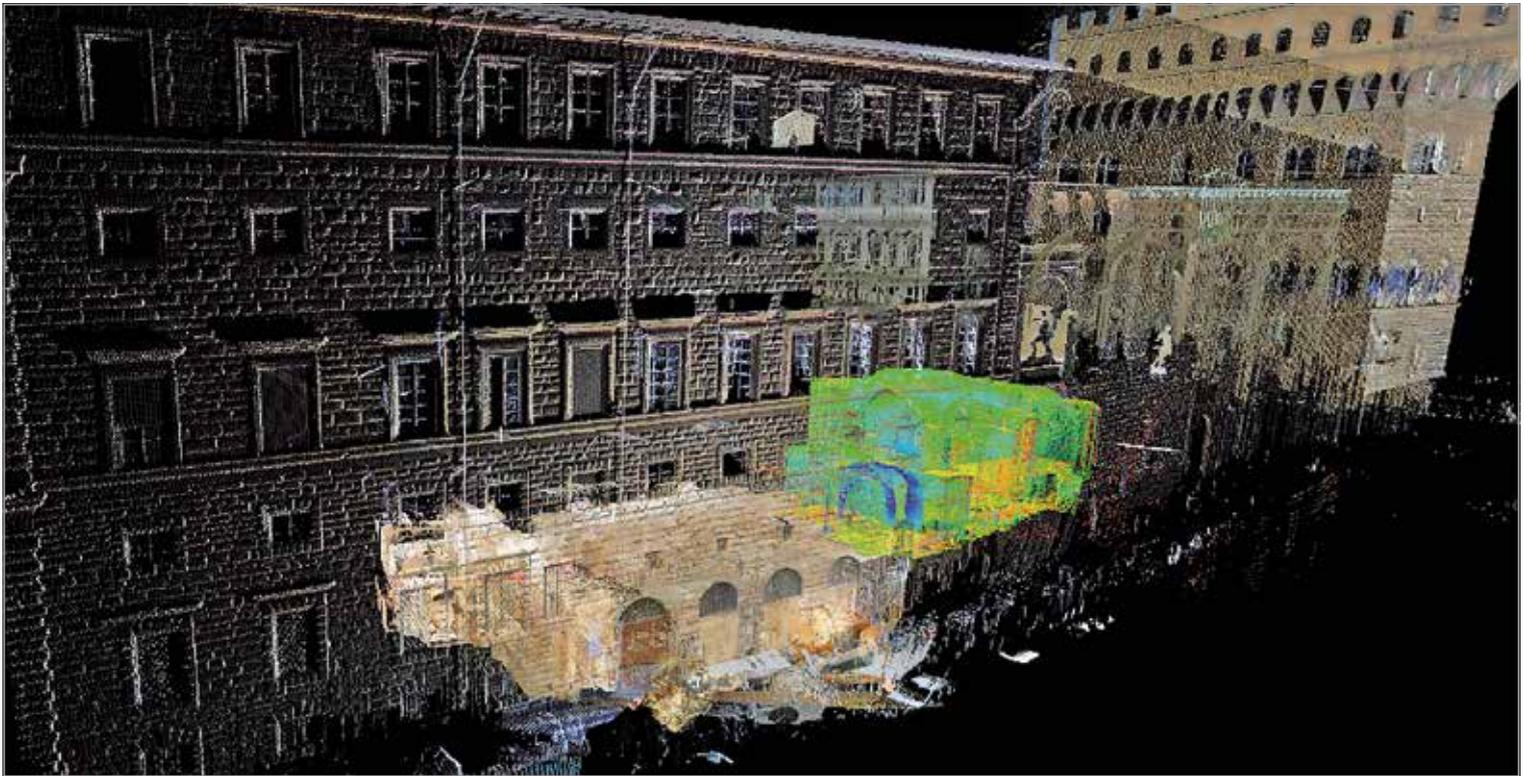


FIG. 121. Vista en perspectiva compuesta de la nube de puntos desde *Via dei Gondi*. Adviértase la zona con una mayor resolución perteneciente a la zona documentada de los arcos radiales interiores del antiguo teatro.

nominar de bajo coste, debido fundamentalmente a la rapidez de su documentación, por el escaso tiempo que tuvimos para el registro. De esta manera, se efectuó una documentación por correlación automática de imágenes y apoyo topográfico con una estación con medición laser. La utilización de este sistema se generó para lograr un mejor ajuste geométrico de las imágenes puesto que, al no existir prácticamente un retranqueo suficiente que garantizase la perpendicularidad de cada una de las imágenes, se realizaron algunas fotos oblicuas de las zonas más altas de la fachada, asociadas de igual manera a puntos de control topográficos (GCP) tomados con la estación total.

C. Resultados y conclusiones

La necesidad de esta documentación ha desarrollado, en ambos trabajos, una documentación geométrica que constituye una he-

rramienta en la interpretación arqueológica urbana de la Florencia romana, si bien es cierto que en el caso del teatro el nivel de dificultad en su interpretación es mayor debido a la complejidad de fases arquitectónicas para ubicar los diferentes arcos radiales conservados en el subsuelo dentro de las diferente estancias de la *terza corte*.

En cambio, los resultados de la documentación del anfiteatro han tenido como objetivo un tipo de documentación preventiva del estado actual de la fachada sur con un interés en el estudio de la lectura de paramentos de dicho alzado arquitectónico.

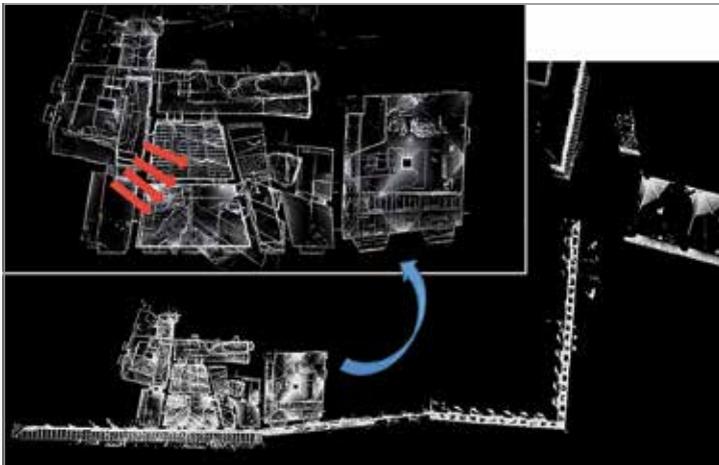


FIG. 122. Composición en planta de la nube de puntos del contorno del *Palazzo Vecchio* y *terza corte* con los arranques de los basamentos radiales del teatro (en rojo).

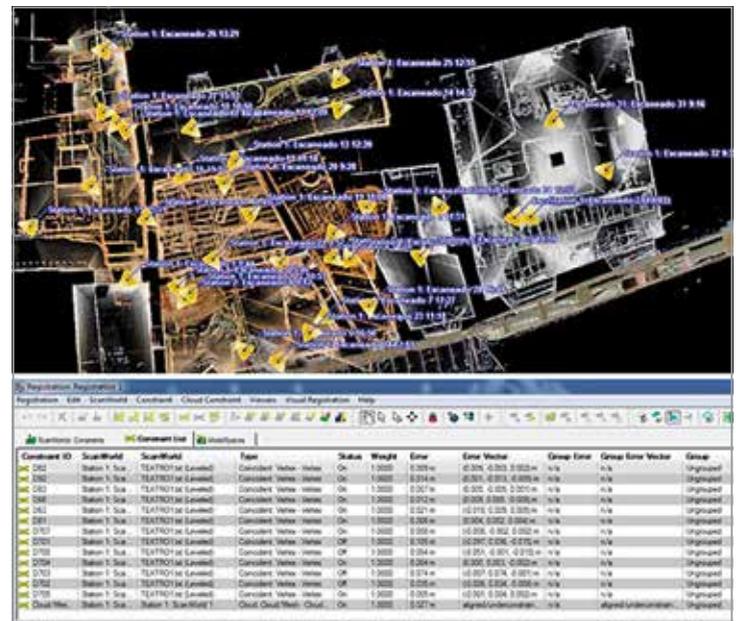


FIG. 123. Gestor web de cada escaneado interior sobre la planta extraída del modelo 3D en la *terza corte*. Informe de errores en la alineación de las nubes de puntos con las dianas (abajo) de los escaneados interiores.



FIG. 124. Ortofoto del alzado sur de Piazza Peruzzi de la zona de la ciudad de Florencia que conserva el trazado del antiguo anfiteatro romano.

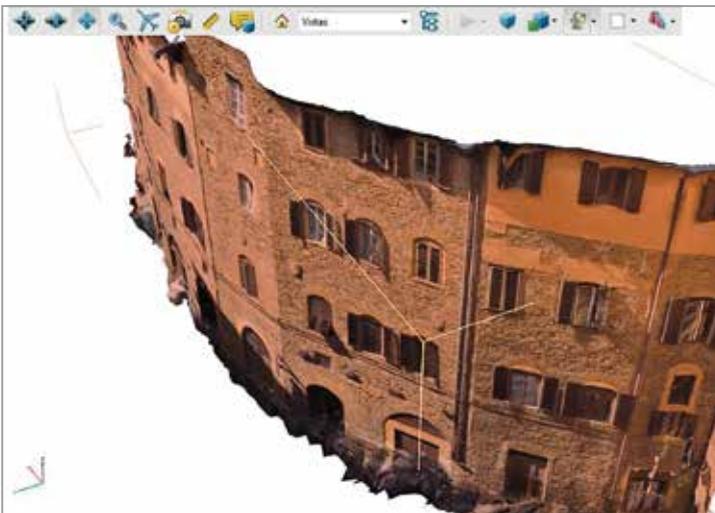


FIG. 125. Modelo 3D del alzado del anfiteatro en formato PDF3D aplicando diferentes filtros de visualización.

De esta manera podemos resumir los resultados en:

- Generación en ambos casos de una nube de puntos densa x, y, z con los 3 parámetros adicionales RGB mediante combinación de TLS y de técnicas fotogramétricas de correlación de imágenes.
- Triangulación para la generación de la malla y texturización únicamente en el caso del alzado del anfiteatro para la obtención de un ortoalzado. En el teatro debido a su complejidad y a su objetivo arqueológico se ha omitido este paso puesto que para la generación de secciones y ortofotos es suficiente con la propia resolución de la nube de puntos. Con una resolución media de uno a dos milímetros entre puntos.
- En el teatro se han generado diversas secciones horizontales sobre la nube de puntos a diferentes alturas con el fin de interpretar los arcos radiales que todavía se conservan en la planta (*vid.* FIG. 122).
- Respecto a los resultados métricos con posibilidades de difusión, se han aportando diferentes soluciones que permiten trabajar con la información sin necesidad de unos conocimientos técnicos en visualización tridimensional. De

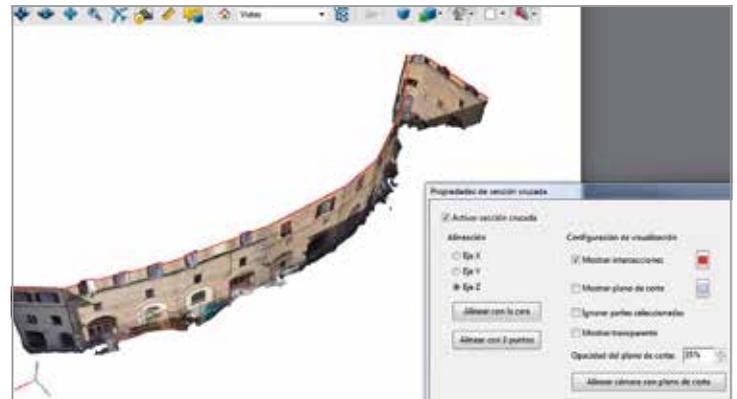


FIG. 126. Ejemplo de una sección horizontal con desplazamiento en tiempo real del anfiteatro en el formato PDF3D con las diferentes herramientas de la versión Adobe Pro Extend.

esta manera, todos los escaneados realizados en el teatro se han aglutinado en un servidor 3D para web, pudiendo gestionarse directamente sobre Internet Explorer. En cambio, la solución en el anfiteatro generó un fichero PDF3D que, debido a su poco peso, permite trabajar con bastante versatilidad.

3.4. Monumentos arquitectónicos

3.4.1. Patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.4.1.1. Introducción

El proyecto que exponemos a continuación constituyó nuestra primera experimentación en la generación de un repositorio *online* de modelos tridimensionales, que fuesen accesibles con un objetivo eminentemente científico, pero que contribuyesen a la vez a generar una información igualmente divulgativa. Asimismo, congela un momento tecnológico del año 2010, como respuesta a una problemática que se venía sucediendo años atrás, respecto a la falta de funcionalidad de la información tridimensional. Actualmente,

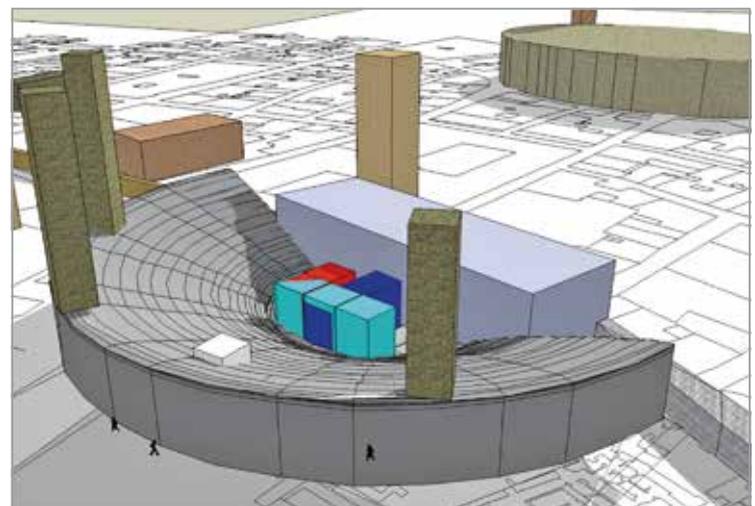
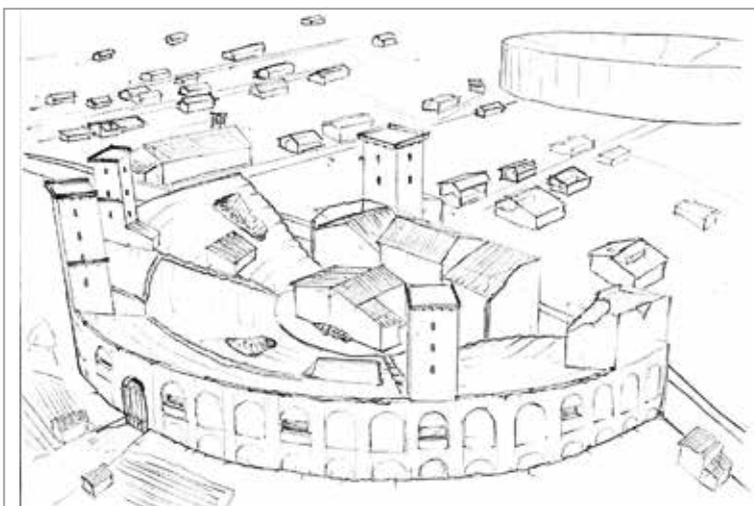


FIG. 127. Dibujo didáctico realizado sobre la reconstrucción de los datos obtenidos que muestra una hipótesis del área del teatro y fondo del anfiteatro en la segunda mitad del siglo XII de la ciudad de Florencia. Dib. Mirko Piccioni

al margen de su programación en Flash, con los problemas de indexado que representa este tipo de información en los buscadores y la necesidad de un *plugin*, este proyecto sigue estando plenamente vigente como fuente documental del patrimonio hidráulico romano. Además, debido a su practicidad y resultados, ha constituido la base de más de una decena de proyectos patrimoniales sucesivos sobre la misma base técnico-científica.

El objetivo del proyecto «Documentación geométrica, valoración y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro»⁵² ha consistido en obtener un registro geométrico de un con-

52 Este proyecto ha sido posible gracias a la financiación de la Subdirección General de Protección del Patrimonio Histórico, Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales del otrora Ministerio de Cultura junto con el asesoramiento



FIG. 128. Yacimientos arqueológicos y ámbito geográfico según la tipología arquitectónica. Desarrollo web del proyecto con los diferentes modelos tridimensionales de cada uno de los conjuntos hidráulicos documentados.

junto representativo de la arquitectura hidráulica romana del valle medio del Ebro. Esta información ha sido procesada con el fin de introducir los datos adquiridos en una plataforma web de libre acceso.

La metodología utilizada en cada uno de los yacimientos –representativos de la captación, distribución y evacuación del agua en el mundo romano– se ha realizado con la combinación de diferentes tipos de escáner 3D y técnicas topográficas clásicas. En este sentido, se han integrado tanto escáneres de largo alcance como de objeto cercano para aquellos elementos que necesitaban un mayor detalle. Asimismo, el entorno ha sido documentado, durante una segunda fase, mediante RPAS o drones, obteniendo el modelo tridimensional del entorno inmediato mediante técnicas de fotogrametría aérea de baja altura.

Los resultados han aportado una documentación topográfica exhaustiva de las principales estructuras hidráulicas romanas del valle medio del Ebro, lo que garantiza, además de su documentación y difusión, su conservación y prevención estructural.

La principal contribución de este proyecto ha sido ofrecer un equilibrio final de los resultados –con un nexo didáctico– entre la investigación para los responsables científicos y su difusión para cualquier interesado en la ingeniería hidráulica romana. Las técnicas de documentación geométrica del patrimonio cultural evolucionan rápidamente en la sociedad de la información actual, no permitiendo –en la mayoría de los casos– una reflexión clara sobre cómo y con qué finalidad administrar o gestionar la cantidad de información adquirida. De este modo, asistimos a un diálogo diacrónico e infrutilizado entre tecnología y metodología con el fin de aprovechar o gestionar toda la información disponible (Angás, 2011). Por ello, en la mayoría de los casos el verdadero avance no se encuentra en la propia técnica utilizada, sino en la combinación de ambos objetivos con el fin de obtener una optimización de los resultados entre el proceso de investigación y su difusión social.

científico del Grupo URBS de la Universidad de Zaragoza. Además en él han colaborado los responsables administrativos y científicos de cada uno de los monumentos expuestos, junto con las diferentes administraciones e instituciones: Gobierno de Navarra, Gobierno de La Rioja, Gobierno de Aragón, Ayuntamiento de Zaragoza, Museo de Teruel y Fundación Uncastillo.

La selección de las estructuras hidráulicas romanas más representativas, se ha centrado en los hallazgos arqueológicos del valle medio del Ebro, concretamente en monumentos ubicados en La Rioja, Navarra y Aragón. En consecuencia, el proyecto pretende documentar, estudiar y difundir con un nexo didáctico construcciones fundamentales para entender el ciclo del agua en la época romana: acueductos, presas, cloacas, depósitos y cisternas romanas.

La primera fase del proyecto se llevó a cabo desde finales del 2010 hasta febrero de 2012. Posteriormente, a partir de marzo de 2012 se incorporó una nueva fase de investigación, dedicada a la documentación mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron.

Las técnicas aplicadas en la documentación de cada uno de los conjuntos arquitectónicos seleccionados, ha sido la utilización de la tecnología escáner 3D para el registro terrestre y drones para la documentación mediante técnicas de correlación automática de imágenes (SfM) para la obtención de nubes de puntos densas. Se trata de una tecnología cuya aplicación en combinación con otras técnicas y procesos aporta una vasta información tanto a los investigadores como al público en general (García-Gómez, 2011: 25-44). Sin embargo, al mismo tiempo, se trata de uno de los procesos más complicados de gestionar por la propia heterogeneidad patrimonial. Su diversa morfología hace que el postproceso de la información registrada tenga que adaptarse a cada caso concreto. La propia documentación topográfica mediante diferentes tipologías de escáner 3D (tiempo de vuelo, diferencia de fase y luz blanca estructurada) y fotogrametría de cada uno de los yacimientos añade, además, un componente métrico muy útil para los responsables científicos de los yacimientos, a la vez que suple grandes carencias en los lugares donde todavía no existía una topografía suficientemente detallada de la arquitectura hidráulica. Además, en algunos de los yacimientos expuestos, como en la presa romana de Muel, los trabajos de documentación se han intercalado con diferentes fases de consolidación y limpieza, hecho que ha permitido un aprovechamiento excepcional de las condiciones físicas del yacimiento.

De este modo, como resumen del planteamiento general expuesto del proyecto que presentamos, hemos combinado el trinomio anteriormente citado de documentación, valorización y difusión, intentando aportar en cada una de las etapas, todas aquellas demandas o carencias que existían. Así mismo, hemos enfocado el proceso hacia un único fin: la armonía entre los datos científicos aportados y su propia divulgación, siempre con un marcado componente didáctico como nexo entre la investigación y la difusión de los resultados obtenidos.

3.4.1.2. Contexto cultural y antecedentes historiográficos

La temática que vertebra el proyecto se centra en el proceso denominado «ciclo del agua» –captación, distribución y evacuación– dentro de la arquitectura romana. De este modo, hemos seleccionado cada uno de los yacimientos siguiendo dos criterios fundamentales: los modelos arquitectónicos y el estado de conservación. Todo ello, con el fin de poder transmitir a la sociedad, con mayor claridad, cómo los romanos aprovecharon sus recursos hídricos. El ámbito geográfico abarca un grupo de ciudades o municipios que en época romana –a partir de Augusto– conformaron el *Conventus Caesaraugustanus*. Este hecho ha proporcionado al proyecto un carácter interterritorial entre La Rioja, Navarra, Zaragoza y Teruel. Los monumentos documentados se estructuran en tres ejes principales según el ciclo del agua:

A. Sistemas de abastecimiento del agua

El abastecimiento de las ciudades romanas estuvo influido, tal y como sucede en la actualidad, por la situación de las ciudades respecto a los cursos de agua. A este factor se sumaron la incidencia del clima en general y las variantes locales. Estos condicionantes po-

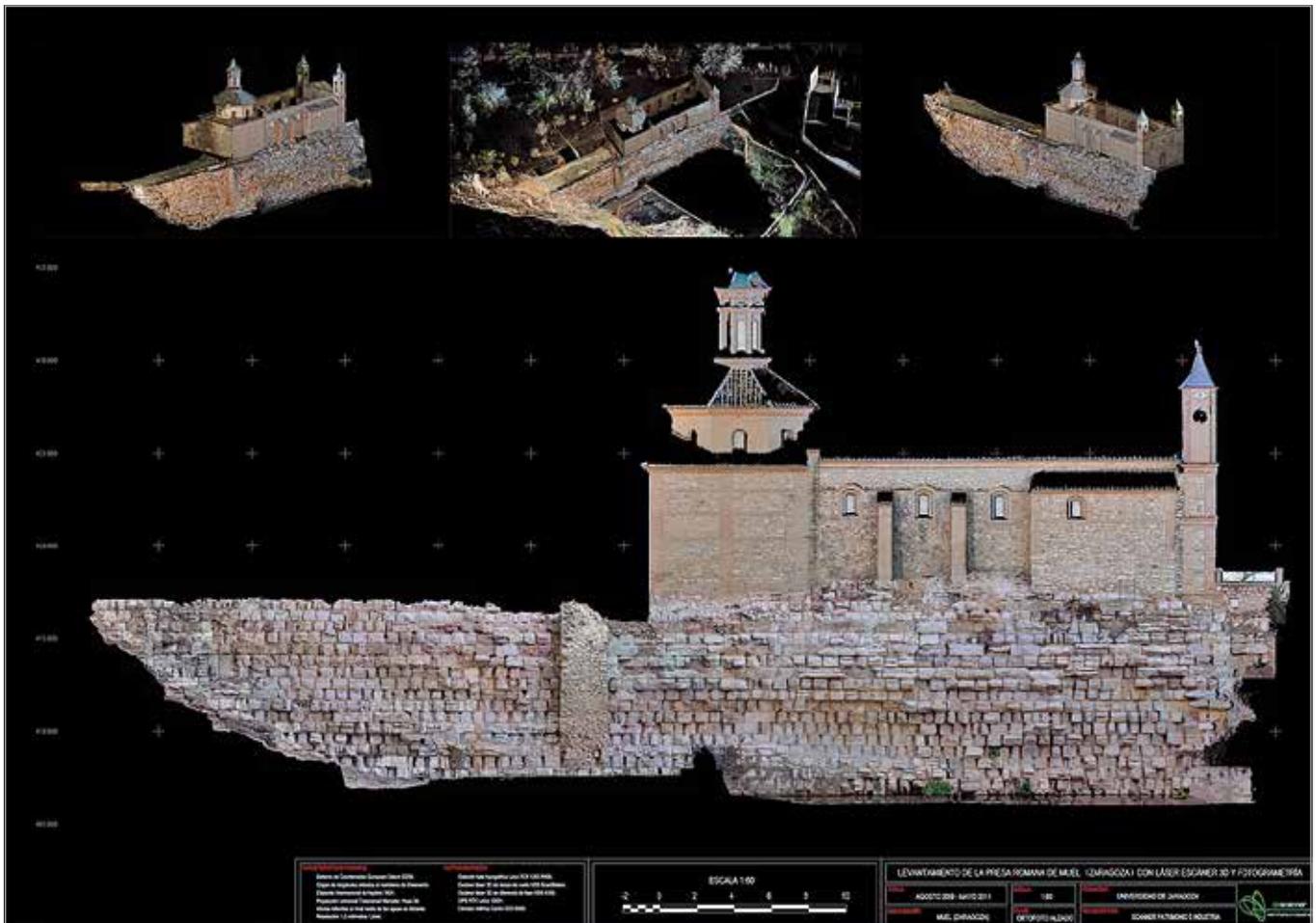
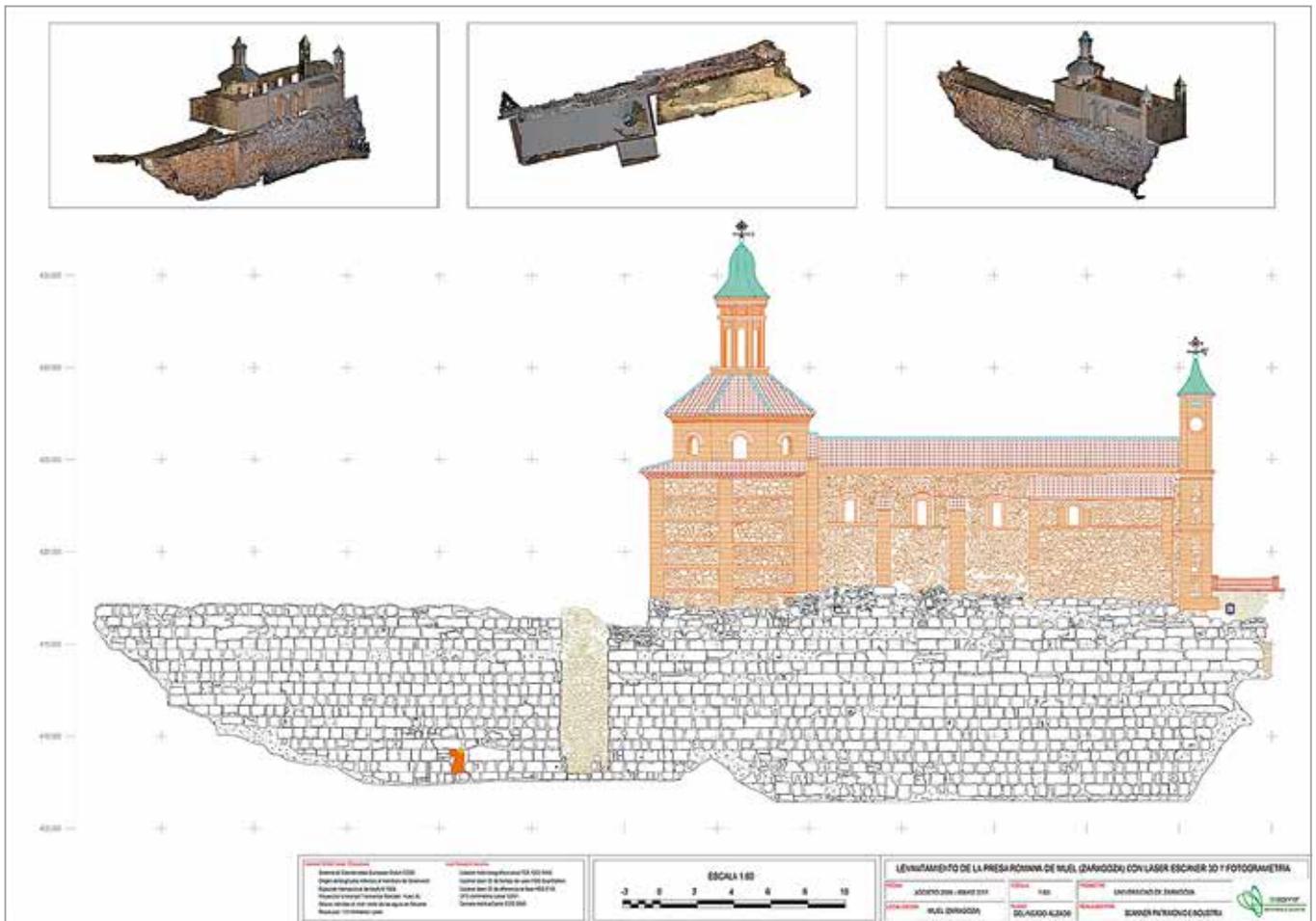


FIG. 129. Delineación del alzado de la presa romana de Muel sobre la ortofoto con la localización de las diferentes inscripciones documentadas.

nen de manifiesto la adaptación de la sociedad a los medios disponibles y el desarrollo que alcanzaron las construcciones hidráulicas en el valle medio del Ebro.

La experiencia adquirida con la práctica y los conocimientos previos de otras civilizaciones hicieron a los romanos solucionar este problema a través de dos estructuras hidráulicas bien conocidas en el valle medio del Ebro: las cisternas y las presas. De este modo, los yacimientos representados son los siguientes:

a) Las cisternas del municipio romano de *Bilbilis*. Calatayud, Zaragoza (Martín-Bueno, 1975)

Bilbilis presenta una amplia diversidad tipológica de cisternas, desde las más simples rectangulares con cubierta plana o abovedada hasta las complejas o compartimentadas mediante muros o simples columnas que ofrecen el aspecto de grandes salas subterráneas, presentando algunas varios pisos para facilitar la decantación del agua. Casi todas están realizadas en muros sólidos de hormigón revestidos interiormente en *opus signinum* fino, con boceles que cubrían los ángulos para evitar las fisuras.

La ermita de San Paterno es realmente una cisterna (clasificada, según M. Martín-Bueno, de tipo rectangular simple) que por su tamaño y buena conservación se utilizó desde antiguo como ermita bajo la advocación de este obispo bilbilitano. Realizada conforme a una bóveda de cañón y techo plano al exterior, su estructura se edificó mediante encofrado de madera del que se pueden observar sus huellas en el *opus caementicium*. Posteriormente, se recubrió el interior por una capa de *opus signinum* para impermeabilizarla.

b) La presa romana de Muel. Muel, Zaragoza (Uribe, 2010)

La presa romana de Muel se ubicaba, en origen, en el cauce del río La Huerva aprovechando un estrechamiento natural formado por dos farallones rocosos. Ambas formaciones, de materiales calizos, podían utilizarse con facilidad para apoyar los laterales de la presa, formando una sólida mole que aguantase la presión ejercida por el agua embalsada.

La construcción en 1770 de la ermita de Nuestra Señora de la Fuente sobre la misma presa nos indica su potencia, puesto que sirvió de cimientos a esta ermita que alberga las pechinas pintadas por Francisco de Goya.

El alzado, que dejaron al descubierto los sondeos arqueológicos realizados en el año 2009, está formado por una fábrica de *opus quadratum* de piezas de caliza blanca, tal y como ya se conocía – este en peor estado – en el paramento de aguas abajo. Este sistema constructivo se caracterizó en el mundo romano por utilizar sillares paralelepípedos de talla cuidada, colocados normalmente a seco (sin argamasa entre las juntas) en hiladas horizontales isódomas o pseudoisódomas.

El hallazgo, desde 2009, de una serie de marcas realizadas en los sillares de *opus quadratum* ha llevado a sus investigadores a relacionar estas inscripciones con la construcción de la presa y sus diferentes marcas de cantero (Navarro, 2014: 573-598).

B. Distribución del agua a las ciudades

Realizada a través de acueductos, se han documentado tres tipologías diferentes de acueductos: con *arquationes* (B.1), pilares con un canal de madera (B.2) y acueducto excavado en la roca (B.3).

a) Acueducto «Puente de los Moros». Lodosa-Alcanadre. Navarra y La Rioja (Mezquíriz, 1979)

El Acueducto de Lodosa-Alcanadre se ubica justo en el límite entre Navarra y La Rioja. Este acueducto, también denominado como

«Puente de los moros», sustentaba el canal a través de una serie de arcos siendo este el modelo arquitectónico más representativo del mundo romano.

Se conservan las ruinas de trece arcos o *arquationes*, de los 108 que debió constar el acueducto completo, aunque únicamente hoy en día se puedan contemplar cinco arcos completos.

Según los trabajos de M^aA. Mezquíriz, las dimensiones de los pilares debieron ser más gruesos que la mayoría de los acueductos conocidos. Su *specus* también es mayor de lo habitual, entre 1,8 y 2,5 m de anchura, pudiendo confirmarse la posibilidad de que el acueducto fuera utilizado también como puente para cruzar el río. El tipo de construcción se compone de un revestimiento externo de pequeñas piedras trabajadas, denominado sillarejo, que formaba la epidermis de una fábrica interna de *opus caementicium*.

b) Acueducto de Los Bañales. Uncastillo, Zaragoza (Beltrán, 1977)

En el caso de Los Bañales, así como en el de *Andelo(s)*, el ciclo del abastecimiento se encuentra casi completo, conservándose una presa, canalizaciones excavadas en la roca, el acueducto y las termas romanas. El acueducto se ubica unos 900 m al Este del asentamiento urbano, muy cerca del límite entre los términos municipales de Uncastillo y Biota (Zaragoza), en el paraje que en la zona se denomina, precisamente, «Los Pilarones». La forma arquitectónica se aleja en menor medida de la conocida solución de acueducto romano con arcos o *arquationes* pero su función fue la misma: abastecer de agua a la ciudad de Los Bañales.

El trazado del acueducto discurría sobre una cresta rocosa que aflora en el centro de la depresión. Los tres tramos rectos describen según L.M. Viartola (2011; 2013), un arco circular con el centro hacia el norte. En la actualidad se conservan 32 pilares de los 75 que se estima pudo tener y no existe ningún vestigio del canal que discurrió sobre ellos (*vid. infra* apdo. 3.6.3).

c) Acueducto de Albarracín-Gea-Cella. Teruel (Almagro, 2002) (Ezquerro, 2008)

El acueducto tiene su origen en el río Guadalaviar, en las inmediaciones de Albarracín (Teruel), y su final en Cella (Teruel) con un recorrido aproximado de 25 km. que discurre por la margen izquierda del río Guadalaviar.

Aunque el acueducto de Gea-Albarracín-Cella conserva de manera excepcional algunos tramos de gran interés arqueológico (la Galería de los espejos, cerca del Castillo de Santa Croche, el Azud de Gea, la Cañada de Monterde, La Hoya, La Tejería y la zona próxima a Cella) elegimos para este proyecto los restos procedentes del Barranco de los Burros cercano a la localidad de Gea de Albarracín.

Destacamos de este modelo y de Los Bañales que la construcción de ambos combinaba dos técnicas diferentes para conseguir transportar el agua. Por un lado, se utilizaron galerías subterráneas o superficiales excavadas en la roca caliza. Por otro lado, se utilizaron canales ubicados sobre una *substructio*, es decir, un muro de mampostería, adaptándose siempre a la topografía y a las peculiaridades geológicas del terreno.

C. La distribución dentro de las ciudades

a) El complejo hidráulico de *Andelo(s)*. Navarra (Mezquíriz, 1988)

Una vez que las aguas habían llegado al punto alto de la ciudad debían iniciar un nuevo recorrido que iba desde el depósito hasta el consumidor, pasando por una red de distribución que a menudo era muy compleja. Conocemos las técnicas relacionadas con estas

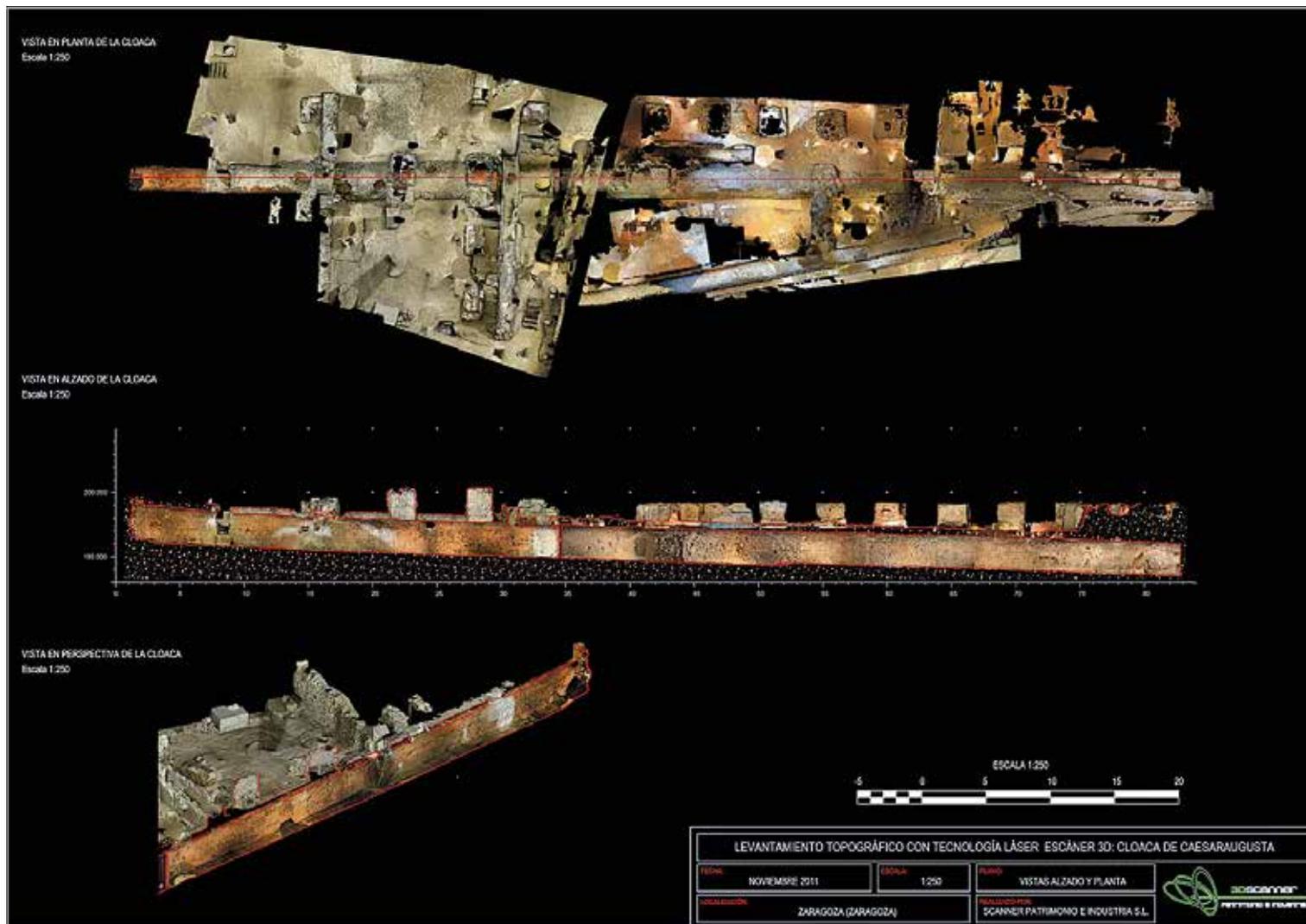


FIG. 130. Modelo 3D integrado de la cloaca del foro de la colonia romana de *Caesar Augusta*. Ortofoto y sección longitudinal del modelo 3D referido al actual sistema de coordenadas de la red topográfica municipal de Zaragoza.

redes, así como la política de su gestión gracias al tratado sobre los acueductos de Roma, *De aquis urbis Romae* escrito por Frontino *curator aquarum* o encargado de las aguas bajo Nerva en el año 97 d.C.

El sistema de abastecimiento de agua a la antigua ciudad de *Andelo(s)* es uno de los más notables de Hispania. Este conserva gran parte de las estructuras hidráulicas que intervinieron en él: la presa de captación de aguas, el depósito regulador, restos del acueducto y uno de los *castella aquae* de la ciudad. Estos restos son conocidos gracias a los trabajos realizados por M^aA. Mezquíriz desde 1980. Sus publicaciones sobre este tema han puesto de relevancia que estos hallazgos constituyen, por el momento, la obra hidráulica romana más original y completa encontrada en el valle medio del Ebro.

El depósito regulador de *Andelo(s)* ocupaba un amplio espacio excavado en el terreno de 85 x 37 m como ejes máximos. En el lado oeste se documentó la altura original de los muros que asciende a 3,5 m. La conservación de la altura y la anchura original hace que M^aA. Mezquíriz estime una capacidad de 7350 m³.

El *castellum aquae* hacía las veces de depósito de agua intramuros y era el punto donde finalizaba la conducción y comenzaba la red de distribución urbana. Este recinto servía para dividir y repartir el caudal entre los usos públicos y las concesiones privadas. La tipología más habitual de estas estructuras se componía de una o varias cámaras rectangulares cubiertas por bóveda de medio cañón. A veces se podía acompañar de una gran fuente monumental dedicada a las ninfas y denominada ninfeo.

El *castellum aquae* de *Andelo(s)* conserva un pódium rectangular de grandes sillares rematado por otros moldurados. El interior estuvo compuesto por un relleno de piedra picada y sobre ella una fuerte argamasa formada por tres capas. Sobre el podio se levantaría la cámara superior o depósito que estaría cubierto por bóveda de cañón o arista.

D. Evacuación de las aguas residuales

El proceso final del ciclo del agua se resolvía deshaciéndose de las aguas usadas o aguas fecales. Al igual que las aguas limpias discurrían por el *specus* o canal del acueducto, las aguas sucias eran arrastradas por las cloacas al mar o, en el caso del valle medio del Ebro, al río.

a) Cloacas de Caesaraugusta. Zaragoza (Aguarod, 2010)

De todas las cloacas halladas en *Caesaraugusta* destaca por su tamaño (2,82 m de alto por 2,20 m de ancho) el gran colector que hoy en día se puede visitar en el Museo del Foro de *Caesaraugusta*. Realizada con un encofrado de *opus caementicium* –todavía se pueden observar las tongadas del mismo–, fue rematada por una bóveda de medio cañón. La cloaca surcaba la plaza de la Seo de norte a sur, discurriendo perpendicular al Ebro, destino final de sus aguas.

La construcción de este gran colector tenía como misión evacuar las aguas de lluvia provenientes de los pórticos del foro y las aguas

usadas de las grandes instalaciones públicas: las termas, que se localizan en la actual calle San Juan y San Pedro, y el teatro de la ciudad. Al igual que sucedía en Roma, donde la red de alcantarillado desaguaba en el Tíber, las cloacas caesaragustanas evacuaron sus aguas al río Ebro o a La Huerva.

3.4.1.3. Metodología desarrollada

Las diferentes etapas de actuación establecidas en el proyecto han quedado divididas en cuatro fases iniciales, desde diciembre de 2010 hasta febrero de 2012, en las que se ha realizado: el estudio previo de cada monumento, el registro topográfico terrestre, la gestión de la información recogida y la adaptación de los resultados a una plataforma web. Posteriormente, a partir de marzo de 2012 se incorporó una quinta fase junto con el Departamento de Ingeniería Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, dedicada a la documentación mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron. Esta última etapa se ha realizado gracias a una ayuda de investigación de la Fundación de la Agencia Aragonesa para la Investigación y Desarrollo (ARAID).

El objetivo fue la documentación del paisaje inmediato de cada conjunto arqueológico desde una perspectiva aérea, que defina su funcionalidad con el resto del yacimiento, localización de las principales estructuras, extensión y posible análisis de estructuras soterradas.

A continuación se describen de un modo sucinto los puntos fundamentales desarrollados en cada etapa de este proyecto:

A. FASE I. Estudio previo y recopilación de la información existente

Para cada uno de los conjuntos arqueológicos seleccionados se realizó una fase de documentación que determinase las partes fundamentales, extensión de cada una de las estructuras y elementos de interés, para la temática del proyecto, bien por su singularidad arqueológica o bien por un marcado deterioro estructural. Esta fase se realizó junto con el asesoramiento científico del grupo de investigación de excelencia URBS de la Universidad de Zaragoza.

Esta planificación previa fue determinante para la definición de cada conjunto. Un ejemplo significativo de esta programación lo observamos en la Cloaca de *Caesaraugusta*, puesto que el desarrollo de la misma transcurría por debajo de diferentes inmuebles –sitos entre la plaza del Pilar y la calle Don Jaime en Zaragoza– en los cuales el acceso no era único y había que establecer un estudio previo de accesos –para la realización de la topografía– y diferenciación estructural de cada una de las partes arquitectónicas. En este sentido, la documentación histórica y planificación resultó imprescindible antes del propio registro geométrico.

B. FASE II. Documentación geométrica

La aplicación de la técnica escáner 3D en la fase de documentación de campo se planteó únicamente como nexo que conjugó e integró otras técnicas de documentación como la fotogrametría y la topografía, para la generación de modelos tridimensionales de cada estructura arquitectónica.

Para la elección de la técnica utilizada, existen unos factores heterogéneos dependiendo de las características particulares de cada monumento documentado. En este sentido, resulta necesario precisar las diferentes tipologías instrumentales empleadas:

- Escáner láser (TLS). Se utilizaron equipos de tiempo de vuelo (*Leica Scanstation*) y equipos de diferencia de fase (*Leica*

HDS 6100) dependiendo del yacimiento, distancia al objeto y entorno inmediato.

- Escáner de luz blanca estructurada (*Artec MHT*) para representar los detalles más significativos en cada monumento, como el caso de las inscripciones epigráficas de la presa de Muel.
- Sistemas GNSS (para georreferenciar la localización) apoyado en las redes permanentes GNSS de Geodesia Activa de Aragón, La Rioja y Navarra.

Por último, se realizó el encaje final de los diferentes estacionamientos del láser escáner a través de dianas (*Black&White*) previamente adquiridas con una estación total (*Leica TCRP 1201*). La creación independiente de un sistema de coordenadas propio para cada conjunto permitió controlar la precisión final del registro de cada modelo, constituyendo ahora este sistema una fuente documental que garantiza la monitorización y/o ampliación del conjunto en futuras campañas.

Aunque la aplicación del escáner 3D permite generar una textura original de cada estructura arquitectónica, se optimizó cada valor cromático RGB de cada punto adquirido, agregando una capa de texturas al modelo tridimensional. Estas texturas se obtuvieron a partir de la toma de imágenes con una cámara calibrada (*Canon EOS 600 D*) con diferentes focales fijas de 24 mm y 50 mm. La técnica utilizada para la adquisición de la textura en cada monumento fue diferente, dependiendo de su propia morfología, utilizando elementos auxiliares como pértigas en el acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza). Respecto al ajuste radiométrico de las imágenes, se utilizó una carta de calibración de 24 colores estandarizada (*X-Rite Color Checker*). La utilización de este patrón permite adaptar el ajuste radiométrico y conseguir la máxima homogeneidad para cada uno de los paramentos y modelos tridimensionales obtenidos. Del mismo modo, se realizaron todas las fotografías en formato RAW, donde quedan registrados todos los valores en un «negativo digital» sin modificaciones y sin ningún tipo de compresión de la imagen. Además queda almacenado de un modo independiente los ajustes de luminosidad y temperatura de la luz.

C. FASE III. Postproceso de la información

Las nubes de puntos adquiridas por los diferentes escáneres de tiempo de vuelo y diferencia de fase fueron registrados conjuntamente apoyados en las dianas (B&W) tomadas con la estación total. El registro y ajuste de los diferentes escaneados se realizó a través de los diferentes módulos del programa *Cyclone v. 7.3.3* con un error medio de alineación entre las nubes de puntos de 3 milímetros. La utilización de cada una de las redes GNSS de cada comunidad autónoma (ARAGEA, RGAN, Red de La Rioja) ha permitido su correcta georreferenciación.

El proceso de adquisición de las texturas fotográficas para la nube de puntos fue realizado de modo dual e independiente con diferentes objetivos finales:

- La adquisición fotográfica para mapeado del modelo triangulado. Este fue realizado con una cámara calibrada en formato RAW, utilizando una carta de color calibrada con el fin de realizar un ajuste radiométrico.
- Para la adquisición del color en cada escaneado, puesto que el modelo de diferencia de fase *Leica HDS 6100* no posee ninguna cámara y la cámara integrada en el modelo de escáner de tiempo de vuelo (*Leica Scanstation*) es de muy baja resolución, se utilizaron diferentes rótulas con una cámara *Canon EOS 550 D* y un objetivo *fisheye* de 8 milímetros. Cada una de las rótulas y barras son de diferente métrica en función de cada modelo de escáner, con el fin de ajustar el eje de muñon-



FIG. 131. Ejemplo de las diferentes técnicas (topografía, escáner 3D y fotogrametría) empleadas en la documentación gráfica y geométrica de cada estructura hidráulica.

nes del escáner con el centro del sensor CCD de la cámara. El resultado final de este ajuste fue utilizado únicamente para la creación de un servidor web que integraba todos los escaneados y que se ejecutaba a través de Internet Explorer mediante el *plugin Leica Truview*. Su fácil accesibilidad le permite realizar cualquier medición y localización de coordenadas a través de un navegador. El trabajo con este tipo de «servidor web integrado» permite autogestionar y vincular cualquier otro tipo de ficheros (imágenes, base de datos, referencias bibliográficas) en cada uno de los escaneados, como servidor local o directamente en la propia web. Por último, respecto a la incorporación y gestión de metadatos, este tipo de archivos almacena una plantilla en formato XML editable con cualquier otro programa (CatMDEdit, XMLNotepad), con los principales datos del proceso de captura de la información.

La triangulación y ajuste cromático del modelo para la generación de los modelos tridimensionales se realizó con el *software 3DReshaper* y *Blender*, utilizándose este último para la reconstrucción de algunos elementos del paisaje, tales como la vegetación, la iluminación y los modelos digitales del terreno (*vid.* FIG. 135).

D. FASE IV. Valorización y difusión de los datos obtenidos en un entorno web

Esta fase constituye la materialización de uno de los objetivos primordiales del proyecto: obtener un equilibrio entre la información científica y su propia difusión a través de un entorno web. La adaptación de los resultados a este tipo de entorno se ha concebido co-

mo la continuación del mismo proceso metodológico. Para ello, los resultados han sido adaptados a formatos compatibles con la mayoría de *software* a nivel de usuario, siendo necesario en muchas ocasiones efectuar una compresión y reducción de la calidad gráfica de los mismos en beneficio de una difusión social en un entorno web. La transformación de los ficheros a formatos compatibles han quedado divididas principalmente en:

FORMATOS MÉTRICOS Y GRÁFICOS

- Reproducción de una selección de escaneados mediante formatos html.
- Conjunto de planos de cada conjunto: plantas, alzados y secciones.

FÓRMATOS GRÁFICOS. DERIVADOS DE APLICACIONES MÉTRICAS

- Videos con itinerarios planificados sobre el modelo 3D con enlaces a una selección de imágenes esféricas captadas por el escáner.
- Imágenes esféricas aéreas, extraídas de la planificación del vuelo realizado por el dron.

INFORMACIÓN DIDÁCTICA

- Capítulo dedicado a la metodología empleada en cada fase, introducción histórica, glosario de términos arquitectónicos e históricos, videos explicativos de los responsables científicos de los yacimientos, cuaderno del profesor con actividades para alumnos de secundaria, bibliografía y diferentes enlaces web.



FIG. 132. Imagen del entorno web público con diferente información histórica, gráfica y métrica sobre el modelo 3D de cada yacimiento. Ejemplo: Cisterna de Bilbilis (Calatayud, Zaragoza).

E. FASE V. Inicio de la documentación de los entornos inmediatos de cada uno de los yacimientos con fotogrametría aérea de baja altura mediante RPAS o drones

Con la utilización de esta tecnología, en la documentación de estos conjuntos arqueológicos, se ha pretendido la restitución mediante sistemas de fotogrametría de baja altura que permitiese la digitalización de la zona donde se contextualiza cada entidad patrimonial. Los drones operan de manera autónoma mediante una planificación de vuelo. Este sistema es capaz de seguir, una vez efectuado el despegue, una trayectoria de vuelo programada en cada yacimiento a partir de unas coordenadas registradas. La alta capacidad de carga de aproximadamente dos kilogramos, permitió incorporar cámaras DSLR de alta resolución que hizo que los modelos obtenidos tuviesen una resolución entre 2 y 3 centímetros por píxel. Las mismas bases topográficas utilizadas en la fase de registro terrestre con escáner láser sirvieron, igualmente, de apoyo del vuelo para su inclusión en el mismo sistema de coordenadas UTM ETRS89. El registro en un sistema de coordenadas absoluto le confiere una singularidad preventiva en un futuro, permitiendo un control estructural y geomorfológico, además de una posible ampliación del área de excavación dentro del mismo sistema de coordenadas.

Este factor, sumado a su gran versatilidad y bajo coste, si lo comparamos con otros tipos de herramientas de documentación métrica, lo convierte en una técnica muy útil en excavaciones arqueológicas ya que proporciona una rápida documentación en cada fase del registro.



FIG. 133. Vuelo programado de un dron del tipo multirrotor en el depósito del yacimiento arqueológico de Andelo(s) (Mendigorría, Navarra).

La combinación de drones con técnicas de fotogrametría de baja altura proporciona varias ventajas como complemento a los sistemas de registro topográfico clásico (estación total y GNSS) y tecnología láser escáner 3D terrestre utilizados. Esto permitió una rápida documentación gráfica a través de las diversas tomas fotográficas, y de igual modo se extrajo información métrica combinada con puntos topográficos localizados sobre el terreno, los cuales resultan básicos para la alineación de las imágenes, la construcción del modelo tridimensional, texturización y su inclusión a un sistema de coordenadas absoluto (UTM ETRS89).

F. FASE VI. Adaptación de los resultados obtenidos a un entorno web

El carácter gráfico que proporcionaron las diferentes técnicas utilizadas se incorporó a la página web del proyecto, dentro del epígrafe «Visualización aérea». Los resultados consistieron en la generación de fotografías esféricas aéreas –aprovechando la planificación aérea en el registro fotogramétrico– que permitieron la visualización de cada conjunto arqueológico desde diferentes perspectivas inmersivas, terrestres y aéreas. En cada uno de los vuelos programados de los siete yacimientos, se planificaron varios puntos relevantes, donde el dron, del tipo multirrotor, se posicionó en una coordenada previamente seleccionada en planimetría y altimetría. Una vez posicionado en el punto, se programó para realizar sucesivas tomas fotográficas cada 30°, gracias al servo donde se localiza la cámara fotográfica. La aportación de estas imágenes esféricas al conjunto del proyecto, proporcionan un documento, únicamente gráfico, que confiere al conjunto de los datos una comprensión del paisaje desde un punto de vista aéreo. A partir de este entorno, cualquier usuario puede desplazarse sobre las imágenes, proporcionando una gran comprensión gráfica sobre los conjuntos patrimoniales: localización y vista del entorno, extensión del yacimiento, funcionalidad de las estructuras, etc⁵³. Además, la parte métrica generada para cada grupo de investigación, consistió en la generación de ortofotos de cada conjunto a diferentes resoluciones, y modelos tridimensionales convertidos en formato PDF3D y vml.

3.4.1.4. Resultados obtenidos: aplicación de estándares en el postproceso de la información

Para estandarizar o normalizar las dificultades de gestión y difusión que poseen los datos adquiridos por el conjunto de técnicas utilizadas, fue necesario apostar por la generación de aplicaciones gestionables con un *software* a nivel de usuario. Este hecho permitió una simplificación de datos tridimensionales, además de conseguir complementar el binomio científico y divulgativo, toda vez que asistimos a una búsqueda cuya finalidad sea integrar un método que gestione de manera sencilla el registro tridimensional del patrimonio cultural. Según Valle (2011: 162) la estandarización de la documentación geométrica del patrimonio cultural, debería contar, independientemente de la técnica, con tres premisas básicas relacionadas con la accesibilidad, la comprensibilidad y una marcada utilidad geométrica. Estas tres directrices son además, perfectamente relacionables con los tres valores que integran y describen el concepto de estandarización o normalización (unificación, simplificación y especificación). La combinación de todos ellos ha sido la base teórica del desarrollo del proyecto, que puede sintetizarse en:

53 Para una mayor información consúltese a modo de ejemplo las perspectivas aéreas inmersivas del yacimiento de *Bilbilis* sobre el teatro: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/_bilbilis360/bilbilis_360.html (último acceso: noviembre de 2015).
Y de la presa romana de Muel: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/_muel360/muel_muralla.html

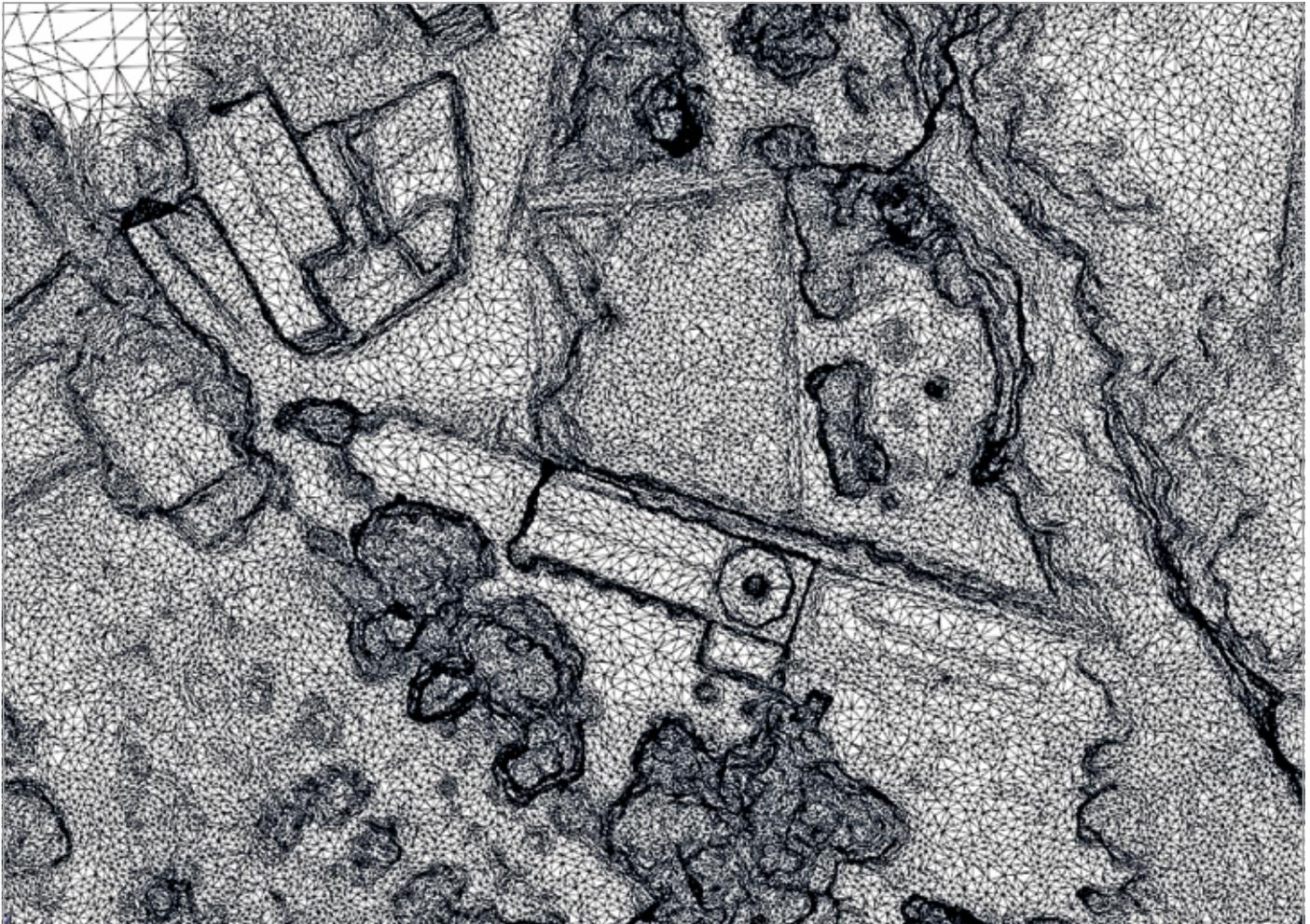


FIG. 134. Ejemplo de la malla de triángulos y su texturización del modelo 3D final de la presa romana de Muel y su entorno inmediato.

- a) Integración de bases de datos accesibles a una plataforma web actualizable e intercambiable con diferentes escalas de acceso y edición, integrando de igual modo el conjunto de metadatos mediante ficheros XML que describen la información principal.
- b) Democratización de los resultados mediante el empleo de formatos compatibles a nivel de usuario para poder trabajar y gestionar la información con aplicaciones de libre acceso que resulten útiles y comprensibles por cualquier usuario.
- c) Registro del protocolo de actuación a través de normas que recojan las recomendaciones necesarias para la verificación de su geometría. El componente métrico en cada proyecto es fundamental para poder obtener medidas y localizar coordenadas absolutas o relativas como punto fundamental de partida para derivar el proyecto hacia alternativas infográficas, ello cumpliendo el binomio científico-divulgativo, siempre partiendo del mismo archivo geométrico a través de un orden lógico de desarrollo.

En este sentido, para la difusión de este proyecto mediante una plataforma web, en base a la experiencia adquirida, se han establecido criterios metodológicos con procesos relacionados con otras disciplinas exógenas como la ingeniería e industria, en concreto, utilizando el mismo sistema de servidor web local que integre cada escaneado realizado y que normalmente se emplea para fines industriales. En este caso se ha utilizado el *plug-in Leica Truview*, aunque existen otros programas similares como *Scene 5.0* de Faro con la función *Scene Web-Share server* que mejora el intercambio de la información. Todo esto supone un nuevo lenguaje que nos permite registrar y publicar el estado original.

El soporte que se ha utilizado para su difusión ha sido una página web. Sin embargo, existen actualmente condicionantes que de algún modo limitan su plena visualización e interacción. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación física del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, para ello ha sido necesario comprimir la información prescindiendo de resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; y (3), la adopción de formatos que sean fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario. Sin embargo, queda todavía un largo camino por explorar, y con ello tan sólo hemos comprobado con este proyecto una aproximación a un nuevo modo de gestionar la información registrada. En este sentido, entendemos que una de las claves para el futuro será intercambiar metodologías de trabajo en la frontera de varias disciplinas para la divulgación del patrimonio cultural, sobre todo a nivel de gestión de la información.



FIG. 135. Malla 3D transformada en formato PDF3D de la Presa romana de Muel (Zaragoza).

3.4.1.5. Conclusiones

El carácter singular de este proyecto ha establecido un nuevo modo de combinación de las nuevas tecnologías de registro patrimonial, con acceso libre a la información, ofreciendo herramientas, sobre todo accesibles, con las que cada usuario, a diferentes niveles, pueda interactuar con esa información. Para ello, ha de asegurarse una disposición de la información registrada, siguiendo un único proceso que integre y relacione de un modo recíproco un registro científico y divulgativo, según esta cadena de procesos:

- a) Documentación de cada yacimiento en su estado actual. Obtención de modelos métricos tridimensionales de diferentes tipologías hidráulicas romanas para su documentación, conservación y protección patrimonial, prescindiendo, si es el caso, de otros elementos externos o arquitecturas modernas, tal y como ha sucedido con la cloaca de Caesaraugusta, con el fin de entender la relación existente entre la arquitectura romana y el medio natural.
- b) Creación de un protocolo en el registro de la información. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos, asegurando la interoperabilidad y comunicación de la información a través de la unificación, especificación y simplificación. Con ello, se facilita la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiendo analizar de manera individual cada uno de ellos.
- c) Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionen una difusión y divulgación, utilizando formatos compatibles con *software* libre y fácil de gestionar.
- d) Metodología interdisciplinar en el proceso de estudio coordinada por cada disciplina. La finalidad fundamental es facilitar la gestión a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso, con el objetivo de alcanzar una mayor divulgación del yacimiento arqueológico de manera gráfica y, sobre todo, geométrica. Esto posibilita, de un modo rápido y preciso, la visualización de cualquier elemento o parte de su estructura. De este modo, se ha logrado un desarrollo combinado, válido para una mayor valoración y divulgación de la información obtenida. Además de contribuir a la propia investigación transdisciplinar, resolviendo los diferentes vacíos metodológicos y de conceptualización tridimensional y aportando una perspectiva integradora que evita la segmentación de la cadena informativa.
- e) Integración de aplicaciones gráficas y métricas de cada uno de los yacimientos en una plataforma web libre a través de un nexo didáctico en la siguiente página web: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano

3.5. Arqueología del paisaje: documentar lo que no se ve

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.5.1. Introducción: la teledetección

El objetivo principal de este apartado es analizar la teledetección como una nueva técnica arqueológica que permita resolver diferentes problemáticas que se plantean actualmente en el estudio del patrimonio arqueológico. Concretamente, analizaremos diferentes yacimientos arqueológicos de época romana del valle medio del Ebro.

Si observamos, sobre todo, la proliferación de investigaciones desde el año 2012, nos percatamos cómo el avance tecnológico en la

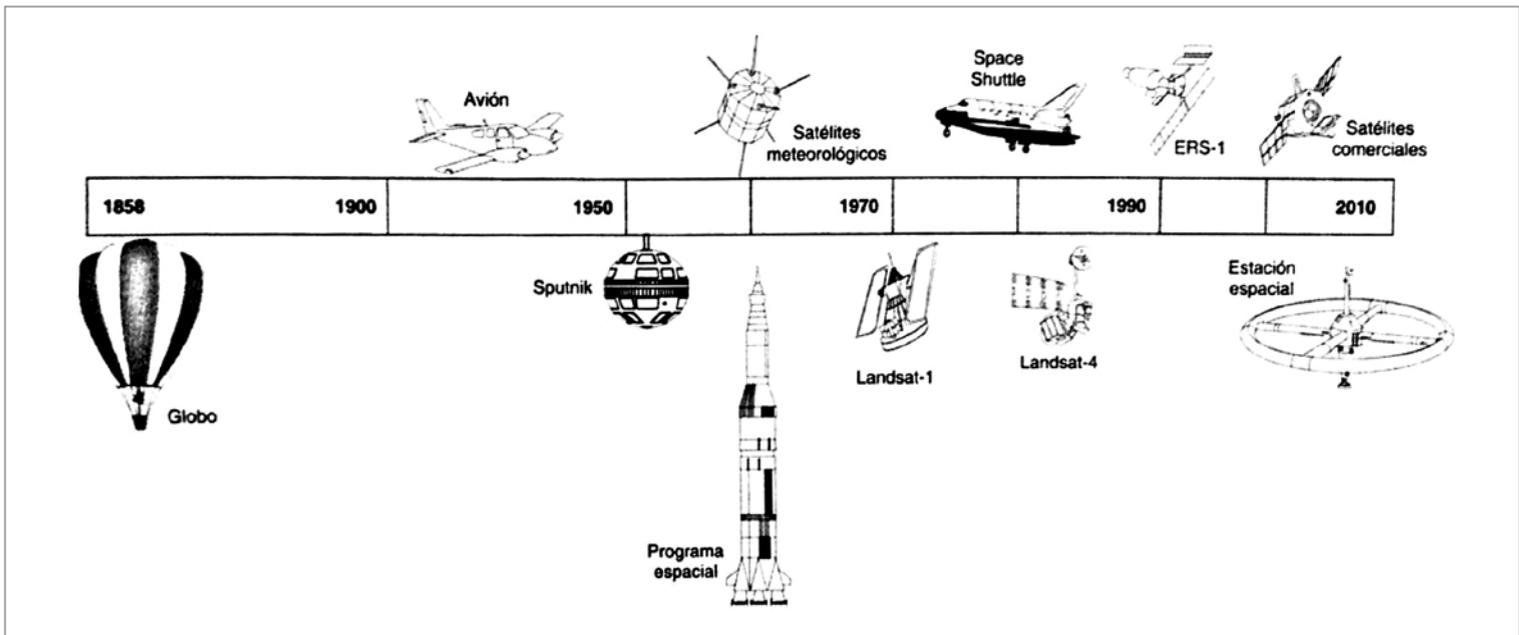


FIG. 136. Evolución histórica de los sistemas de teledetección (Chuvioco, 2010: 22).

sensorización de los drones ha contribuido a una monitorización periódica de zonas arqueológicas que facilitan, indudablemente, la documentación y conservación del patrimonio arqueológico. A este factor cabe añadir la accesibilidad en la consecución de información satelital y sobre todo de datos LiDAR. Sin duda, se trata de información con diferente grado de resolución y periodicidad, sin embargo, podemos obtener datos a diferente nivel de escala que nos permitan analizar un mapa previo antes de cualquier otro tipo de intervención más intensiva sobre el terreno, como las diferentes alternativas de la prospección geofísica. Este hecho, si lo comparamos con la denominada «agricultura de precisión», que prácticamente se nutre de las mismas técnicas de teledetección, resulta fundamental dotar de un registro o un histórico que nos permita conocer la evolución del campo para comprender la variabilidad de cada contexto.

En este momento, desconocemos gran parte del entramado urbano y la forma arquitectónica de muchos de los edificios que configuraron estos asentamientos prerromanos y romanos. Ante la incapacidad de llevar a cabo excavaciones arqueológicas, se plantea la aplicación de uso de imágenes multispectrales realizadas a baja altura mediante la utilización de RPAS o drones, con la finalidad de investigar y delimitar los restos que permanecen todavía soterrados. Nuestra aportación reside en la utilización de la misma herramienta de trabajo, esto es, la teledetección, pero precisamente usando estas tecnologías emergentes que adolecen de un procedimiento contrastado, tales como plataformas aéreas no tripuladas. Esta implementación tiene como resultado la obtención de diferentes imágenes con una resolución de 3-4 cm por píxel⁵⁴, resolución con la que seremos capaces de distinguir con mayor exactitud la tipología de las estructuras soterradas.

La aplicación de la teledetección es otra de las ciencias que ha tenido un gran protagonismo en el análisis científico de la arqueología del paisaje. Por ello, hemos dedicado un apartado de experimentación centrado en dos yacimientos arqueológicos con el fin de documentar «lo que no se ve». Si nos centramos en lo que entendemos por teledetección, es necesaria una definición del térmi-

no, significando que se trata de la ciencia que estudia el conjunto de técnicas de adquisición, elaboración e interpretación de objetos sin entrar en contacto directo con los mismos⁵⁵. Si atendemos a su propia idiosincrasia, esta ciencia siempre señala un ámbito multidisciplinar y en la frontera del conocimiento en el que confluyen campos de aplicación como las ciencias de la tierra, la agricultura, la ordenación del territorio, la biología, etc. (Campana, 2011: 12).

Aunque es una ciencia relativamente joven y muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente, aplicada al campo que nos ocupa, esto es, la arqueología⁵⁶, coincide con el desarrollo de la fotografía aérea (Aber *et al.*, 2010; Musson *et al.*, 2013) y posteriormente de las plataformas satelitales⁵⁷.

Actualmente, la relación de la teledetección con el uso de drones supone, en primer lugar, el abaratamiento de costes (Uribe *et al.*, 2018): comprar una imagen de satélite comercial o realizar un vuelo tripulado incrementa ampliamente el precio del trabajo de campo. En segundo lugar, se puede realizar una captura de datos personalizada en la que el investigador define la resolución del píxel que quiere para su proyecto, así como obtener diversos productos cartográficos: planos, modelos 3D, modelos digitales del terreno (MDT) y de superficie (MDS). De la misma forma, la incorporación de sensores multispectrales permite visualizar elementos que el ojo humano (longitud de onda del visible) no logra ver. Obviamente todo ello conlleva una nueva serie de problemas técnicos para la adaptación de estas herramientas a diferentes tipos de suelos, etapas fenológicas, periodos cronológicos y estructuras arqueológicas. La obtención o no de información en cada zona responde a un determinado flujo de trabajo que depende de cada uno de los factores anteriormente descritos. Es por ello, que en ocasiones re-

55 CCRS 1998: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html> (último acceso: octubre de 2017).

56 Destacamos otro tipo de estudios precedentes que contribuyeron a la conexión y posibilidades de la teledetección con la arqueología como Palacios y Martín-Bueno, 2004 (331-361). Esta investigación analiza las posibilidades y aplicaciones de la teledetección mediante sensores activos como el Radar de Apertura Sintética (SAR) en la arqueología.

57 Las herramientas de teledetección geofísicas (georradar, electromagnéticas, etc.) no forman parte de nuestro análisis, sin embargo su uso se complementa perfectamente como técnica de contrastación intensiva de las marcas, previamente individualizadas, a través de los resultados de aplicación de los sensores multispectrales utilizados con los drones.

54 Recordemos que en el ámbito de la teledetección espacial la disponibilidad de imágenes de una resolución espacial inferior a medio metro es prácticamente inexistente y que los productos entre 0,5 y 1 m son considerados de muy alta resolución (VHR1), según la definición para GMES (2012) y actualizada por la ESA.

sulta complicado adaptar los mismos procedimientos de trabajo a zonas geográficamente dispares, pese a haber una similitud tanto en cronología como en estructuras arqueológicas.

3.5.2. Objetivos del estudio

Los objetivos concretos de este estudio han sido:

- Impulsar la investigación del urbanismo prerromano y romano de las ciudades, comunicaciones antiguas y asentamientos rurales del valle del Ebro. Todas estas infraestructuras ayudan a comprender uno de los rasgos de identidad del valle del Ebro: la primera organización de este territorio que condicionará el desarrollo posterior del mismo.
- Conservar las estructuras soterradas como objetivo final, además del propio conocimiento científico. Si conocemos la extensión de cada yacimiento, sin una intervención física sobre el terreno, seremos capaces de protegerlas con mayor rigor. Los datos obtenidos servirán como elementos de valoración frente a posibles degradaciones efectuadas por la agricultura intensiva o las remociones de tierra.
- Experimentar un flujo de trabajo contrastado con el registro mediante sensores en diferentes longitudes de onda (verde, rojo, borde del rojo, infrarrojo cercano y térmico).
- Comprobar las capacidades de esta técnica mediante la actuación en diferentes tipologías de yacimientos. De esta forma, hemos querido discriminar las posibilidades de identificación que ofrecen los restos soterrados en campos cultivados llanos frente a orografías abruptas y con escasa vegetación, así como las posibilidades de identificar restos en asentamientos sin excavar⁵⁸.

3.5.3. El contexto histórico-arqueológico: el valle medio del Ebro en época romana

La elección del valle medio del Ebro como marco geográfico obedece a que en él se constatan algunas de las estructuras romanas más antiguas de Hispania. Este hecho es fruto del papel fundamental que jugó esta región en la conquista de la Península Ibérica por Roma. Igualmente, la cuenca media del Ebro constituye una región natural con límites relativamente bien definidos: la Cadena Costero Catalana, el estrechamiento del valle en La Rioja, los Pirineos y el Sistema Ibérico. Según Beltrán (2006: 218), Roma tendría una percepción reconocida de este territorio como entidad en época imperial cuando Augusto creó una circunscripción judicial –el convento jurídico *Caesaraugustanus*– que coincidía casi exactamente con esta región natural, tal y como se desprende de la descripción pliniana (Plin., Nat., 3.4.24.). En consecuencia, nuestro objeto de estudio abarca los restos arqueológicos hallados en el actual territorio de Aragón.

⁵⁸ Los resultados preliminares de esta investigación han permitido establecer otro tipo de estudios más profundos (Uribe *et al.*, 2018), principalmente en el valle medio del Ebro, en más de una decena de yacimientos arqueológicos. El objetivo se establece en la necesidad de realizar otro tipo de ensayos en diferentes épocas del año, condiciones fenológicas y tipos de estructuras arqueológicas, para establecer mediante patrones redundantes una metodología concreta y adaptada para cada idiosincrasia arqueológica. De este modo, se analiza cómo influye el estado y el tipo de la vegetación y cultivos, con la combinación de cada uno de los sensores multiespectrales (MultiSpec, Tetracam o Sequoia) y térmicos (thermoMap) utilizados. Acostumbrados al uso de plataformas satelitales o vuelos convencionales, la autogestión y velocidad que proporciona el uso de estos sensores en drones ha propiciado un volumen de datos e información en el proceso de investigación que será necesario contrastar para establecer protocolos claros y conjuntos en la arqueología. El aprendizaje y conocimiento de estas nuevas técnicas permitirán, en los próximos años, una optimización en la prospección y excavación arqueológica, sumándose con ellos a otras técnicas no destructivas como las geofísicas, con el uso del georradar y el gradiómetro electromagnético.

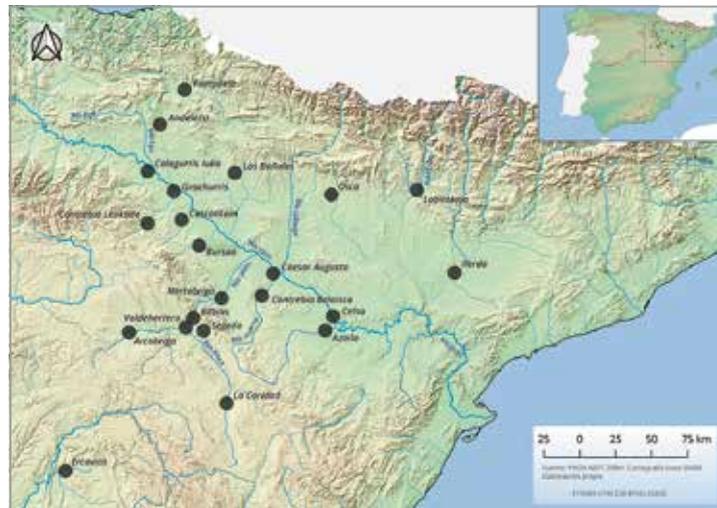


FIG. 137. Asentamientos urbanos romanos del valle medio del Ebro (cartografía de elaboración propia).

3.5.4. El yacimiento romano republicano de Valdeherrera (Calatayud, Zaragoza)⁵⁹

La ciudad de Valdeherrera se ubicó en uno de los puntos neurálgicos de la Celtiberia, entre la confluencia de los ríos Jiloca y Jalón. Estos ríos fueron dos de las vías naturales más importantes de la antigüedad, ya que por ellas se posibilitaba un acceso rápido a la Meseta, así como a la costa (Martín-Bueno *et al.* 2009: 420). Por las prospecciones arqueológicas terrestres se ha estimado que el enclave tendría unas proporciones de 40 hectáreas de las que se han conservado 30. Se desconoce el nombre de la ciudad aunque algunos autores han querido ubicar en ella la *Bilbilis* indígena o la *Platea* mencionada por el epigramista bilbilitano Marcial (IV, 55.13 y XII, 18.11).

Los restos más antiguos que se conservan pertenecen a los siglos VI-V a.C. pasando a jugar un papel importante en las Guerras Celtibéricas, ss. III-II a.C. La ciudad sería destruida durante el conflicto sertoriano, perdurando un asentamiento menor en época imperial. Asimismo, durante las recientes excavaciones, se ha localizado una gran necrópolis de época islámica vinculada a la cercana Qal'at Ayyub, actual Calatayud.

La antigua ciudad fue defendida por un amplio foso que la rodeó solo por el Este y el Sur. Igualmente, contó con viviendas de patio central, según han puesto de manifiesto las recientes excavaciones, decoradas con pavimentos de *opera signina* y pinturas del I estilo pompeyano. Estas viviendas han sido datadas por sus excavadores a partir de la segunda mitad del s. II a.C.⁶⁰

3.5.5. La ciudad imperial de Labitolosa (La Puebla de Castro, Huesca)⁶¹

La ciudad hispanorromana de *Labitolosa* se localiza en el Cerro del Calvario, a unos 2 km al Este de La Puebla de Castro, población ri-

⁵⁹ Proyecto dirigido por los responsables científicos Manuel Martín-Bueno y Carlos Sáenz del Grupo Consolidado de Investigación URBS, CONSI+ID (Gobierno de Aragón), del Instituto IUCA (Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón). Este proyecto ha sido financiado por el Programa HAR.2013-48456-C3-1-P.: URBS III: Repertorios ornamentales públicos y privados en el NE de Hispania (MINECO).

⁶⁰ Para mayor una información *vid.* Martín-Bueno *et al.* (2016).

⁶¹ Proyecto: «Teledetección mediante sensores multiespectrales aplicados a la investigación y conservación del patrimonio cultural en el valle del Ebro y los Pirineos Atlánticos» dirigido por M^a Ángeles Magallón del Grupo Consolidado de Investigación URBS de la Universidad de Zaragoza y financiado por el Mi-

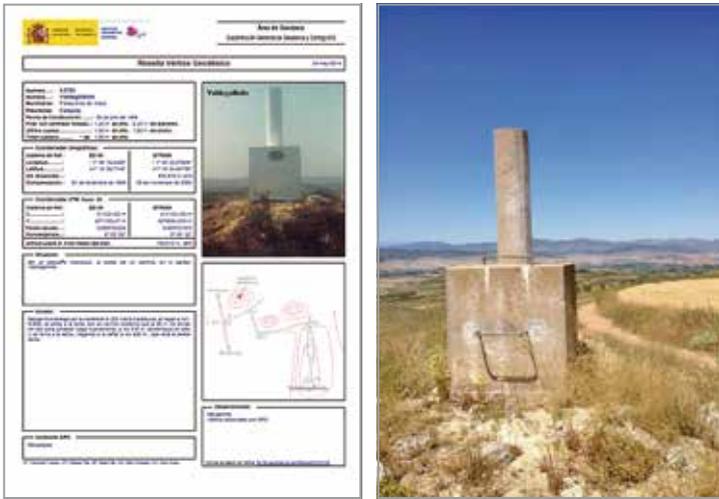


FIG. 138. Reseña del IGN del vértice núm. 43756 denominado Valdegalindo (izda.) y su estado actual (dcha.).

bagorzana situada en la confluencia de los ríos Cinca-Ésera. El topónimo de la ciudad, *Labitolosa*, fue deducido a partir del gentilicio *labitolosani* que apareció en una inscripción hallada en el siglo XVI con una dedicatoria realizada por los *cives Labitolosani et incolae* (CIL, II, 3008=5837). La consideración de *Labitolosa* como municipio latino fue confirmada por la aparición en el año 1994 de un epígrafe en el edificio del Genio del municipio, localizado en el foro, que aludía explícitamente al municipio de *Labitolosa*⁶².

De esta manera, la ciudad originada en el siglo I a.C. avanzado, pasaría de ser una comunidad estipendiaria a convertirse en municipio seguramente en época flavia. La transformación urbanística se produciría a mediados/segunda mitad del siglo I d.C., paralelamente a la promoción jurídica de la *civitas*. En este momento se reconstruyó el foro y se realizaron otras importantes reformas a partir de la iniciativa y el evergetismo de las élites locales, en especial de Marco Clodio Flacco.

El siglo II d.C. fue el momento de máximo esplendor y de mayor prosperidad económica de la ciudad, aunque ya a finales del mismo se evidencia su declive. Finalmente, será completamente abandonada en torno al año 200 d.C. por motivos que se desconocen.

A lo largo de más de una veintena de años de trabajos arqueológicos ininterrumpidos⁶³ en la ciudad de *Labitolosa* se han puesto al descubierto dos edificios termales completos, vestigios de varias viviendas y un importante sector del foro, del que destaca su curia por su conjunto epigráfico.

3.5.6. Adquisición de los datos de campo

3.5.6.1. Fase topográfica

Esta primera fase consiste en la adquisición de varios puntos de control en el terreno, denominados GCP (*Ground Control Points*). Para ello necesitamos una buena distribución geométrica en la zona delimitada del vuelo con el fin de escalar el modelo final a un sistema métrico e insertarlo dentro del sistema de coordenadas de referencia seleccionado.

En ambos trabajos el sistema geodésico de referencia utilizado fue el oficial en España UTM ETRS89 (Real Decreto 1071/2007 de 27

ministerio de Educación Cultura y Deporte y el Campus de Excelencia Internacional del Valle del Ebro (*Iberus*).

62 Navarro / Magallón (1999: 30-56).

63 Sobre la bibliografía proporcionada durante estos años de investigaciones nos referimos al volumen monográfico de la ciudad: Magallón / Sillières (2013).



FIG. 139. Distribución de la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón, ARAGEA. FUENTE: <http://gnss.aragon.es/>.

de julio) dentro del huso 30. Los GCP fueron adquiridos mediante un sistema GNSS Leica GS14:

- En Valdeherrera el sistema GNSS se conectó mediante radio enlace (Satellite 3AS frecuencia 406.425 MHz) a otro equipo GNSS Leica GX1230 como referencia, estacionado en el vértice geodésico n° 43756 denominado Valdegalindo, situado en el término municipal de Paracuellos de Jiloca.
- Sin embargo, para Labitolosa, la conexión del equipo GNSS móvil se realizó mediante conexión GPRS a la red de geodesia activa del Gobierno de Aragón ARAGEA (<http://gnss.aragon.es/>). La aplicación de esta técnica permite obtener coordenadas absolutas en RTK con una precisión aproximada de dos centímetros sin necesidad de corregir la posición y la cota mediante un vértice geodésico o postproceso de archivos RINEX como en el caso de Valdeherrera.

La conexión del sistema GNSS fue mediante *Mountpoint Cercano*⁶⁴ a la antena situada en Graus. La elección de *Mountpoint Cercano* se escogió en detrimento del modo de estacionamiento virtual, dada la cercanía de la antena de Graus. Posteriormente se registraron entre 15/20 puntos repartidos en la zona delimitada. Las marcas sobre el terreno variaron entre puntos fácilmente identificados en el terreno, como caminos o piedras, junto con dianas y carcasas de hitos fenos en las zonas con vegetación.

De todo ello se obtuvo un fichero en formato «x, y, z, cod» para posteriormente realizar el apoyo fotogramétrico con estos puntos de control.

3.5.6.2. Fase de vuelo

Los vuelos en ambos casos, Valdeherrera y Labitolosa, fueron planificados mediante el programa *MKTools*. El objetivo de esta planificación fue definir una ruta que permitiese un solape entre las imágenes del 80 %. La velocidad media para ambos fue de 10 m/s a una altura aproximada de 100 m. Para la obtención de un GSD (*Ground Sample Distance*) o resolución espacial adecuada se configuran e introducen las siguientes variables en el *software*: distancia al suelo programada, megapíxeles de la cámara, tamaño del sensor de la cámara, longitud focal del objetivo, apertura del diafragma, velocidad de disparo y sensibilidad de la ISO.

64 Sistema de conexión del sensor móvil GNSS a la antena de referencia mediante telefonía móvil.

FIG. 140. Planificación del vuelo con *waypoints* en la zona arqueológica de Valdeherrera mediante la aplicación MKtools.

TABLA 9
Características de la adquisición de las imágenes

	VALDEHERRERA RGB	VALDEHERRERA NIR	LABITOLOSA RGB	LABITOLOSA NIR
Fecha captura	7 / 7 / 2013	7 / 7 / 2013	5 / 10 / 2014	5 / 10 / 2014
Cámara	EPM 2	EPM 1 NIR	EPM 2	EPM 1 NIR
Objetivo fijo	12 mm	12 mm	12 mm/ Tetracam Mini MCA 9.6 mm	12 mm/ Tetracam Mini MCA 9.6 mm
Altura de vuelo	100	100	90/100	90/100
GSD* / Resolución espacial	2.7 cm	3.1 cm	2.9 cm / 6.5 cm	6.5 cm
Hectáreas registradas	19.8 ha	27.4 ha	7.2 ha	72 ha
Velocidad de vuelo	10 m/s	10 m/s	10 m/s	10 m/s
ISO - Velocidad	200-1/400	200-1/400	200-1/400	
Diafragma	4.5	4.5	automático	automático
Imágenes captadas	685	1452	430	430
Sensor cámara (ancho x alto en mm)	17.3 x 13.0	17.3 x 13.0	17.3 x 13.0 6.66 x 5.32	6.66 x 5.32
Píxeles efectivos cámara	16 Mpx.	12 Mpx.	16 Mpx. 6 x 1.3 Mpx.	6 x 1.3 Mpx.

* Ground Sampling Distance

La cámara montada en el sistema fue una Olympus EPM1⁶⁵ (sistema micro cuatro tercios) con el mismo objetivo fijo de 12 mm Zuiko Digital ED. Las fotografías fueron registradas en formato RAW (Olympus*.ORF) con el mismo objetivo fijo, tanto en el sen-

sor RGB como NIR de 12 mm f. 2.0 con una ISO 200 y un enfoque manual a infinito.

Dadas las altas prestaciones, no fue necesario realizar una parada en cada una de los *waypoints* seleccionados ya que la captura se realizó en un movimiento continuo a una velocidad constante de 10 metros por segundo. El uso de esta cámara y objetivo con esta configuración permite evitar la trepidación en las imágenes y optimizar el tiempo de vuelo consiguiendo ampliar el área establecida.

65 Este tipo de cámara que elimina el espejo réflex de las cámaras SLR se denominan «micro cuatro tercios» por el tamaño del sensor 18 x 13,5 mm ofrecen una gran calidad y versatilidad en la toma de fotografías con una reducción considerable tanto en peso como en tamaño para su uso con drones.

TABLA 10

Resultado de la sincronización de una imagen con sus coordenadas y ángulos estimados para el yacimiento arqueológico de Valdeherrera

IMAGEN REFERENCIA	COORDENADA X / ESTE	COORDENADA Y / NORTE	COORDENADA Z / ALTITUD	YAW	PITCH	ROLL
Image112.jpg	611772.971835	4575713.692171	670.103316	134.294638	0.381355	1.831058

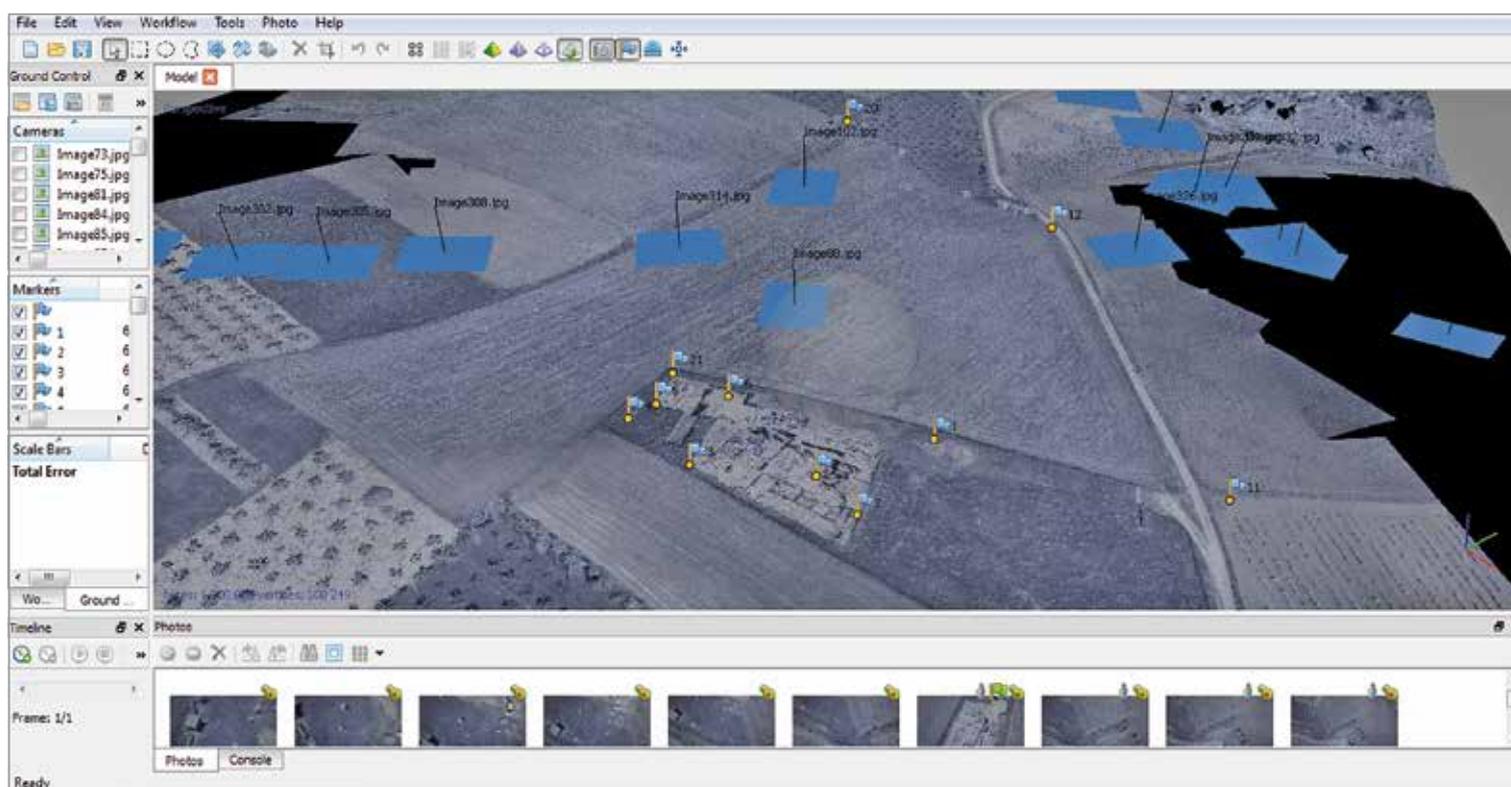
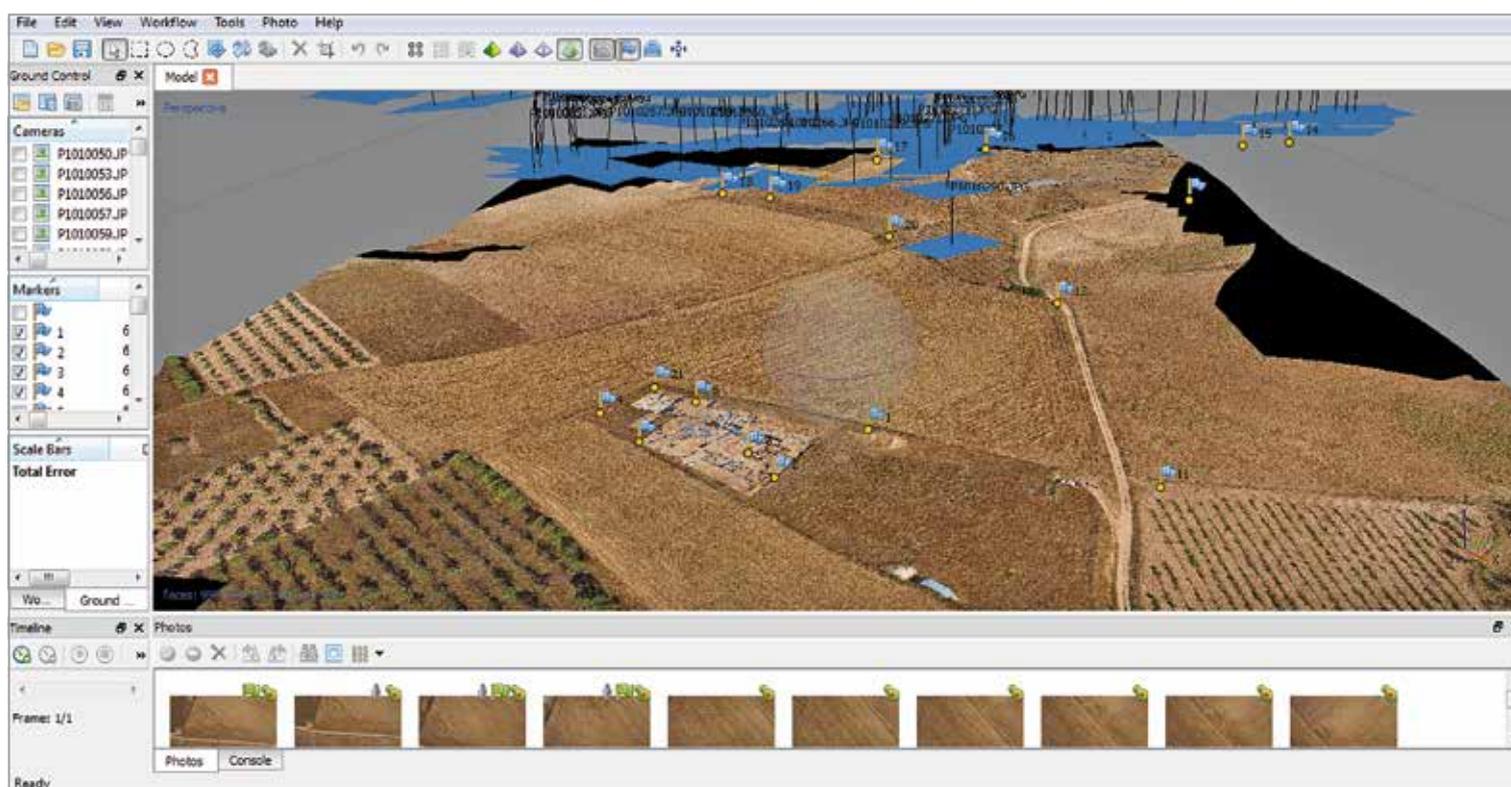


FIG. 141. Ejemplo del procesamiento de Valdeherrera RGB (imagen superior) y NIR (imagen inferior) resultante con los mismos GCP insertados en terreno y la orientación externa de cada una de las imágenes que integran el modelo mediante el programa Agisoft Photoscan.

- Número de imágenes utilizadas: 218
- Zona capturada: 19.8 ha
- Error del modelo: 0.7 píxel
- Altura de vuelo: 100.77 m
- Puntos vinculados: 624098
- Resolución: 2.7 cm / píxel
- Proyecciones: 2365481

Respecto a la cámara multispectral *Tetracam*, se utilizó en formato *.raw* de 10 bits con enfoque a infinito, objetivo de 9.6 mm y ajustes automáticos.

3.5.6.3. Postproceso de la información

El primer paso de la restitución fotogramétrica es sincronizar las imágenes captadas con las coordenadas del autopiloto del sistema y los tres ángulos o actitud del RPAS: *Pitch*, *Roll* y *Yaw*, traducidos como los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada (esto es, la actitud). Pese a ser un sistema GNSS diferencial con un error aproximado de dos metros, este primer paso –sincronización de la imagen junto con las coordenadas aproximadas del sistema y de los tres ángulos comentados– optimiza notablemente el procesamiento para el cálculo de la orientación externa de las imágenes.

Posteriormente resumimos el tratamiento de los datos en los siguientes pasos:

1. Importación de las imágenes seleccionadas.
2. Sincronización de imágenes, coordenadas y ángulos.
3. Alineación de las imágenes mediante ajuste *bundle* o puntos comunes.
4. Importación del fichero *.txt* con los GCP adquiridos.
5. Reconocimiento sobre las imágenes de los GCP y control de errores *x*, *y*, *z*.
6. Ajuste del modelo, selección del sistema de coordenadas utilizado y triangulación de la nube de puntos.
7. Aplicación de la textura de cada una de las imágenes que integran el modelo 3D mediante un ajuste radiométrico según el método del *software: Adaptive Orthophoto*⁶⁶.
8. Exportación de los errores del modelo, nube de puntos, MDT, ortofoto y mapa de elevación.
9. Comprobación de los errores obtenidos (informe) en la ortofoto (*x,y*) de cada uno de los puntos de control y en la nube de puntos densa (*x, y, z*).

Además del informe estadístico de los errores cometidos en cada uno de los puntos obtenidos en coordenadas *x*, *y*, *z* y píxel que nos proporciona el programa, podemos comprobar la robustez resultante del modelo tridimensional de un modo totalmente empírico ya que disponemos de los mismos GCP como fichero auxiliar que permite la comprobación de esos puntos en un programa que a su vez permita importar el MDT y/o ortofoto y posteriormente importar estos puntos para comparar los resultados.

3.5.7. Tratamientos aplicados a las imágenes

El paso previo al tratamiento digital fue realizar un *layer stack* de las imágenes en formato *.tiff* del VIS y del NIR de los dos ejemplos o yacimientos. De esta forma, la imagen resultante, utilizada para la aplicación de los tratamientos mencionados a continuación, tiene seis bandas, ordenadas para nuestra comodidad del siguiente modo:

A continuación se describe la metodología utilizada para la discriminación de los restos arqueológicos soterrados. La presentación de esta metodología se ha ordenado según los criterios de Chuvieco (2010).

⁶⁶ Para realizar la textura del modelo 3D el *software* realiza un ajuste radiométrico basado en la media de cada píxel en cada imagen tomada.

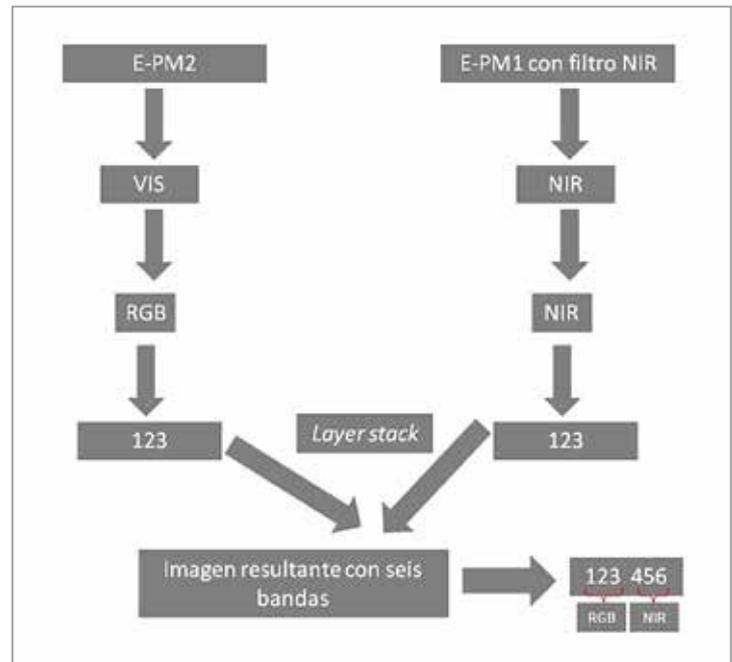


FIG. 142. Proceso de creación de la ortofoto con la longitud de onda del VIS-NIR con los sensores E-PM2 y E-PM1.

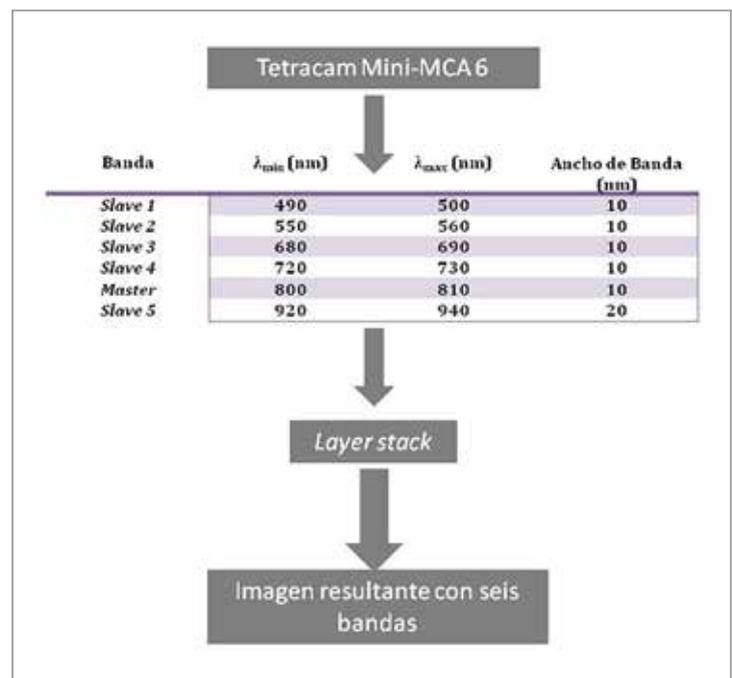


FIG. 143. Proceso de creación de la ortofoto con la longitud de onda del VIS-NIR del sensor *Tetracam Mini-MCA 6*.

3.5.7.1. Realces y mejoras visuales

A. Ajustes radiométricos del histograma

Para favorecer la visualización de los restos arqueológicos soterrados se han aplicado ajustes radiométricos del histograma. Estos ajustes se han empleado sobre las siguientes imágenes y neocanales: imágenes VIS, NIR, VIS-NIR, neocanal del NDVI, Green NDVI, SAVI y ACP. De la amplia batería de recursos disponibles en el *software* de tratamiento digital utilizado (*Erdas Imagine*) el realce lineal, utilizando puntos de corte o *breakpoints*, para definir interactivamente los límites de las funciones, fue el que mejores resultados proporcionó (*vid. infra*). Según Jensen (1996: 145), el ajuste lineal tiende a expandir los niveles digitales originales al mínimo y

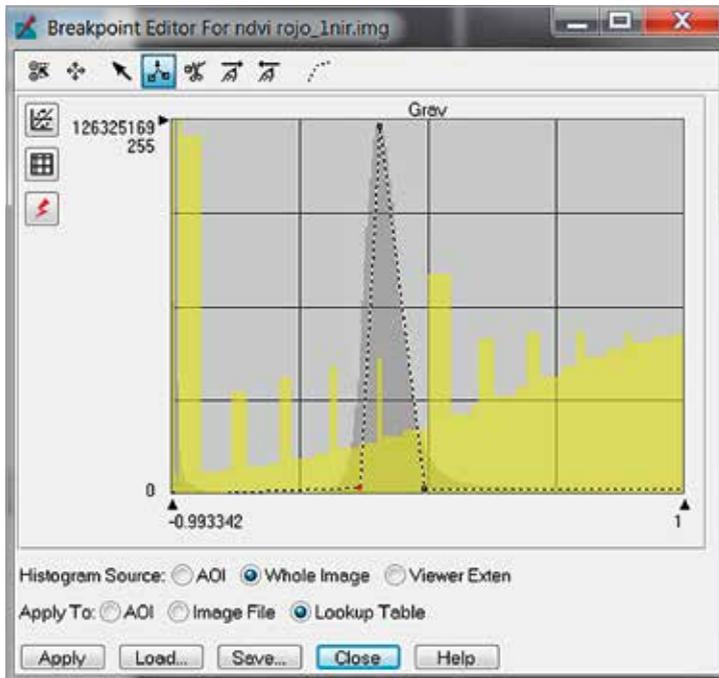


FIG. 144. Realce lineal del histograma con puntos de corte de la imagen NDVI_4.

al máximo (0-255) para aprovechar la sensibilidad del dispositivo. En nuestro caso, se utilizaron umbrales definidos estadísticamente (desviación estándar) e interactivamente (*breakpoints*), siendo este último particular en cada imagen.

B. Composiciones de color

Las composiciones de falso color son combinaciones lineales de tres bandas a cada una de las cuales se les asignan los colores aditivos primarios (*Red, Green and Blue* –RGB–). En nuestro caso, en lugar de las bandas originales se utilizaron los tres NDVI (aquellos realizados con las tres bandas del NIR, *vid. infra*) o las seis bandas del ACP.

En relación a la ordenación particular de las bandas de las imágenes VIS-NIR de Valdeherrea y Labitosa para los diferentes sensores utilizados, las composiciones de falso color comúnmente utilizadas en teledetección tendrán la siguiente notación:

Obviamente no hemos incluido en la tabla las composiciones de falso color que utilizan la longitud de onda del SWIR ya que los sensores utilizados en este trabajo no son capaces de captarla. Sin embargo, debemos recordar que, cuando en este trabajo se citan las bandas 5 y 6, no se hace referencia a esta longitud de onda (SWIR) si no a los valores más altos del NIR.

C. Ajustes espaciales o filtros

Comenzamos nuestra experimentación aplicando diferentes filtros porque, tal y como expone Chuvieco (2010: 254), sirven para aislar

componentes de interés. Como nuestro fin era identificar visualmente las estructuras soterradas pensamos que esta podría ser la mejor herramienta.

Los filtros o realces espaciales se basan en el concepto de la frecuencia espacial, esto es, el número de cambios en los valores de brillo por unidad de distancia (Jensen, 1996: 153). Estos buscan reforzar o suavizar los contrastes espaciales entre píxeles contiguos mediante la utilización de una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF) o *kernel*. Se pueden distinguir dos tipos de filtros en función de sus coeficientes de filtraje. En primer lugar, los de paso bajo (*Low pass filtering*) que tienden a destacar el componente de homogeneidad de la imagen, suavizándola de esta forma, por lo que pensamos que no son los más adecuados para destacar los restos soterrados ya que tienden a homogeneizar la imagen. En segundo lugar, los filtros de paso alto (*High pass filtering*), agudizan los contrastes entre los niveles digitales de los píxeles contiguos, por lo que consecuentemente pensamos que podían actuar como una buena herramienta para la detección de las estructuras. Así, se aplicaron a las imágenes VIS, NIR, VIS-NIR al igual que a las imágenes individuales sin ortorectificar ni mosaicar.

Lasaponara y Masini (2012: 51) describen este tipo de tratamiento de las imágenes para la teledetección arqueológica mediante imágenes de satélite; sin embargo, sus resultados son exiguos.

3.5.7.2. Extracción de información temática: creación de neocanales

La generación de neocanales nos permite extraer información continua y realzar aspectos significativos de las imágenes a partir de las bandas originales. La creación de estos canales artificiales se puede realizar con diferentes técnicas. Para este estudio, utilizamos la relación métrica entre bandas para la estimación de parámetros biofísicos como el vigor vegetal, en el caso de la obtención de los índices de vegetación, así como la relación estadística entre bandas para la creación del Análisis de Componentes Principales (ACP).

A. Índices de vegetación

Los índices de vegetación se utilizan para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Obviamente la vegetación, bajo la que subyacen los restos arqueológicos, presenta una variación de crecimiento dependiendo de si la vegetación está creciendo sobre estructuras enterradas o no (*crop marks* o *soil marks*). Es decir, una planta que crece en una parcela donde existen estructuras soterradas (por ejemplo, un muro) presentará un comportamiento diferente a una planta que crece en el mismo terreno en una zona sin restos arqueológicos.

Los índices de vegetación consisten en la creación de ratios o cocientes, píxel a píxel, entre los niveles digitales de dos o más bandas de la imagen (Chuvieco, 2010: 337). Para la realización de este trabajo utilizamos los siguientes índices que se exponen a continuación:

TABLA 11

Equivalencias de las composiciones de falso color

COMPOSICIONES FALSO COLOR COMÚNMENTE UTILIZADAS PARA LA TELEDETECCIÓN SATELITAL	EQUIVALENCIA CON LAS COMPOSICIONES DE FALSO COLOR DE LOS SENSORES DSLR E-PM2 Y E-PM1	EQUIVALENCIA CON LAS COMPOSICIONES DE FALSO COLOR DEL SENSOR TETRACAM MINI-MCA 6
4/3/2	4-5-6/1/2	4-5-6/3/2
3/2/1	1/2/3*	3/2/1

* Las imágenes en formato *tiff* y RGB se representan de este modo en *Erdas*, siendo la composición de 123 (RGB) la representación el *True Color Composite*.

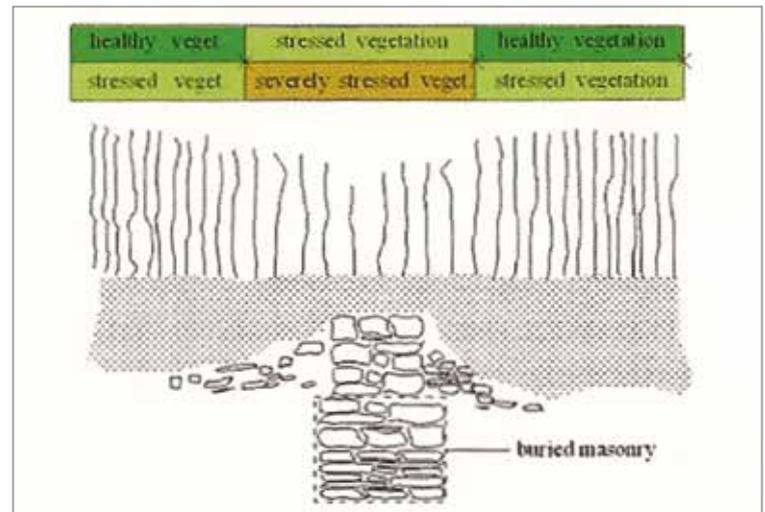
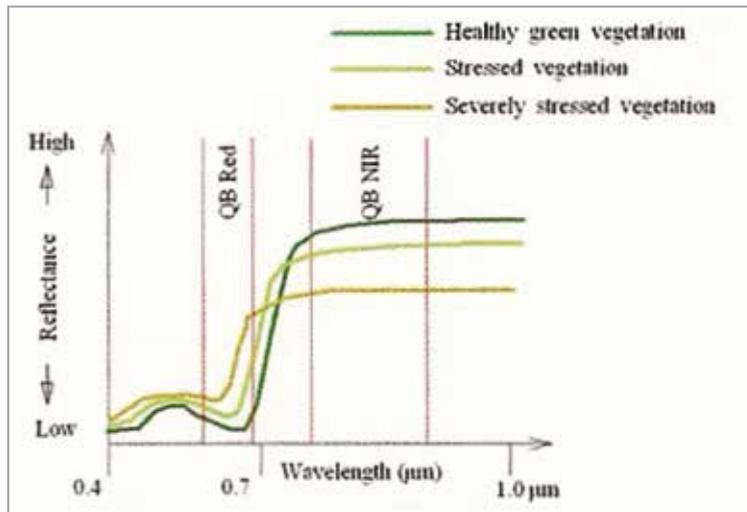


FIG. 145. Comportamiento del crecimiento de la vegetación sobre estructuras soterradas (Lasaponara / Masini, 2012: fig. 2.7).

a) NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI por sus siglas en inglés, se obtuvo operando con la banda del rojo, correspondiente a la banda 1 para los sensores DSLR y a la banda 3 para el sensor *Tetracam* Mini-MCA 6, con las tres bandas de la imagen del NIR (4, 5 y 6 para todos los sensores) mediante la siguiente expresión:

$$NDVI_i = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R}) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R})$$

Donde: $\rho_{i,NIR}$ corresponde al valor de la reflectividad del píxel en las bandas 4 o 5 o 6 y $\rho_{i,R}$ el valor de reflectividad del píxel en la banda del rojo. Para facilitar la comprensión a partir de ahora se designarán como NDVI_4, NDVI_5 o NDVI_6 dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

b) Green NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada verde, Green NDVI por sus siglas en inglés, opera de igual que el NDVI pero con la banda del verde siendo más sensitivo a la concentración de la clorofila. Este índice se obtuvo operando con la banda del verde (correspondiente a la banda 2 para todos los sensores utilizados) con las tres bandas de la imagen del NIR (4, 5 y 6 para todos los sensores) mediante la siguiente expresión:

$$GreenNDVI_i = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,G}) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,G})$$

Donde: $\rho_{i,NIR}$ corresponde al valor de la reflectividad del píxel en las bandas 4 o 5 o 6 y $\rho_{i,G}$ el valor de reflectividad del píxel en la banda del verde. Para facilitar la comprensión a partir de ahora se designará GreenNDVI_4, GreenNDVI_5 o GreenNDVI_6 dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

c) Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Finalmente optamos por introducir la proporción de vegetación/suelo que capta el sensor y que modifica notablemente el comportamiento del NDVI. Para ello Huete (1998) propuso en la fórmula del NDVI introducir el parámetro L (en torno a un valor a 0,5) que ajustase el índice a una reflectividad promedio de fondo (Chuvieco 2010, 341). De esta forma, el índice de vegetación ajustado al suelo (*Soil Adjusted Vegetation Index*) se calcula:

$$SAVI = (\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R} * (1+L)) / (\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R} + L)$$

También en este caso la banda del rojo se corresponde con la 1 para los sensores DSLR y la banda 3 para el sensor *Tetracam* Mini-MCA

6. Para el NIR se han utilizado todas las bandas posibles (4, 5 y 6), siendo denominada como SAVI_4, SAVI_5 o SAVI_6, dependiendo de la banda del NIR utilizada para su creación.

B. Análisis de componentes principales (ACP)

Esencialmente el ACP es un procedimiento estadístico que reduce la información redundante transformando un número de variables cuantitativas (dimensiones subyacentes comunes) en un número de nuevas variables no correlacionadas. Esta reducción se realiza mediante una matriz de varianza-covarianza sin perder una parte significativa de la información original. Esta capacidad de síntesis es interesante en teledetección porque la adquisición de imágenes en bandas adyacentes del espectro, implica con frecuencia detectar información redundante, puesto que las cubiertas suelen presentar un comportamiento similar en longitudes de onda próximas. Por ello, las medidas realizadas en una banda pueden presentar una importante correlación con las realizadas en otra banda.

En el campo de la arqueología, el ACP ha sido utilizado, sobre todo, cuando se trabaja con sensores multispectrales (Traviglia, 2006). En nuestro caso, lo aplicamos sobre la imagen VIS-NIR (es decir, aquella que contiene las seis bandas) de todos los sensores utilizados para la creación de neocanales.

3.5.7.3. Extracción de información temática: clasificación digital de la imagen

Otra de las técnicas que se han aplicado para la detección de los restos arqueológicos soterrados ha sido la clasificación digital de las imágenes, es decir, la asignación de categorías informacionales a los ND mediante técnicas de tratamiento digital y proceso automáticos o semiautomáticos. En concreto, la clasificación digital de la imagen se realizó con la finalidad de diferenciar las zonas donde podrían existir estructuras soterradas de las que no lo están (que pasamos a denominar como yermas). En este sentido, el propósito del trabajo no era realizar una clasificación precisa, sino poder valorar si esta técnica nos permitía distinguir los restos soterrados.

Una de las etapas clave en el proceso de la clasificación digital es el entrenamiento, consistente en la identificación de las claves multispectrales de las categorías informacionales (en este caso, zonas yermas o no). En términos generales existen dos tipos: Supervisado y No Supervisado. En el primero, se determinan muestras de cubiertas objetivo a partir de las cuales el sistema extrae los parámetros de la clase que ocupa dicha área; en el segundo, se proporcionan

unas instrucciones mínimas para buscar mediante técnicas estadísticas y algoritmos específicos agrupaciones de NDs. En las siguientes líneas se recogen con mayor detalle las instrucciones seguidas en cada uno de estos dos procedimientos de clasificación.

En concreto, únicamente hemos realizado la clasificación con los datos obtenidos por los sensores DSLR para el yacimiento de Valdeherrera.

A. Clasificación no supervisada: ISODATA (*Iterative Self-organizing Data Analysis Technique*)

En primer lugar, para la clasificación se realizó un *layer stack* con las bandas del visible (RGB), las bandas del NIR (en este caso otras tres) y por último, la séptima banda, con el resultado de los NDVI. Posteriormente, decidimos hacer una primera aproximación utilizando el procedimiento no supervisado. Para ello, manejamos el algoritmo ISODATA con 36 clases que realiza una clasificación automática basada en la función de la mínima distancia espectral.

B. Clasificación supervisada

Primeramente, definimos una leyenda que pensamos reunía los requisitos básicos.

Clases:

- Bloques de cemento de la excavación
- Información solo del NIR
- Suelo desnudo
- Restos arqueológicos
- Lona azul excavación
- Lona negra excavación
- Tejado paridera
- Tejado uralita
- Parideras sin tejado
- Marcas de arado
- Sombra
- Almendros
- Cultivos sin restos_divergentes
- Cultivos sin restos

Esta leyenda resulta jerárquica y estructurada porque ordena y diferencia las diferentes cubiertas. Asimismo, es flexible porque se podrían añadir nuevas clases si quisiésemos. Con las clases establecidas pensamos que además se podrían realizar comparaciones temporales de cómo cambia la cobertura vegetal o avanza la excavación. Finalmente, pensamos que también es exhaustiva porque para la finalidad de la investigación podíamos reducirla simplemente a tres clases. Sin embargo, una vez terminada la clasificación pensamos que sería necesario añadir otras coberturas (*vid. infra*). De ella, creemos que cabe explicar la diferencia que realizamos entre los cultivos sin restos (cultivo sin restos divergente y cultivo sin restos). Esta diferenciación se debe a su diferente signatura espectral, por ello hemos creído conveniente no juntarlas para observar los resultados obtenidos.

La clasificación supervisada se realizó mediante una selección de *training fields* con un método de localización interactiva, es decir, diferentes AOIs. Además, utilizamos la banda del NDVI para determinar mejor las estructuras soterradas. Esta información se combinó con los datos obtenidos durante el trabajo de campo –prospecciones arqueológicas– que determinan la concentración de materiales muebles e inmuebles en superficie. Para una correcta definición de las clases pensamos que era necesario obtener entre 8 y 800 píxeles debido a que la imagen tiene 7 bandas.

3.5.8. Resultados obtenidos

Como el objetivo principal de este trabajo era comprobar si éramos capaces de obtener resultados con la aplicación de esta nueva metodología, dentro del campo de la arqueología, hemos decidido estructurar el apartado de los resultados en dos apartados. El primero, para la valoración de los resultados obtenidos mediante la metodología aplicada y, el segundo, para los resultados arqueológicos conseguidos y su validación en campo.

La complejidad del uso de la cámara Tetracam Mini-MCA 6, su adaptación a nuestro RPAS, las dificultades para ortorectificar las imágenes y mosaicarlas así como los problemas de viñeteado o su resolución espacial menor provocan que la operatividad de este sensor se dilate en el tiempo. En consecuencia, se muestran a continuación los resultados obtenidos con los sensores DSLR para los



FIG. 146. Detalle del resultado del realce lineal del histograma con puntos de corte de las imágenes del NDVI_5 y NDVI_6 de Valdeherrera.

dos yacimientos: Valdeherrera y Labitlosa y algunos resultados de Labitlosa con el sensor *Tetracam* Mini-MCA 6.

3.5.8.1. Resultados de la metodología aplicada

El realce lineal utilizando puntos de corte o *breakpoints*, para definir interactivamente los límites de las funciones, ha sido el que mejores resultados ha proporcionado a esta investigación, en cuanto a los tratamientos aplicados a las imágenes de los índices de ve-

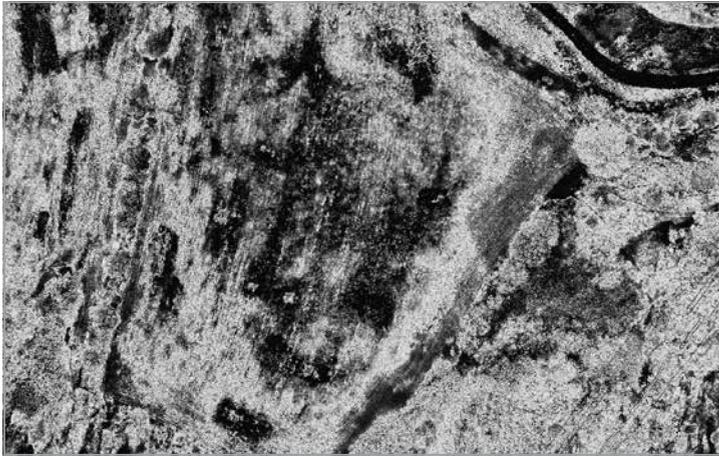


FIG. 147. Detalle del resultado del realce lineal del histograma con puntos de corte de la imagen del NDVI_6 de Labitlosa.

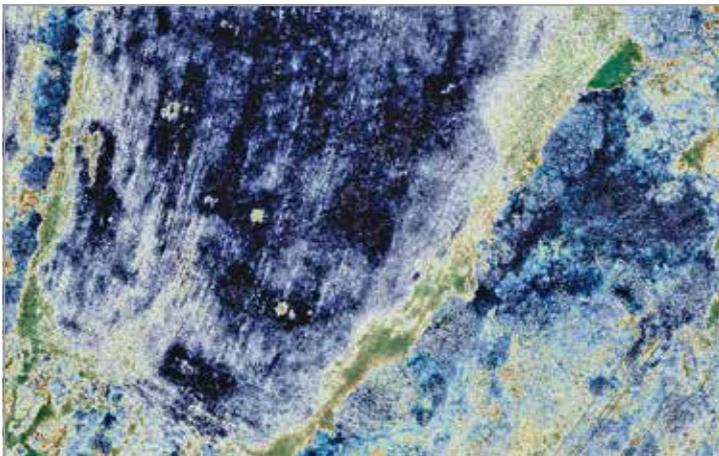


FIG. 148. Detalle de la composición de falso color con los tres NDVIs (R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_4) y realce lineal del histograma con puntos de corte de Labitlosa.

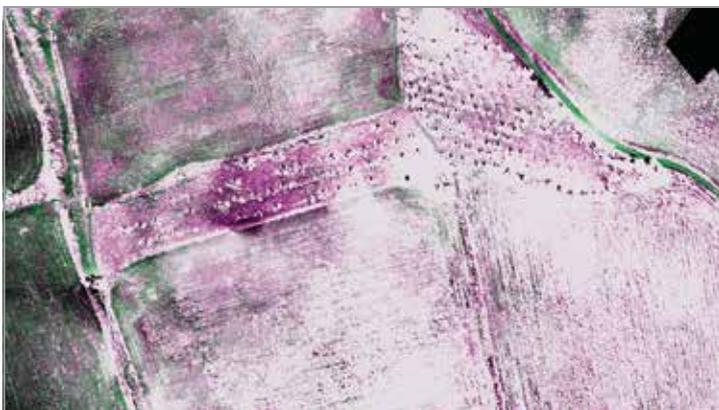


FIG. 149. Detalle de la composición de falso color con los tres NDVIs (R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_6) y realce lineal del histograma con puntos de corte de Valdeherrera.

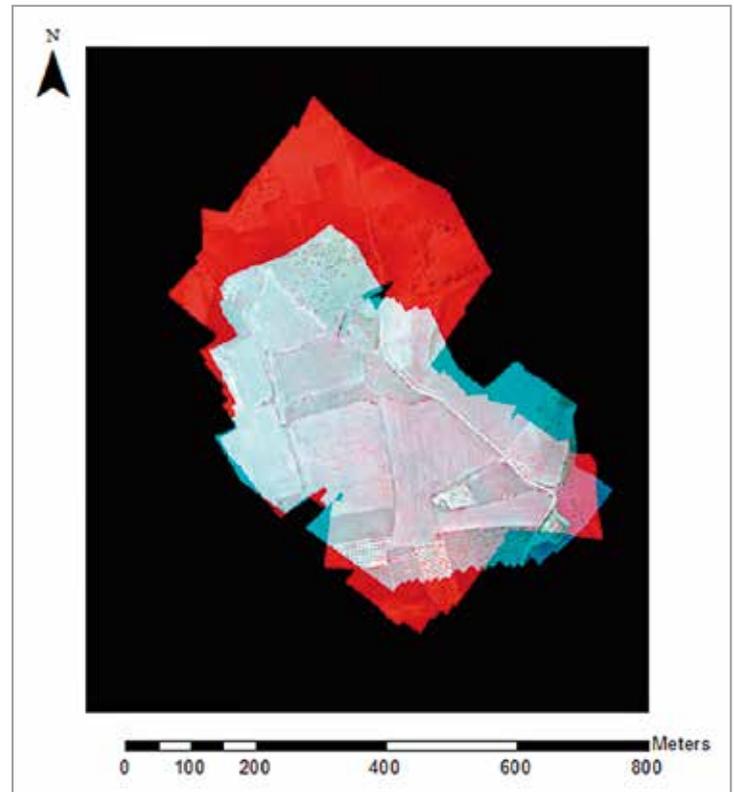


FIG. 150. Aplicación del filtro *Edge Enhance* 5x5, composición de falso color 432 de la imagen VIS-NIR de Valdeherrera con ajuste lineal de desviación estándar (2,5) donde se observa una zona con restos soterrados.

getación. Este ajuste lineal nos ha permitido destacar visualmente las estructuras soterradas frente a otros ajustes no lineales, como la equalización. Este último considera la frecuencia procediendo a equidistribuir los píxeles reduciendo el contraste en las zonas extremas del histograma (Jensen, 1996:150). Tal y como podemos observar en los resultados obtenidos por realce lineal, los restos se muestran dentro de las zonas extremas del histograma siendo muy oscuros o muy claros. En consecuencia, ajustes no lineales o tendientes a homogeneizar el histograma no nos son útiles para esta aplicación.

Las figuras bajo estas líneas representan la distribución de los niveles visuales tras el ajuste y los resultados de la aplicación de este realce sobre los NDVIs de dos imágenes (NDVI_5 y NDVI_6) del yacimiento de Valdeherrera.

Para las composiciones en falso color también han demostrado óptimos resultados la utilización de los tres NDVIs en vez de las bandas originales. A continuación, se muestran detalles de los resultados obtenidos:

Como comentamos en el apartado de la metodología, pensamos en un primer momento que los filtros de paso alto (*High pass filtering*) podían actuar como una buena herramienta para la detección de las estructuras. Sin embargo, tal y como se muestra a continuación, los resultados no han sido óptimos para la finalidad de este trabajo.

Como se puede observar en la imagen anterior, los resultados obtenidos mediante esta herramienta no son los deseados. Aparentemente el proceso de mosaicado (*seam lines* o líneas de costura) con *Photoscan* queda reflejado en la imagen tras aplicarle un filtro *High pass* de 5x5. Hemos podido comprobar que si reducimos la *kernel* a 3 (*kernel* de 3x3) esto no sucede. De esta forma, este herramienta digital, filtro *High pass* de 5x5, se ha utilizado como herramienta para discriminar los restos soterrados de los solapes de las imágenes

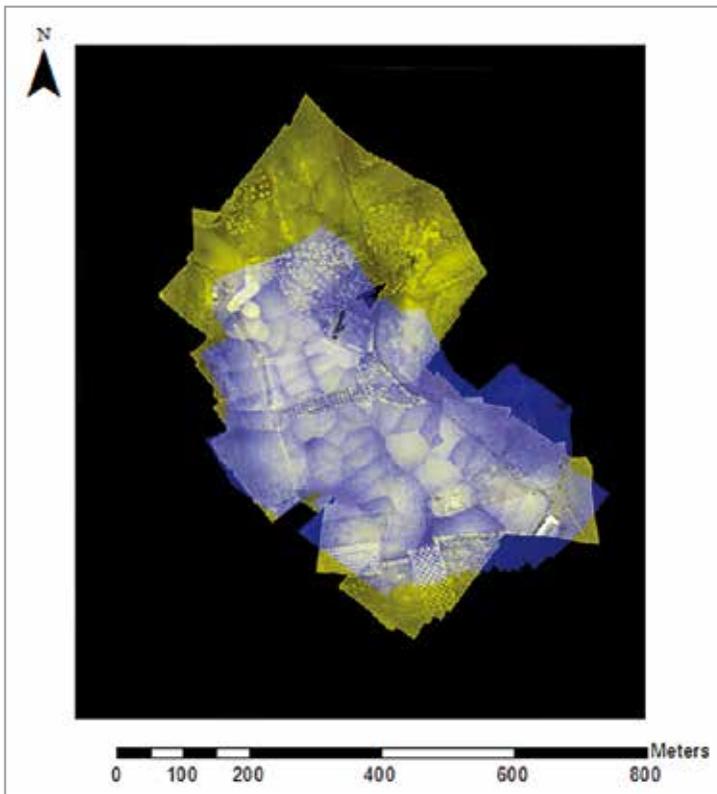


FIG. 151. Resultado del tratamiento digital de la imagen de Valdeherra VIS-NIR con un filtro *High pass* con una kernel de 5x5 (composición 643) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

de *Photoscan*, estableciéndose como una herramienta necesaria para el procesado de los datos que provengan del mosaicado de este *software*. En el caso de la imagen que se muestra a continuación de Labitlosa este hecho no es tan visualmente nítido como en el caso



FIG. 152. Resultado del tratamiento digital de la imagen de Labitlosa VIS-NIR con un filtro *High pass* con una kernel de 5x5 (composición 431) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).



FIG. 153. Una sola imagen del NIR a la que se le ha aplicado un filtro *Adaptive Filter* sin resultados significativos. Zona de la excavación de Valdeherra.

de Valdeherra debido a que se han realizado otros parámetros de ajuste en el programa de mosaicado.

Asimismo, también probamos a realizar ajustes espaciales a una sola imagen (sin georreferenciar y sin realizar el mosaico) obteniendo también exiguos resultados, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

De todos los tratamientos digitales de las imágenes que se han realizado durante la elaboración de este trabajo, la utilización de los índices vegetales para visualizar estructuras soterradas se muestra como una herramienta adecuada de gran potencial⁶⁷. Su elaboración y posterior utilización para la creación de neocanales así como su posterior ajuste lineal, utilizando puntos de corte, del histograma nos ofrecen, de momento, el recurso más óptimo para el desarrollo de esta nueva metodología.

En las FIGS. 154, 155, 156 y 157 mostramos los resultados obtenidos por la creación de los índices vegetales comentados en la metodología (*vid. supra*).

El proceso de cálculo de los componentes principales no se ha mostrado muy revelador, identificándose prácticamente los mismos restos arqueológicos que en la elaboración de los índices, tal y como se muestra en el detalle de las imágenes de las FIGS. 158 y 159.

TABLA 12
Matriz de autovectores

	B1	B2	B3	B4	B5	B6
CP1	0.529	0.395	0.676	0.308	0.098	-0.030
CP2	0.406	0.398	-0.178	-0.671	-0.437	0.043
CP3	0.285	0.420	-0.684	0.347	0.390	-0.016
CP4	0.369	-0.368	-0.155	0.382	-0.459	0.587
CP5	0.379	-0.392	-0.128	0.130	-0.229	-0.784
CP6	0.439	-0.467	0.035	-0.411	0.617	0.191

67 Sobre la aplicación de NDVI para la detección de restos arqueológicos, *vid. Lasaponara / Masini, 2006; Lasaponara / Masini, 2012; Bennett et al., 2012.*

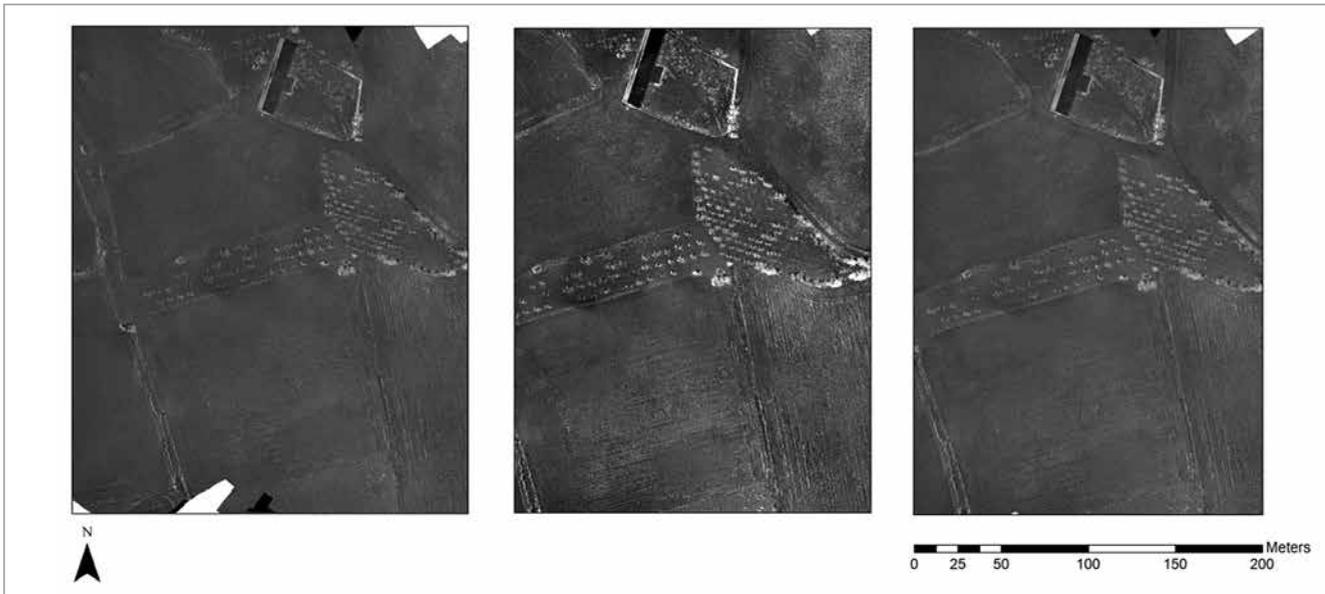


FIG. 154. Detalle de los NDVIs de Valdeherrera (NDVI_4; NDVI_5; NDVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

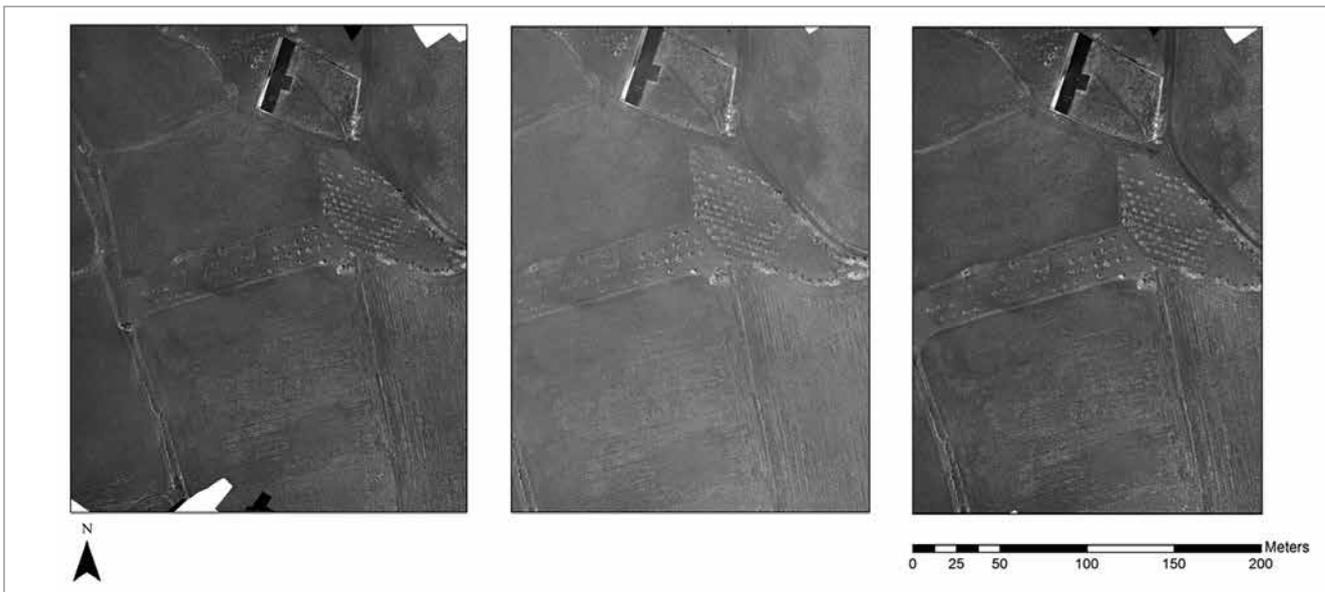


FIG. 155. Detalle de los GreenNDVIs de Valdeherrera (GreenNDVI_4; GreenNDVI_5; GreenNDVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

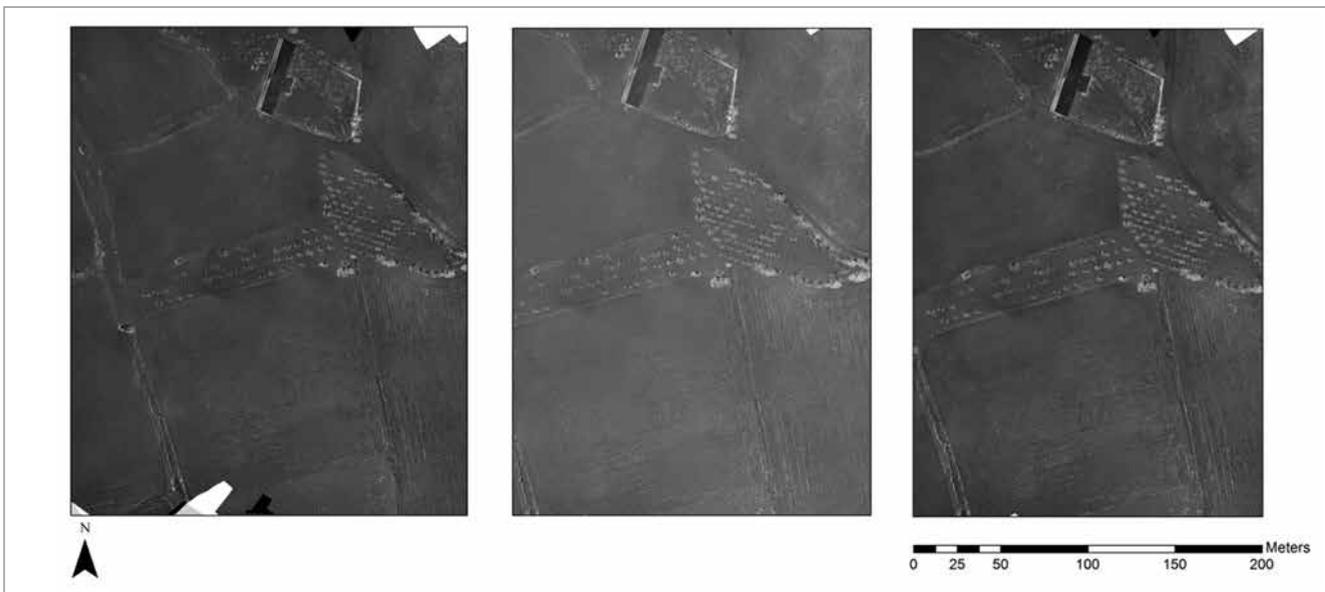


FIG. 156. Detalle de los índices SAVI de Valdeherrera (SAVI_4; SAVI_5; SAVI_6) con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

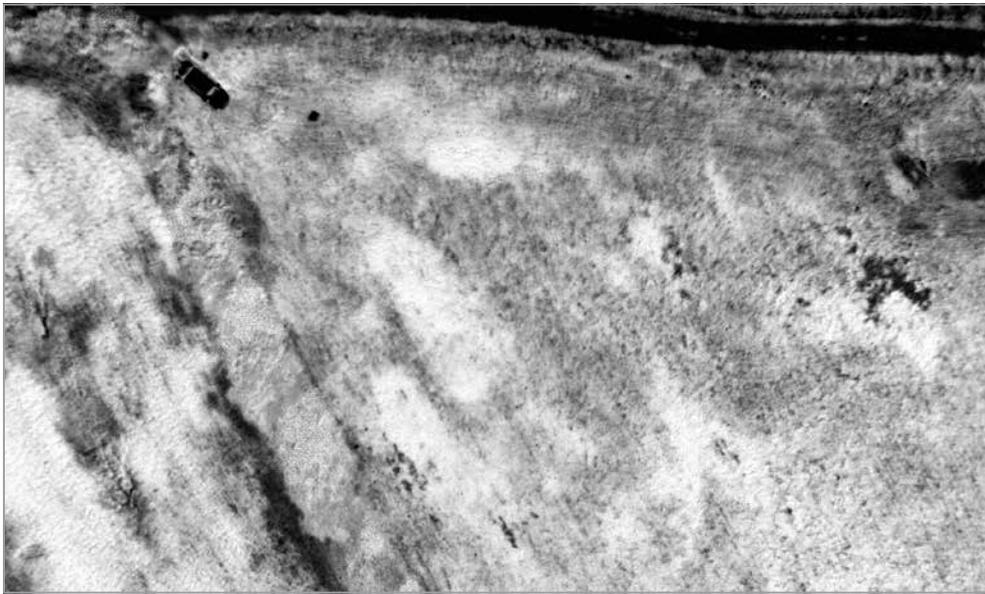


FIG. 157. Detalle del NDVI realizado a una sola imagen del sensor *Tetracam* Mini-MCA 6 utilizando la longitud de onda del 920-940 nm.



FIG. 158. Detalle del ACP de Valdeherrera bandas 1, 2 y 3 con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).



FIG. 159. Detalle del ACP de Valdeherrera bandas 4, 5 y 6 con ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

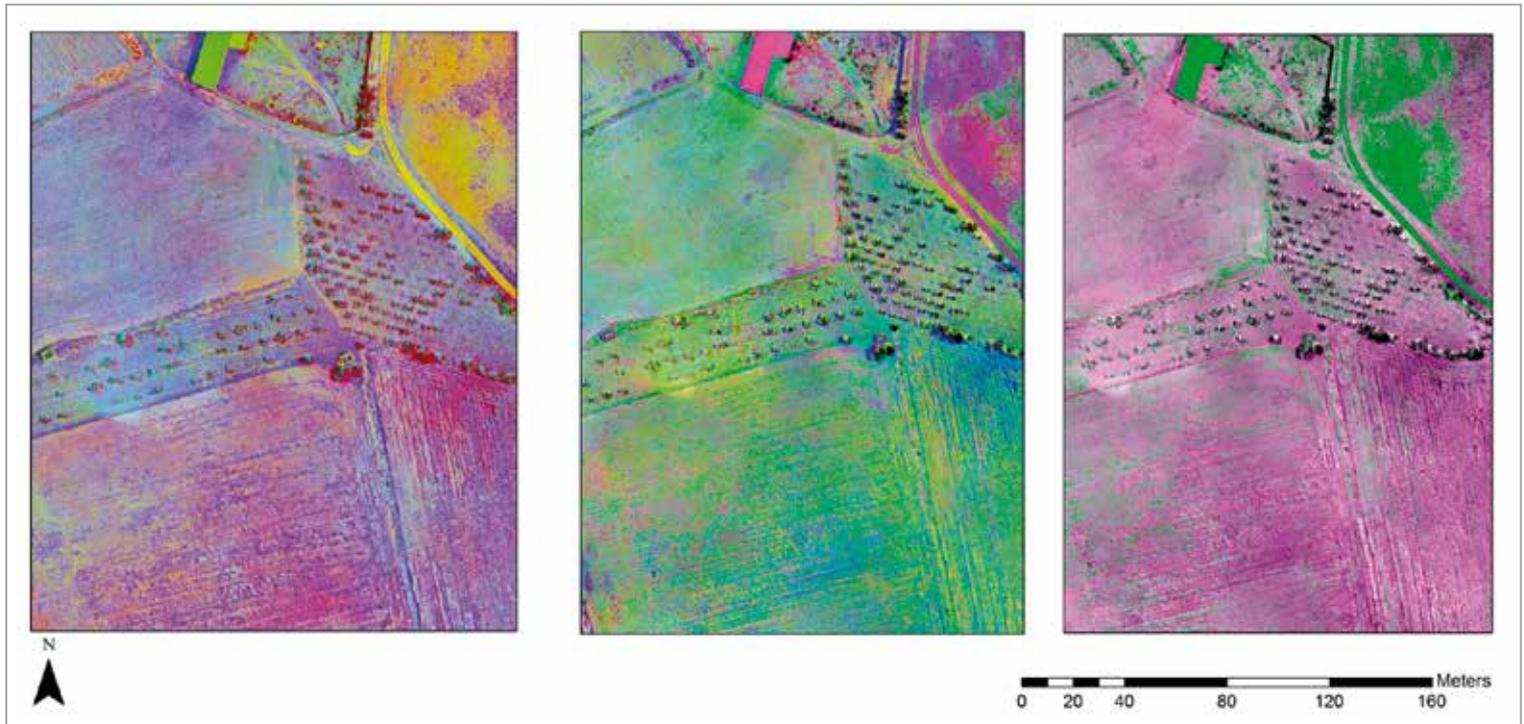


FIG. 160. Generación de neocanales con los resultados obtenidos del ACP. La primera imagen combina los ACP 123; la segunda 234 y la tercera 323. A todas ellas se les ha aplicado un ajuste lineal de desviación estándar (2,5).

La matriz de autovectores muestra el sentido espectral de los componentes, es decir, evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales (recordemos que en este caso la banda 1 representa el rojo). En esta tabla puede verse que el primer componente recoge una valoración de las características espectrales comunes a todas las bandas, que puede asimilarse con el brillo de la imagen. El segundo componente muestra el contraste espectral entre el NIR y el resto de las bandas, representándose de este modo el vigor vegetal que permite una visualización óptima de los restos arqueológicos. Este último, junto con el ACP 3 el cual parece indicar el contenido de agua de la vegetación, son los ACP que resultan más óptimos para identificar los restos. Por contra, se puede observar como el ACP6 contiene sólo ruido.

Sin embargo, verdaderamente mejora la identificación de los restos arqueológicos cuando utilizamos los ACP para la creación de neo-

canales, mostrándose como una herramienta muy útil para conseguir nuestros objetivos.

Finalmente querríamos comentar los resultados obtenidos mediante la clasificación digital de la imagen. Según la leyenda que hemos expuesto en la metodología, hemos obtenido la siguiente tabla de divergencia transformada (FIG. 161).

En ella se puede observar cómo hemos tenido graves problemas de asignación entre los cultivos yermos, las marcas dejadas por el tractor (arado) y los cultivos con restos. Pensamos que al tratarse de campos de cultivo poseen una signature espectral muy similar, siendo muy complejo diferenciarlos con esta herramienta. Los resultados obtenidos se muestran en la FIG. 162.

En este sentido, podemos observar cómo esta herramienta no es útil para nuestro objetivo porque no discrimina automáticamente

Separability CellArray														
Distance Measure: Transformed Divergence														
Using Layers: 1 2 3 4 5 6 7														
Taken 7 at a time														
Best Average Separability: 1962.51														
Combination: 1 2 3 4 5 6 7														
Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
restos	1	0	1869.09	1999.95	2000	2000	2000	1987.09	1940.71	2000	2000	1974.79	1894.84	893.863
Suelo_denudo	2	1869.09	0	2000	2000	2000	2000	1998.49	1946.12	2000	2000	2000	1804.66	1865.74
bloques_cemento_excav	3	1999.95	2000	0	2000	1999.7	2000	1915.1	1971.05	2000	2000	1999.1	2000	2000
Info_solo_NIR	4	2000	2000	2000	0	2000	1999.84	1999.98	2000	1999.93	2000	1999.1	2000	2000
Lona_azul_excav	5	2000	2000	1999.7	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Lona_negra_excav	6	2000	2000	2000	1999.84	2000	0	2000	2000	1522.16	2000	2000	2000	2000
Parideras_sintejado	7	1987.09	1998.49	1915.1	1999.98	2000	2000	0	1923.31	2000	1999.95	1998.87	2000	1999.99
Tejado_paridera	8	1940.71	1946.12	1971.05	2000	2000	2000	1923.31	0	2000	2000	1999.47	1999.91	1995.83
Sombra	9	2000	2000	2000	1999.93	2000	1522.16	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000
Tejado_uralita	10	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.95	2000	2000	0	2000	2000	2000
Almendros	11	1974.79	2000	1999.1	1999.1	2000	2000	1998.87	1999.47	2000	2000	0	2000	2000
Arado	12	1894.84	1804.66	2000	2000	2000	2000	2000	1999.91	2000	2000	2000	0	1577.29
Cultivo_sinrestos	13	893.863	1865.74	2000	2000	2000	2000	1999.99	1995.83	2000	2000	2000	1577.29	0

FIG. 161. Resultado del *Transformed divergence*.

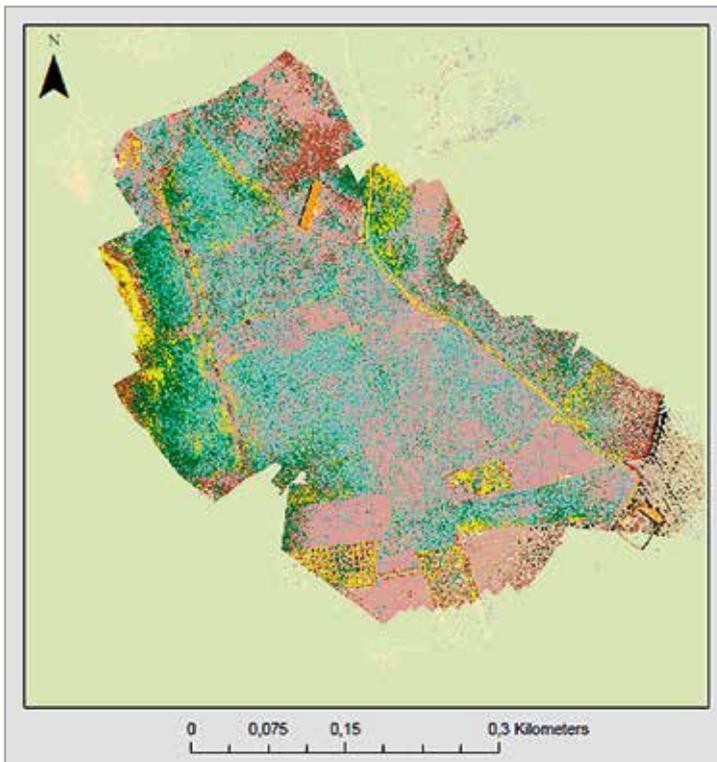


FIG. 162. Resultado de la clasificación digital de la imagen de Valdeherrera.

te entre los restos arqueológicos y el suelo yermo, por lo que pensamos que para el desarrollo de esta nueva metodología aplicada al campo de la arqueología no sería apropiado utilizar esta herramienta.

3.5.8.2. Resultados arqueológicos

En definitiva, mediante este proceso hemos podido identificar diferentes estructuras soterradas. Consecuentemente, tal y como muestran las FIGS. 163 y 164, pensamos que hemos podido alcanzar el objetivo inicial de este trabajo: comprobar si esta nueva metodología aportaba resultados óptimos al campo de la arqueología.

Si bien la adquisición de los datos no fue la óptima, debido al momento fenológico de la vegetación (recordemos que en este yacimiento las imágenes fueron tomadas en julio), hemos podido identificar una serie de estructuras en la ciudad romano republicana

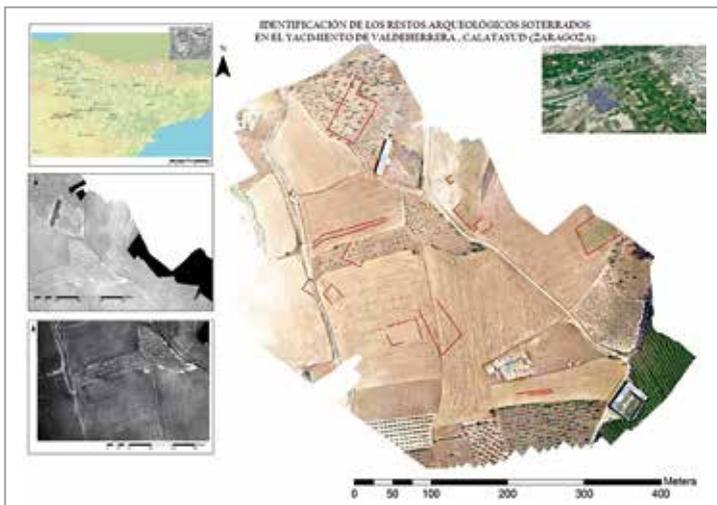


FIG. 163. Cartografía con los resultados obtenidos en el yacimiento de Valdeherrera (imagen VIS).

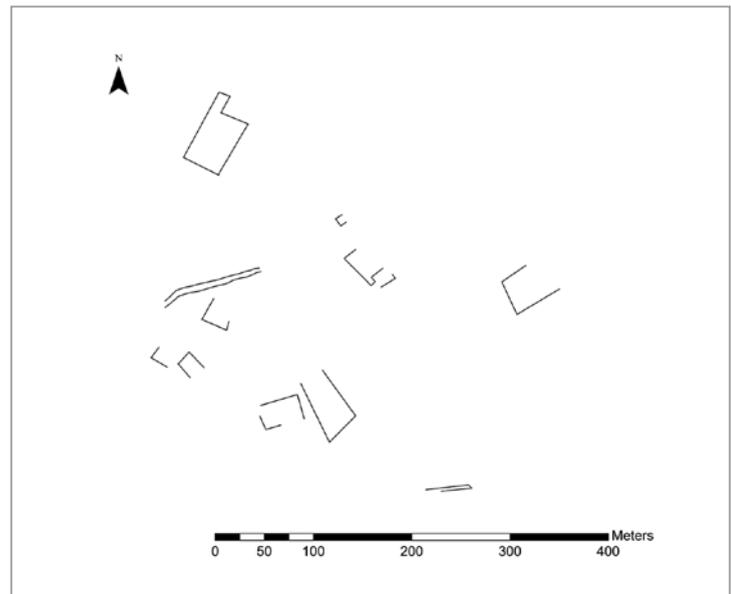


FIG. 164. Dibujo planimétrico de los restos arqueológicos documentados con las técnicas descritas en el yacimiento de Valdeherrera.



FIG. 165. Resultado del tratamiento digital de las imágenes (creación de neocanales R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_4 y realce lineal del histograma con puntos de corte) para la identificación de los restos arqueológicos. Se puede observar claramente la diferencia entre la imagen del visible y la identificación de los restos arqueológicos gracias a la metodología utilizada.

na de Valdeherrera⁶⁸. De todas ellas, destacamos la estructura denominada como A (FIG. 165).

Pensamos que se trataría de un edificio importante de la ciudad debido a su posición elevada, tal y como muestra el MDE⁶⁹, sus dimensiones (25 x 26,67 m) y el hallazgo de grandes sillares rectangulares sobre el terreno (FIGS. 166 y 167).

Un hecho similar ocurre con la estructura identificada como B. Se trataría de una gran estructura ubicada justo en la vaguada del río (ver MDE). Por su forma y sus dimensiones (40 x 20 m) podemos pensar que estaríamos ante uno de los accesos a la ciudad (FIGS. 1688 y 169).

3.5.9. Conclusiones

En definitiva, tal y como muestran los resultados, hemos podido comprobar que la aplicación de estas técnicas de teledetección resultan muy propicias para la identificación de los restos soterrados arqueológicos. Sin embargo, para su adaptación a cada tipo de contexto arqueológico es necesario contemplar los factores que citábamos en la introducción de este apartado.

⁶⁸ Hemos decidido no incluir los resultados arqueológicos obtenidos en el yacimiento de Labitola (Huesca) por estar, todavía, en fase de procesamiento. Sin embargo, debemos destacar que, aplicando la misma metodología utilizada en el caso de Valdeherrera, se han obtenido los primeros resultados.

⁶⁹ Esta imagen del MDE ha sido extraída del software *Photoscan*.

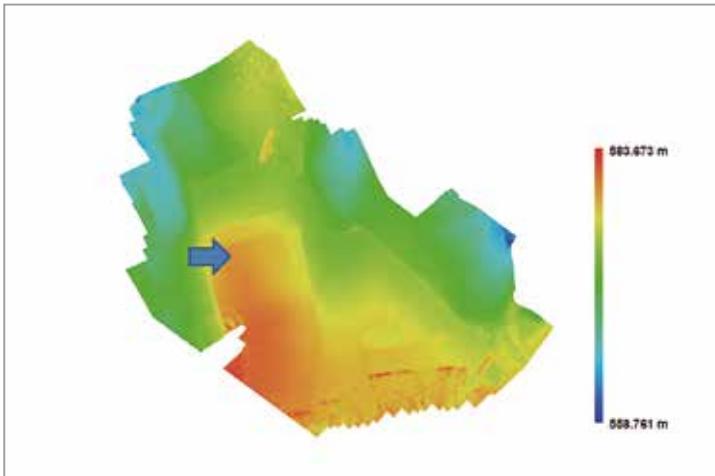


FIG. 166. MDE con la ubicación de la estructura A.

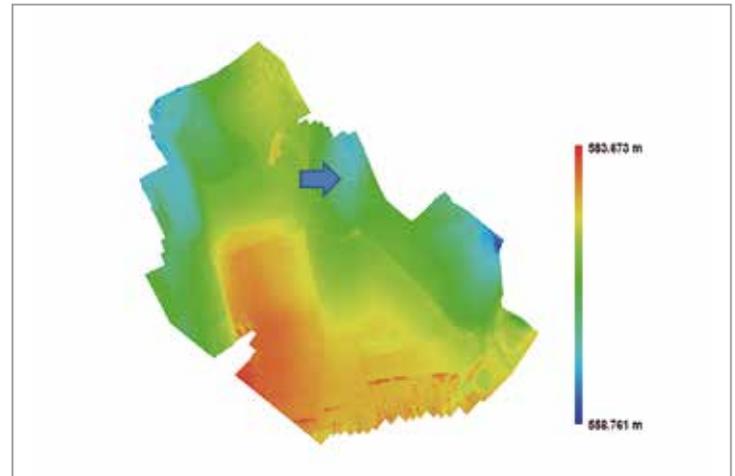


FIG. 168. MDE con la ubicación de la estructura B.

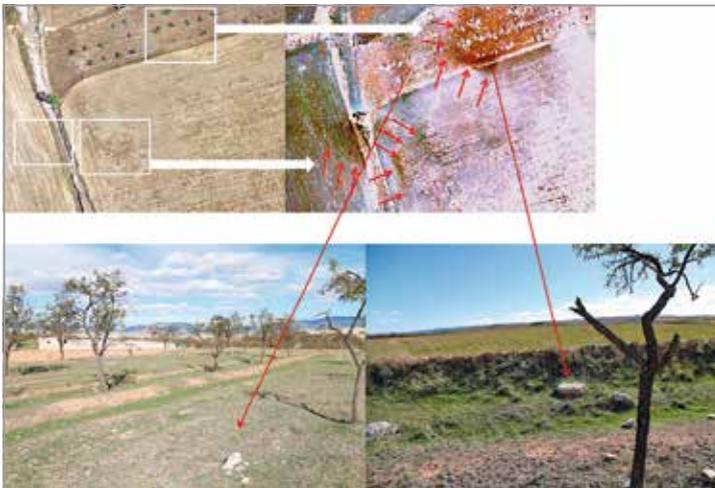


FIG. 167. Documentación de sillares de alabastro escuadrados sobre el terreno que confirman la existencia de una estructura.

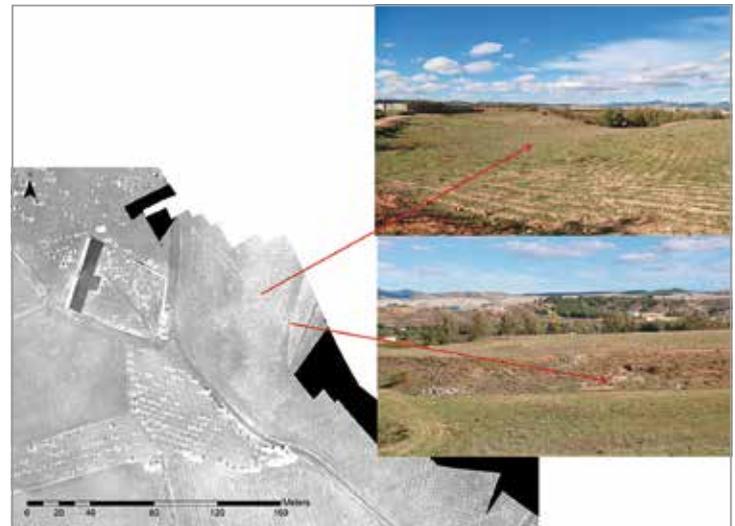


FIG. 169. Restos arqueológicos sobre el terreno que confirman la existencia de una estructura B.

A continuación pasaremos a describir una serie de cuestiones que se nos han planteado durante la elaboración del trabajo:

A. Reflexiones sobre la plataforma

Sin lugar a dudas, hemos podido demostrar que los drones se presentan hoy en día cómo una herramienta muy útil para estudios de teledetección que necesiten una resolución espacial máxima. Sin embargo, todavía quedan por mejorar algunos aspectos como la capacidad del tiempo de vuelo, su compatibilidad con los diferentes sensores o su telemetría. En este sentido, pensamos que este sector, en actual desarrollo, ofrecerá en los próximos años soluciones integrales e innovadoras como la posibilidad de utilizar escáneres láseres 3D sobre este tipo de plataformas aéreas con una mayor autonomía de vuelo.

B. Los sensores

La integración final del sensor Tetracam Mini-MCA6 conlleva múltiples problemas y actualmente se siguen procesando los datos de este sensor comparándolos con otros yacimientos en el valle medio del Ebro y con otros resultados de otras cámara multiespectrales (multiSpec de senseFly, *vid.* TABLA 3). Este hecho ha producido que no hayamos podido incluir los datos preliminares en este estudio. Asimismo, su manejo no ha sido fácil ya que, además de la integración, ofrece muchos problemas de ortorectificación y mosaicado. En consecuencia, pensamos que, aunque desconocemos

exactamente los rangos de longitudes de onda, la utilización de las DSLR *Olympus* E-PM2 y E-PM1 se muestran, por el momento, como el método más efectivo y económico para nuestros objetivos arqueológicos.

C. El tratamiento digital de las imágenes

Asimismo, hemos podido comprobar que los índices normalizados de vegetación y su tratamiento posterior se presentan como el tratamiento más efectivo para nuestros objetivos. La utilización de los filtros nos ha servido para discriminar los efectos del mosaicado del *software* *Photoscan*. Sin embargo, otras técnicas como el ACP o la clasificación digital de la imagen no han producido resultados relevantes.

También la realización de estos procesos nos ha permitido conocer las necesidades para trabajos futuros. De esta forma, quedan varias líneas de investigación abiertas como profundizar en la discriminación de las «soil marks» o en la zonificación de los píxeles de los índices de vegetación.

D. Resultados

En definitiva, los resultados han sido satisfactorios. Sin embargo, desde el punto de vista de la arqueología y a pesar de las posteriores comprobaciones en campo, solo una excavación arqueológica de las estructuras documentadas podrá validar nuestro método e hipótesis.

3.6. La reconstrucción patrimonial mediante modelos tridimensionales

3.6.1. Antecedentes

El siguiente apartado pretende abordar las posibilidades de las técnicas de reconstrucción tridimensional como una herramienta interpretativa en la documentación, conservación y difusión de los bienes patrimoniales. De esta manera, se analiza en general el escenario actual con los antecedentes más significativos, para posteriormente centrarnos en el análisis en profundidad de tres escenarios con una técnica en común pero con una naturaleza completamente diferente, tanto en la forma como en la problemática a que se enfrenta la reconstrucción tridimensional del arte rupestre: «Abrigos rupestres del barranco de Calapatá (Cretas, Teruel)», la arquitectura: «El acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)» y la arqueología: «El Cabezo de la Cruz (La Muela, Zaragoza)». Cada uno de estos tres ejemplos puede servir de arquetipo extensible para problemáticas similares dentro del patrimonio cultural.

Las técnicas actuales de documentación geométrica del patrimonio cultural permiten esbozar cualquier tipo de teoría arqueológica, sin la necesidad de intervenir y deteriorar el bien patrimonial, mediante el empleo de plataformas virtuales. Dentro de los criterios de la restauración, la anastilosis (del griego ἀνά «hacia arriba» y στύλος «columna») ha sido tradicionalmente ejercida a lo largo de los siglos y paulatinamente matizada como concepto de intervención para la conservación y protección del patrimonio cultural (Carta de Atenas de 1931, Carta de Venecia de 1964). Actualmente la reintegración tridimensional, pieza a pieza, que ofrecen las técnicas de documentación, desde los sistemas de escáner a la fotogrametría, constituyen un punto de avance, con múltiples ventajas que facilitan principalmente la investigación y difusión arqueológica.

Sin embargo, los nuevos sistemas de representación digital no pretenden de ninguna manera sustituir a los sistemas clásicos de representación en papel, en monografías o artículos científicos. Su empleo debe concebirse como una herramienta que facilite el trabajo del conjunto de profesionales que se dedican a la documentación, investigación, protección y difusión del patrimonio arqueológico. Asimismo, la transición entre la representación física y digital debe de entenderse como una herramienta dual que iguale y mejore las posibilidades técnico-científicas del papel como soporte clásico de divulgación científica.

Estamos todavía muy lejos de una automatización de la técnica, coexistiendo múltiples procesos de restauración para la investigación científica, desde simulaciones arquitectónicas enfocadas hacia un carácter dual científico-divulgativo, a reconstrucciones escultóricas mediante la composición de unos pocos fragmentos hallados, que ofrecen un vasto abanico de alternativas. De hecho, el empleo de esta técnica digital basada en modelos tridimensionales representa un salto cualitativo como herramienta de interpretación del patrimonio cultural. Esta tendencia la hemos constatado, sobre todo, desde el año 2010, coincidiendo con diversificación de numerosos tipos de programas informáticos, aplicada a la reconstrucción virtual de esculturas de diferentes tamaños como por ejemplo los Budas de Bamiyan (Toubekis, 2011), el *Guerrero di Castiglione* (Fatuzzo, 2011) o más recientemente en la restauración de fragmentos de una escultura de terracota renacentista (Arbace, 2013: 332-345).

El factor común entre estos tres ejemplos ha sido el deterioro parcial o total del bien por diferentes causas de las esculturas, algunas simplemente de carácter temporal como el *Guerrero di Castiglione*, otras por circunstancias naturales, propiciado por un terremoto en la escultura en terracota de la *Madonna de Pietranico*, o de destruc-

ción antrópica de carácter político-religioso en el ejemplo de los Budas de Bamiyan. En la arqueología de la arquitectura destacamos el ejemplo de la reconstrucción virtual e interpretación de la casa de *Caecilius Iucundus* de Pompeya (Dell'Unto *et al.*, 2013: 621-628). Se trata de los pocos ejemplos que encontramos que combina información arqueológica y fuentes históricas, basando la reconstrucción directamente sobre el modelo 3D dentro de un sistema inmersivo denominado CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) para la formulación de las hipótesis de reconstrucción. Otro tipo de reconstrucciones arqueológicas que realizan también esta combinación a partir del modelo 3D escaneado, pero sólo a nivel infográfico, es el proyecto de documentación de la casa, también en Pompeya, de la Diana Arcaizante (2007-2010)⁷⁰.

En consecuencia, independientemente de las causas del deterioro, el incremento de este tipo de técnicas constituye un método de estudio muy útil para las diferentes cuestiones arqueológicas, ya que una vez digitalizado permite múltiples interpretaciones y teorías totalmente inocuas para el bien patrimonial. Sin necesidad, por ejemplo, de que tengan que transportarse, en el caso de objetos muebles, del centro o museo donde se encuentren depositadas, repercutiendo también en un ahorro de tiempo, traslados, seguros, permisos, etc. De hecho, las posibilidades finales actuales representan únicamente una primera aproximación de la restitución digital. Las técnicas actuales utilizadas tienen un proceso generalizado donde prima la restitución manual⁷¹ sobre el empleo de un método con muchas posibilidades dedicadas a la generación de «modelos predictivos rupestres, arquitectónicos y escultóricos», aplicable a cualquier bien cultural. Una automatización del método permitiría que se pudiesen incluir todas las variables que fuesen susceptibles de afección a cada conjunto cultural y se alcanzasen simulaciones temporales gráficas y geométricas que determinasen y aclarasen los diferentes procesos, tanto en la realización como en el deterioro sufrido. Sin duda, son planteamientos futuros mucho más complejos y ambiciosos que necesitan tener en cuenta un conjunto de variables por consensuar entre un equipo interdisciplinar de historiadores, historiadores del arte, restauradores, químicos, biólogos, geólogos, etc. Estas preconizaciones representarían un nuevo campo de aplicación en la investigación y conservación preventiva del patrimonio cultural, inscrita entre los procesos de documentación y de difusión.

Si bien, todos estos nuevos medios de interpretación del patrimonio no han estado exentos de críticas a lo largo de la historia, la mayor parte de estas diatribas surgen generalmente desde el sector de la arquitectura. Un ejemplo de ello surge ya a finales del siglo XVIII con una disyuntiva entre la representación métrica y no métrica del patrimonio, dentro de un trasfondo de cambios en los movimientos culturales, entre el racionalismo de la ilustración y un incipiente romanticismo con mucha mayor libertad en la representación. En este caso el protagonista es el autor de la traducción de la obra de Vitruvio *Los diez libros De Architectura*, José Ortiz y Sanz, intentando normalizar un sistema de representación, de los cánones de Vitruvio, «que niegue el valor poético de las ruinas» (Ortiz y Sanz,

70 Para una mayor información consúltese la página web del proyecto en <http://www.dianaarcaizante.com/> (último acceso: noviembre de 2017).

71 Debemos considerar que los procesos de restitución son generalmente manuales, controlados por el componente subjetivo del técnico que realiza, sobre datos físicos, históricos y estilísticos, las diferentes pruebas digitales. Por esta razón, es necesario puntualizar un cambio cultural sobre los denominados «intrusismos profesionales» que cada vez más han sido conceptualmente sustituidos por «formaciones híbridas» que permiten una mayor integración y control sobre las técnicas aplicadas al patrimonio. En este sentido, cada vez existe una mayor formación interdisciplinar que establece, por ejemplo, que el propio arqueólogo articule los mecanismos de restitución digital respecto a su formación. Principalmente porque es el que mejor y más a fondo conoce la variable de su propia investigación.



FIG. 170. Ejemplo del proceso desarrollado para la generación, mediante anastilosis virtual, de la hipótesis arqueológica del horno islámico núm. 3 (Angás / Ramón, 2016: 15-27).

1787: 27)⁷². En este sentido, realiza de manera empírica un acercamiento a la tipología para comprender con mayor precisión los problemas conceptuales que plantea la obra vitruviana. Y por ello, Ortiz y Sanz defiende un modo de representación basado en unos cánones geométricos, criticando las ilustraciones «pintorescas» que plasmaban los viajeros y anticuarios en los libros de viajes «ya que las imágenes están excesivamente animadas por los golpes de claro y oscuro del pincel» (Ortiz y Sanz, 1797:12). En el prólogo de Delfín Rodríguez, de la edición de la obra vitruviana de Ortiz y Sanz, indica las normas que habría que seguir para la representación arquitectónica, describiendo: «Se han de tomar geométricamente las plantas y alzados de todos los edificios antiguos [...] enteros o en ruinas [...] En todos los monumentos considerables no íntegros se suplirá la parte diruida, por la guía de lo que reste, distinguiéndolo en los diseños» (Ortiz y Sanz, 1787: 26-27). En la actualidad podríamos trasladar con cierta cautela este debate metodológico de finales del s. XVIII a la problemática presente, como metáfora conceptual entre la representación geométrica y la puramente infográfica. Sin embargo, resulta indiscutible afirmar que todos aquellos dibujos idealizados de finales del XVIII que realizaban los viajeros han contribuido, pese a la abstracción, de una manera u otra, a documentar un sinfín de escenas de la propia so-

iedad contemporánea y monumentos de un patrimonio cultural, hoy posiblemente ya perdido.

El principal problema de la representación que sufre la arquitectura se encuentra en la posterior interpretación y la desconfianza a que una automatización del proceso no aclare sino que dificulte el entendimiento de un edificio. Sin duda, se trata de temores en los que subyace otra realidad. Por un lado, estamos asistiendo a un cambio progresivo de soportes físicos a soportes digitales y por otro, esta automatización de procesos o toma masiva de información requieren de una especialización que extraiga solo la información que necesitamos, pero conservando el resto para futuras investigaciones. Desde la historia de la arquitectura, para facilitar la comprensión de un edificio, siempre se ha recurrido al clásico dibujo de línea como simplificación del objeto (Almagro, 2011: 36). Sin embargo, de la misma manera que se observa cierta reticencia desde el sector arquitectónico, con esta toma cuantitativa de datos, que únicamente promueve una automatización de los procesos en campo, hay que tener en cuenta que se trata de una información claramente más objetiva, porque como materia prima todavía no ha sufrido una interpretación cognoscitiva de la realidad a la línea. Consecuentemente, estamos de acuerdo al considerar que la implementación de mejoras tecnológicas en cualquier proyecto de documentación por sí mismas no constituye un avance en el proceso de interpretación de un edificio. Por ello, actualmente consideramos que el proceso está

72 Vid. n. 19.



FIG. 171. Registro topográfico del entorno y acceso de la cueva de Chaves con un láser escáner 3D de tiempo de vuelo.

claramente dividido en dos apartados: el de la toma «objetiva» de los datos y su posterior interpretación en cualquiera de las múltiples variantes. Por esta razón, independientemente del estado del edificio, siempre existirá, en principio, una documentación de la cual se podrá extraer una trazabilidad que denote su objetividad, y en segundo término que se pueda interpretar de la manera más adecuada a través de secciones sobre el modelo tridimensional, delineación sobre las ortofotos o cálculos de volumen, verticalidad, etc.

Otro ejemplo crítico, también desde la arquitectura, es el de Ortega (2010: 46). En su relato sobre el dibujo del patrimonio y su vida gráfica alude a la «necesidad de preservar los valores de la tradición del dibujo arquitectónico». Del mismo modo, el autor habla de otra necesidad, la de encontrar un «discurso unificado» que no permita el cambio radical a lo tecnológico sino integrar todos los avances en beneficio de la representación arquitectónica (2010: 50). Ya que en muchas ocasiones se tiende a valorar más el medio que la finalidad cuando muchas veces no proporciona ninguna ventaja adicional. Otra de las aportaciones del autor es la propuesta, muchas veces confundida, entre restitución y reconstitución, entendiendo por restitución la documentación de la realidad existente desde un enfoque objetivo y sobre todo comprobable⁷³, en lo que normalmente denominamos «levantamiento» mientras que la reconstitución refleja los estados de un edificio «que ya no existen o que nunca existieron, pero que pudieron formar parte de su biografía», siendo en este segundo caso donde entra la interpretación del técnico (2010: 50). Atendiendo a esta definición, observamos cierta controversia con la mayoría de artículos recientes. El problema muchas veces se nos plantea en cómo resolver la plasmación del espacio tridimensional cuando contamos como soporte el papel.

La arquitectura ha sintetizado y simplificado esta plasmación tridimensional con proyecciones bidimensionales sobre la clásica triada: planta, alzado y sección. El juego planimétrico que hace la arquitectura de estos tres elementos, no tiene comparación con la mejor de las vistas de cualquier modelo tridimensional (adquirido, por ejemplo, con un láser escáner). Sin duda, resulta más operativo y pragmático cuando se trata de una intervención en el propio bien y sólo contamos con el espacio papel.

73 Resulta interesante matizar que si consideramos e incluimos este conjunto de técnicas dentro de la investigación, es imprescindible que existan unas premisas fundamentales enfocadas a la trazabilidad y comprobación del método utilizado. Este factor será el único que permitirá salvaguardar toda la documentación registrada.



FIG. 172. Estacionamiento de un láser escáner 3D de diferencia de fase utilizado para la documentación del interior de la cavidad junto con una estación total y dianas al fondo.

Si observamos el caso de Aragón en este último periodo, también se han producido diversas, y muy variadas, intervenciones en el patrimonio cultural que han tenido como objetivo la reconstrucción tridimensional con diferentes tipos de condicionantes.

Un caso particular dentro de la arqueología urbana del casco antiguo de Zaragoza fue la digitalización pieza a pieza de tres hornos islámicos (dos de birlas, de tradición islámica, y un tercero de parrilla, de tradición romana) que fueron extraídos de su emplazamiento original y almacenados en la década de los años 90 del pasado siglo, para posteriormente ser reconstruidos nuevamente mediante un proceso de anastilosis virtual veinte años más tarde (Angás / Ramón, 2016: 15-27) promovido por el Ayuntamiento de Zaragoza. Este tipo de proyectos permiten además un ahorro considerable del espacio empleado por el almacenaje de los materiales arqueológicos, obteniendo una reproducción a escala en cualquier momento de la pieza mueble original. Además, permiten una clara facilidad en la musealización de estas piezas, a través de la generación de réplicas livianas en poliuretano de alta densidad o resinas, prácticamente idénticas, respecto al original.

Finalmente, señalaremos otro tipo de ejemplos que han tenido relación en los últimos años con la reconstrucción de varios yacimientos arqueológicos en Aragón, que han sufrido el expolio y destrucción antrópica en diferente grado. En estos casos, el objetivo ha estado dirigido a la protección y prevención del patrimonio. Nos referimos al caso de la ciudad celtibérica de Aratis en Aranda de Moncayo (Zaragoza)⁷⁴ (Fatás *et al.*, 2014) y al de la cueva neolítica de Chaves en Bastarás (Huesca)⁷⁵ (Romeo *et al.*, 2017). La documentación geométrica realizada ha servido como prueba pericial en ambos procesos judiciales para la reconstrucción de los niveles arqueológicos destruidos, sentando un precedente en la historia de la documentación arqueológica en España.

74 Proyecto dirigido por la Dirección General de Cultura y Patrimonio del Gobierno de Aragón. Vid. FIG. 3 en: Fatás, L. / Graells, R. / Llorio, A. / Romeo, F. (2014): «Dos nuevos cascos hispano-calcídicos en contexto urbano: los oppida celtibéricos de Aratis (Aranda de Moncayo, Zaragoza) y Contrebia Carbica (Villas Viejas, Cuenca)», *Boletín del Seminario de estudio de Arte y Arqueología*, Arqueología LXXX, pp. 13-51.

75 Proyecto dirigido por la Dirección General de Cultura y Patrimonio del Gobierno de Aragón. Para una mayor información vid. Romeo, F. / Royo, J.I. / Gonzalvo, I. / Fatas, L. / Angás, J. (2017): «Un nuevo sistema para la valoración económica de los daños en yacimientos arqueológicos expoliados», *Patrimonio Cultural y Derecho*, 21.

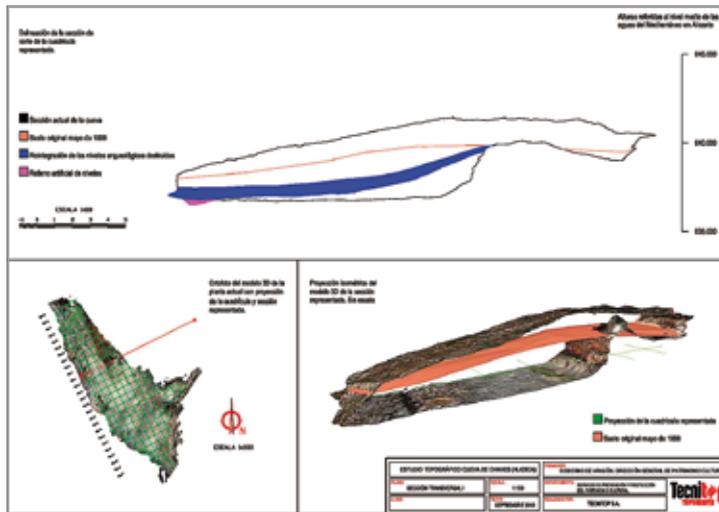


FIG. 173. Ejemplo de una de las secciones realizadas (I), representando la planta, alzado y proyección isométrica de la sección, simulando de manera gráfica y métrica las diferencias entre niveles en el año 2010 y en 1998.

Los trabajos de documentación topográfica desarrollados en junio de 2010 en la cueva de Chaves, situada en el término municipal de Bastarás (Huesca), tuvieron como objetivo realizar un registro tridimensional con una combinación de sistemas de escáner 3D para establecer las diferencias geométricas del yacimiento arqueológico entre junio de 2010 y la última topografía realizada en mayo de 1998. El levantamiento topográfico original de 1998 fue realizado por Rafael Larma dentro de la campaña anual de trabajos arqueológicos, publicado en Utrilla y Baldellou (2001-2002: 79).

Las técnicas de documentación utilizadas se pueden dividir básicamente en dos categorías:

- Sistemas de topografía clásica. Utilización de un sensor GNSS RTK de doble frecuencia para la georreferenciación en el sistema de coordenadas UTM ED50 Huso 30. Posteriormente, para la densificación de bases y dianas de control en el interior de la cavidad se usó una estación total con medición láser.
- Tecnología láser escáner 3D. De diferencia de fase para la documentación del interior de la cavidad, y de tiempo de vuelo para la documentación exterior del entorno inmediato del yacimiento arqueológico. Entre ambos tipos de láser escáner 3D se realizaron treinta escaneados completos, obteniendo una nube de 1.021.357.768 puntos. Esta densidad de puntos equivale en el interior de la cueva a una resolución de 1 punto cada 3 milímetros aproximadamente.

Toda la información tridimensional registrada fue procesada consiguiendo, de este modo, la creación del modelo 3D depurado y un conjunto de resultados finales que combinaron una utilidad gráfica y geométrica para entender las alteraciones geomorfológicas producidas: modelo 3D, planimetrías, comparación de secciones, cubicación por diferencia de perfiles, servidor web métrico de cada estacionamiento y video-simulaciones sobre el modelo tridimensional del desmonte realizado, recreando las diferencias geométricas entre ambos momentos.

Por último, el ejemplo de la cueva de Chaves nos ha enseñado que es necesario establecer un protocolo documentado en el registro de la información geométrica mediante el uso de metadatos. De esta manera, podremos reproducir, como ha sido el caso, una trazabilidad en cualquier yacimiento arqueológico que nos permita marcar un punto de partida para la investigación, conservación y protección del patrimonio cultural.

3.6.2. Arte rupestre: propuesta de restauración digital del arte rupestre destruido de los abrigos de Roca dels Moros y Els Gascons (Cretas, Teruel)⁷⁶

JORGE ANGÁS / MANUEL BEA

3.6.2.1. Historiografía de las investigaciones

En 1902, E. Cartailhac (1902) publicaba su famoso trabajo sobre la cueva de Altamira en el que reconocía su filiación crono-cultural paleolítica, poniendo fin al debate en torno a la autenticidad prehistórica del arte rupestre. Se inauguraba una gran etapa de descubrimientos y, con todo ello, un nuevo campo de estudio para la recién creada ciencia prehistórica. Espoleado por ese reconocimiento, el arqueólogo J. Cabré decidió dar a conocer el descubrimiento de un conjunto rupestre al aire libre que había realizado en 1903 en Cretas (Teruel) (Vidiella, 1907), si bien la fecha del descubrimiento podría ser matizada (Martínez Bea, 2005). El interés e importancia del hallazgo llevó a Cabré a contactar con la máxima autoridad en materia de arte rupestre del momento, H. Breuil. Con él estudiaría el abrigo de Roca dels Moros, siendo precisamente el investigador francés quien, en plena campaña de estudio, descubriera el vecino conjunto de Els Gascons (Breuil y Cabré, 1909). A partir de 1912, la relación entre ambos investigadores se fue enfriando hasta que se rompió definitivamente en un enfrentamiento dialéctico abierto por el propio Breuil (Díaz-Andreu, 2012). En el contexto que nos ocupa en el presente apartado, el interés de estos abrigos no radica tanto en que su descubrimiento suponga la definición de un nuevo estilo artístico sino en que fueron tempranamente destruidos. El propio Cabré arrancó las pinturas de Roca dels Moros, los tres grandes ciervos y una cuarta figura de un pequeño zoomorfo, con el pretexto de que corrían peligro de ser destruidas por parte de la población local. En 1918 Cabré vendió los bloques arrancados del abrigo, junto con otros objetos, a la Junta de Museos de Barcelona. Los tres bloques correspondientes a los magníficos ciervos se exhiben actualmente en las vitrinas del *Museu d'Arqueologia de Catalunya*.

Las pinturas de Els Gascons corrieron peor suerte al haber sido casi totalmente destruidas en el proceso de arrancado o, cuando menos, al no haberse conservado con posterioridad. Según Bosch Gimpera, en el propio pueblo del que era originario Cabré se decía que éste tenía varias de las figuras que extrajo de esas rocas (Bosch Gimpera, 1924: 145), circunstancia que verifica parcialmente Vallespí cuando constata que en la casa paterna de Cabré se conservaba la figura incompleta de un ciervo procedente del abrigo de Els Gascons (Vallespí, 1954: 135).

La extracción de las pinturas por parte de Cabré fue duramente criticada por investigadores como Bosch Gimpera (1924) y Obermaier (1925).

A. Un nuevo estilo artístico

Imbuídos por el contexto científico del momento del descubrimiento y por el naturalismo de las figuraciones rupestres, estos conjuntos rupestres se definieron como paleolíticos (Cabré, 1915; Breuil, 1920; Breuil *et al.* 1912; Breuil / Lantier, 1955; Bosch-Gim-

⁷⁶ Este proyecto ha sido financiado por la Comarca del Matarranya/Matarranya y por la Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte) dentro de las Ayudas para bienes declarados Patrimonio Mundial 2015. Igualmente queremos agradecer la disponibilidad y ayuda prestada por Ana Casasús y David Arrufat de la Comarca del Matarranya/Matarranya además del *Museu d'Arqueologia de Catalunya* en los trabajos de digitalización desarrollados en el propio museo, especialmente a Àngels Casanovas y Jordi Rovira.

pera, 1970). Para ello, se apoyaron tanto en aspectos estilísticos como en la identificación de la fauna como pleistocena, llegando a subrayar que *le style des fresques animals de Cogul, comme de celles de Calapatá (Cretas), est bien le style de nos dessins quaternaires, et non pas des plus récents* (Breuil, 1909: 20).

Los nuevos conjuntos rupestres naturalistas en abrigos al aire libre suponían la aparición de una nueva región artística paleolítica en el levante peninsular en contraposición a la franco-cantábrica. Sin embargo, ya desde momentos relativamente tempranos, algunos investigadores apuntaron la posibilidad de que estas nuevas manifestaciones rupestres en abrigos al aire libre fueran post-paleolíticas (Hernández-Pacheco, 1924), tendencia que será seguida por la mayoría de los investigadores, si bien la cuestión de la filiación crono-cultural del arte levantino todavía se muestra como un debate abierto (Mateo, 2012).

En todo caso, los nuevos conjuntos con arte rupestre pintado, de estilo naturalista, postpaleolítico y localizado en abrigos al aire libre de las zonas montañosas del Este peninsular, determinan la definición de un nuevo estilo artístico prehistórico, el conocido como arte Levantino. El abrigo de Roca dels Moros tiene el honor de haber sido el primero en ser oficialmente reconocido como tal por parte de la comunidad científica y la desgracia de haber sido, precisamente, el primero en ser destruido.

B. Objetivos del proyecto

En 1998 el *Arte Rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica* (ARAMPI) fue declarado Patrimonio Mundial por la UNESCO. Su inclusión estuvo justificada por tratarse del corpus postpaleolítico de conjuntos con arte rupestre pintado más numeroso de toda Europa, aportando una visión excepcional del modo de vida de los grupos humanos en un momento transcendental de su evolución cultural⁷⁷. Si bien dentro de la denominación del bien ARAMPI se engloban conjuntos levantinos y esquemáticos, son los primeros los que aportan más a la definición global de la propia declaración como Patrimonio Mundial.

Atendiendo a la realidad referida, se pretendió desarrollar un compendio procedimental que contemplara la aplicación de nuevas herramientas de documentación geométrica y digital para tratar de recuperar los conjuntos rupestres desnaturalizados, al haber sido arrancados de su lugar original.

El objetivo no sólo pretendía ofrecer una restitución de los elementos destruidos sino que, a partir de los datos obtenidos, se pudiera conocer la evolución diacrónica de los restos pictóricos todavía conservados, la creación de modelos virtuales con el aspecto que debieron tener los yacimientos en el momento de su descubrimiento y la restauración digital de los motivos tal y como debieron de ser en el momento de ser pintados, así como la generación de aplicaciones digitales y la posibilidad de desarrollar visitas virtuales. Todo ello, con una decidida apuesta por la investigación que permitiese una mejora en la comprensión y conocimiento del bien ARAMPI, tratando de concienciar a la Sociedad acerca del valor y la fragilidad del arte rupestre (Domingo y Bea, 2016).

3.6.2.2. Los abrigos rupestres

Los abrigos con pinturas rupestres prehistóricas de Roca dels Moros y Els Gascons se localizan en la margen derecha del barranco de Calapatá, tributario por el Este del río Matarraña. Situados a escasos kilómetros al Noroeste de la localidad de Cretas, este barranco tiene un recorrido aproximado de unos 15 kilómetros, desembocando en el río Matarraña. La zona corresponde geológicamente a una cuenca de sedimentación Terciaria, posterior a la orogenia Alpina, en la que fueron disponiéndose niveles arcillosos, de margas y de areniscas en capas horizontales, disposición que se mantiene hasta la actualidad. Geológicamente este territorio presenta escasa complejidad, predominando grandes zonas de areniscas y arcillas surcadas ocasionalmente por los cursos de agua de mayor o menor entidad que han dado lugar a la deposición de materiales aluviales, esencialmente gravas, arenas y arcillas.

Resulta comprensible la falta de estudios sobre los citados abrigos dada la destrucción de los mismos, de manera que las referencias a estos, más allá de las publicaciones iniciales de Breuil y Cabré (1909) o de Cabré (1909-1910; 1915), resultan escasas y difusas. En esta línea, los trabajos de documentación se reducen a la campaña dirigida por M. Almagro para el *Corpus* de Pintura Rupestre Levantina⁷⁸, la confección de calcos de los grandes ciervos como los realizados por J. Tersol, A. Bregante (Beltrán, 1984; Díaz-Andreu, 2015), Vallespi (1954), de los motivos todavía conservados en los abrigos llevados a cabo por Utrilla *et al.*, (1986-1987), Mazo *et al.*, (1987), Grimal (1999) o Bea *et al.*, (2009).

Resulta comprensible la falta de estudios sobre los citados abrigos dada la destrucción de los mismos, de manera que las referencias a estos, más allá de las publicaciones iniciales de Breuil y Cabré (1909) o de Cabré (1909-1910; 1915), resultan escasas y difusas. En esta línea, los trabajos de documentación se reducen a la campaña dirigida por M. Almagro para el *Corpus* de Pintura Rupestre Levantina⁷⁸, la confección de calcos de los grandes ciervos como los realizados por J. Tersol, A. Bregante (Beltrán, 1984; Díaz-Andreu, 2015), Vallespi (1954), de los motivos todavía conservados en los abrigos llevados a cabo por Utrilla *et al.*, (1986-1987), Mazo *et al.*, (1987), Grimal (1999) o Bea *et al.*, (2009).

3.6.2.3. Técnicas aplicadas

A. Documentación geométrica

Las diferentes fases de estudio llevadas a cabo para la documentación de ambos abrigos rupestres, se han dividido en el trabajo de campo realizado en el barranco de Calapatá y el trabajo de documentación registrado en la vitrina expuesta del *Museu d'Arqueologia de Catalunya*. Posteriormente toda la documentación adquirida ha tenido un largo proceso de investigación e interpretación hasta obtener la restitución virtual de los dos abrigos rupestres. El resultado final se ha traducido en la generación de dos plataformas de difusión: mediante la inclusión de los resultados en una página web⁷⁹ y la creación de una aplicación en los diferentes sistemas móviles Android e IOS⁸⁰.

a) Trabajo de campo en el barranco de la Calapatá

Las técnicas empleadas tuvieron el objetivo doble de registrar geoméricamente el soporte rocoso de cada uno de los abrigos en su estado actual y además generar una serie de documentación gráfica que permitiese entender el espacio natural donde se localizan. La valla perimetral de cada uno de ellos fue respetada, dada la dificultad en su supresión virtual, sin que por ello se interfiriese en la comprensión del paisaje de cada uno de los abrigos. Esta documentación consistió en la generación de una ortofoto mediante técnicas fotogramétricas con el fin de incorporar esta textura al modelo tridimensional final y la generación de imágenes equirrectangulares perpendiculares al punto central de observación de cada uno de los paneles. En el caso de Roca dels Moros, debido a la inclinación de la superficie transitable contigua, se adaptó un sistema de pértiga desde la actual entrada perimetral del abrigo hasta lograr una visión perpendicular del panel central.

El objetivo de las técnicas empleadas proporcionó un documento geométrico totalmente reproducible en el futuro. Mediante el empleo de un sistema láser escáner terrestre de tiempo de vuelo, modelo *Leica Scanstation*, se realizó el escaneado completo a una resolución de 5 milímetros en cada uno de los abrigos rocosos. De esta manera se realizaron 8 escaneados en Roca dels Moros y 3 escaneados en Els Gascons.

78 <http://www.prehistoria.ih.csic.es/AAR/menu> (último acceso: septiembre de 2017).

79 <http://3dscanner.es/matarranya/> (último acceso: septiembre de 2017).

80 <http://3dscanner.es/matarranya/app> (último acceso: noviembre de 2017).

77 <http://whc.unesco.org/en/list/874> (último acceso: noviembre de 2017).

dos en Els Gascons con el fin de minimizar zonas con sombras en la nube de puntos resultante. La textura, aunque fue adquirida por la cámara del escáner, se sustituyó por un sistema complementario de adquisición de textura con una cámara réflex concordando ambos ejes para evitar errores de paralaje.

Posteriormente se utilizó una estación total para fijar un sistema de coordenadas local con el propósito de ampliar en un futuro la zona documentada así como de controlar cualquier patología estructural que pudiese sufrir el soporte rocoso. Además, mediante la toma de las dianas del escáner, permitió registrar las diferentes nubes de puntos de cada estacionamiento, pudiendo controlar el error final de alineación del modelo.

Por último, se empleó un sistema de adquisición de imágenes mediante pértiga regulable *Manfrotto 270BSU* con una altura máxima de 4,77 metros y cámara *Canon EOS 6D* con objetivo *Canon EF 24mm f/2.8* y *Canon EF 24-105mm f/4L IS USM*. El registro del arte rupestre, tanto en cuevas como en abrigos, siempre incluye una notable adaptación al medio físico y en muy pocas ocasiones las condiciones son parecidas. En consecuencia, se optó por la adaptación de un sistema de registro mediante una pértiga. La incorporación de esta técnica permitió un barrido regular en la toma de imágenes, respetando la misma distancia y altura al soporte rocoso y controlando cada uno de los parámetros de la cámara mediante un sistema de conexión remoto.

b) Toma de datos en el *Museu d'Arqueologia de Catalunya*

Las tres figuras más representativas del panel central de Roca dels Moros están expuestas en una vitrina en el *Museu d'Arqueologia de Catalunya* adheridas a un tipo de soporte que intenta reproducir artificialmente tanto la disposición que debieron de tener los motivos en el panel original (conocida exclusivamente por los calcos ofrecidos por Cabré) como el tipo de soporte rocoso original. La cuarta figura es la única de las cuatro representaciones pictóricas arrancadas del abrigo que no se encuentra, sin duda, debido al mal estado de conservación en el que se encuentra. Este motivo aparece fragmentado en al menos cuatro partes ensambladas en una especie de marco de yeso. En cualquier caso, su fragmentación y el desvaído de la pintura hace completamente imposible apreciar cualquier parte reconocible de la figura original.

Debido a las dimensiones de la vitrina y su morfología abocinada se determinó que la técnica más propicia consistía en la utilización de un escáner de luz blanca estructurada portátil. Este escáner trabaja a una distancia media óptima de 70 centímetros y, debido a su

utilización manual, permite recorrer exhaustivamente la superficie de cada figura y los bordes laterales que, sin duda, fueron fundamentales para realizar una aproximación del encaje digital con el soporte original de donde fue extraído cada bloque. La utilización de este tipo de sistema de escáner de luz blanca estructurada representa una clara ventaja frente a los sistemas de correlación automática de imágenes fotogramétricos de objeto cercano ya que proporciona una malla directa, sin necesidad de obtenerla a partir de una nube de puntos, proporcionando un modelo mallado ordenado y prácticamente sin alteraciones significativas.

B. Combinación de la información gráfica y geométrica

Independientemente de la metodología empleada en la realización del calco, y de la discusión abierta entre calcos manuales y calcos digitales (Rogerio, 2008) existe una grave problemática que tiene que ver con la plasmación en papel –formato 2D– de los calcos y su publicación.

Tratando de conjugar información gráfica bidimensional (fotografía y calcos) y tridimensional (modelos 3D) para lograr llevar a cabo la restitución virtual de los conjuntos rupestres destruidos, se dividió el trabajo de postproceso en las siguientes fases:

- a) Tratamiento de las imágenes para la generación de los calcos, dividiéndolo para ello en tres etapas cronológicas diferentes que explicasen de un modo gráfico y geométrico cuáles fueron los cambios más notables entre el momento de la representación, el descubrimiento y su estado de conservación actual.

Para el mapeado de los diferentes modelos con los calcos se trabajó sobre la textura obtenida de la ortofoto. En consecuencia, el tratamiento de los calcos se realizó sobre la misma textura, para evitar algún tipo de disfunción en la correlación cuando visualizamos el modelo tridimensional y alternemos la fase cronológica en la aplicación.

- b) Creación y combinación de los modelos 3D. El tratamiento en ambos abrigos fue completamente diferente. En el caso de Els Gascons, una vez creada la malla del estado actual, se interpoló la parte de la extracción central y posteriormente se encajó el calco de Cabré como única documentación existente.

En cambio, en Roca dels Moros, las marcas de extracción se interpolaron teniendo en cuenta la superficie de cada uno de los modelos individuales registrados en el museo. Sin embargo, fue imposible calcular el volumen individual y total con certeza, puesto que las figuras están totalmente adheridas al soporte de la antigua vitrina. Analizando la morfología de los paneles con varias grietas y la profundidad del negativo de su soporte natural originario, nos hace suponer que, muy posiblemente, algunas de ellas fueron ensambladas en la vitrina ya fragmentadas.

- c) Simplificación de las mallas. Una vez creados los modelos tridimensionales, se generaron diferentes archivos tridimensionales en formato estándar *vml* y *obj* de los cuales se fueron reduciendo el número de triángulos con el fin de hacer unos modelos livianos, fáciles de abrir tanto en la versión web como en los dispositivos móviles de las diferentes plataformas.

- d) Compilación de la información como herramienta de difusión. El objetivo último del proyecto era la creación de una aplicación sintética que ofreciese, de modo claro y conciso, la descripción de cada abrigo rupestre con diferentes posibilidades de visualización e información. De este modo, se



FIG. 174. Proceso de digitalización mediante un escáner 3D de luz blanca estructurada en el *Museu d'Arqueologia de Catalunya*.

seleccionaron tres canales diferentes de distribución a través de las plataformas Android, IOS y por último mediante una página de acceso web.

Las diferentes secciones en cada uno de los canales son idénticas, y quedan establecidas en diferentes grados de información para cualquier categoría de especialización, incorporando una organización dividida en varios apartados: historiografía de las investigaciones, descripción estilística por paneles y figuras, acceso a los modelos tridimensionales restituidos ya actuales y simulación de fases cronoculturales.

La idiosincrasia del procedimiento empleado permitió establecer un conjunto de posibilidades de visualización que redundan en un carácter original, resumido en los siguientes puntos:

- a) Visualización de la ortofoto de cada abrigo plenamente restituida pudiendo extraer información historiográfica, estilística e interpretativa.
- b) Visualización de los modelos tridimensionales en el caso de Roca dels Moros del abrigo completo restituido, su aspecto actual y de cada una de las figuras escaneadas en el *Museu d'Arqueologia de Catalunya*, incluyendo la cuarta figura no expuesta. En el caso de Els Gascons, dada la particularidad de no conservarse las partes extraídas, sólo podemos visualizar la comparación entre el modelo 3D restituido y su estado actual.

Por último, la plataforma gratuita seleccionada por su versatilidad fue *Sketchfab*, donde están incluidos los modelos tridimensionales. Esta plataforma está basada sobre el estándar en navegadores WebGL (*vid.* apdo. 3.7.2) y permite además la visualización estereoscópica de los modelos mediante las gafas de realidad inmersiva *Oculus Rift* modelo 1 y 2. Esta posibilidad permite al espectador contemplar el espacio de una manera totalmente inmersiva en todos los modelos tridimensionales.

- c) Imágenes equirectangulares esféricas para entornos web que también interactúan con los giróscopos de los dispositivos móviles, pudiendo de igual modo contemplar (1) el estado original, (2) el del momento en que fueron encontradas y (3) el actual, incorporando los calcos que quedan.

C. Técnicas de restauración digital

En el proceso de estudio referido ni la fotografía infrarroja ni la multispectral (*vid.* apdo. 2.3.3.2.) han ofrecido resultados satisfactorios o que mejoraran los obtenidos con fotografía digital convencional y su posterior tratamiento mediante diferente *software*. Así, al extendido tratamiento digital de imágenes se ha unido, como herramienta complementaria, el uso del plugin *DStretch* desarrollado para el programa *ImageJ* (Harman, 2005). Este *software* permite la mejora del visionado de las imágenes rupestres mediante el aumento de la saturación de los colores, ayudando a obtener una visión más clara de la composición. El proceso consiste en la aplicación de la transformación Karhunen-Loève (KLT) a los colores de una imagen. El programa permite emplear diferentes cálculos que analizan una matriz de covarianza para los colores representados en la imagen. La transformación se aplica a la totalidad de la imagen, lo que permite la exclusión de aquellas zonas que no tienen relación con el área que interesa para la investigación. Atendiendo a este aspecto, resulta muy interesante que se puedan obtener diferentes resultados seleccionando diferentes partes de la imagen⁸¹.

81 La utilización de este algoritmo de decorrelación se ha utilizado en la generación de los modelos tridimensionales *online* de cada una de las representaciones de las manos paleolíticas del proyecto HANDPAS *vid.* apdo. 1.3-6.1.

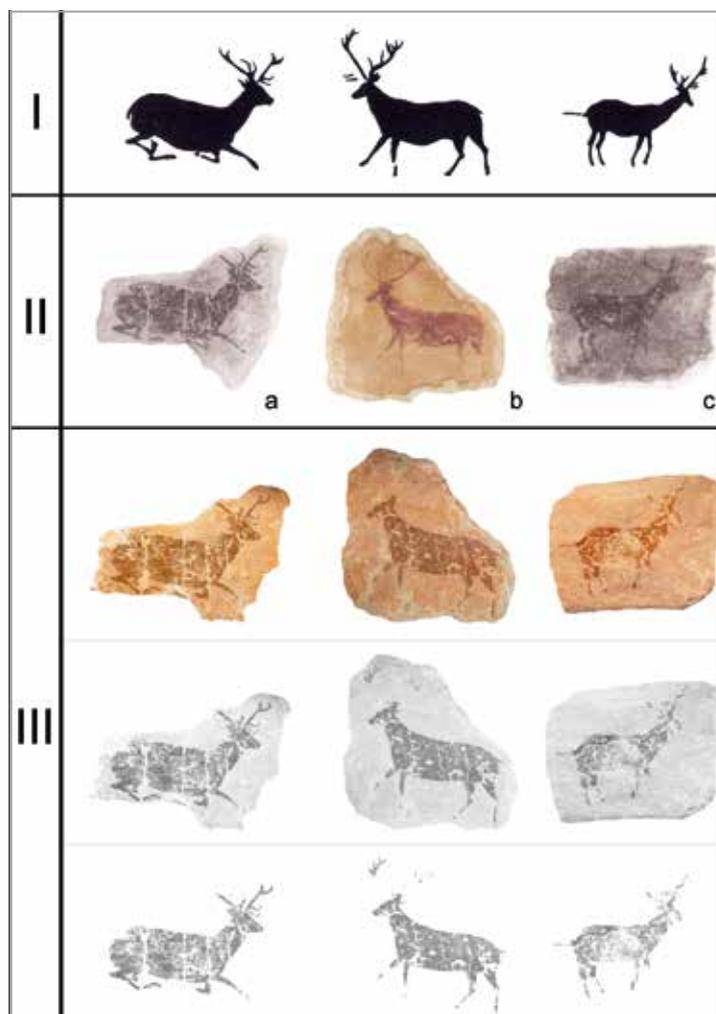


FIG. 175. Calcos previos de los ciervos de Roca dels Moros: I. Según Cabré 1915; IIa. según J. Tersol; IIb y c. según A. Bregante (imágenes a partir de Díaz-Andreu, 2015: 260); III. Proceso de obtención del calco digital: 1. Calco en color; 2. Calco en blanco y negro; 3. Calco con el motivo aislado del soporte (Bea / Angás, 2017: 163).

El tratamiento de imágenes mediante este programa, o similares, resulta muy extendido en los estudios sobre arte rupestre tanto para pintura (Dodd, 2013) como en su aplicación para el estudio de grabados (Caldwell / Botzojorns, 2014; Defrasne, 2014; Robin, 2014). Mediante este procedimiento se han elaborado los calcos digitales cuya realización ha resultado en extremo compleja debido a la localización de las figuras (insertas en una vitrina) y, sobre todo, al mal estado de conservación que presentan las mismas.

La confección de los calcos digitales ha permitido observar ciertas diferencias con respecto a los calcos de los motivos realizados por Cabré, Bregante y Tersol. En todos los casos (atendiendo siempre a los elementos conservados de Roca dels Moros) los motivos en los calcos previos cuentan con unas dimensiones ligeramente mayores que las que presentan en los calcos digitales y, en algún caso, determinadas partes de los animales presentan una disposición diferente. Este hecho se explica por la metodología empleada, sobre todo en el caso de los elaborados por Cabré, quien empleó la técnica del calco directo. El mayor inconveniente de este sistema es que la superficie rocosa sobre la que fue realizado el motivo rupestre y sobre la que se superpone el papel no es lisa ni homogénea. El volumen de la roca determina que una vez concluido el calco y extenderse el papel con el dibujo éste adopta una disposición bidimensional (papel en superficie plana) con unos valores reales tomados directamente de una fuente tridimensional (soporte), lo que genera la distorsión aludida si no se representa con la misma proyección.

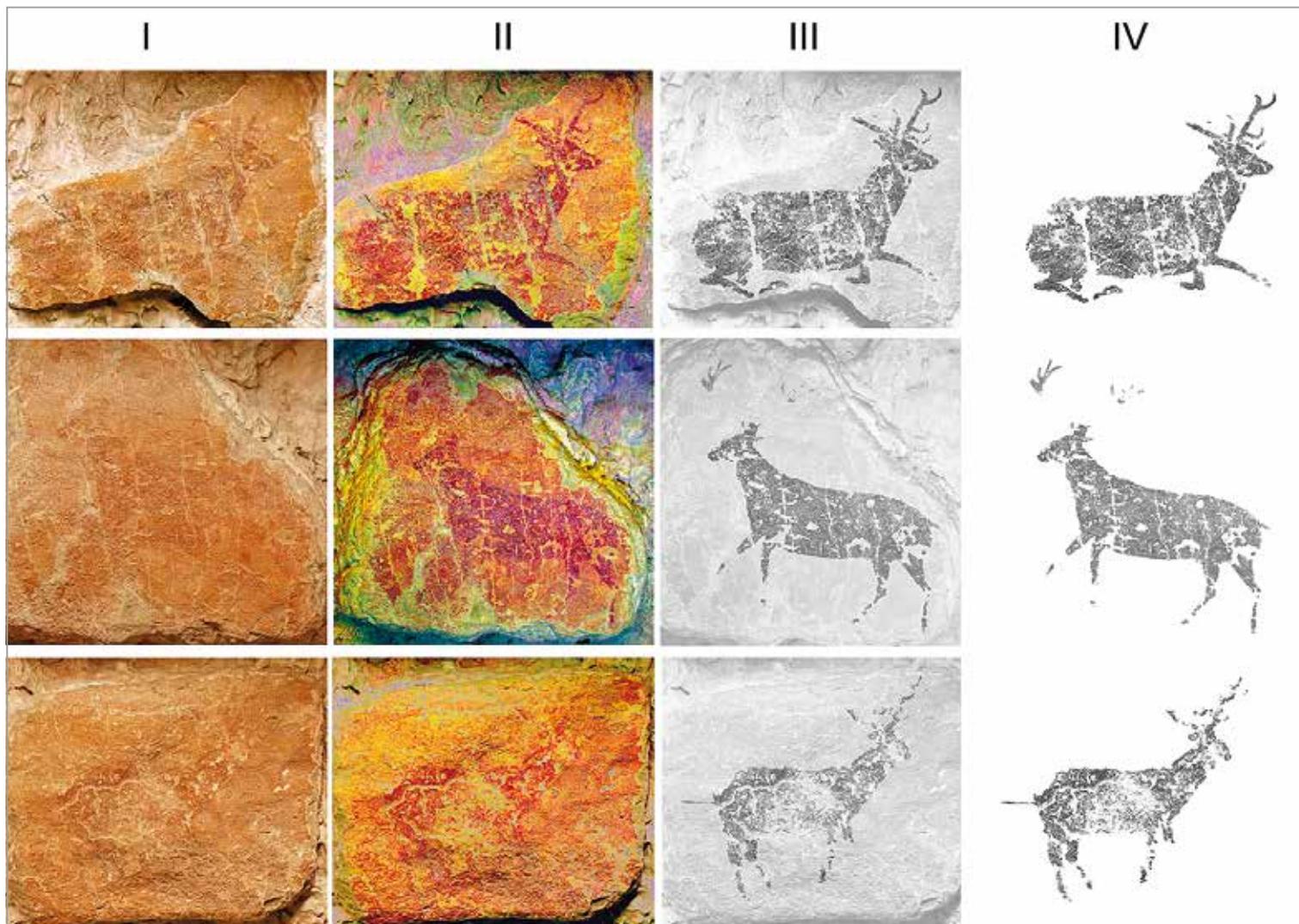


FIG. 176. Proceso de obtención del calco digital de los ciervos de Roca dels Moros: I. Fotografía original; II. Tratamiento mediante DStretch; III. Calco en blanco y negro con representación del soporte; IV. Calco del motivo aislado del soporte (Bea / Angás, 2017: 163).

El trabajo con calcos digitales permite eliminar esta problemática al realizarse fotografías totalmente ortogonales al motivo, haciendo desaparecer el factor de la superficie tridimensional y obteniendo un calco con el punto de vista real del observador. La restitución y generación de una ortofoto sin distorsiones de este calco digital (igualmente bidimensional) en un modelo en tres dimensiones es posible gracias a su superposición sobre el modelo tridimensional del soporte escaneado y a la toma de puntos de control que permiten situar perfectamente el motivo en un contexto espacial tridimensional.

La minuciosidad de la técnica aplicada ha permitido observar una evidente degeneración del estado de conservación de las pinturas, comparando las partes conservadas de las mismas y representadas en los calcos antiguos con respecto a los actuales. Pero la fase de obtención de los calcos digitales no sólo supone un elemento preciso de conocimiento acerca del estado de conservación actual de los motivos, sino que supone la primera fase de la confección de los modelos restituidos digitalmente.

En la restitución virtual realizamos por separado el trabajo de «restauración» digital del motivo pictórico y del soporte a partir del registro fotográfico y tridimensional del mismo. Durante la fase de restitución integral y elaboración de los modelos virtuales los documentos gráficos referidos fueron integrados.

El tratamiento digital de la imagen permite, mediante el uso de herramientas específicas, confeccionar restituciones virtuales de aque-

llas partes que por diferentes grados de erosión ya no se conservan en los motivos rupestres. El uso de estas herramientas gráficas permite además dotar de realismo a los modelos, conservando valores de textura de la roca. Ensayos similares al propuesto se han llevado a cabo con éxito en algunos conjuntos rupestres (Solís, 2009; Bea / Angás, 2017), pero también en otros contextos patrimoniales dispares: pintura sobre lienzo y madera (Cornelis *et al.*, 2013; Pei *et al.*, 2004), fibras vegetales (Oka / Perry, 2002) o soporte pétreo (Dumazet *et al.*, 2008; Martín *et al.*, 2014).

En todo caso, y a pesar de tratarse de una restitución virtual, hemos preferido abordar el estudio desde una perspectiva basada en intervenciones propuestas por el movimiento «anti-restauro» y, de forma natural, en su evolución en las más recientes de W. Morris, C. Boito y C. Brandi⁸² (Brandi, 2007; Graham / Howard, 2008). Así, todos los elementos reintegrados en los paneles decorados, tanto los pictóricos como el soporte rocoso, cuentan con un cierto grado de diferenciación visual con respecto a los originales que permiten al espectador conocer qué elementos son los originales y cuáles los restituidos.

82 La base de ésta aparecerá recogida (ampliada y mejorada) por Cesare Brandi, cuyo proyecto se define en la Carta de Atenas (1931), obteniéndose un refrendo generalizado en numerosos textos fundamentales recogidos con posterioridad en la legislación internacional, como la Carta de Venecia (1964); Carta Italiana del Restauro en Roma (1972); la Carta de Ámsterdam o Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico (1975); el Convenio de Granada (1985) o los más recientes de la Carta del Patrimonio Vernáculo (1999) o la Carta de Cracovia (2000).

Como se puede apreciar en las comparativas de los calcos de Cabré y los elaborados para este estudio, los motivos presentan algunas diferencias notables, sobre todo en el aspecto y grado de conservación de determinados elementos y detalles. En este sentido, cabe suponer que los motivos debían de poder verse mejor y más completos en el momento de su descubrimiento y que, sin duda, el proceso de arrancado y posterior recomposición en su actual lugar de exhibición, ha deteriorado gravemente las pinturas. Se observan grietas que parecen sugerir la posibilidad de que las figuras fueran extraídas en diferentes fragmentos para ser posteriormente compuestas (*vid. supra*). Esta circunstancia es innegable en el caso del supuesto pequeño bóvido, cuyos fragmentos se han dispuesto en una especie de plancha de yeso, asimismo la superficie de la roca aparece brillante, bien porque se haya pulido bien porque se haya impregnado de algún tipo de laca o fijador. En cualquier caso, el motivo resulta totalmente irreconocible observando el calco aportado por Cabré. Tal es su grado de deterioro que resulta imposible identificar el motivo, por lo que no se ha podido proceder con la elaboración de un calco digital, debiendo dar la figura por perdida, hecho que explica, igualmente, que el motivo no fuera fotografiado en el *Corpus de Pintura Rupestre Levantina Archivo Martín Almagro Basch*. Esta circunstancia habría determinado que, en la restitución virtual del conjunto decorado, habríamos tenido que recurrir al calco realizado por Cabré, al ser la única fuente gráfica conservada de esta figura, tal y como hemos hecho para los motivos de Els Gascons. Sin embargo, el análisis del conjunto nos ha permitido plantear una nueva interpretación para este motivo, de manera que en lugar de un bóvido consideramos que podría tratarse de los restos de un jabalí, lectura que hemos traducido en la restitución digital de la figura.

Para realizar la restitución virtual y digital de los motivos de Roca dels Moros y Els Gascons se recurrieron a diferentes fuentes de información gráfica. Por una parte, haciéndolo a las propias figuras conservadas, generando un archivo fotográfico actualizado de alta resolución. Por otra, se realizaron calcos digitales de cada motivo y se emplearon diferentes tratamientos de imagen para mejorar la visibilidad de las pinturas. Junto a estos procedimientos se recurrió

a la revisión de fotografías antiguas (*Archivo Martín Almagro Basch*), así como a los calcos originales de Cabré, Bregante y Tersol, y a las descripciones realizadas en las primeras publicaciones al respecto (Cabré, 1909, 1915; Breuil y Cabré, 1909).

Junto a estos elementos gráficos, la reconstrucción digital se llevó a cabo también mediante el análisis de otras manifestaciones rupestres afines a las que centran el proyecto, y cuya conservación aporta información preciada para tratar de lograr una restitución morfológica fiel al original. Así, y para los diferentes motivos contenidos en ambos conjuntos, inspiramos la restitución virtual de los mismos o de partes de éstos según el siguiente cuadro:

La totalidad de los conjuntos rupestres que nos sirvieron para guiar la restitución virtual de los abrigos analizados se localizan en la misma zona geográfica y de influencia temático-estilística que los conjuntos de Roca dels Moros y Els Gascons. El análisis estilístico de las figuraciones reveló, además, unas influencias meridianas, documentándose motivos prácticamente idénticos. Tan sólo las supuestas cabras aludidas por Cabré en la zona superior izquierda de Els Gascons no se restituyeron en el estudio, ya que su identificación real con tales cabras nos presentó serias dudas. Los exiguos restos conservados y reproducidos por el propio Cabré y la posibilidad de que en realidad pudieran tratarse de restos de motivos con una temática totalmente diferente aconsejó la cautela en su reproducción. Por ello, en la recreación virtual del conjunto (tanto de la plasmación de los calcos como en la vista del conjunto restituido) optamos por dejar los calcos originales de Cabré sin intervención alguna.

El procedimiento de restitución se llevó a cabo en diferentes fases, procediendo en primer lugar a la restitución del soporte rocoso sobre ortofotografías y, posteriormente, a la restitución de las figuras a partir de los calcos. Este procedimiento se realizó de forma individualizada para cada una de las representaciones conservadas en los conjuntos rupestres, aplicándose de forma específica sobre la restitución del soporte rocoso.

Las restituciones de los motivos rupestres se realizaron respetando siempre los restos conservados, su estilo y dimensiones. En aquellos casos en los que los restos habían desaparecido total-

TABLA 13

Indicación de los motivos sobre los que se han basado las restituciones virtuales de los de Roca dels Moros y Els Gascons

CONJUNTO RUPESTRE	MOTIVOS RESTITUIDOS	CONJUNTOS RUPESTRES CON MOTIVOS USADOS COMO PARALELOS PARA LA RESTITUCIONES PROPUESTAS
Roca dels Moros	Ciervos	Val del Charco (Alcañiz) Plano del Pulido (Caspe)
Roca dels Moros	Arqueros zona superior izquierda	Els Secans (Mazaleón)
Roca dels Moros	Jabalí	Val del Charco (Alcañiz)
Els Gascons	Ciervos	Roca dels Moros (Cretas) Val del Charco (Alcañiz)
Els Gascons	Cabra inferior izquierda	Val del Charco (Alcañiz) El Arquero del Pudial (Ladruñan, Castellote)
Els Gacons	Cabra a la carrera	Val del Charco (Alcañiz) Cova Remigia (Ares del Maestre)
Els Gascons	Cabra inferior derecha	Val del Charco (Alcañiz)
Els Gascons	Pequeño arquero a la carrera	Roca dels Moros (Cretas)
Els Gascons	Arqueros estáticos	El Arquero del Pudial (Ladruñan, Castellote) Los Chaparros (Albalate del Arzobispo) Els Secans (Mazaleón)

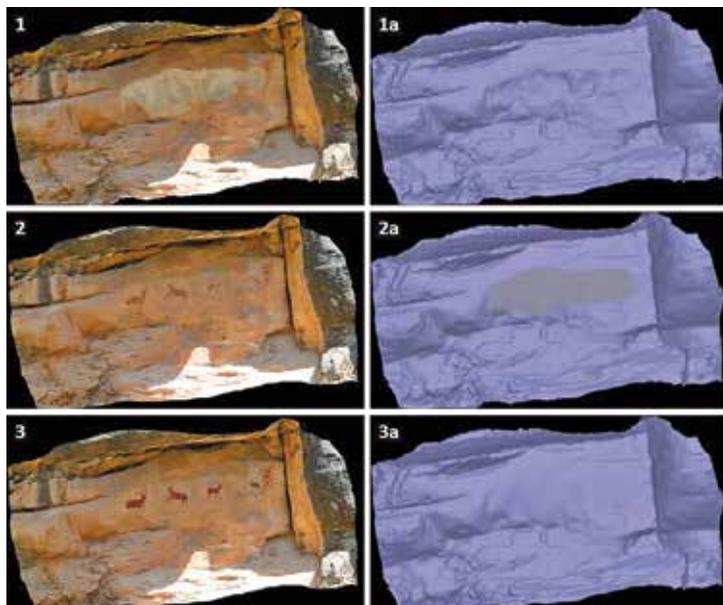


FIG. 177. Hipótesis del proceso de reconstrucción de Roca dels Moros: 1. Aspecto actual; 2. Localización de los calcos sobre el soporte restituído (momento del descubrimiento); 3. Reconstrucción digital de las pinturas y del soporte en el momento de su plasmación. Derecha 1a, 2a, 3a: proceso de reconstrucción del modelo tridimensional sin textura (Bea / Angás, 2017: 165).

mente recurrimos a los calcos de Cabré (1909 y 1915). No obstante, conjuntos rupestres descubiertos con posterioridad al estudio del arqueólogo de Calaceite nos permitieron concretar o matizar algunos aspectos relativos a determinados motivos. Esta circunstancia se presentó esencialmente en las representaciones humanas que pudimos completar a partir de las observaciones realizadas en motivos afines de abrigos geográficamente cercanos. Así, la temática y estilo eran plenamente coincidentes en los casos de los arqueros de Roca dels Moros, para los que encontramos perfecto paralelo en el ya desaparecido de Els Secans, o para los arqueros de Els Gascons cuya pose, estilo y temática eran plenamente coincidentes con los observados en el motivo central del abrigo del Arquero del Pudial (Bea, 2012b) o en otro de Los Chaparros (Beltrán, 2005).

Con todo, seguimos los modelos de los calcos de Cabré, al ser el único referente existente sobre estos motivos, de manera que preservamos en la visualización digital el componente estilístico aportado por la publicación original, de manera que detalles que el propio Cabré no pudo ver, por encontrarse ya desaparecidos, pero que restituyó o perfiló en sus calcos se modificaron o complementaron. Así, Cabré representó los dos arqueros de Els Gascons en una pose exactamente igual y con la misma disposición de arcos, a pesar de que en el caso del arquero de la derecha no se conservaba. A partir de los restos conservados en los conjuntos de El Arquero del Pudial, y de Los Chaparros, adaptamos la disposición de los arqueros restituídos, atendiendo a algunos detalles figurados en los citados conjuntos, con el ánimo de contar con una mayor representatividad de actitudes en figuraciones estilísticamente afines.

Algo similar ocurre con las figuraciones animales. De esta manera, atendiendo a la temática general de ambos abrigos (al margen de los grandes ciervos) encontramos que son las cabras de pequeño tamaño los animales que centran el discurso expositivo. Así, interpretamos el motivo de «zoomorfo indeterminado» de Roca dels Moros, basándonos para su restitución en modelos de Val del Charco del Agua Amarga (Bea, 2013). En el caso de las cabras de Els Gascons, completamos las figuras a partir de la lectura aproximada de temáticas cercanas, como la cabra con patas replagadas

del abrigo del Arquero del Pudial (Bea, 2012b). Para las otras dos figuras de cápridos del citado abrigo también encontramos buenos paralelos en Val del Charco del Agua Amarga, con actitudes plenamente coincidentes.

Mención especial merece la denominada representación de «pequeño bóvido» del abrigo de Roca dels Moros. Si bien en el estudio preliminar del conjunto se comenta que podría tratarse de un jabalí, lo cierto es que Breuil y Cabré (1909) se deciden por su atribución como bóvido aludiendo a la longitud de la cola conservada. Ciertamente, los restos conservados (en la actualidad) impiden realizar cualquier apreciación al respecto de este motivo, siendo también compleja su lectura en el momento del descubrimiento, basándose exclusivamente en restos escasos, mal conservados e inconexos que, además, deberían completarse con zonas grabadas (no observadas en la actualidad) para poder interpretarse como bóvido. A tenor de estas dificultades y de la nula figuración de pequeñas representaciones de bóvidos en la zona alta del Guadalupe, nos planteamos la interpretación de los restos como los de un jabalí. Las proporciones de los restos conservados y la representación de un ejemplar en Val del Charco (yacimiento con el que los conjuntos de Roca dels Moros y Els Gascons presentan más afinidades) determinaron nuestro posicionamiento.

3.6.2.4. Resultados

A pesar de la buena calidad del material gráfico resultante, los calcos finales mediante el procedimiento referido continuaban siendo imágenes bidimensionales, aunque se incluyesen en los mismos la representación del soporte. Para tratar de ofrecer la mayor información posible, se recurrió en ocasiones a la documentación geométrica del conjunto y, una vez establecida ésta, a insertar en la imagen tridimensional resultante los calcos de los motivos rupestres. Sin embargo, nuevamente se chocó con la misma problemática: la publicación de los resultados siguió siendo bidimensional y los archivos tridimensionales generados no resultaban, por lo general, accesibles a todo el público.

Atendiendo a esta realidad, el protocolo de documentación y de presentación de resultados que seguimos trató de conjugar diferentes técnicas y tipología de archivos documentales para cumplir con los objetivos marcados a continuación:

- a) Generación de una documentación digital gráfica y geométrica, que nos permitirá comprobar cualquier alteración y servir de base para cualquier otro trabajo de investigación futuro a modo de repositorio digital.
- b) Investigación, tanto en la corroboración y combinación de las técnicas empleadas en el paraje natural, en el museo y en el procesamiento como en las diferentes simulaciones realizadas tanto en el soporte como en el apartado gráfico.
- c) Difusión, quizá el apartado más complejo puesto que realizar «restituciones virtuales» entraña siempre un factor de riesgo entre la comunidad científica de acuerdo al método utilizado. Sin embargo, debe constituir un factor de interés para el público no especializado que repercuta, de algún modo, en el tejido turístico, y por ende socio-económico, de una comarca.

Si analizamos únicamente la repercusión turística, conseguimos diferentes sinergias en la restitución digital de este patrimonio «destruido» y las nuevas posibilidades de visualización social. De hecho, hace factible el empleo de esta herramienta digital *in situ*, previamente descargada en un dispositivo móvil, en una zona que no existe cobertura de telefonía móvil, permitiendo contemplar en el mismo espacio natural cuál fue el proceso que sufrió cada uno de los abrigos.

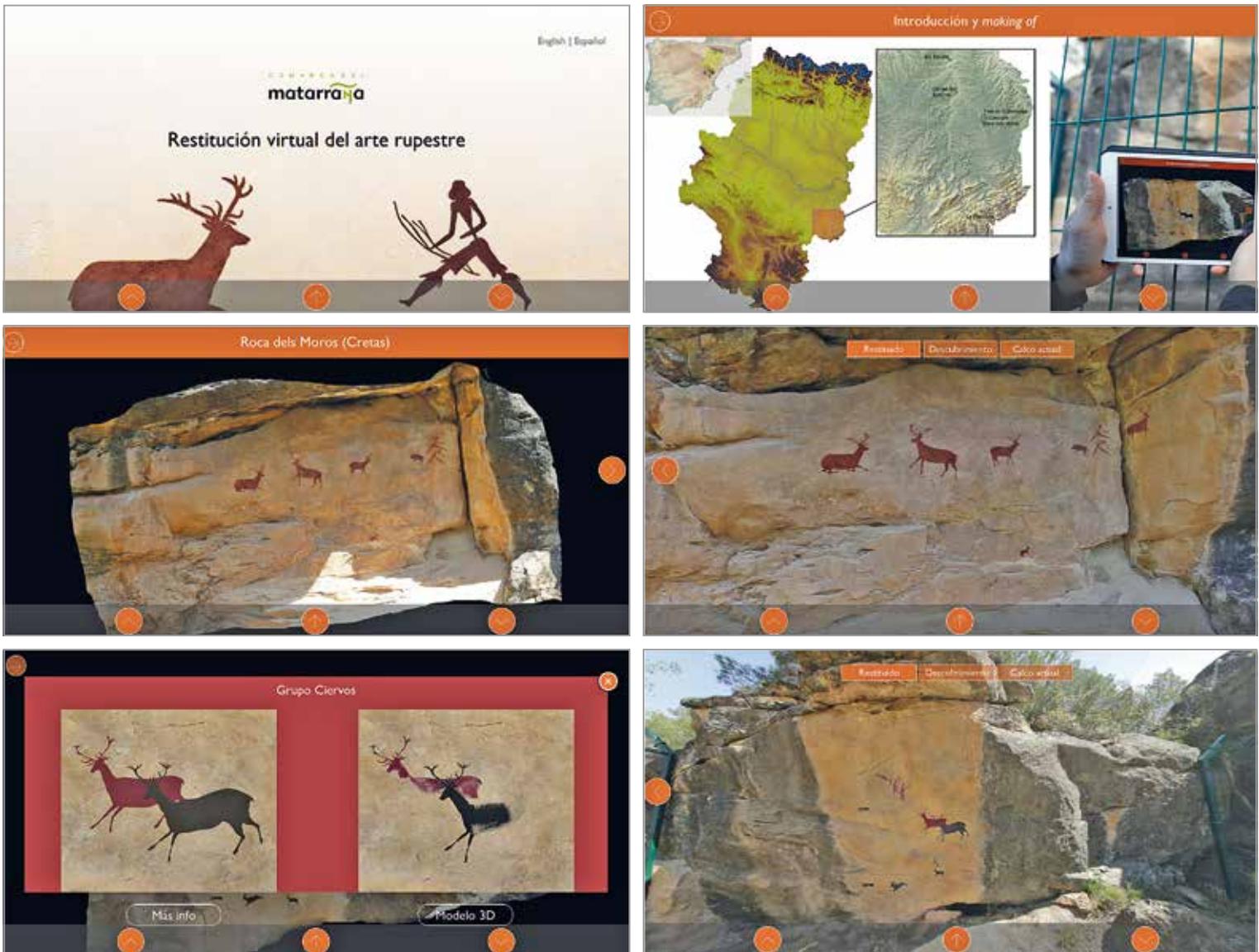


FIG. 178. Ejemplos de las pantallas de acceso a la aplicación para Android e IOS «Matarranya Rock Art» y vinculación con modelos 3D de los abrigos rupestres de Roca dels Moros y Els Gascons (Cretas, Teruel). Aplicación descargable en: <http://3dscanner.es/matarranya/app> y <http://3dscanner.es/matarranya> como versión web de consulta para PC.

Asimismo, proporciona un incentivo para todo aquel que descargue la aplicación y quiera contemplar en primera persona la zona rupestre. Y, por último, en cualquier caso proporciona por sí solo una herramienta de difusión del arte rupestre en cada uno de las plataformas de distribución seleccionadas.

Si tenemos en cuenta la diversificación tecnológica y el uso de las aplicaciones actuales, estas herramientas se definen, en buena parte, por su utilidad para la búsqueda de nuevas percepciones sensoriales, permitiendo al espectador conjugar la virtualidad con el espacio físico real. En esta línea se constituye la materialización de

TABLA 14

Formatos métricos y gráficos	<ul style="list-style-type: none"> • Nubes de puntos con color y reproducción de cada escaneado en formato JSON relacionando la imagen con cada uno de los millones de puntos (coordenadas x, y, z, RGB) • Conjunto de planos de cada estación rupestre: plantas, alzados y secciones. • Formatos de intercambio <i>PDF3D</i> (3D), <i>vrmf</i>, <i>obj</i>, etc.
Formatos gráficos (derivados de aplicaciones métricas)	<ul style="list-style-type: none"> • Imágenes esféricas captadas por el escáner sin información métrica. • Localización de cada conjunto e imágenes exteriores del abrigo
Información sobre la trazabilidad de los datos almacenados	Sobre cada fichero html se incorpora una plantilla de metadatos con la información del registro. Esta plantilla se puede modificar y extraer la información a través de cualquier programa gratuito de edición de metadatos

uno de los objetivos primordiales de aplicación de la metodología que proponemos: obtener un equilibrio entre la información científica y su propia difusión a través de un entorno web y aplicación para dispositivos móviles. Este factor facilita el intercambio de datos así como la posibilidad de interactuar con el conjunto rupestre. La adaptación de los resultados a este tipo de entorno la hemos concebido como la continuación natural del proceso metodológico definido con anterioridad. Para ello, los resultados han sido adaptados a formatos compatibles con la mayoría de *software* libre a nivel de usuario, atendiendo a la transformación de los ficheros a diversos formatos compatibles (véase cuadro adjunto). Este aspecto ha determinado que, en ocasiones, resulte necesario efectuar una compresión y reducción de la calidad en la representación de los elementos gráficos en beneficio de una mayor difusión social en un entorno digital.

3.6.2.5. Conclusiones

Para el desarrollo de la metodología propuesta se ha establecido un modo de combinación de las nuevas tecnologías de registro para el arte rupestre, con un soporte digital web de libre acceso. Ofreciendo herramientas accesibles para que cada usuario pueda interactuar con la información y asegurar una disposición de la información registrada, siguiendo un único método que integre y relacione de un modo recíproco un registro científico y divulgativo.

Todo ello nos lleva a reflexionar acerca de los nuevos soportes en la documentación y difusión científica del arte rupestre. En este sentido, la línea de investigación y procesos que hemos expuesto tiene como objetivo esencial la propuesta de un método «democratizador» del resultado tridimensional, en línea con otros autores (Roecker, 2008) para la conservación del Patrimonio. En este sentido, del mismo modo que se genera una documentación con los datos registrados, que equivaldría al almacenamiento de la información registrada, hemos buscado herramientas que sean válidas para su aprovechamiento en plataformas digitales de acceso global.

El soporte que se ha utilizado para su difusión ha sido la propia web junto con una aplicación para dispositivos móviles. Sin embargo, somos conscientes de que existen condicionantes que, de algún modo, limitan una plena posibilidad de interactuar y de visualización. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación física del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, que hace necesario comprimir la información prescindiendo de resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; (3) la adopción de formatos que resulten fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario; (4) la gran variación tipológica de dispositivos móviles existentes que determina un grado de visibilidad de la información gráfica y teórica que puede resultar muy distinto según modelos; (5) todo ello, sin desatender la necesidad de almacenar con seguridad los datos, permitiendo además vincular modelos 3D con bases de datos bidimensionales (Remondino, 2014).

El método de trabajo propuesto (realización de calcos digitales, escaneado tridimensional del soporte, montaje de los calcos al modelo tridimensional, generación de archivos compatibles, presentación y difusión a través de plataformas web) permite acercar el carácter tridimensional del arte rupestre por dos vías: una primera bidimensional, mediante diferentes imágenes (fotografía, calcos) de cada panel, escena o motivo sobre ortofotografías rectificadas, y una segunda tridimensional, facilitando el acceso a archivos colgados en servidores como repositorio digital de libre acceso.

La aplicación de este sistema integrado de documentación y difusión representa tan sólo una primera aproximación al empleo de un método con muchas posibilidades dedicadas a la generación

de «modelos predictivos rupestres» aplicable tanto a cuevas como abrigos. Una automatización del método permitiría que se pudiesen incluir todas las variables que fuesen susceptibles de afectar a cada bien rupestre y se alcanzasen simulaciones temporales gráficas y geométricas que determinasen los diferentes procesos tanto en la realización como el deterioro sufrido. Sin duda, son planteamientos mucho más complejos y ambiciosos que necesitan tener en cuenta un conjunto de variables por consensuar entre un equipo interdisciplinar de prehistoriadores, restauradores, químicos, biólogos, geólogos, etc. Estas preconizaciones representarían un nuevo campo de aplicación en la conservación preventiva del arte rupestre entre los procesos de documentación y de difusión.

3.6.3. Arquitectura: El acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.6.3.1. Propuesta de reconstrucción tridimensional del acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)⁸³

Los restos arqueológicos de Los Bañales⁸⁴ se encuentran situados a 14 km. de Uncastillo, en la comarca zaragozana de Las Cinco Villas. Las recientes excavaciones y la revisión de las antiguas campañas han confirmado la existencia de un asentamiento anterior, quizá un *oppidum*, que fue amortizado, en parte, por la construcción del foro de la ciudad⁸⁵.

De acuerdo a las excavaciones dirigidas por Javier Andreu, se ha podido abandonar la antigua idea de Lostal⁸⁶, para quien Los Bañales no sería propiamente una ciudad, sino un hábitat disperso en forma de *villae*. Estas se levantarían, según este autor, sobre los relieves residuales de la Val y del valle paralelo (río Riguel), aglutinando un núcleo monumental en llano, a los pies del cerro llamado El Pueyo. Asimismo, a esta hipótesis se sumó también Beltrán⁸⁷, añadiendo que en el cerro del Pueyo viviría la plebe mientras que las *villae* estarían ocupadas por la clase ciudadana más alta. Actualmente, estamos en condiciones para afirmar que el yacimiento se configuró conforme a los modelos urbanísticos exportados de la Península Itálica, contando con foro, termas y acueducto.

La plaza monumental pública, realizada sobre una *substructio de opus quadratum*, se comenzaría a construir⁸⁸ hacia el cambio de Era⁸⁹. Respecto al topónimo y a su estatuto jurídico, todavía hoy, si-

83 Esta propuesta se ha elaborado gracias a los diferentes trabajos realizados en el yacimiento arqueológico de Los Bañales entre los años 2011 y 2014. Financiados en diferentes proyectos de investigación por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, proyecto «Patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro», *Institut de Recherche sur l'Architecture Antique* (IRAA) de la *Université de Pau et des Pays de l'Adour* «Reconstrucción fotogramétrica de Los Bañales» y la Diputación Provincial de Zaragoza «Propuesta de reconstrucción tridimensional del acueducto de Los Bañales». Igualmente quiero expresar mi gratitud al interés y confianza de la Fundación Uncastillo y al responsable científico del yacimiento Javier Andreu Pintado.

84 Para una actualización sobre las investigaciones del yacimiento y la bibliografía generada hasta el momento, *vid.* Andreu (2011).

85 Bienes *et al.*, (2011). Sobre la extensión y los diferentes hallazgos pertenecientes a esta época, *vid.*: Andreu (2011: 22-26).

86 Lostal, J. (1980): *Arqueología del Aragón romano*, pp. 83-90.

87 Beltrán, F. (1976: 156).

88 Bienes *et al.* (2011).

89 Recordemos que a juzgar por los miliarios (ERZ, 19; IRMN, 1; ERZ, 11), a partir del 9 a.C., las legiones fundadoras de *Caesaraugusta*, estarían amojonando la vía que unía *Pompaelo* con *Caesaraugusta*, a través de la denominada vía *Caesaraugusta-Beneharum*.



FIG. 179. Detalle de la ortofoto realizada mediante un dron de tipo multirrotor en el año 2012 de la zona del foro (1), zona de El Pueyo (2), zona doméstico artesanal (3) y zona de la Casa del Peristilo (4).

que sin confirmarse, la cada vez más plausible hipótesis sobre que el yacimiento de Los Bañales fuese la *ciuitas foederata Tarraca*⁹⁰ citada por Plinio⁹¹.

La ciudad tuvo su florecimiento entre los siglos I y II d.C., sobre todo, en época flavia, quizá con su promoción a *municipium*. Fue en esta época cuando se construyeron la mayoría de los edificios públicos conocidos, como las termas públicas o, probablemente, el acueducto⁹². A finales del último cuarto del II d.C. y principios del III d.C., comienza la regresión urbana. La evidencia arqueológica de este hecho queda atestiguada por el abandono de diferentes sectores y la reutilización de espacios que se mantendrán –por lo menos, a falta de una secuencia estratigráfica completa del yacimiento– hasta mediados del siglo IV d.C.

A pesar de no conocer el entramado urbanístico completo de la ciudad, es importante destacar que las viviendas conocidas representan una muestra de las diferentes formas de hábitat doméstico romano. Las residencias más humildes quedarían conformadas por las casas ubicadas en el cerro de El Pueyo excavadas en

un primer momento por J. Galiay y posteriormente por A. Beltrán⁹³.

La segunda estructura, la Casa del Peristilo⁹⁴, perteneciente a las clases altas de la ciudad, cuenta con un devenir historiográfico muy similar a las viviendas de El Pueyo: comenzada a excavar en las campañas de J. Galiay, su última intervención fue realizada por el equipo de A. Beltrán en las campañas de 1976 y 1977⁹⁵. Su cercanía a las dos famosas columnas, que suponen un emblema del yacimiento, provocó que durante años esta zona fuese interpretada como una zona pública (foro o *macellum*).

Respecto al acueducto, existen todavía varias incógnitas históricas sin resolver: época de construcción, cómo se abastecía la ciudad antes de su construcción y la singular construcción de la presa de la que se abastecía. El trazado original del acueducto, desde un manantial actualmente seco, a tres kilómetros de Biota, está adaptado a la orografía del terreno con una parte excavada directamente sobre la roca a modo de canal *specus* y en la zona central conserva gran parte de los pilares originales que debieron contar en su parte superior con un canal de madera.

90 En relación a estas cuestiones ver la reciente actualización de Andreu (2011: 30-32).

91 Plin., *Nat.* 3.4.24.

92 Sobre la antigüedad de esta obra de ingeniería hidráulica, *vid.* Andreu (2011: 35); Jordán (2011: 327-330).

93 Beltrán, F. (1976 y 1977).

94 Denominada de este modo por Uribe *et al.* (2011: 241-260).

95 Para la edición crítica de los manuscritos de A. Beltrán referentes a estas campañas de excavación *vid.* Andreu (2011: 101-159).

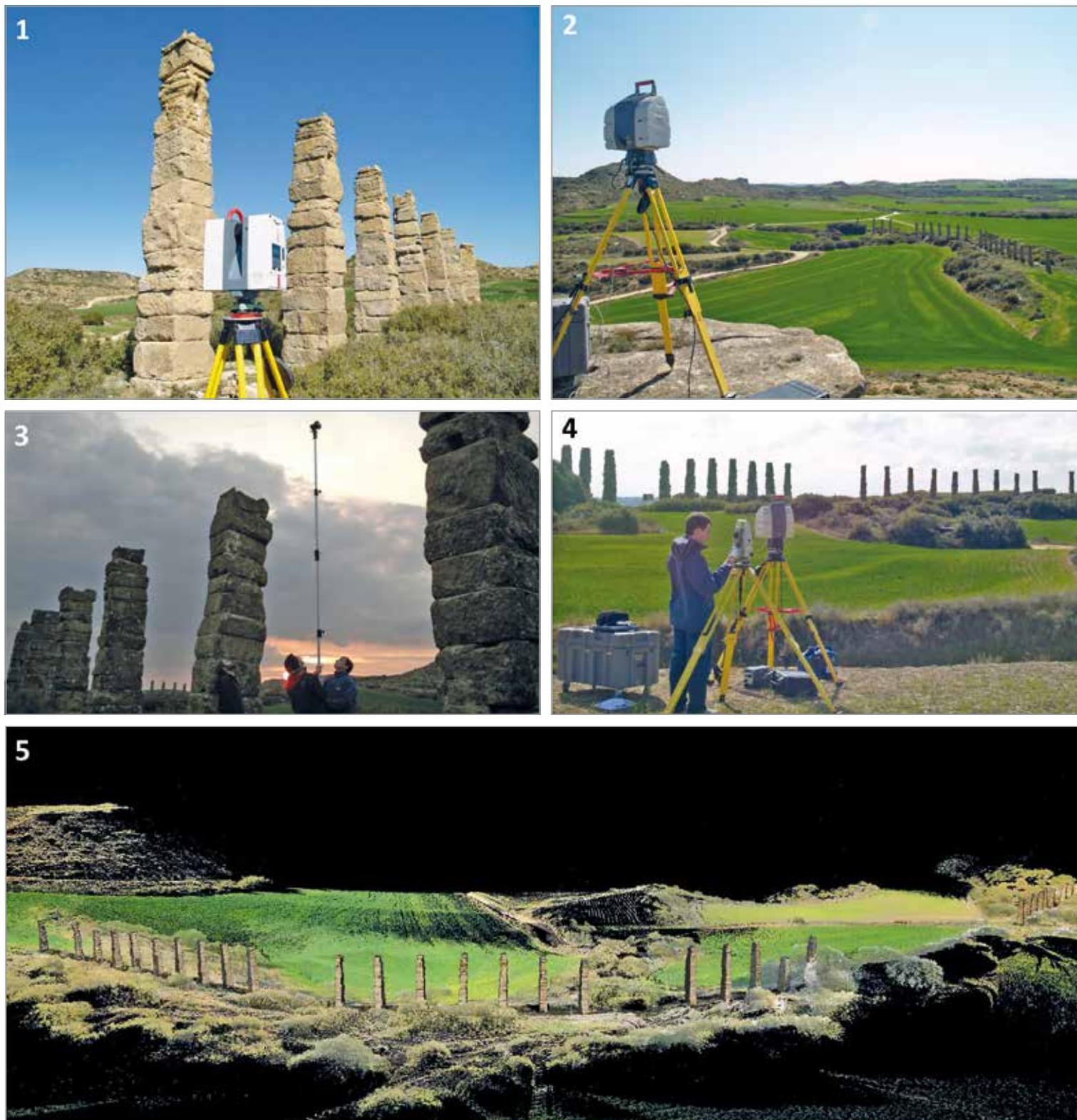


FIG. 180. Sistemas de registro empleados mediante láser escáner de diferencia de fase para cada pilar (1), láser escáner de tiempo de vuelo para todo el conjunto y entorno (2, 4), estación total para un registro en el mismo sistema de coordenadas (4), técnicas de fotogrametría terrestre mediante el empleo de una pértiga para las zonas superiores (3) y nube de puntos densa en color, combinando todas las técnicas y herramientas anteriormente citadas (5).

3.6.3.2. Objetivos del proyecto

El siguiente caso de estudio se centra, a lo largo de diferentes fases, en la documentación geométrica de los 32 pilares que se conservan del acueducto de Los Bañales junto con su entorno más próximo. Para ello, podemos dividir el trabajo en:

a) Documentación mediante láser escáner 3D terrestre de diferencia de fase y tiempo de vuelo del entorno de los pilares.

b) Documentación fotogramétrica aérea.

c) Generación del modelo tridimensional de la zona de estudio, combinando los datos de dos escáneres 3D (tiempo de vuelo y diferencia de fase) y los datos fotogramétricos.

d) Reconstrucción *ex novo* sobre el modelo mallado *as built*, con el objetivo de generar una hipótesis sobre la tipología arquitectónica del acueducto.

- e) Generación de un video explicativo que conjugue cada uno de los procesos y explique la hipótesis arqueológica sobre la reconstrucción *ex novo*.

De este modo, la finalidad del proyecto trata de conjugar el trío formado por el registro tridimensional, el análisis arqueológico y la difusión social de la hipótesis sostenida. Así, el reto afrontado con este caso de estudio ha sido establecer un equilibrio entre una hipótesis arqueológica y unos recursos tridimensionales donde primase más el conjunto arquitectónico que el medio tridimensional, para que únicamente sirviese de herramienta transmisora de una idea basada en un estudio científico, constituyendo este último un medio complementario para su conocimiento.

3.6.3.3. Técnicas utilizadas

A. Documentación geométrica

Las técnicas de documentación han consistido en la combinación de un escáner de diferencia de fase para registrar las zonas contiguas a cada uno de los pilares, adaptando una estrategia de estacionamientos en zigzag que permitiese el escaneado por ambos sentidos longitudinales, permitiendo de esta forma el menor número de sombras posibles, y combinando un escáner de tiempo de vuelo

para aprovechar la distancia desde los dos extremos del acueducto, por un lado, desde la ladera Este del Pueyo de Los Bañales y en el otro extremo desde Puy Foradado. La ventaja en el empleo de este sistema se debe a la distancia de captura de datos hasta algo más de 250 metros, que además, desde ambas zonas elevadas, permite la documentación del entorno inmediato en el que se inscribe el acueducto. Aunque los tiempos de captura son bastante elevados, debido a la tecnología de tiempo de vuelo, la combinación de ambos escáneres permite una alineación de ambas nubes de puntos obteniendo un registro completo del área de estudio.

Para la documentación de las zonas más elevadas de cada pilar se optó, en un primer momento, por un sistema de pértiga, pero dadas las dificultades, debido a su altura, se eligió posteriormente un dron de tipo multirroto, utilizando técnicas de fotogrametría aérea de baja altura e imagen esférica aérea.

La alineación de cada una de las nubes de puntos (TLS y fotogrametría) se realizó por medio de dianas previamente capturadas con el distanciómetro láser de una estación total, que a su vez, a modo de prevención, originó la generación de un sistema de coordenadas local que permitirá en el futuro discernir cualquier comprobación de verticalidades y patología estructural que pudiese sufrir algún pilar.



FIG. 181. Proceso de documentación aérea mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron.



FIG. 182. Modelo tridimensional mallado del acueducto sobre un MDT en su estado actual adquirido con la combinación de técnicas: escáner de tiempo de vuelo, diferencia de fase y fotogrametría terrestre y aérea.

Esta técnica de monitorización o auscultación es prácticamente similar a la empleada en otro tipo de actividades más ligadas a la ingeniería como la de las presas o pilares de viaductos que, mediante puntos de control, permite detectar cualquier cambio morfológico. Además, en el caso de los pilares se puede realizar un estudio periódico más completo respecto a la verticalidad de cada una de sus caras, horizontalidad, cálculos de volumen, etc.

B. Reconstrucción digital

Para realizar la base del modelo que ha permitido realizar la hipótesis arqueológica, se trabajó, en primer lugar, con el modelo mallado obtenido de la nube de puntos alineada en formato estándar vrmf con color (FIG. 182) de la interpolación de cada uno de los puntos. Posteriormente, dado que no era un factor prioritario, en las siguientes fases se prescindió del color proporcionado. Este modelo, debido a la vegetación de matorral bajo que envolvía a muchos de los pilares en las zonas bajas, tuvo que tratarse con especial atención y limpieza sobre el modelo resultante para prescindir de aquellas zonas que era necesario eliminar para evitar un mallado erróneo. Una vez obtenido el modelo limpio pero incompleto de las zonas con vegetación, se procedió a su modelado teórico mediante el programa *Reshaper* (FIG. 183). La hipótesis de este modelo arquitectónico propuesto se ha basado en cada uno de los aspectos técnicos que aborda el estudio de Viartola (2011: 169-198) «El acueducto de Los Bañales» y Viartola *et al.* (2013) «The Roman Aqueductbridge of Los Bañales (Uncastillo, Spain)».

La creación de un modelo simplificado sobre la malla triangulada previa permite:

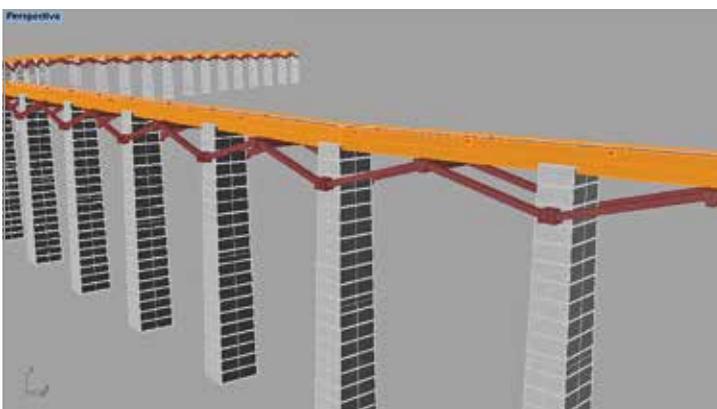


FIG. 183. Reconstrucción tridimensional mediante una superficie parametrizada de la arquitectura del acueducto sobre la base del modelo 3D escaneado.

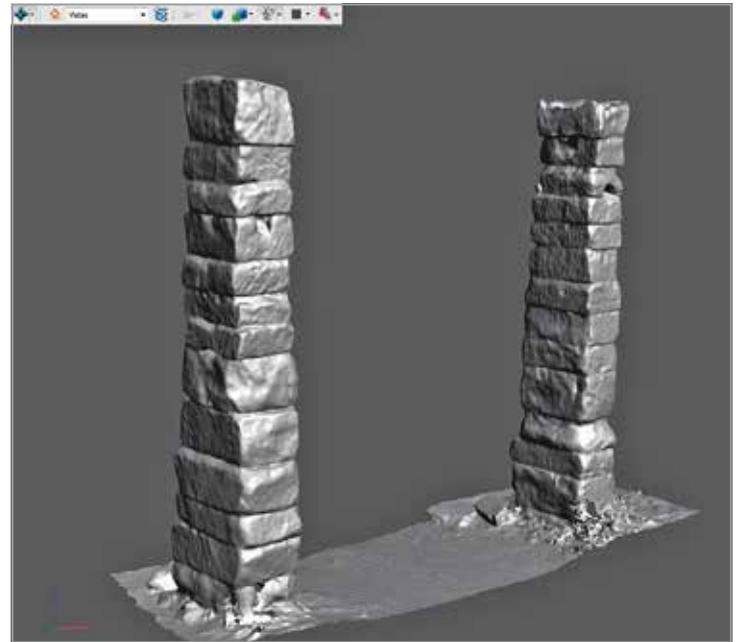


FIG. 184. Ejemplo de dos de los pilares en un formato geométrico PDF 3D sin textura gestionado en un árbol de capas con secciones horizontales y verticales.

- Respetar la geometría relativa concreta de cada pilar.
- Respetar la relación absoluta entre los diferentes pilares ya que el trabajo se realiza dentro del mismo sistema de coordenadas.

En este sentido, el modelo final obtenido en formato CAD tiene una geometría parametrizada, mucho más simplificada que la triangulación inicial, lo que permite realizar cualquier tipo de modificación en su estructura.

3.6.3.4. Resultados y conclusiones

Los resultados se han articulado en tres apartados:

a) Documentación geométrica para un análisis estructural del acueducto

- Nubes de puntos de todo el conjunto documentado en formato estándar x, y, z, RGB y ReCap de Autodesk (FIG. 180-5).

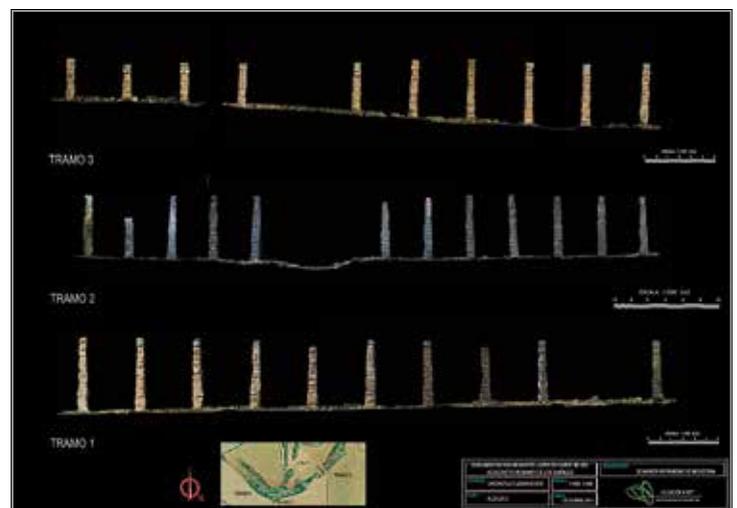


FIG. 185. Ejemplo del alzado de los diferentes tramos conservados de los pilares sobre el modelo tridimensional.

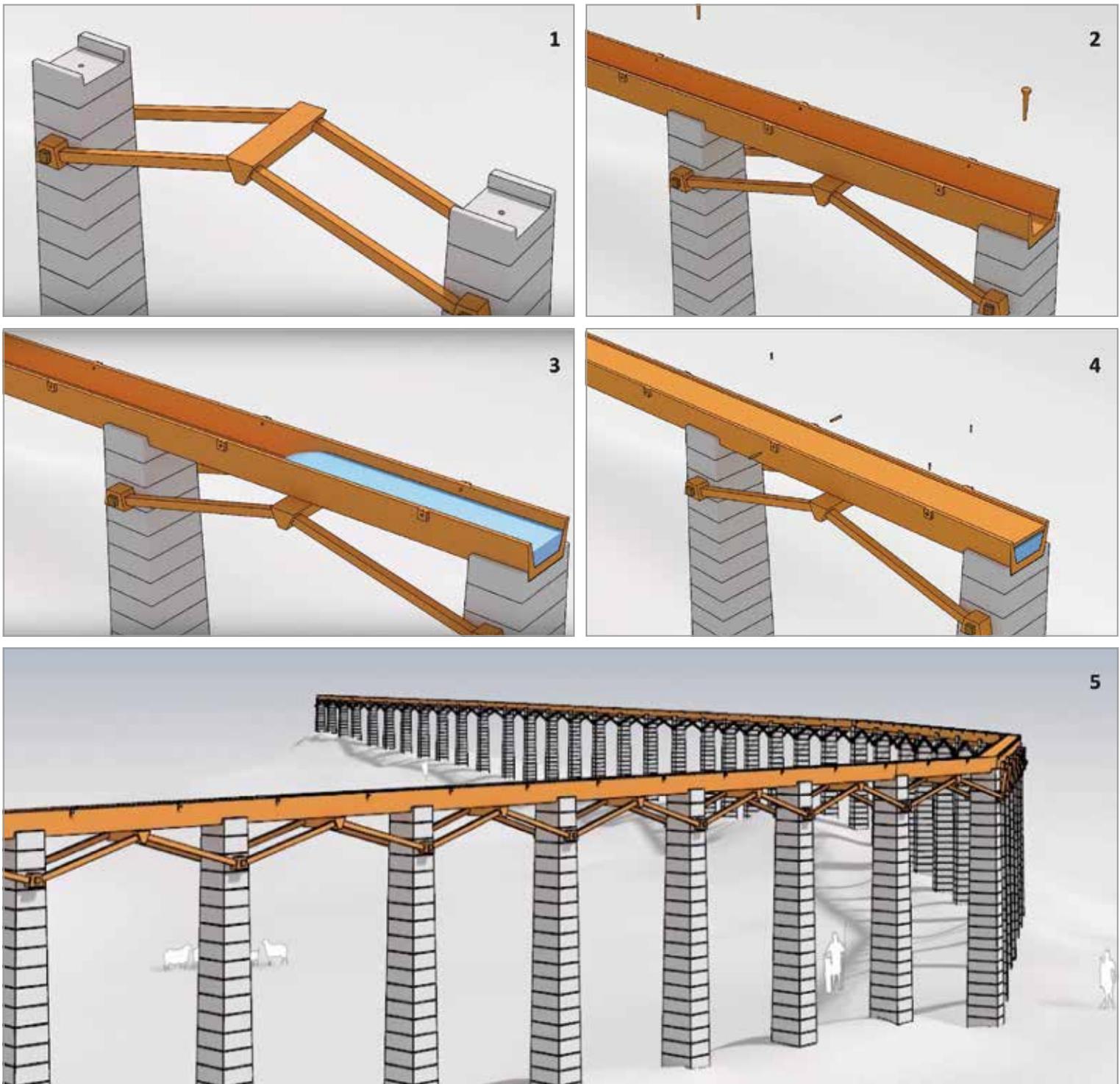


FIG. 186. Propuesta de las diferentes fases de reconstrucción tridimensional del acueducto del yacimiento arqueológico de Los Bañales, basadas en el registro geométrico combinado entre láser escáner, técnicas fotogramétricas e hipótesis según Viartola (2011).

- Modelos 3D en formato PDF3D de cada uno de los pilares, habilitando un árbol de capas con secciones verticales y horizontales cada uno de los pilares (FIG. 184).
- Visualizador métrico (*Truview*) de la nube de puntos en formato html para Internet Explorer con el objetivo de localizar coordenadas y mediciones.

b) Documentación geométrica y gráfica para hipótesis arqueológica

- Modelo tridimensional parametrizado sobre la base del escaneado, reconstruyendo cada una de las partes según la hipótesis de Viartola (2011) (FIG. 186).

c) Documentación didáctica

- Diferentes vistas esféricas aéreas que reproducen un punto en el espacio de manera inmersiva. Permiten observar desde una perspectiva elevada todo el conjunto facilitando su comprensión.
- Diferentes herramientas didácticas en la página web del proyecto tales como «cuaderno del profesor», descriptivas, glosario de términos, etc. (FIG. 187).
- Video del modelo tridimensional *as built* con diferentes vínculos que enlazan con vistas esféricas de una selección de puntos tomados para su escaneado.



FIG. 187. Página web del proyecto con todas las funcionalidades descritas de información historiográfica, didácticas, métricas, gráficas e infográficas.

- Video didáctico del proyecto de reconstrucción tridimensional que explica el procedimiento de las técnicas de construcción empleadas y la funcionalidad del acueducto como hipótesis arqueológica: https://youtu.be/NtYVsAFV_xw
- Página web del proyecto patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro en el que se inscribe el acueducto de Los Bañales dentro del ciclo de distribución del agua en el mundo romano y distinguiendo el resto de tipologías arquitectónicas existentes (*vid. apdo. 3.4.1*). http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/

3.6.4. Arqueología: El Cabezo de La Cruz (La Muela, Zaragoza)

3.6.4.1. Introducción

El yacimiento arqueológico del Cabezo de la Cruz (Picazo / Rodanés, 2009) está situado en una colina en el término municipal de La Muela en el valle del río Huerva, junto a Mozota, a 25 kilómetros aproximadamente de Zaragoza. El descubrimiento científico fue realizado en 1975 por Javier Fanlo y publicado, por primera vez, conjuntamente con Francisco Burillo, en 1979. Se trata de uno de los principales yacimientos de la Primera Edad del Hierro del valle medio del Ebro, que, debido a las obras de construcción de la Autovía Mudéjar A-23, fue parcialmente destruido en el año 2004.

Previo a esta destrucción, propuesto en mayo de 2003, se elaboró un anteproyecto como «pliego de prescripciones técnicas para la excavación del Cabezo de la Cruz» que garantizase una excavación de urgencia de la zona afectada por dicha obra civil. De este modo, se excavó y documentó desde febrero hasta agosto de 2004 por un equipo multidisciplinar dirigido por José María Rodanés y Jesús Vicente Picazo del Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza⁹⁶. La metodología desarrollada en este proyecto de reconstrucción tridimensional, únicamente ha tenido en cuenta los datos de la última intervención de 2004 gracias al sistema de registro realizado.

3.6.4.2. Objetivos

La reconstrucción digital con el material legado 11 años después de la excavación arqueológica, constituye un reto que pretende abrir

⁹⁶ Queremos agradecer la disponibilidad y confianza a los dos responsables científicos de la última intervención de 2004 en el Cabezo de la Cruz, Jesús V. Picazo y José María Rodanés del Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza. Esta gratitud es doble por permitimos formar parte en el equipo de trabajo de la excavación de 2004 y once años después por prestarnos los materiales para poder formular este tipo de reconstrucciones arqueológicas totalmente inconcebibles en su momento.



FIG. 188. Estado actual del Cabezo de la Cruz a su paso desde la autovía A-23 correspondiente a la zona de la excavación arqueológica de 2004.

una nueva línea de reinterpretación de una parte de la documentación del patrimonio cultural, sobre todo aquella que no se conserva físicamente o que tiene problemas de conservación. La diferencia resulta clarividente respecto a los proyectos descritos con anterioridad ya que no se parte de una documentación adquirida para tal finalidad, sino que se cuenta con una recolección muy variada de información de estructuras, objetos y sedimentos que fue adquirida antes de que el yacimiento quedase parcialmente destruido en el año 2004 por la construcción de una autovía. Por el contrario, en una clara similitud con el resto de ejemplos de reconstrucción tridimensional anteriormente descritos (*vid. supra caps. 3.6.2 y 3.6.3*), se trata de una parte del patrimonio arqueológico, que ha quedado destruido debido, en este caso, a la construcción de una obra pública.

En consecuencia, el objetivo que plantea este proyecto trata de obtener una restitución en el momento final de la excavación de 2004, basándose en los datos obtenidos a partir de técnicas fotogramétricas de correlación automática de imágenes para obtener una reconstrucción tridimensional. Todas estas imágenes fueron tomadas en diferentes momentos en el transcurso de la excavación de 2004, con diverso material fotográfico –cámaras y objetivos– a diferentes alturas y resoluciones junto con una base topográfica



FIG. 189. Imagen superior: estado actual del Cabezo de la Cruz a su paso desde la A-23 correspondiente a la zona de excavación de 2004. Imagen inferior: cuadrícula de la excavación (en rojo), topografía de la excavación (en blanco) y curvas de nivel originales del Cabezo. Superposición con la ortofoto actual con la Autovía A-23. Información calculada y adaptada al nuevo sistema de coordenadas UTM ETRS89 sobre los datos de Picazo / Rodanés (2009).

TABLA 15

Listado de actuaciones arqueológicas realizadas en el Cabezo de la Cruz

ACTUACIÓN ARQUEOLÓGICA	DIRECCIÓN CIENTÍFICA	AÑO DE INTERVENCIÓN
Descubrimiento y estudio restos superficiales	Burillo / Fanlo	1975-1979
Prospección informe previo trazado autovía	García Valero	1998
Delimitación del yacimiento. PGOU de La Muela	Delgado Ceamanos / Del Real	2002
1ª excavación. Ayto. de La Muela	Gutiérrez Dohijo	octubre-noviembre 2002
2ª excavación. Trazado autovía. Mº Fomento	Viladés / González	2003
3ª excavación. Trazado autovía. Mº Fomento / DGA	Rodanés / Picazo	febrero-agosto 2004

FUENTE: Adaptación de Picazo / Rodanés, (2009: 17)

realizada con sistemas clásicos (estación total, nivel óptico y sistema GNSS RTK) en el antiguo sistema de coordenadas absoluto UTM ED50 Huso 30.

Este tipo de reconstrucciones generan toda una alternativa en la investigación arqueológica ya que, si contamos con una información gráfica con alguna referencia métrica, es posible generar una reconstrucción tridimensional que abra un conjunto nuevo de interpretaciones científicas de los datos antiguos⁹⁷. Al margen de la información aprovechada para las publicaciones o monografías, resulta importante conservar el resto de la información digital para este conjunto de nuevas posibilidades. De este modo, es posible reinterpretar la información desde otro punto de vista, analizando los espacios o simplemente generando una réplica física del yacimiento mediante técnicas de prototipado rápido o mecanizado.

La cultura metodológica en arqueología está muy focalizada en la conservación de los materiales arqueológicos que se extraen de una excavación, acompañado del informe de cada campaña de excavación por parte de los responsables científicos. Sin embargo, de igual modo que resulta importante clasificar, inventariar y estudiar los materiales, con este tipo de proyectos debemos reflexionar sobre la clasificación de la documentación digital. Las imágenes y registros topográficos muchas veces no son inventariados, o simplemente almacenados, de la misma manera que los objetos arqueológicos. Estos constituyen un punto, tan importante como la clasificación de los restos materiales y el informe para la interpretación arqueológica del conjunto. La única manera de asegurar este tipo de información es adquiriendo un procedimiento ordenado y documentado, día a día, en una excavación que asegure una trazabilidad de la información y los procesos. Solo esto asegurará otro tipo de análisis en un futuro, indudablemente con otro tipo de herramientas más avanzadas a las actuales pero con los mismos datos.

Para ello, independientemente de las técnicas utilizadas, uno de los factores que ha garantizado los primeros resultados en este proyecto de reconstrucción tridimensional ha sido poder contar con una información adquirida mediante un procedimiento escrupulosamente claro y ordenado de los sistemas de registro de objetos, estructuras y sedimentos. Este factor nos hace reflexionar sobre cómo unos datos adquiridos, con una antigüedad de más de once años, han sido procesados con unas técnicas que en su momento no existían. Este hecho se debe, única y exclusivamente, al protocolo que se empleó en campo en su momento. De igual modo, tenemos que tener en cuenta que mucha de la información que estamos recopilando en la documentación actual en arqueología o

arquitectura podrá ser procesada en un futuro de la misma manera, arrojando otro tipo de información al respecto, que hoy somos incapaces de conocer. Por esta razón, resulta incuestionable el uso de repositorios digitales por parte de la administración que garanticen la perdurabilidad de la información original de este proceso, de la misma manera que resulta primordial establecer un protocolo claro, clasificado y ordenado en la recopilación de la información arqueológica.

3.6.4.3. Metodología

El ensayo se realizó combinando la información existente, recopilada en el año 2004, mediante el programa Photoscan de Agisoft de correlación automática de imágenes para generación de mode-

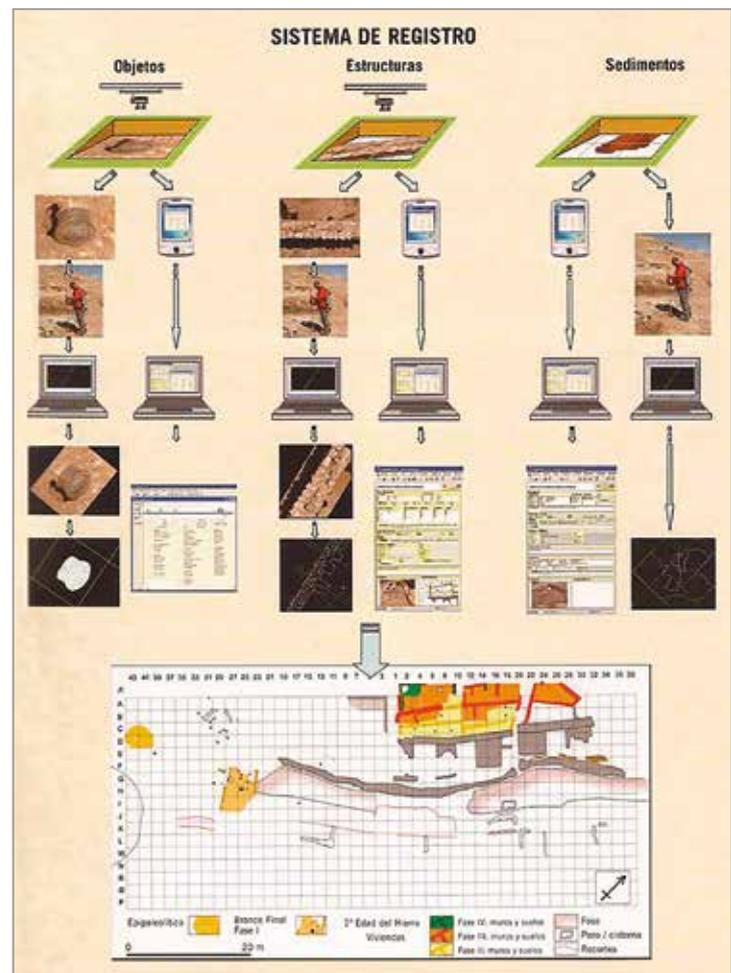


FIG. 190. Esquema del procedimiento desarrollado para la documentación de estructuras y sedimentos en la excavación arqueológica de 2004 (Picazo / Rodanés, 2009: 53).

97 A lo largo de esta investigación hemos visto otro conjunto de posibilidades de reconstrucción arqueológica mediante imágenes satelitales de la Guerra Fría como el ejemplo del programa satelital CORONA (Watanabea *et al.* 2017: 38), desclasificadas en la década de los 90 del siglo pasado. Esta fuente de información, accesible por medio del USGS, permite una reconstrucción topográfica contemplando la evolución del paisaje arqueológico de los últimos 50 años.

TABLA 16

Clasificación tipológica de las fotografías que finalmente se seleccionaron para este ensayo

TIPOLOGÍAS FOTOGRÁFICAS	RESOLUCIÓN EN PÍXELES
Aéreas oblicuas de diferentes resoluciones, alturas, ángulos y momentos	1600 x 1200 y 2362 x 1575
Nadiraes con pértiga de las casas	2560 x 1920
Frontales aprovechando el desnivel de la ladera	1600 x 1200
Oblicuas con pértiga	1600 x 1200
TOTAL	310 fotografías

los tridimensionales junto con la topografía realizada en formato CAD con puntos x, y, z y delineaciones de las estructuras mediante polilíneas.

El primer paso fue recopilar todas las imágenes facilitadas por los responsables científicos José María Rodanés y Jesús V. Picazo del Departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza.

Las imágenes pueden dividirse en diferentes tomas realizadas en su momento con un sistema de pértiga de las diferentes estructuras arqueológicas, imágenes de los alzados aprovechando el desnivel de la colina y algunos ejemplos de imágenes aéreas con diferentes tipos de cámaras y focales. A esta información gráfica se unió el registro topográfico que realizó en su momento Rafael Larma con métodos de topografía clásica con estación total (Leica TCR705) y sistema GNSS (Leica SR530). La topografía sirvió para establecer todos los puntos de control GCP necesarios para ajustar el modelo. Además, una vez exportadas las diferentes ortofotos, se aprovecharon estas referencias paralelas para comprobar el encaje de cada una de las estructuras con la delineación de cada uno de los puntos que se tomaron.

Las imágenes corresponden a varias resoluciones, alturas y tamaños. Además se realizaron con diferentes longitudes focales, nor-

malmente entre 8 y 14 mm tomadas con diferentes cámaras: *Mi-nolta DiMAGE 7*, *Canon EOS 1Ds Mark II*, *Olympus C-5000Z* y *Nikon E5700*. Todos estos factores además de repercutir en una peor geometría final del modelo, implican una mayor dificultad para obtener un ajuste radiométrico homogéneo del modelo tridimensional y de la ortofoto del conjunto arqueológico.

Además se contó con un total de 16 193 puntos topográficos (x, y, z), para identificar en las imágenes, en coordenadas absolutas tomados por un sistema GNSS RTK y una estación total en un área de 3116 m² con un perímetro de 240 m.

TABLA 17

Diferentes cámaras, resoluciones y longitudes focales usadas en la reconstrucción tridimensional

MODELO DE CÁMARA	RESOLUCIÓN	LOGITUD FOCAL
DIMAGE 7 (48.5625 mm)	1600 x 1200	48.5625 mm
DIMAGE 7 (18.875 mm)	1600 x 1200	18.875 mm
DIMAGE 7 (15.75 mm)	1600 x 1200	15.75 mm
DIMAGE 7 (44.4375 mm)	1600 x 1200	44.4375 mm

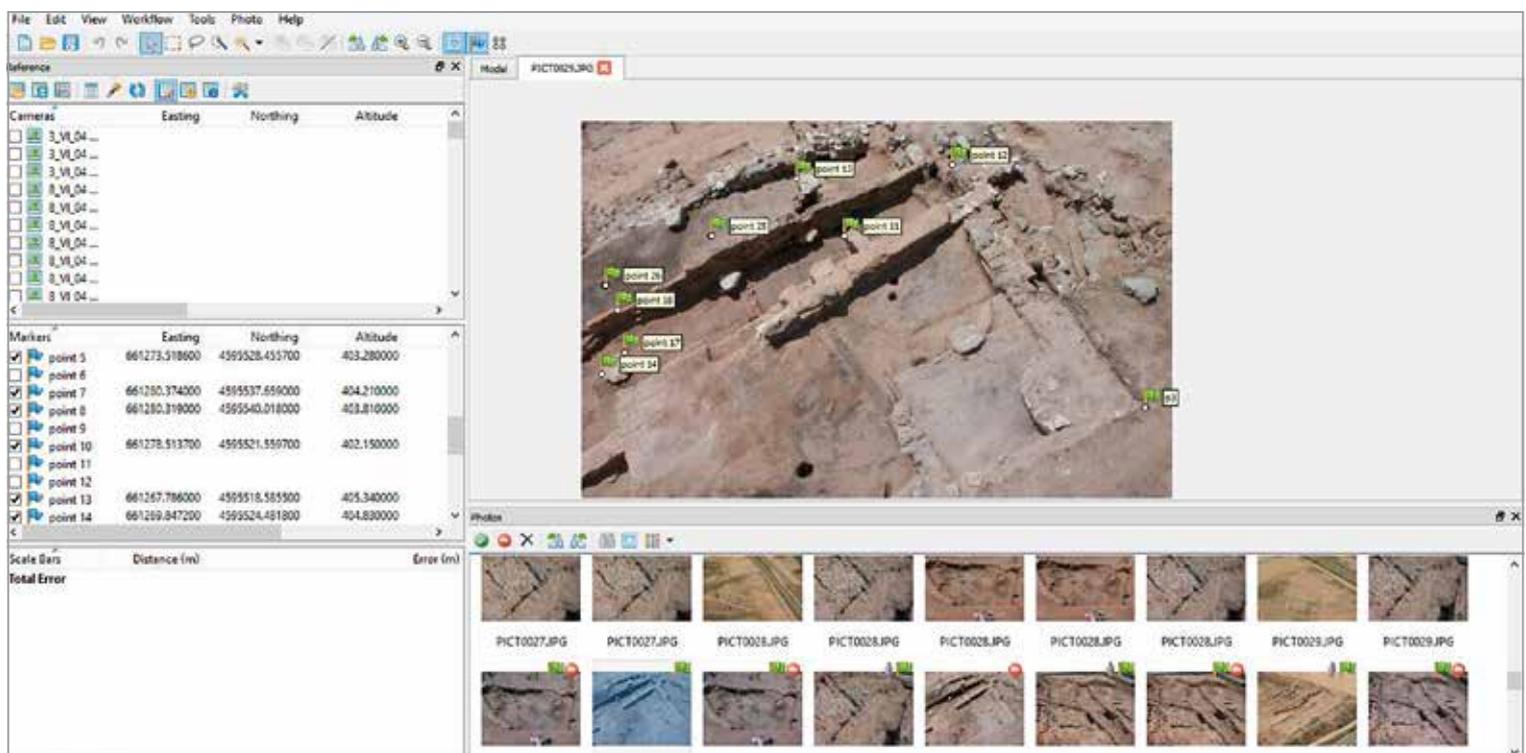


FIG. 191. Asignación de puntos comunes entre fotografías extraídos de las coordenadas de la topografía. Programa Agisoft Photoscan.

MODELO DE CÁMARA	RESOLUCIÓN	LOGITUD FOCAL
DIMAGE 7 (7.375 mm)	1600 x 1200	7.375 mm
DIMAGE 7 (10.5 mm)	1600 x 1200	10.5 mm
DIMAGE 7 (7.375 mm)	736 x 1000	7.375 mm
DIMAGE 7 (7.375 mm)	1600 x 1200	7.375 mm
DIMAGE 7 (9 mm)	2560 x 1920	9 mm
DIMAGE 7 (14.7 mm)	2560 x 1920	14.7 mm
DIMAGE 7 (8.9 mm)	2560 x 1920	8.9 mm
DIMAGE 7 (10.7 mm)	2560 x 1920	10.7 mm
DIMAGE 7 (7.8 mm)	2560 x 1920	7.8 mm
DIMAGE 7 (7.8 mm)	1920 x 2560	7.8 mm
DIMAGE 7 (14.71 mm)	2560 x 1920	14.71 mm
DIMAGE 7 (10.59 mm)	2560 x 1920	10.59 mm
DIMAGE 7 (11.4 mm)	2560 x 1920	11.4 mm

Asimismo, el primer paso fue seleccionar las diferentes fotografías y buscar grupos comunes que tuviesen el suficiente solape desde diferentes puntos de vista. Una vez establecidos estos grupos se identificaron puntos de control, que fuesen fácilmente identificables en las fotografías y en la topografía, integrando las coordenadas extraídas para relacionarlas en los modelos.

Los siguientes pasos fueron alinear las imágenes de un modo automático, construir una nube de puntos densa, asignar los puntos de control, calcular el error, generar la triangulación y posteriormente la texturización del modelo resultante. Una vez elaborado todo ello, pudimos exportar la ortofoto (tiff) con el fichero de encaje (tfw) y los modelos en diferentes formatos (vrml, obj, kml).

De esta manera, pudimos comprobar diferencias significativas dependiendo de la redundancia de información con la que se contaba para las diferentes zonas de la excavación, observando una mejoría de resultados en la zona Este debido a una mayor distribución, solape y densificación de imágenes. Aun así, comprobamos cómo ha sido posible restituir el yacimiento completo con diferentes tipos de resoluciones, obteniendo, con todos los condicionantes citados, una precisión global de entre 30 y 98 cm (x, y, z). Debemos conside-



FIG. 192. Generación de nube puntos densa de todo el yacimiento (arriba) con los puntos de control colocados (GCP), y generación de modelo 3D en la parte baja.

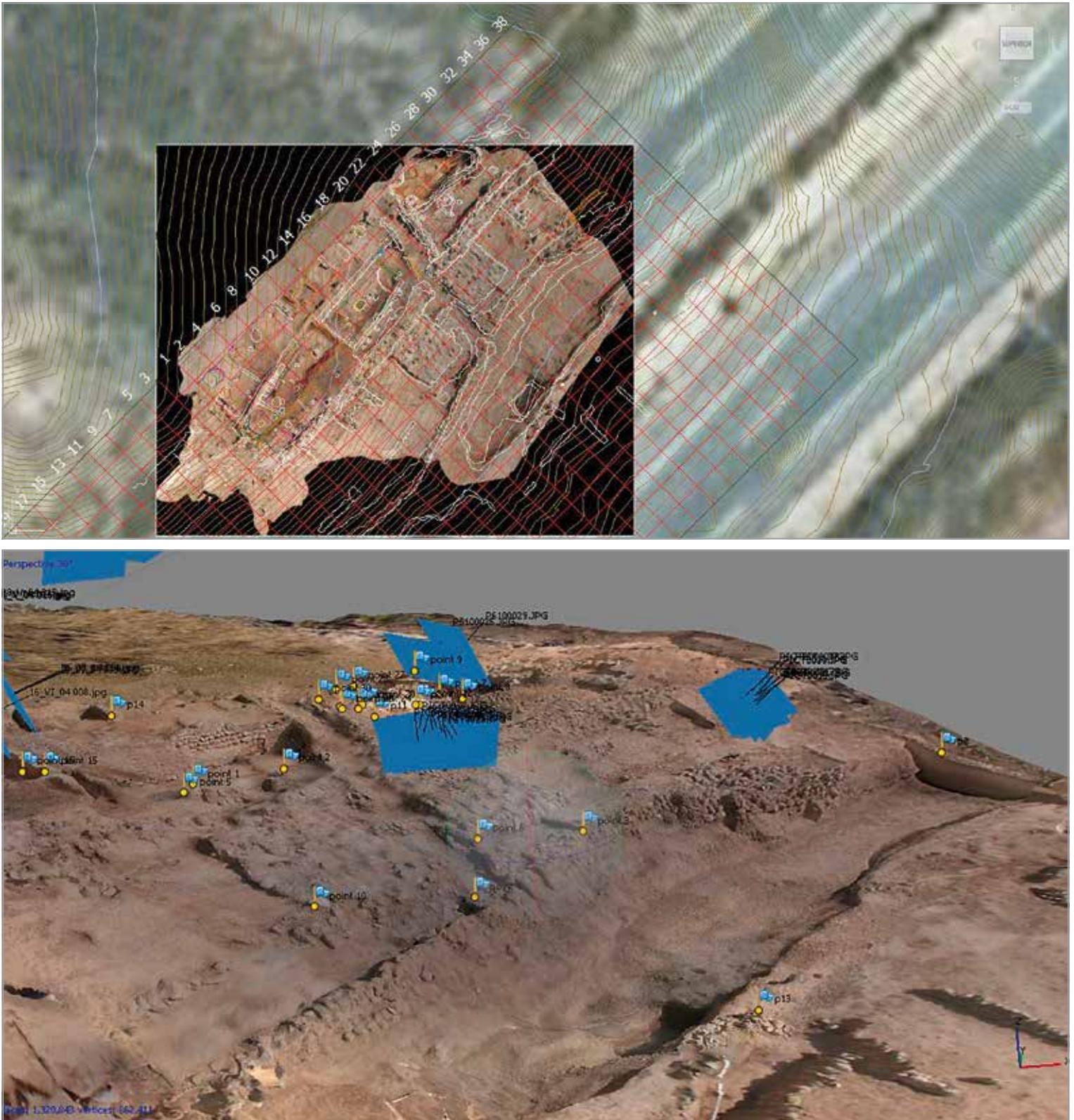


FIG. 193. Zona Este reconstruida con mejor ajuste, con la proyección de la ortofoto en la actual autovía A-23 (arriba), y modelo tridimensional reconstruido con los puntos de control topográfico y la posición estimada de la fotografías.

rar que aunque el valor resultante no es admisible desde el punto de vista topográfico, consideramos que teniendo en cuenta las diferentes fuentes gráficas y la dificultad en la asignación de los puntos de control, el resultado puede constituir un referente como reconstrucción geométrica de un yacimiento que, simplemente, ya no existe.

De todo ello, extraemos diferentes lecturas, ya que para obtener una mayor resolución y calidad geométrica hubiese hecho falta una mayor densificación fotográfica del yacimiento con unos parámetros ho-

mogéneos. Sin embargo, tenemos que tener en cuenta que al tratarse de una excavación de urgencia en una zona con una fuerte pendiente, no facilita en absoluto, la toma de imágenes ordenadas, en este caso, con una pértiga manteniendo valores de distancia constantes.

3.6.4.4. Resultados y conclusiones

El ensayo realizado en este proyecto abre una nueva metodología arqueológica dentro de la documentación geométrica del patri-



FIG. 194. Ortofoto obtenido de la zona Este con mejor resolución, junto con la planimetría de la zona noreste en el mismo sistema de coordenadas UTM 30 ED50.

monio cultural. El análisis y las técnicas aquí descritas se pueden aplicar perfectamente a cualquier otro yacimiento arqueológico, estructura arquitectónica, bienes muebles o, en su defecto, a cualquier otro tipo de entidad patrimonial que cuente con una amplia y, geoméricamente, bien distribuida colección fotográfica o imágenes satelitales de la que se pueda extrapolar alguna referencia métrica. En este sentido, en el Cabezo de la Cruz se partía con cierta ventaja, puesto que contaba con una excelente documentación topográfica, que ha sido uno de los factores que ha asegurado una aceptable correlación automática de imágenes con un amplio conjunto de coordenadas de control (GCP) en un sistema de coordenadas absoluto (UTM ED50). Sin embargo, podemos encontrar otros ejemplos en los cuales no exista este tipo de información métrica, pero sí es posible extrapolar medidas dentro de las imágenes por patrones conocidos o por paralelos que todavía existen.

En consecuencia, este apartado ha planteado la posibilidad de reinterpretar, en arqueología y arquitectura, un conjunto de fotografías, cuadernos de campo, publicaciones, etcétera, de bienes patrimoniales que puedan haber sufrido algún tipo de deterioro o, como el caso del Cabezo de la Cruz, que haya sido parcialmente destruido y se pueda reconstruir tridimensionalmente.

Las conclusiones finales de este ensayo se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- Se abre una nueva línea de reinterpretación no sólo en el campo arqueológico, sino aplicable a la arquitectura, bienes muebles y en su defecto a cualquier otro tipo de bienes patrimoniales que requieran de una documentación geométrica. Y ello, con una finalidad ya no sólo centrada en la documentación, sino extrapolable a la conservación y preservación del patrimonio cultural en general.
- Gracias a la variedad que actualmente existe de este tipo de programas de correlación automática de imágenes, es posible realizar ensayos e interpretaciones por personal no cualificado, aunque con cierto grado de entrenamiento, que permita un flujo de trabajo más dinámico en el planteamiento de hipótesis y sobre todo que permita la autogestión desde el punto de vista arqueológico.
- Este tipo de técnicas en su conjunto las podemos vincular a las ya denominadas técnicas de bajo coste, abordadas en el apdo. 2.6 sobre la clasificación y el análisis de herramientas empleadas y el ejemplo del apdo. 3.3.1 sobre técnicas de



FIG. 195. Simulación del modelo tridimensional final en la actualidad, desde varias alturas, con la cuadrícula de la excavación sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT).

documentación geométrica de bajo coste (ya planteadas en los yacimientos de Valdeherra y Labitolosa).

- En este sentido, como propuestas complementarias dentro de un conjunto de preconizaciones, puede constituir una base que determine, dentro del patrimonio, una auscultación de los conjuntos patrimoniales que identifique y cuantifique el grado de deterioro sufrido de un determinado conjunto patrimonial. En relación a este factor, se puede extrapolar un protocolo diacrónico que analice la conservación, sobre todo, referente a patologías estructurales. Ello, con la posibilidad de vincularlo a la reproducción del paisaje arqueológico de los últimos 50 años por medio de la reconstrucción con imágenes de satélite de finales de los años 60 y 70 del pasado siglo. De esta manera, se podría identificar y medir de qué manera influye el tiempo, como cuarta dimensión, en la conservación del patrimonio cultural.

3.7. Propuestas para la integración de modelos tridimensionales en plataformas web

A partir del primer decenio del siglo XXI, se constata un claro movimiento de carácter funcional en los proyectos que integran modelos tridimensionales en bases de datos (*vid. supra* apdo. 1.3). En este sentido, la parte gráfica de cada digitalización ha sido complementada en beneficio de una utilidad organizativa, que favorece el proceso de lectura e interpretación de los datos.

De este modo, el objetivo de este apartado, una vez analizado el estado actual, las principales técnicas y los diferentes ensayos en las clasificaciones patrimoniales, trata de vehicular diferentes alternativas como aproximación a una propuesta metodológica acorde

a cada funcionalidad. En consecuencia, pensamos que concluir en una única solución resulta complejo ya que se tiene que aportar un equilibrio entre todas las disciplinas que investigan el heterogéneo sector cultural. Esta aportación refleja de un modo sintético las tendencias sociales y tecnológicas actuales apostando, según hemos analizado a lo largo de esta investigación, por nuevas perspectivas de actuación que faciliten el aprovechamiento de la documentación geométrica del patrimonio cultural en una clara búsqueda hacia una propuesta conceptual, en cómo gestionar y organizar, de un modo claro y útil, toda esta información recopilada.

El problema al que nos enfrentamos surge del incremento de las posibilidades actuales del uso de herramientas tridimensionales, la aplicación de distintas técnicas de documentación geométrica y la capacidad de crear bases de datos relacionales. Esta gran variedad de posibilidades, sin una única metodología, ha generado un desequilibrio entre los procesos geométricos y gráficos y en el posterior problema de relacionar toda esa información en una base de datos. Así, el objetivo de este apartado es definir el estado actual de posibilidades de generación de un sistema de información espacial *online* que vincule bases de datos relacionales con modelos tridimensionales creados a partir del registro geométrico.

Su aplicación a cualquier clasificación del patrimonio cultural permite crear una herramienta científica para archivar y relacionar diferentes tipos de datos con diferentes escalas. Este hecho mejora la gestión, el intercambio de información, la conservación y posteriormente permite una valorización de cada entidad patrimonial. El avance al que vamos a asistir en los próximos años permitirá vincular e interrelacionar información tridimensional con cualquier dato histórico, arquitectónico, arqueológico, biológico, historiográfico, etc.

Afrontar este tipo de proyectos debe suponer un avance en la gestión de los datos que se generan, por ejemplo, en una excavación arqueológica, permitiendo incluir toda la información tridimensional que se está generando. La finalidad consistiría en la creación de una base de datos que pudiese ser visualizada y tratada a través de un navegador *online* con modelos tridimensionales, pero con unas particularidades que permitiese su gestión sin un *software* específico.

Los diferentes ensayos que a continuación se desarrollan han partido del estado actual de la vinculación de bases de datos con modelos tridimensionales dentro de la arqueología, principalmente. Asimismo, se han analizado los principales proyectos internacionales, ya realizados o todavía en curso, para valorar si su modelo de trabajo se adaptaba a nuestros objetivos (*vid. supra.* apdo. 1.3). De esta manera, hemos podido observar un incremento de este tipo de proyectos que persiguen este fin de bases de datos relacionales, pero muchos de ellos únicamente aportan un componente gráfico, organizativo y/o tecnológico, sin dar un paso más allá. Sin duda, se trata del factor más complicado, ya que se trata de traspasar lo puramente gráfico y teórico para dar respuestas a problemas concretos: cómo organizar bases de datos relacionales, por ejemplo, en una excavación arqueológica o en cuevas con arte rupestre con una problemática de conservación muy específica.

Después del conjunto de proyectos representativos hemos extraído las principales conclusiones de cada uno de ellos para establecer un protocolo de trabajo adecuado y técnicamente viable para nuestra problemática.

De esta manera, nuestra propuesta ha intentado interrelacionar tres constantes fijas:

- a) Bases de datos relacionales, organizadas mediante la inclusión de los diferentes metadatos que conforman toda la información de cada unidad estructural. La unidad documental de cada bien patrimonial estará organizada por un conjunto de atributos relacionados todos ellos mediante

coordenadas geográficas que permitirán la vinculación de la información.

- b) Sistema *online* gestionado a través de una plataforma web. Resulta imprescindible el trabajo en Internet que permita que cualquier usuario pueda introducir información, buscar datos científicos o herramientas divulgativas sin unos conocimientos específicos técnicos y sin un *software* propietario. En los próximos años asistiremos a la migración de aplicaciones en la «nube» frente a la clásica instalación de aplicaciones de escritorio.
- c) Gestión de modelos tridimensionales. No hay duda de que se han producido en los últimos años unos avances significativos en la optimización de recursos para su utilización sobre todo en plataformas web. Tenemos que tener en cuenta que existe un fuerte componente sociológico con respecto a su difusión, influidos estos recursos, en muchas ocasiones, por otro tipo de industrias como la del videojuego o la cinematográfica. Las marcas comerciales se están esforzando en la democratización de productos y utilidades para que su difusión sea muy amplia, produciéndose una mayor demanda profesional. El avance en los últimos años ha sido significativo, estando ya lejos del modelo tridimensional que únicamente se podía visualizar en el propio programa que lo generaba mediante visualizadores específicos que excluía al resto de formatos.

La búsqueda de convergencias y estándares para la manipulación de modelos tridimensionales tanto a nivel científico como divulgativo se encuentra en un momento crucial. La investigación actual demanda un paso más allá que permita traspasar la frontera de lo meramente gráfico.

Por esta razón, a modo de síntesis, este apartado esboza una propuesta metodológica desde el punto de vista arqueológico con el objetivo de confeccionar un marco teórico de trabajo para el desarrollo futuro de una base de datos integral e integradora de cualquier bien mueble o inmueble registrado en 3D⁹⁸. En los siguientes apartados se configuran las bases para la creación de un sistema global de datos interrelacionados que integren todas las disciplinas de las que se puede obtener información: investigación, documentación, conservación, restauración, difusión y formación. Todo ello aplicando nuevas tecnologías y la implementación de un entorno virtual de acceso a los datos. De acuerdo a los parámetros iniciales expresados en este apartado, no se concibe la generación de una base de datos como un mero repositorio en el que se almacenan una información determinada. Por contra, pensamos que debe ser un ente orgánico compuesto por diferentes elementos todos ellos interrelacionados, de manera que el usuario (según el nivel de acceso permitido a los datos) pueda contar con una información amplia y constructiva del objeto de estudio.

3.7.1. La evolución del concepto SIG en Arqueología: *web mapping*

Del mismo modo que los modelos 3D se han ido adaptando con formatos compatibles para la gran mayoría de los navegadores web, los datos geoespaciales han encontrado en la misma web una

98 No es la intención de este apartado trivializar sobre la complejidad inherente del uso y gestión de las bases de datos, puesto que necesitaríamos integrar para un estudio más profundo un compendio de puntos de vista, sobre todo de informáticos y programadores especializados. Sin embargo, muy probablemente esta falta de integración sea, además, la razón que ha contribuido en los proyectos analizados a que todavía no exista un marco funcional que llegue a cubrir las necesidades arqueológicas. Centrándose sólo en la parte gráfica y más aparente o solamente en la estadística, sin llegar a cubrir unas funcionalidades básicas que relacionen la información arqueológica.



fuerza inagotable para generar y visualizar este tipo de información interactiva con diferentes tipos de funcionalidades, incluso colaborativas. Ambos sistemas confluyen en tres objetivos comunes: la facilidad en el acceso, inmediatez en la gestión y la edición e interrelación de la información.

Actualmente podemos encontrar una gran variedad de este tipo de proyectos dedicados al patrimonio cultural⁹⁹. De los ensayos realizados en esta monografía, destacamos dos estudios gestionados a través de este tipo de plataformas: el proyecto HANDPAS y el proyecto de Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia (ARAM) (*vid. supra* caps. 1.3.6 y 3.2.2). El primero tiene la peculiaridad de combinar en la misma web estos elementos: datos geoespaciales, base de datos y modelos tridimensionales métricos con diferentes filtros y algoritmos de decorrelación. Además, coincide que se ha generado con el mismo lenguaje de programación JavaScript, usando diferentes tipos de librerías para cada una de las funcionalidades propuestas.

El ejemplo de la librería *Open Source Leaflet*¹⁰⁰ constituye en la actualidad una de las principales y más extendidas para la interacción con el usuario, permitiendo la generación, edición y consulta de mapas interactivos para la web relacionados con cualquier tipo de las diferentes clasificaciones del patrimonio cultural.

Si trazamos una retrospectiva para entender de dónde arrancan este tipo de gestores, resulta necesario abordar de modo breve los sistemas de información geográfica SIG y las alternativas que proponen algunos programas comerciales en la gestión de modelos digitalizados y bases de datos¹⁰¹. De esta manera, los SIG se definen como «un sistema informático para recoger, gestionar, integrar y analizar información relativa a la superficie terrestre» (Rhind, 1988: 23-

⁹⁹ Citaremos algunos ejemplos representativos: <http://services.historicengland.org.uk/rrstonehenge/?platform=hootsuiteContar> <http://viajealpatrimonio.com/> (último acceso: junio 2017).

¹⁰⁰ <http://leafletjs.com/> (último acceso: junio 2017).

¹⁰¹ Resulta ineludible nombrar sucintamente los sistemas SIG, sin embargo no es el objetivo de esta investigación realizar un estudio en profundidad sobre las posibilidades que ofrecen estos sistemas por considerarlos fuera de nuestra escala y ámbito de trabajo para este estudio. Para ello habría que realizar un análisis comparativo entre todas las soluciones comerciales y *open source* que existen actualmente. No obstante, hemos realizado una aproximación sintética sobre la revisión de algunos trabajos con el objetivo de obtener una visión global de otro tipo de alternativas en la gestión de bases de datos tridimensionales.

ÍNDICE	ABREVIATURA	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN
Diferencia Normalizada del Borde Rojo	NDRE	$\frac{IRP - \text{Borde Rojo}}{IRP + \text{Borde Rojo}}$	La sustitución en el NDVI de la banda del rojo por el borde del rojo mejora la respuesta en la fase final de temporada de buena parte de los cultivos.
Índice de Ratio de Vegetación	RVI	$\frac{IRP}{\text{Rojo}}$	Cociente simple entre infrarrojo próximo y rojo. Usado para estimaciones de biomasa e índice de área foliar (LAI) desde 1969.
Índice de Vegetación Verde	GVI	$\frac{IRP}{\text{Verde}}$	Cociente simple entre infrarrojo próximo y verde que se usa para cuantificar la vegetación de los campos de cultivo.
Índice de Diferencia Rojo-Verde Normalizado	NGRDI	$\frac{\text{Verde} - \text{Rojo}}{\text{Verde} + \text{Rojo}}$	Sustituye el IPR del NDVI por el verde.
Rojo-Verde	RG	$\frac{\text{Rojo}}{\text{Verde}}$	Pretende excluir la banda del infrarrojo cercano y ver la relación entre el rojo y verde.
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo	SAVI*	$\frac{IRP - \text{Rojo}}{IRP + \text{Rojo}} (1 + L)$	Pretende minimizar la influencia del suelo sobre los índices de vegetación.
Índice de Ratio de Vegetación Normalizado	NRVI	$RVI - \left(\frac{1}{RV7}\right) + 1$	Normalización del índice RVI.
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	NDVI	$\frac{IRP - \text{Rojo}}{IRP + \text{Rojo}}$	Diferencia normalizada de la dispersión del verde de la hoja en el canal IRC, y la absorción de clorofila en el rojo. Toma valores entre -1 y 1.

*El índice SAVI se ha calculado con un parámetro L de valor 0,5, valor estándar.

FIG. 196. Ejemplo de *web mapping* del Cabezo de Alcalá de Azaila (Teruel)* que integra: un modelo tridimensional (*vid.* FIG. 200), ortofotos con una alta resolución espacial obtenidas con un dron, herramientas geométricas para la visualización georreferenciada de la dispersión de materiales hallados, junto con diferentes tipos de índices calculados** (imagen inferior, según adaptación de Bennett 2012:211) a partir de la combinación de varias bandas espectrales. Estas bandas han sido registradas mediante vuelo fotogramétrico de dron de ala fija eBee Plus RTK / PPK con sensor RGB, multiespectral y térmico. La combinación de todos estos elementos en un *web mapping* permite, de un modo sencillo, trazar estrategias de prospección o excavación incluyendo un conjunto de información arqueológica, geométrica y espectral interrelacionada en una base de datos *online*.

28). Estos posibilitan la visualización de la información geográfica compleja, funcionando como una base de datos relacional en la que se mantiene y relaciona información espacial y temática. Además, se incorporan procedimientos para el análisis y modelado de datos espaciales.

Los SIG se basan en la unidad elemental de la información geográfica: *el Datum*, que contiene la siguiente información:

* Proyecto arqueológico del Cabezo de Alcalá de Azaila (Teruel) dirigido por Francisco Romeo, Miguel Beltrán y Luis Fatás. Cofinanciado por el Consorcio de Patrimonio Ibérico de Aragón y con fondos propios.

** Los índices son combinaciones de bandas espectrales que intentan realzar la contribución de los diversos elementos de la cubierta terrestre en la respuesta espectral de una superficie y atenuar otros factores como la influencia de la atmósfera, la iluminación y el suelo. Con ellos, se pretende conseguir una información más clara sobre las características, por ejemplo, de la vegetación, cuyo estrés y nivel de humedad constituyen dos variables indispensables en los trabajos arqueológicos a la hora de poder identificar la presencia de restos arqueológicos en el subsuelo.

- Espacial: para describir la posición de un objeto o fenómeno sobre la superficie terrestre (X, Y, Z).
- Temática: para expresar los atributos o propiedades de un objeto o localización (A, B, C...).
- Temporal: para describir los cambios ocurridos con el transcurso del tiempo (T1, T2, T3...).

Para construirlos es necesario un proceso previo de modelado de la realidad (o creación de la base de datos). Esta fase inicial representa una construcción abstracta en un determinado lenguaje mediante el que se hacen explícitas las relaciones entre los distintos fenómenos. Un ejemplo del modelado clásico utilizado en Geografía es el mapa: herramienta básica de abstracción del paisaje siguiendo unas reglas básicas de estructura y referencia¹⁰².

En consecuencia, para esta fase de modelado se emplean determinados elementos que constituyen la plasmación de los objetos reales en el modelo digital de un SIG:

- Clase: es el conjunto de elementos que comparten alguna propiedad que se utiliza para construirla. Cada clase da lugar a una tabla, y cada elemento de esa clase se describe en una fila de la tabla de atributos. Ejemplo: datos de humedad o composición de los pigmentos.
- Objeto geográfico: un elemento x, y, z caracterizado por la clase, es decir, aspectos esenciales o características que se quieren retener en el proyecto o estudio.

Si trazamos algún ejemplo que haya relacionado los SIG con modelos 3D, podemos distinguir diferentes aspectos según la experiencia de Opitz y Nowlin (2012: 46-49) para poder compatibilizar datos obtenidos por un programa de correlación automática de imágenes (Photomodeler, Pix4D, Photoscan, AutoDesk Recap Photo) y para reconstrucciones tridimensionales mediante un sistema comercial SIG. Después de analizar en este apartado diferentes procesos básicos sobre la conversión de modelos tridimensionales realizados por técnicas fotogramétricas en un entorno SIG, resumimos el procedimiento en estos puntos:

1. Creación y limpieza de la malla, geolocalización de la malla e importación de una malla en *ArcGIS 3D Analyst*.
2. Limpieza de la malla inicial. Eliminar el ruido de la malla.
3. Exportar desde el *software* de modelado.
4. Importar y transformación: 3D pseudo-referenciado.
5. Datos relacionados: creando elementos en la malla.
6. Trabajo con Datos de malla en entorno SIG.

En definitiva, a modo de conclusión, el trabajo de este tipo de mallas, aunque en los últimos años ha protagonizado ciertos avances, resulta altamente arduo, resultando complejo gestionarlos directamente sobre programas que tradicionalmente se han dedicado al SIG. En este sentido, para poder trabajar con una base de datos 3D en ArcGIS, sería necesario cumplir los siguientes requisitos:

- Disponer del *software* comercial.
- Utilizar al menos un ordenador con la suficiente capacidad que permita mover las mallas junto con los atributos de estas.
- Transformar los datos de los atributos en tablas. Normalmente esta operación se realiza desde ArcGIS o importándolas desde Access.

102 Este proceso de abstracción lo hemos visto, de igual modo, en otras disciplinas (arquitectura, arte rupestre, arqueología) para facilitar la lectura, representación e interpretación de la información a través de visualizaciones bidimensionales con un marcado componente subjetivo que logra focalizar la atención en una determinada información.

- Crear campos que vinculen estos datos en cada tabla. En este caso se podría utilizar x, y, z.
- Realizar el postproceso de las mallas (limpieza, simplificación, etc).
- Convertir el formato de la malla en uno exportable a ArcGIS.
- Comprender y manejar el lenguaje SQL para realizar las búsquedas.
- Tener nociones básicas para manejar el programa y avanzadas para realizar análisis con los datos espaciales.

3.7.2. Modelos tridimensionales para navegadores: PDF3D vs. WebGL

3.7.2.1. Gestión de modelos mediante archivos PDF3D

El formato PDF3D representa un formato estándar abierto en el intercambio y gestión de modelos tridimensionales, aceptado como tal desde 2008 por la *International Organisation for Standardisation* ISO 32000-1 y ISO 32000-2. Su gestión se puede realizar mediante el programa gratuito Acrobat Reader DC y permite el trabajo con los modelos sin unos conocimientos específicos en cuanto a gestión de la información tridimensional. La gestión de esta herramienta se remonta al año 2005 con la versión 7.0. Posteriormente, en relación al patrimonio, fue el formato de intercambio escogido en el proyecto europeo CARARE¹⁰³ con un alto índice de objetos arqueológicos digitalizados. Su gestión le permite almacenar una serie de metadatos de cada pieza y asimismo podemos etiquetar la información de manera tridimensional, como si se tratase de anotaciones. Además de introducir este tipo de información adicional permite realizar mediciones y generar secciones x, y, z a nivel de usuario. Admite una texturización de los objetos, estableciendo una comprensión jpg de la propia textura. Su limitación se encuentra en la propia optimización de los ficheros web, que resulta necesaria para su agilidad. Asimismo, permite su visualización directamente en un navegador web, aunque es necesario realizar algunas instrucciones específicas para cada tipo de navegador¹⁰⁴. Mediante el *software* superior Acrobat Pro DC o similares se pueden importar diferentes formatos y convertirlos en PDF3D.

Las funcionalidades que aprehende este formato se pueden visualizar e interactuar con contenido 3D de alta calidad¹⁰⁵ creado en programas de modelado 3D o de CAD 3D profesional e incrustados en documentos PDF. Una vez abierto el documento, el modelo 3D aparece inicialmente como una imagen de vista previa bidimensional. Al hacer clic en el modelo 3D con la herramienta «Mano o Seleccionar» se habilita (o activa) el modelo y se abre la barra de herramientas de gestión tridimensional.

3.7.2.2. Sistemas basados en Web Graphics Library (WebGL)

La divulgación social del concepto 3D ha propiciado una fuerte relación entre la oferta y la demanda de modelos tridimensionales,

103 Vid. para una mayor información las especificaciones sobre el PDF3D como formato propuesto en Pletinckx y Haskiya (2011: 10-12) <http://www.carare.eu/eng/Media/Files/D5.1-Req-Spec-for-preparing-3D-VR-for-European> (último acceso: octubre de 2017).

104 Cada navegador tiene su propia configuración para controlar cómo se abren los PDF en una página web. Acrobat DC y Acrobat Reader DC no incluyen una configuración de preferencias para abrir los PDF basados en la web. Para cambiar el comportamiento de la visualización, hay que seguir una serie de instrucciones que indica cómo controlar *plug-ins* o complementos. <https://helpx.adobe.com/es/acrobat/using/display-pdf-in-browser.html> (último acceso: octubre de 2015).

105 El límite del tamaño de la textura que puede cargar el formato PDF3D es de 8192 x 8192 píxeles. Este factor limita una visualización en alta resolución de este tipo de ficheros frente a otro tipo de soluciones (*vid. infra*).

TABLA 18

**Principales funcionalidades de gestión de modelos 3D
en el formato estándar de intercambio PDF3D según guía de usuario adaptada de Acrobat DC**

Rotar	Permite rotar objetos 3D respecto a la pantalla. El movimiento del objeto depende de la vista inicial en la que inició el arrastre y de la dirección de éste.
Gírar	Permite girar un modelo 3D en paralelo respecto a los dos ejes fijos del modelo 3D, el eje x y el eje z.
Alternar árbol modelo	Podemos dividir el trabajo en diferentes capas, para activar o desactivar, generadas para sistemas CAD (<i>vid. infra</i> Mausoleo de Fabara).
Usar proyección ortogonal o proyección de perspectiva	Alterna entre la visualización de la proyección de perspectiva u ortogonal del objeto 3D.
Agregar multimedia/ comentario 3D	Permite agregar una nota a cualquier parte del modelo 3D. La nota se mantiene con la vista.
Sección cruzada	Permite generar secciones en tiempo real en cualquier eje x, y, z Resulta muy práctico poder seleccionar el plano de corte, junto con un porcentaje de transparencia, y cambiar la alineación y ángulo de la sección. Función muy utilizada en análisis morfológicos de cerámicas o análisis de estructuras arquitectónicas.
Alinear con 3 puntos	Existen varias opciones para alinear. Destacamos la función de 3 puntos ya que permite cortar la sección sobre un plano definido por 3 puntos.
Medición de objetos 3D	Permite crear mediciones entre combinaciones de puntos o bordes del modelo 3D. Al mover el puntero sobre el modelo 3D se resaltan puntos y bordes específicos. La herramienta de medición 3D admite cuatro tipos de mediciones: la distancia perpendicular entre dos bordes rectos, la distancia lineal entre dos puntos, el radio de bordes circulares y el ángulo entre dos bordes (o tres puntos). Se puede además asociar medidas 3D con vistas específicas. Si la vista predeterminada está activa cuando se agrega una medida, se creará una nueva vista de medida y se agregará a la jerarquía de vistas en el árbol modelo. La medida sólo está asociada con esa vista y aparece como un elemento secundario de la vista. También puede mostrar comentarios mientras toma medidas. Estos comentarios (también llamados marcas de medida) se conservan al cerrar el documento.
Definir unidades de modelo	Junto con la funcionalidad anterior existe igualmente la posibilidad de cambiar las unidades de medición cuando empezamos a medir sobre el modelo 3D.
Activar presentación de coordenadas	Muestra u oculta las coordenadas del sistema de referencia del puntero del ratón en la ventana de información de medida tal y como si fuera un sistema CAD.

Vid. <https://helpx.adobe.com/es/acrobat/using/interacting-3d-models.html> (último acceso: octubre de 2015).

prácticamente los encontramos en cualquier disciplina, desde los videojuegos hasta usos médicos. Este auge ha posibilitado el desarrollo de un conjunto de herramientas que han contribuido a una rápida difusión.

No existe un único formato, ni una solución que prevalezca sobre otra por sí misma, como ya hemos visto, en cada uno de los proyectos analizados para la publicación de la información tridimensional de manera *online*. Existen varias alternativas, cada una de ellas con sus ventajas y sus inconvenientes. Si el proyecto CARARE apostaba en el año 2010 por la inclusión de formatos PDF3D como herramienta de trabajo, hemos constatado cómo en los proyectos sucesivos han tendido hacia alternativas «más directas» sobre la inclusión de estos modelos sobre los navegadores, fundamentalmente bajo el estándar WebGL. Es aquí donde surgen un buen número de librerías de JavaScript y formatos para su inclusión. Si analizamos otro tipo de alternativas, más dirigidas a la industria del videojuego, encontramos el motor multiplataforma Unity3D. Aunque su utilización está muy determinada por el tamaño de las mallas, se utiliza frecuentemente por su simplificación como aplicación y desarrollo de modelos *ex novo* de estructuras arquitectónicas, aun-

que estos últimos pueden ser modelos sobre la base, por ejemplo, de una nube de puntos o malla registrada (*vid. supra* apdo. 3.6.3).

A. Análisis de X3DOM como formato estándar de intercambio

A partir del año 2010 surgen varias iniciativas que promueven el empleo de ficheros tridimensionales directamente en los navegadores que soportan WebGL sin necesidad del empleo de *plugins* ni programas específicos. Este factor supone una ventaja en la rapidez e intercambio de información. Uno de estos formatos es X3DOM, un estándar basado en los formatos X3D y XML y que utiliza la librería de JavaScript x3dom.js de la empresa Fraunhofer. Este tipo de archivos son fácilmente exportables desde el programa de código abierto Meshlab, pudiendo incluir tanto el «color vertex» dentro del fichero o generar la textura separada del modelo. Un ejemplo en cuanto posibilidades de estos archivos lo encontramos en el repositorio generado por el proyecto europeo 3DCOFORM del Victoria & Albert Museum¹⁰⁶. Sin embargo, la calidad de los modelos debe ser altamente simplificada para poder visualizarlo con cierta agilidad.

106 <http://www.3dcoform.eu/x3domCatalogue/> (último acceso: octubre de 2017).

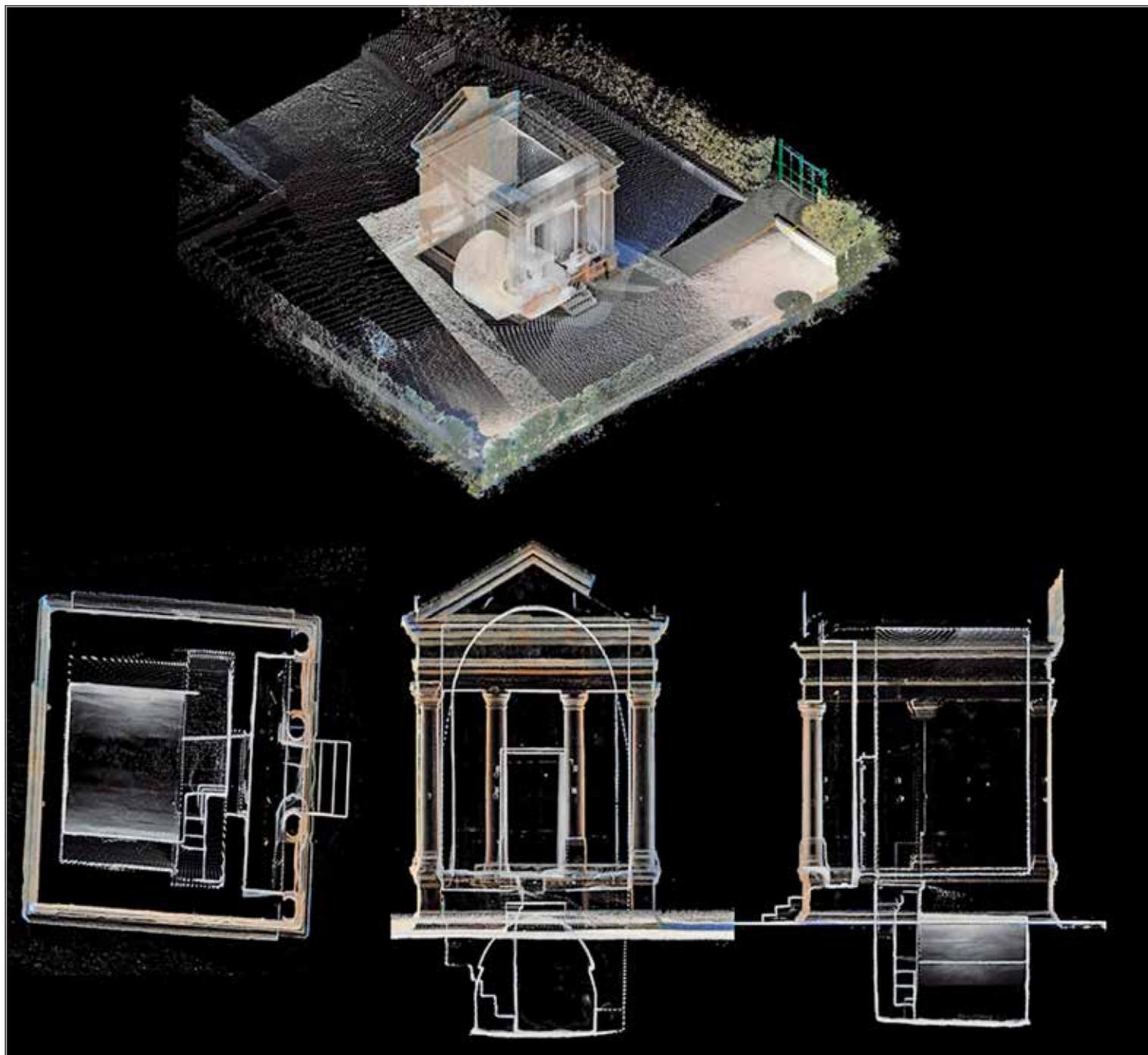


FIG. 197. En esta pág. y la siguiente: nube de puntos y árbol de capas sobre el modelo tridimensional en PDF3D del Mausoleo de Fabara con diferentes secciones longitudinales, transversales y horizontales*.

B. Análisis del uso de las librerías Three.js

El proyecto Three.js¹⁰⁷ trata de un conjunto de librerías *open-source* realizadas en JavaScript que permiten integrar modelos 3D en cualquier navegador que admita WebGL¹⁰⁸. La gran cantidad de librerías de ejemplos que se encuentran en su web <http://threejs.org/examples/> permiten integrar modelos tridimensionales de múlti-

¹⁰⁷ <http://threejs.org/> (último acceso: octubre de 2017).

¹⁰⁸ Se trata de una especificación estándar que permite a los navegadores incorporar gráficos 3D en páginas web sin necesidad de *plugins* ni programas adicionales. Para comprobar la compatibilidad de cada una de las versiones de los navegadores y sistemas operativos véase <http://caniuse.com/#feat=webgl>

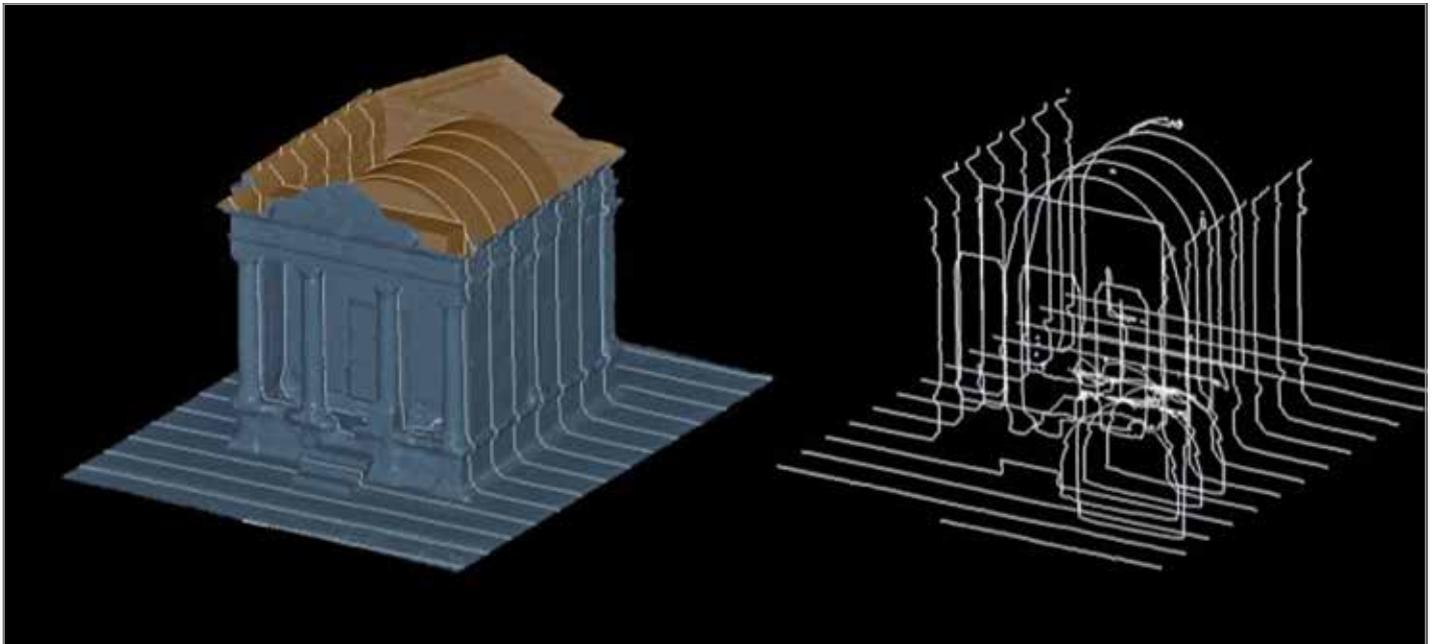
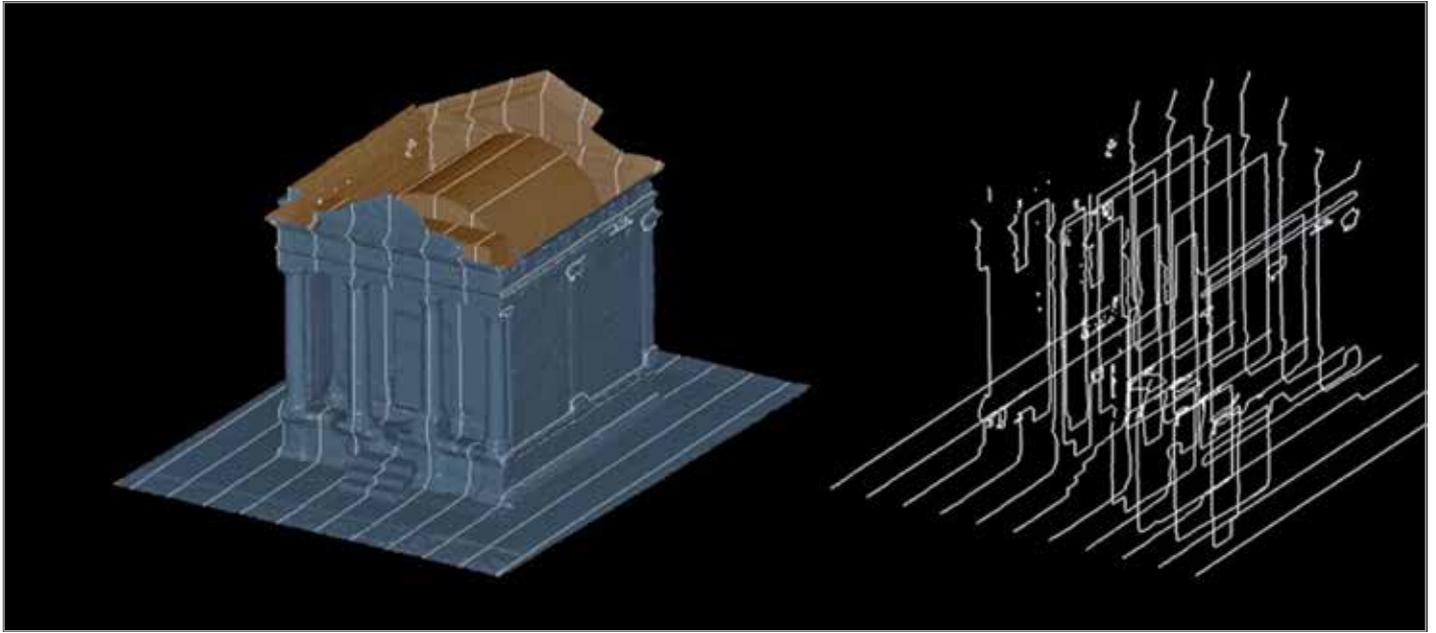
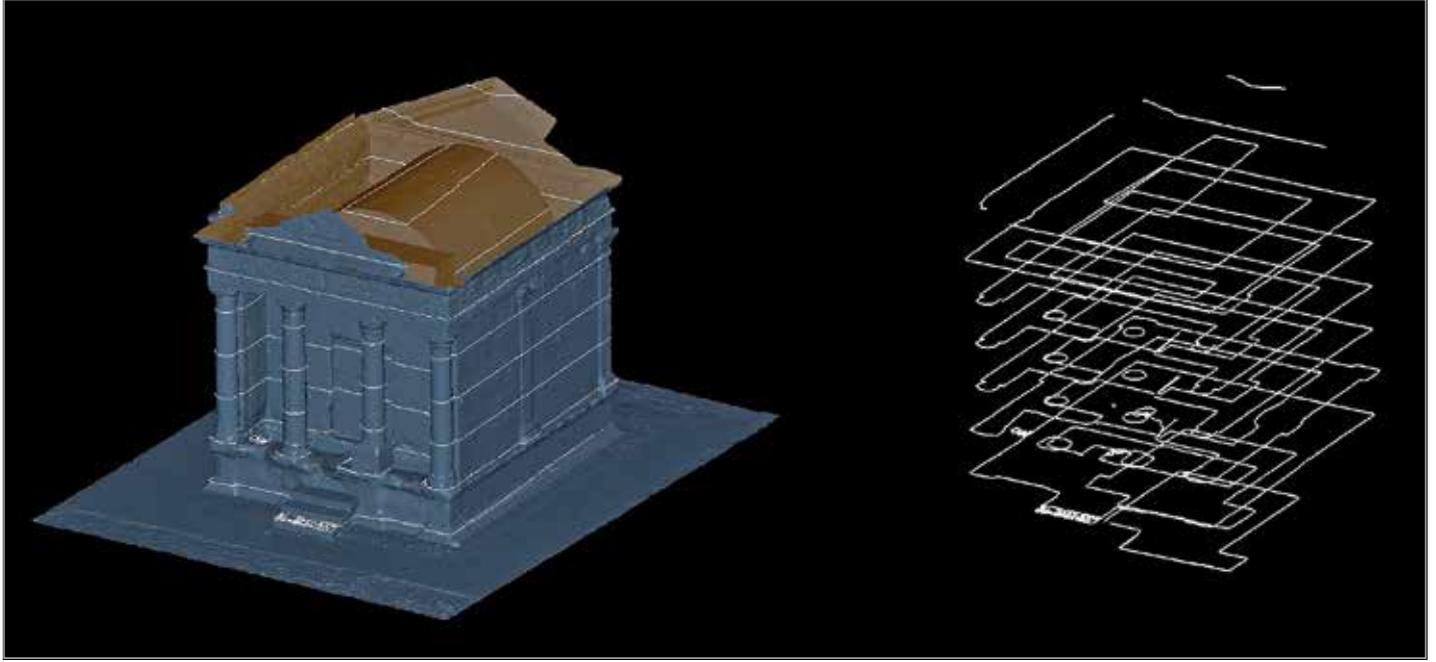
* Vid. figs. 52 y 56 relacionadas con la toma de datos y procesamiento del Mausoleo romano de Fabara. Proyecto desarrollado conjuntamente con la arquitecta Beatriz Gimeno.

ples maneras y formatos, constituyendo toda una alternativa llena de posibilidades tanto para poder visualizar dichos modelos como para soporte de integración y relación de información.

Los principales formatos tridimensionales que puede integrar son *vtk*, *collada* (*dae*), *stl*, *ply*, *vrml* y *obj*. Existe otra opción que amplía notablemente las posibilidades a través del formato JSON (*JavaScript Object Notation*)¹⁰⁹. Este formato estándar de intercambio de datos tiene varias ventajas; entre ellas, se trata de un tipo de formato de texto independiente bastante ligero respecto a los formatos más comunes de modelos tridimensionales.

Asimismo, hemos realizado varios ensayos con casos de estudio, con la digitalización tridimensional de un fragmento de cerámica

¹⁰⁹ <http://json.org/> (último acceso: octubre de 2017).



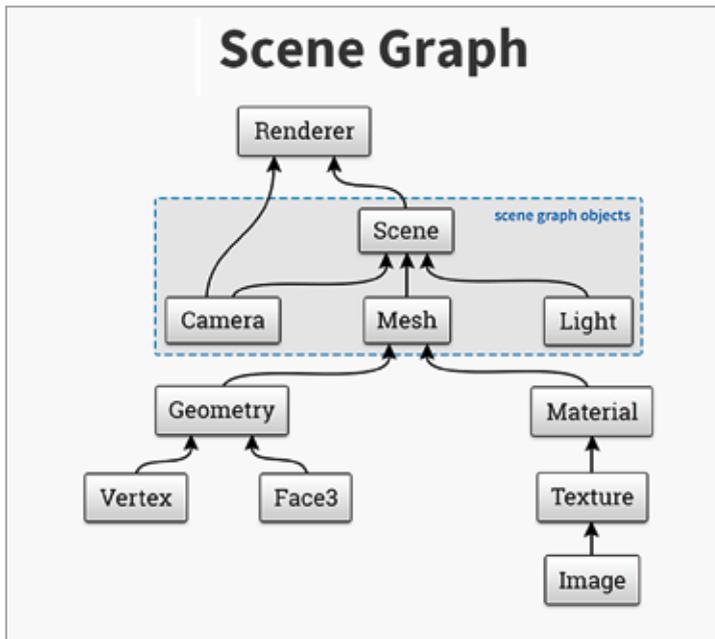


FIG. 198. Organigrama de todas las variables que incorpora Three.js para la generación de un modelo tridimensional. FUENTE: <http://davidscottlyons.com/threejs/presentations/frontporch14/#slide-16>

cardial del yacimiento de La Ambrolla (La Muela, Zaragoza)¹¹⁰, y la comparación con archivos genéricos como collada (dae), obj y vrml. La reducción de tamaño oscila entre el 45% y el 60%, dependiendo del tipo de formato. Sin duda, esta reducción tiene una doble ventaja tanto para su almacenaje como para su difusión web.

Otra de las ventajas que observamos reside en que se trata de un archivo que se puede abrir en cualquier editor de textos. Este factor permite, al igual que los formatos anteriormente mencionados, rescatar su información sin la necesidad del uso de un programa propietario. En contraposición, conocemos, hasta ahora, únicamente dos alternativas para exportar un modelo tridimensional a este tipo de formato: el uso de los programas Meshlab y Blender. Ambos programas coinciden, no casualmente, en su carácter de publicación bajo una licencia de código abierto. Por un lado, Meshlab (v1.3.3) lleva el *plug-in* de exportación incorporado y, por otro lado, Blender (v2.75) requiere cargarlo antes de realizar la exportación.

Otro de los ejemplos más notables sobre esta librería es su uso en el proyecto Potree, desarrollado por la Universidad de Tecnología de Viena¹¹¹ como sistema de visualización *open source* basado en WebGL y su uso en la gestión de nubes de puntos.

El uso de la combinación de las librerías que gestionan este proyecto¹¹² permite:

- Una gestión dinámica de nubes de puntos densas.
- Opciones sobre la visualización de la nube de puntos (ángulo, tamaño del punto, filtros de luz, etc.)
- Generación de medidas, localización de coordenadas, anotaciones, superficies, secciones y volúmenes sobre la nube de puntos.
- Exportación directa en diferentes formatos: JSON, DXF, LAS, CSV.
- Clasificación por filtro (para datos LiDAR).

110 Bea *et al.* (2010): «Prospecciones arqueológicas en el término municipal de La Muela (Zaragoza)», *Salduie*, 10, pp. 240-241.

111 <https://www.cg.tuwien.ac.at/> (último acceso: noviembre de 2017).

112 Librerías que integran el proyecto Potree: i18next, tween.js, proj4js, openlayers, plasio, laszip, jquery, threejs.

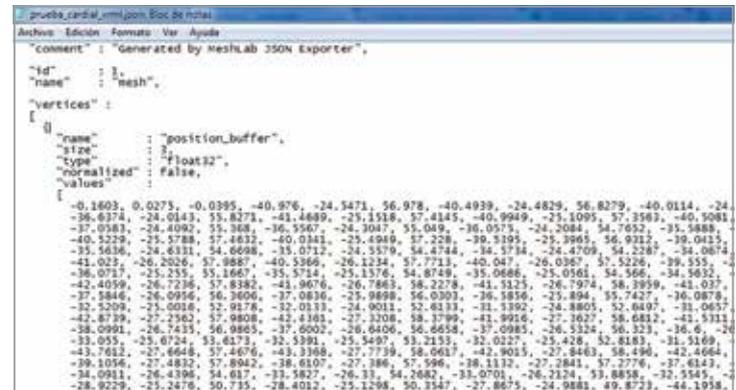


FIG. 199. Ejemplo de la estructura que emplea el formato JSON en la codificación de un modelo 3D.

C. Análisis del uso de las librerías JSC3D

Otro ejemplo de librería *open source* WebGL para la publicación de modelos 3D es JSC3D¹¹³. Esta librería importa modelos en diferentes formatos como obj o stl.

Funciona en entornos que admiten WebGL y en dispositivos móviles con pantallas táctiles.

D. Análisis de 3D Hop¹¹⁴

Se trata de un sistema de conversión de modelos tridimensionales creado por los autores del programa Meshlab. Los modelos se pueden visualizar en navegadores web que admitan WebGL mediante la conversión a un formato propio denominado *nexus*. La gran ventaja respecto a la plataforma más conocida, Sketchfab, es que se puede visualizar de manera de manera *offline*, aunque su agilidad y gestión es algo menor. Posee un filtro que permite focalizar la luz en un determinado ángulo para observar detalles pero no admite posibilidad de anotaciones en 3D.

E. Sistemas 3D en la nube: Sketchfab¹¹⁵

Esta plataforma representa la solución *online* gratuita más extendida de visualización de modelos tridimensionales compatibles con navegadores que admitan WebGL, con más de 1,5 millones de modelos y 6,5 millones de consultas cada mes. Tiene la capacidad de importar un buen número de formatos y además es posible incorporar anotaciones tridimensionales en cada modelo y sistemas inmersivos como las gafas de realidad inmersiva Oculus Rift 1 y 2 o cualquiera compatible con un dispositivo móvil (con giroscopio y acelerómetro) del tipo google cardboard¹¹⁶. Esta característica hace que se pueda aprovechar una gran alternativa de modelos para su visualización sin un coste adicional.

Admite una gran cantidad de formatos de ficheros tridimensionales¹¹⁷, y además han desarrollado *plugins* para otra gran cantidad de programas de gestión tridimensional para hacer una exportación directa a esta solución. Se trata de una de las mejores soluciones *online* de gestión de modelos con diferentes soluciones y herramientas exclusivas para el patrimonio cultural¹¹⁸. El único inconveniente

113 <https://code.google.com/p/jsc3d/> (último acceso: noviembre de 2017).

114 <http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/> (último acceso: noviembre de 2017).

115 <https://sketchfab.com> (último acceso: noviembre de 2017).

116 <https://vr.google.com/cardboard/> (último acceso: noviembre de 2017).

117 <https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/202508396-3D-File-Formats> (último acceso: noviembre de 2017).

118 <https://forum.sketchfab.com/t/tools-for-cultural-heritage-applications/786> (último acceso: noviembre de 2017)

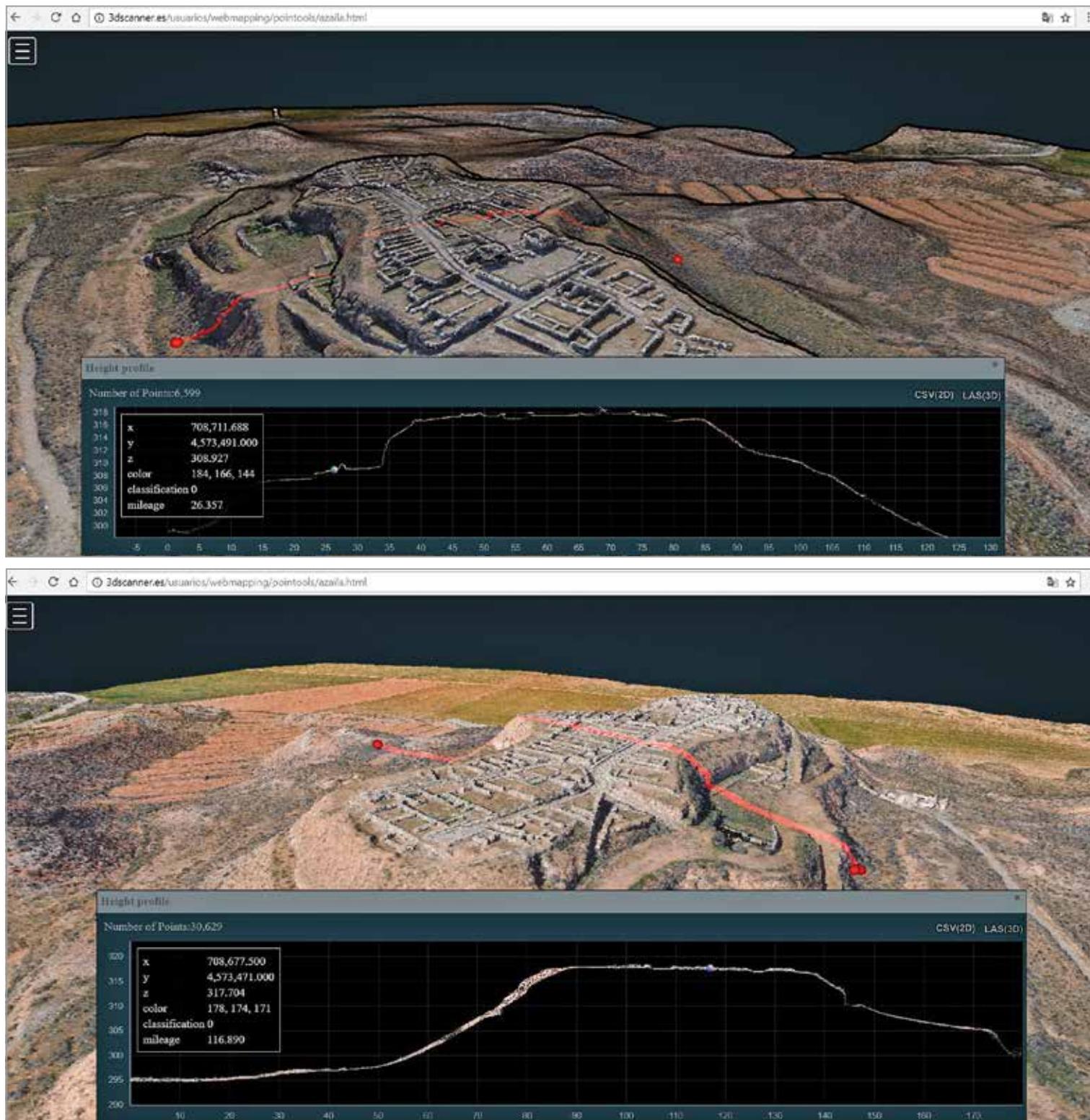


FIG. 200. Nube de puntos densa procesada mediante técnicas de fotogrametría aérea de baja altura con dron de ala fija eBee Plus RTK en el Cabezo de Alcalá (Azaila, Teruel)*. La peculiaridad de este resultado es que su gestión se realiza directamente en cualquier navegador que admita WebGL, sin necesidad de visores ni programas adicionales, pudiendo obtener y exportar en tiempo real secciones, coordenadas, mediciones, volúmenes, clasificaciones, valor RGB, etc.

es que se trata de una plataforma reservada para su difusión *online* que por el momento, y después de varias experimentaciones, no tiene un carácter plenamente métrico¹¹⁹. Aunque el patrimonio cul-

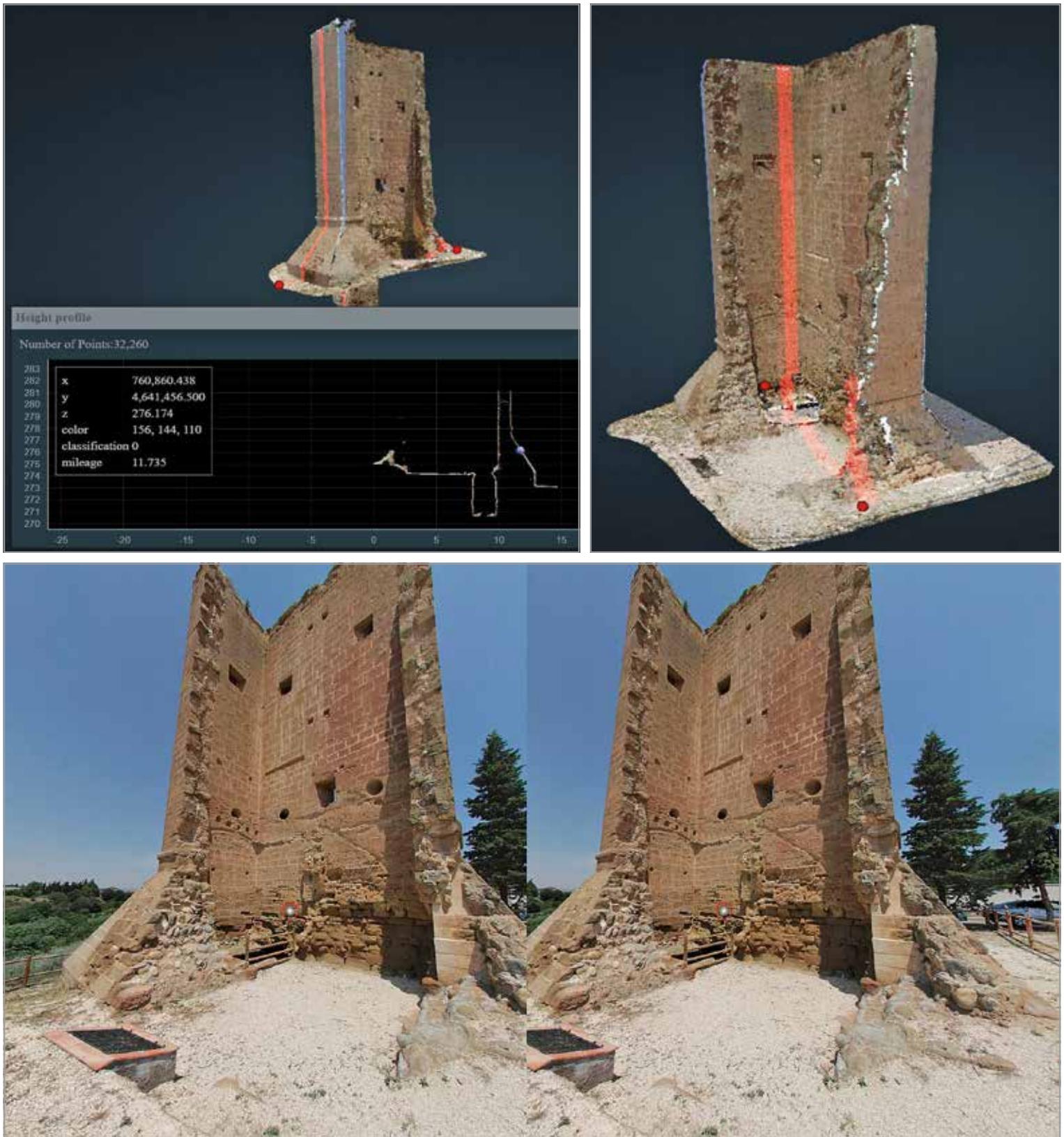
tural está muy presente en esta plataforma, con una gran alternativa de museos virtuales, tiene un carácter más vinculado con la industria del videojuego como repositorio de modelos.

¹¹⁹ <https://labs.sketchfab.com/experiments/measurements/> (último acceso: noviembre de 2017).

* Gestionado a través de la plataforma de gestión de información tridimensional *online* (nubes de puntos, mallas tridimensionales, realidad virtual y SIG) <http://www.threedcloud.com> (último acceso: noviembre de 2017), *vid.* FIG. 196.

F. Casos de estudio: digitalización de modelos 3D, compilación de librerías y funcionalidades para publicación *online*

Como ejemplo de utilización y ensayo se han escogido dos librerías Three.js y Jsc3D.js de JavaScript, anteriormente analizadas, para



FIGS. 201-202. Ejemplo arquitectónico de la gestión abierta de una nube de puntos densa de la Torre de Conchel (Monzón, Huesca) registrada, en este caso, con láser escáner 3D de diferencia de fase *Leica HDS6100* (TLS) combinado con un visor inmersivo aprovechando cada escaneado*.

comprobar las capacidades de implementación de estas herramientas como soporte para la documentación tridimensional.

Para el primer ensayo realizado hemos utilizado varios scripts de Three.js y Jsc3D.js para incorporar el modelo tridimensional adqui-

rido del escaneado de un fragmento de cerámica cardial del yacimiento arqueológico de La Ambrolla (La Muela, Zaragoza)¹²⁰ mediante un escáner de triangulación NextEngine¹²¹.

120 Para una mayor información consúltese Bea *et. al.* (2010).

121 Resolución de 0,1 mm. en modo macro con un campo de 13 x 10 cm y de 0,3 mm. en modo extendido con un campo de 34 x 25 cm aproximadamente (<http://www.nextengine.com/>).

* Proyecto financiado por el Ayuntamiento de Monzón. <http://www.monzon.es/to-reconchel.html> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 203. Visión estereoscópica del abrigo de Chimiachas con las gafas Oculus Rift para la visualización tanto de imágenes equirectangulares de cada escaneado como los modelos tridimensionales de cada panel mediante el sistema de sketchfab.

El formato obj resultante lo hemos importado en el *software* Meshlab con un resultado de 242.417 vértices y 473.064 caras. Desde aquí hemos realizado una exportación como fichero JSON.

Para la carga de las librerías three.js hemos utilizado ambos ejemplos como formato JSON y como formato obj con idénticos resultados.

Respecto a la incorporación del modelo tridimensional obtenido hemos recurrido al formato obj y las siguientes librerías modifica-

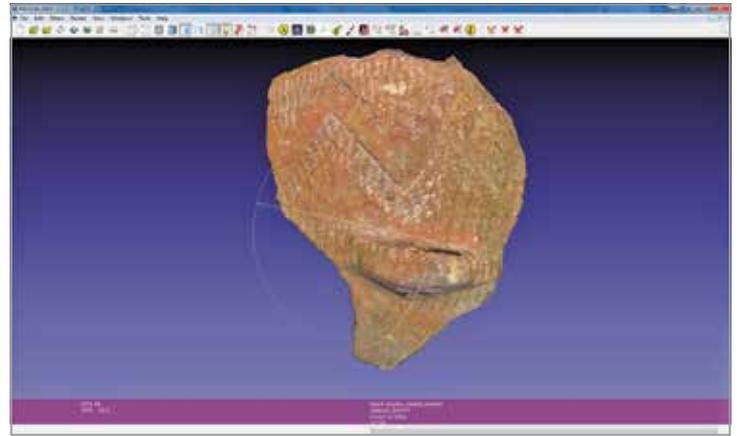


FIG. 205. Digitalización tridimensional de la cerámica cardinal de La Ambrolla (La Muela, Zaragoza) visualizada mediante el *software* Meshlab.

bles desde su código fuente en la plataforma colaborativa: <https://github.com/mrdoob/three.js/>

1. three.min.js
2. DDSLoader.js
3. MTLLoader.js
4. OBJMTLLoader.js
5. Detector.js
6. stats.min.js

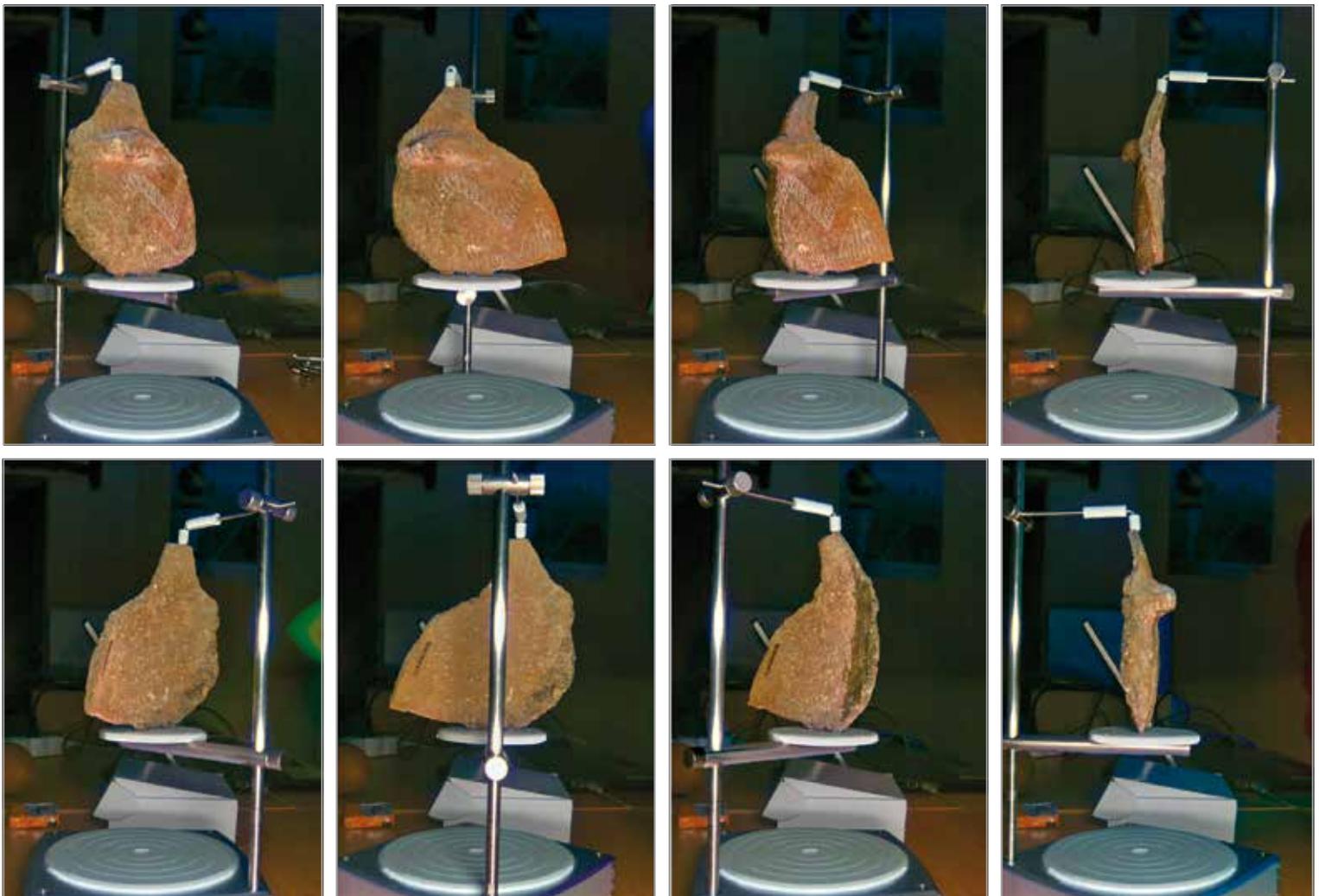


FIG. 204. Proceso de escaneado del fragmento de cerámica cardinal por medio de una peana motorizada del escáner de triangulación mod. NextEngine.

Finalmente hemos modificado el siguiente código fuente para obtener:

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <title>three.js WebGL - OBJLoader + MTLLoader</title>
    <meta charset="utf-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, user-scalable=no, minimum-scale=1.0, maximum-scale=1.0">
    <style>
      body {
        font-family: Monospace;
        background-color: #000;
        color: #fff;
        margin: 0px;
        overflow: hidden;
      }
      #info {
        color: #fff;
        position: absolute;
        top: 10px;
        width: 100%;
        text-align: center;
        z-index: 100;
        display: block;
      }
      #info a, #button { color: #f00; font-weight: bold; text-decoration: underline; cursor: pointer }
    </style>
  </head>
  <body>
    <div id="info">
      <a href="http://threejs.org" target="_blank">three.js</a> - OBJLoader + MTLLoader
    </div>
    <script src="js/build/threemin.js"></script>
    <script src="js/loaders/DDSLoader.js"></script>
    <script src="js/loaders/MTLLoader.js"></script>
    <script src="js/loaders/OBJLoader.js"></script>
    <script src="js/Detector.js"></script>
    <script src="js/libs/stats.min.js"></script>
    <script>
      var container, stats;
      var camera, scene, renderer;
      var mouseX = 0, mouseY = 0;
      var windowHalfX = window.innerWidth / 2;
      var windowHalfY = window.innerHeight / 2;
      init();
      animate();
      function init() {
        container = document.createElement( 'div' );
        document.body.appendChild( container );
        camera = new THREE.PerspectiveCamera( 45, window.innerWidth / window.innerHeight, 1, 2000 );
        camera.position.z = 250;
        // scene
        scene = new THREE.Scene();
        var ambient = new THREE.AmbientLight( 0x444444 );
        scene.add( ambient );
        var directionalLight = new THREE.DirectionalLight( 0xffe000 );
        directionalLight.position.set( 0, 0, 1 ).normalize();
        scene.add( directionalLight );
        // model
        var onProgress = function ( xhr ) {
          if ( xhr.lengthComputable ) {
            var percentComplete = xhr.loaded / xhr.total * 100;
            console.log( Math.round(percentComplete, 2) + '% downloaded' );
          }
        };
        var onError = function ( xhr ) {
          THREE.Loader.Handlers.add( /\.dds$/A, new THREE.DDSLoader() );
          var mtlLoader = new THREE.MTLLoader();
          mtlLoader.setPath( 'obj/prueba_cardial/' );
          mtlLoader.load( 'prueba_cardial_vrml.obj.mtl', function( materials ) {
            materials.preload();
            var objLoader = new THREE.OBJLoader();
            objLoader.setMaterials( materials );
            objLoader.setPath( 'obj/prueba_cardial/' );
            objLoader.load( 'prueba_cardial_vrml.obj', function ( object ) {
              object.position.y = - 95;
              scene.add( object );
            }, onProgress, onError );
          });
          //
          //
          renderer = new THREE.WebGLRenderer();
          renderer.setPixelRatio( window.devicePixelRatio );
          renderer.setSize( window.innerWidth, window.innerHeight );
          container.appendChild( renderer.domElement );
          document.addEventListener( 'mousemove', onDocumentMouseMove, false );
          //
          window.addEventListener( 'resize', onWindowResize, false );
        }
        function onWindowResize() {
          windowHalfX = window.innerWidth / 2;
          windowHalfY = window.innerHeight / 2;
          camera.aspect = window.innerWidth / window.innerHeight;
          camera.updateProjectionMatrix();
          renderer.setSize( window.innerWidth, window.innerHeight );
        }
        function onDocumentMouseMove( event ) {
          mouseX = ( event.clientX - windowHalfX ) / 2;
          mouseY = ( event.clientY - windowHalfY ) / 2;
        }
        //
        function animate() {
          requestAnimationFrame( animate );
          render();
        }
        function render() {
          camera.position.x += ( mouseX - camera.position.x ) * .05;
          camera.position.y += ( - mouseY - camera.position.y ) * .05;
          camera.lookAt( scene.position );
          renderer.render( scene, camera );
        }
      }
    </script>
  </body>
</html>

```

FIGS. 206-207. Código compilado (visualizado a través del programa de código fuente libre Notepad++ v6.8) con el modelo 3D de la cerámica en formato obj junto con la textura (véase flecha y resto en FIG. 207).

El otro ejemplo se ha basado en la librería jsc3D.js con la digitalización de la cerámica cardial mencionada y se ha obtenido el siguiente código:

```

<!DOCTYPE HTML>
<HTML>
<HEAD>
<TITLE> Cerámica cardial - La Ambrolla </TITLE>
</HEAD>
<BODY>
<div style="width:1500px; margin:auto; position:relative; font-size: 9pt; color: #777777;">
<div id="cv" style="border: 1px solid; width="1280" height="800" ></div>
<div id="loading" style="position:absolute; left:190px; top:134px;"></div>
<div id="tip" style="display:block; color:#ffffff; padding:5px; position:absolute; left:0px; top:330px; background-color:#000000; height:18px; width:115px; border-radius:5px; border:1px solid #777777; opacity:0.5; font-family:courier new;">
<input type="checkbox" id="quality" style="vertical-align:-2px; margin-right:2px;" onclick="changeGraphicQuality()">
<label> High Quality </label></input>
</div>
<p style="font-family:Arial,sans-serif">
Modelo 3D de un fragmento de cerámica cardial del yacimiento de La Ambrolla (La Muela, Zaragoza)
<strong></strong> Modelo 3D: Jorge Angás</strong>
<strong></strong> NextEngine - </strong> Enero de 2011 - Bibliografía:
<a href="http://salduie.unizar.es/sites/default/files/Salduie_109626M_9%20Bea%29.pdf">here</a></p>
</div>
<script type="text/javascript" src="jsc3d.js"></script>
<script type="text/javascript" src="jsc3d.touch.js"></script>
<script type="text/javascript" src="sonic.js"></script>
<script type="text/javascript">
var canvas = document.getElementById( 'cv' );
var viewer = new JSC3D.Viewer( canvas );
viewer.setParameter( 'SceneUrl', 'prueba_cardial_vrml.obj' );
viewer.setParameter( 'InitRotationX', 0 );
viewer.setParameter( 'InitRotationY', 0 );
viewer.setParameter( 'InitRotationZ', 0 );
viewer.setParameter( 'ModelColor', '#CAA618' );
viewer.setParameter( 'BackgroundColor1', '#CCCCCC' );
viewer.setParameter( 'BackgroundColor2', '#000000' );
viewer.setParameter( 'RenderMode', 'textureflat' );
viewer.setParameter( 'ProgressBar', 'off' );
viewer.init();
viewer.update();
/*
 * Create and display a user-defined sonic animation when loading.
 */
var sonic = new Sonic( [
width: 100,
height: 100,
stepsPerFrame: 3,
trailLength: 1,
pointDistance: 0.1,
fps: 30,
step: 'fader',
strokeColor: '#D4FF00',
setup: function() {
this._lineWidth = 6;
}
], [
[ 'arc', 50, 50, 20, 360, 0 ]
] );
document.getElementById( 'loading' ).appendChild( sonic.canvas );
showProgress( true );
viewer.onloadingcomplete = viewer.onloadingaborted = viewer.onloadingerror = function() {
showProgress( false );
};
function changeGraphicQuality() {
viewer.setDefinition( document.getElementById( 'quality' ).checked ? 'high' : 'standard' );
viewer.update();
}
function showProgress( show ) {
if( show ) {
sonic.play();
document.getElementById( 'loading' ).style.display = 'block';
} else {
sonic.stop();
document.getElementById( 'loading' ).style.display = 'none';
}
}
</script>
</BODY>
</HTML>

```

FIG. 208. Código compilado mediante la librería jsc3D.js

La publicación de 45 Mb *online* ha resultado bastante más ágil que el empleo de la librería anterior, igualmente compatible con dispositivos móviles táctiles: <http://3dscanner.es/ambrolla/ambrolla.html>

No obstante, de acuerdo a los ensayos realizados, creemos que este tipo de modelos no deberían superar los 10 Mb totales para obtener un equilibrio entre calidad y rapidez en la carga del modelo, con el objetivo de que fuese plenamente funcional con una velocidad de conexión media.

El segundo caso de estudio nos ha proporcionado, una vez que hemos comprobado la viabilidad del uso de este sistema con un objeto mueble, conjugar una digitalización del abrigo rupestre del Plano del Pulido en Caspe (Zaragoza)¹²² y su publicación como modelo tridimensional para su utilización directamente en un na-

122 Proyecto realizado conjuntamente con el Grupo de Investigación Primeros Pobladores del Valle del Ebro de la Universidad de Zaragoza dirigido por Pilar Utrilla.

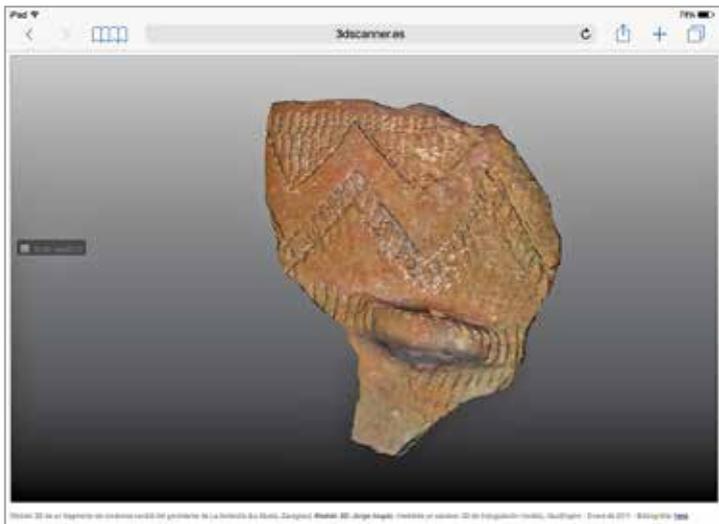


FIG. 209. Publicación *online* en un dispositivo móvil de la cerámica cardial de La Ambrolla (La Muela).

vegador. Con este ejemplo hemos pretendido aportar otro tipo de funcionalidades más avanzadas como:

- La elección del punto de luz sobre el modelo.
- La capacidad de poder extraer información métrica sin la necesidad de ningún tipo de visualizador (medidas y coordenadas).
- La aplicación de filtros e intensidades, diferenciación en partes asociadas con más información y aplicación de un algoritmo de decorrelación¹²³, para potenciar las partes menos visibles de la figura de la cierva que se encuentra a la izquierda de la figura central. Este tipo de funcionalidades están relacionadas con la misma técnica de generación de composiciones de falso color que hemos visto en teledetección (*vid.* apdo. 3.5).

La documentación se ha realizado con la combinación de dos tipos de escáneres 3D de diferencia de fase y triangulación. Posteriormente se ha realizado la conversión de los archivos tridimensionales a formato obj para finalmente convertirlo a formato JSON para su combinación con las librerías de three.js. El resultado final es la integración del abrigo rupestre en un navegador con las funcionalidades ya descritas, con posibilidad, además, de dividir las diferentes partes del mismo y relacionarlo con una base de datos.

Las librerías utilizadas y modificadas de la biblioteca three.js han sido las siguientes:

- HP3D_0.0.4.min.js
- jquery-1.9.1.js
- Handpas_1.0.1.min.js
- three.js

La conclusión sobre el empleo de este tipo de librerías escritas en JavaScript, en plataformas de desarrollo colaborativo (GitHub), junto con la combinación del lienzo (*canvas*) de HTML5, permiten un vasto conjunto de posibilidades que facilitan la utilización de estos modelos con información contextual asociada a una base de datos. A modo de síntesis final, pensamos que actualmente constituyen una magnífica solución que cumple varias de las premisas que hemos considerado fundamentales en la investigación realiza-

123 Se ha utilizado la herramienta DStretch de Jon Harman (2005) basado en las técnicas de *decorrelation stretching*, en este caso se ha utilizado el espacio color YBK, <http://www.dstretch.com/>



FIG. 210. Registro en campo del abrigo del Plano del Pulido en Caspe con la combinación de dos sistemas de digitalización tridimensional de triangulación y de diferencia de fase

da: alta capacidad métrica y gráfica *online* y *offline*, extracción de información geométrica, aplicación de filtros y texturas, sencillez en su utilización únicamente con un navegador que admita WebGL sin la necesidad de ningún programa adicional y, sobre todo, se trata de un sistema abierto y programable a cualquier tipo de implementación que necesitemos desarrollar en un futuro.

3.7.3. Propuesta de descripción conceptual de una base de datos

La base de datos teórica propuesta debe incorporar un extenso conjunto de variables de campos muy diversos: geología, geomorfología, arqueología, biología, con contenidos muy diversos (datos relativos a humedad, temperatura) y en distintos formatos (gráficos, fotografías) y naturaleza de los propios registros (papel, digital, diferentes formatos digitales, etc.).

Se debe, por tanto, asimilar en una misma y única base de datos con archivos vectoriales, ráster y de información alfanumérica, desarrollando e implementando un sistema de información geo-relacional espacial con un motor de búsqueda avanzado que permita obtener información mediante búsquedas relacionales (entre diversos campos). La diferente temática abordada en la base de datos debe ser traducida en objetos, claves de objeto, relaciones en-

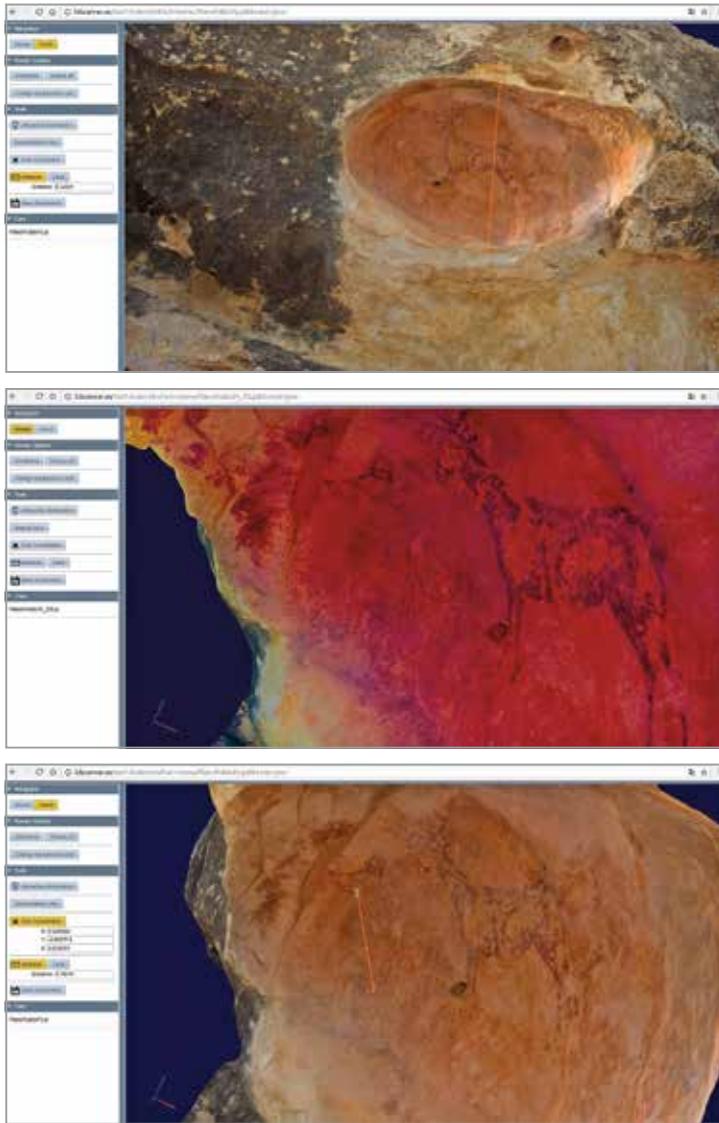


FIG. 211. Resultados de la integración del modelo tridimensional del abrigo del Plano del Pulido (Caspe) en un navegador con librerías three.js con información métrica y gráfica.

tre objetos y atributos descriptivos, todo ello además orientado al menos, a dos públicos bien diferenciados: técnico-científico y público general.

Dentro de la categoría de público técnico se establece tanto la de investigadores como la de gestoras-administradores del Patrimonio en cualquiera de sus claves de trabajo.

La totalidad de la información incluida en la base de datos debe de estar protegida con acuerdos sobre la propiedad intelectual *Creative Commons copyleft*. En este sentido, debemos de señalar cómo la protección intelectual de la información y de derechos de autor, en muchas ocasiones, va más allá incluso de lo considerado como responsable, con verdaderas lagunas en el conocimiento de determinados conjuntos arqueológicos por la simple e injustificada falta de publicación de resultados¹²⁴.

La heterogeneidad respecto a los formatos, fuera de los estándares anteriormente mencionados, es una constante que repercute negativamente en el tratamiento y difusión de la información generada. De esta manera, dentro del patrimonio cultural, encontramos esta doble variable en cuanto a la diversidad del patrimonio y la

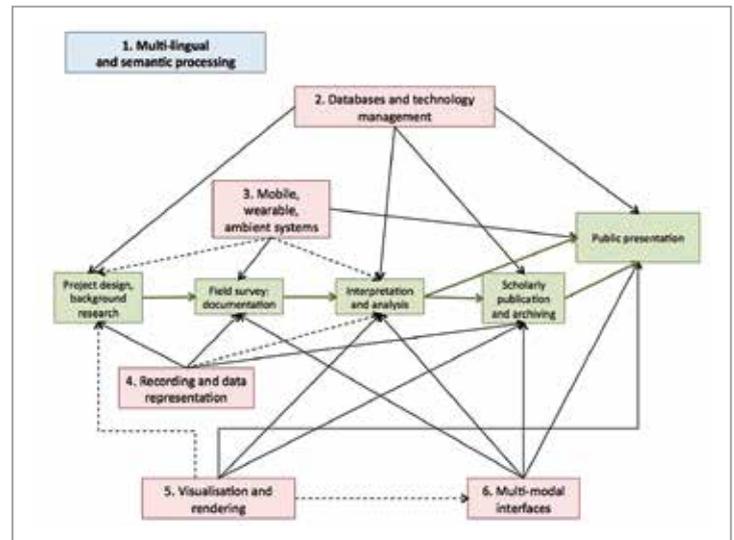


FIG. 212. Relación típica entre Bienes Culturales y las áreas funcionales de la Informática (modificado a partir del original de Van Eycken *et al.*, 2008).

estandarización de formatos. Este componente es uno de los más importantes en la construcción y funcionamiento de la propia base de datos. En este apartado se deben atender a diferentes aspectos:

- Definir un esquema de metadatos para ayudar a recopilar y agregar contenidos.
- Establecer flujos de trabajo entre las diferentes administraciones, departamentos y técnicos.

Como punto de partida básico, se deben de acotar perfectamente los tipos de información y documentación de los que se disponen y se quieren integrar en la propia base de datos. Seleccionados y recopilados, se debería realizar una clasificación por categorías:

- Elementos principales.
- Grupos de información.
- Elementos obligatorios.
- Elementos recomendados.

3.7.4. Propuesta para la gestión de los datos tridimensionales

Para llegar a un acuerdo en cómo estandarizar los datos adquiridos en la fase de documentación geométrica es necesario apostar por el uso de librerías que admitan la especificación estándar WebGL o similares, que sean compatibles a nivel de usuario en la misma línea de las experimentaciones realizadas en los puntos anteriores que hemos ido analizando. Este hecho permite una simplificación pero sobre todo una utilización de los archivos tridimensionales, además de conseguir complementar el binomio científico y divulgativo. Asistimos a una búsqueda, sin un formato todavía reconocido por el resto de la comunidad científica, cuya finalidad sea integrar un método que gestione de manera sencilla el registro tridimensional del patrimonio cultural. Si bien esta idea de vincular modelos 3D con bases de datos bidimensionales no es nueva, en alguna otra ocasión ha sido realizada con éxito con el apelativo *democratizing the process of heritage conservation*. Citaremos el ejemplo del barrio de Chinatown en Vancouver entre los años 2005-2007 desarrollado por la *University of British Columbia* (Canadá) a través de sencillas bases de datos del tipo Access o Filemaker que pudiesen ser consultadas de manera pública (Roecker, 2008: 345). Si analizamos el uso de esta información en arquitectura vemos un aumento de

¹²⁴ Para una mayor información entre las diferencias *copyright* y *copyleft* y los acuerdos GNU GPL consúltese Torres / Gómez (2011): *El copyright en cuestión*.

programas específicos que gestionan bases de datos relacionadas con la arquitectura con los *Building Information Modelling* (BIM)¹²⁵. Por otro lado, encontramos soluciones más acordes con el estándar WebGL y con el uso de plataformas tipo Unity que requieren una geometría simplificada realizada *ex novo*.

Según Valle (2007: 155), la estandarización de formatos debería contar independientemente de la técnica con tres premisas básicas que se reducen a estos aspectos: accesibilidad, comprensibilidad y utilidad geométrica. Con ello, se facilita, en primer lugar, la integración de bases de datos compatibles con servidores web actualizables con diferentes escalas de acceso y edición. De hecho, tanto la accesibilidad como la comprensibilidad quedan resueltas con la incorporación de los formatos WebGL.

Queda, no obstante, un largo camino para seguir avanzando en la integración de datos métricos mediante librerías en JavaScript con las que poder obtener medidas, localizar coordenadas, aplicación de algoritmos de decorrelación y, sobre todo, relacionar contenidos. Sin duda, representa el punto crucial y diferenciador de otro tipo de resultados, más relacionados con infografías donde en muchas ocasiones el componente métrico o no interesa o se ha perdido como consecuencia de escenarios virtuales más atractivos donde prima un efecto meramente visual.

Si comparamos los métodos utilizados en otras disciplinas, observamos cómo en muy pocas ocasiones ha existido una interacción con otros procesos de registro utilizados, por ejemplo, en ingeniería, industria o medio ambiente. De la ingeniería, podemos extraer como metáfora conceptual el término industrial «*as built*», como registro del estado actual (Jardí / Angás, 2010). En estos sectores existe una mayor estandarización de procesos que trascienden en la comprobación y control de la calidad del método, utilizándose de esta manera como principio de autenticidad del registro realizado.

La aplicación de cada una de las técnicas específicas, dentro de la documentación geométrica del patrimonio, debería contar con un proceso de trazabilidad del resultado tridimensional. Así, del mismo modo que se genera un *corpus* científico con los datos obtenidos, se debe intentar difundirlos al resto del público. Para ello, es necesario elaborar ficheros, según los criterios expuestos, que permitan obtener un mayor aprovechamiento científico y difusión del tipo de patrimonio al resto de la sociedad.

De este modo podríamos determinar un proceso metodológico centrado en el registro > estandarización > democratización de resultados:

- a) Registro del estado actual. Aplicación de la metáfora conceptual del término industrial *as built*. Interacción y comparación de procesos de registro relacionados con otras disciplinas: ingeniería, industria, ciencias ambientales. Todo esto supone un nuevo lenguaje que nos permite registrar la realidad. Al margen de los anacronismos pertinentes con otras disciplinas exógenas, establecer puntos de contacto con otros sectores contribuye a la adquisición de una visión global para organizar y gestionar la información. Intercambiar metodologías de trabajo, con el fin de ensayar su viabilidad será uno de los objetivos en los próximos años, sobre todo a nivel de procedimientos y ges-

ción de la información¹²⁶. Todo el proceso de compilación, de los datos tridimensionales se centra, en un primer estadio, en una adquisición del registro real, documentando y reproduciendo todos los detalles del mismo mediante la creación de una base documental. De esta manera, es posible introducir nuevos criterios científicos en su estudio y análisis. Mediante su utilización podemos obtener desde detalles milimétricos que pueden permitir el estudio de grabados, inscripciones o cualquier tipo de traza hasta su propia posición respecto al espacio morfológico que ocupa dentro del entorno inmediato.

- b) Estandarización de procesos. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos. Con ello se facilitaría la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiendo analizar de manera individual cada uno de ellos. De esta manera, las diferentes normativas ISO contribuirían como punto de avance (*vid. infra* apdo. 4.2).
- c) Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionen una difusión y divulgación.
- d) Metodología multidisciplinar en el proceso de estudio coordinada por un técnico especialista. La finalidad fundamental es la creación de bases de datos «democratizadas» a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso, con el objetivo de alcanzar una mayor divulgación del yacimiento arqueológico de manera gráfica y, sobre todo, geométrica. Esto posibilita, de un modo rápido y preciso, la visualización de cualquier elemento o parte de su estructura. De este modo, se ha logrado un desarrollo combinado, que sirve para una mayor valorización y divulgación de la información obtenida, además de contribuir al estudio científico interdisciplinar, resolviéndose los diferentes vacíos metodológicos y la conceptualización tridimensional.

Asimismo, esta documentación se puede utilizar como nuevo soporte científico, tanto en su labor de prevención, protección y conservación como en su posterior divulgación cultural. Todos estos factores, además del trabajo de un equipo multidisciplinar, permiten establecer una lógica espacial, a través de un modelo tridimensional, del cual se originan y ramifican una serie de datos que derivan en el aprovechamiento científico válido para diversas disciplinas.

De esta manera la propuesta que establecemos está enfocada en una doble vía:

- gestión administrativa: acceso a la base de datos con distintos niveles de información, cada uno de los cuales accesible mediante diferentes claves de acceso.
- difusión: mediante plataforma web de autogestión aunque se debería contar con un servidor externo para el alojamiento de determinado tipo de información, como los modelos tridimensionales. En este caso se aconseja el uso de plataformas con servicio de pago (aspectos relacionados con la seguridad y propiedad de los modelos; capacidad de almacenamiento, etc).

Algunos ejemplos en esta línea de difusión empiezan a desarrollarse sobre todo en el ámbito museográfico o relacionado con Fundaciones dedicadas a la salvaguarda del Patrimonio Cultural, especialmente con el Prehistórico y Arqueológico. Algunos casos se orientan al mundo de la investigación, llevándose a cabo proyectos que aparecen más como verdaderas perspectivas de futuro en ayuda a la investigación que bases de datos de gestión y difusión: *Pro-*

125 Mediante la Directiva 2014/24/UE (https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=DOUE-L-2014-80598) el Parlamento Europeo instó a los 28 países miembros de la Unión Europea a implementar la metodología BIM en todos aquellos proyectos constructivos de financiación pública. En países como Inglaterra tienen cierta ventaja en su práctica a partir de 2011, con un uso legislativo desde 2016. En España se prevé, según el Ministerio de Fomento, su implantación entre 2018-2019 para el caso de licitaciones públicas de infraestructuras (último acceso: noviembre de 2017).

126 Sobre estándares genéricos aplicados en ingeniería véase el capítulo «Codes, Standards, and Regulations» en Smith / Van Laan, 1987: 17-39.

yecto *Digitalización Tridimensional de Sitios y Artefactos Arqueológicos* desarrollado por el Instituto Nacional de Arqueología e Historia (México) (*vid.* apdo. 1.3-5).

Con un aspecto más orientado a la difusión, se han desarrollado algunos intentos de generación de bases de datos accesibles a través de plataformas *online* en los que se conjugan informaciones de diferente naturaleza: fotografías, información textual, modelos tridimensionales. La idea es la de generar una especie de repositorio de parte de los fondos museísticos con dos objetivos: conservación de las piezas y difusión.

Por lo general, estas bases de datos se limitan a aportar una información breve de objetos concretos pero contando con visualizadores 3D para poder trabajar con los modelos tridimensionales. No obstante, la calidad y el resultado final de los ejemplos revisados resulta bastante desigual.

Como hemos mencionado en el apartado anterior, la plataforma más utilizada como repositorio web de modelos 3D es sketchfab, que además de ser gratuita proporciona una alta compatibilidad con ficheros tridimensionales, navegadores y dispositivos móviles. No obstante, el número de este tipo de gestores está creciendo en los últimos años, articulados como verdaderas bibliotecas de intercambio de información tridimensional.

Estos gestores permiten el intercambio y visualización de abrigos y paneles rupestres en una parte o en su totalidad. Sin embargo, existen actualmente condicionantes que de algún modo limitan su plena visualización e interacción plena. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación física del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, para ello ha sido necesario comprimir la información prescindiendo de una mayor resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; y (3), la adopción de formatos que fuesen fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario.

El objetivo fundamental del prototipo de base de datos relacionales que presentamos se centra en el ejemplo de una cueva con arte rupestre:

- a) Describir los requisitos técnicos y conceptuales para la creación de un sistema SIG 3D web cuyo contenidos serían los datos (arqueológicos, biológicos, historiográficos, etc.) que se generan en el estudio de una cueva con arte rupestre. Dichos datos se almacenarían ya georreferenciados en el sistema de coordenadas oficial¹²⁷ y se podrían visualizar gráficamente en representaciones modeladas y/o de realidad virtual de la cueva.
- b) Describir las funcionalidades previstas que dicho sistema podría presentar, así como establecer diversos perfiles de usuario.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

El sistema propuesto tiene tres nodos fundamentales, simulando el ejemplo de una cueva con arte rupestre:

- a) **Una base de datos relacional** con tres unidades de información básica:

La cueva

Modelo cueva

¹²⁷ El sistema geodésico de referencia oficial en España es ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) según el Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/5B614FA3-5B57-4838-9D08-1434B8FD2DD5/70540/RD_1071_2007.pdf Exceptuando las Islas Canarias que se adopta el sistema REGCAN95. En ambos casos el elipsoide de referencia es GRS80 (último acceso: 14 de agosto de 2015).

Id_cueva

Nombre

Coordenadas

Localizacion_administrativa

Descripcion

Modelo_3D

Otros ...

El elemento arqueológico (grabado, pintura, etc.)

Modelo elemento_arqueologico

Id_elemento

Descripcion

Id_cueva

Coordenadas

La información adicional (modelo 3D, fotografía detalle, etc.)

Modelo_elemento_adicional

Id_elemento

Nombre

Descripción

Tipo

Localizador

Id_elemento_arqueologico

- b) **Un gestor de la base de datos**, con capacidades gráficas para posicionar elementos arqueológicos dentro de la representación tridimensional de la cueva. Dicho gestor estará a disposición del personal autorizado.
- c) **Un módulo de explotación de datos** en el que se podrá interrogar a la base de datos mediante formularios, recuperándose los elementos arqueológicos encontrados con su localización visual en la representación tridimensional. Dicho módulo puede tener varios niveles de uso y acceso: investigación / difusión.

Técnicamente, el sistema estará basado sobre tecnologías web. Actualmente existen plataformas de pago como por ejemplo Oracle Database, un sistema de gestión de base de datos interrelacional (SGBDR). En cambio, otras, caso de FileMaker, ofrecen un programa cerrado para gestionar bases de datos que no admiten la inclusión de formatos tridimensionales de manera directa. Las alternativas de programación más conocidas *open source* que utilizan bases de datos son SQL, que sin duda representa una alternativa a Oracle como sistema de gestión de bases de datos relacionales. Se trata de *software* libre empleado para múltiples usos, y es una de las herramientas con más potencial para realizar una parte de la gestión relacional de la base de datos.

De esta manera, se opta por la elección de un motor MySQL dadas sus características *open source*. La programación del gestor se haría con tecnología php, utilizando algún framework de código abierto (Laravel, Symphony2). El módulo de explotación utilizará tecnologías web: html5, css, javascript. La visualización de la representación gráfica de las cuevas se establece mediante tecnología de realidad virtual krpano¹²⁸.

Dentro de las funcionalidades, hay dos básicas, y a cada una le corresponde otro conjunto de funciones, principalmente gestionadas

¹²⁸ Consúltense el recorrido virtual generado sobre los estacionamientos de láser escáner 3D de la cueva de Maltravieso (Cáceres): http://patrimoniocultural.juntaex.es/filescms/maltravieso/uploaded_files/Cueva_Maltravieso/Cueva_Maltravieso.html Además, este estudio ha sido utilizado en la visualización aérea y terrestre de los abrigos rupestres del Parque Cultural del río Vero (Huesca) (*vid.* apdo. 3.7.5) y la Torre de Conchel (*vid.* fig. 201).

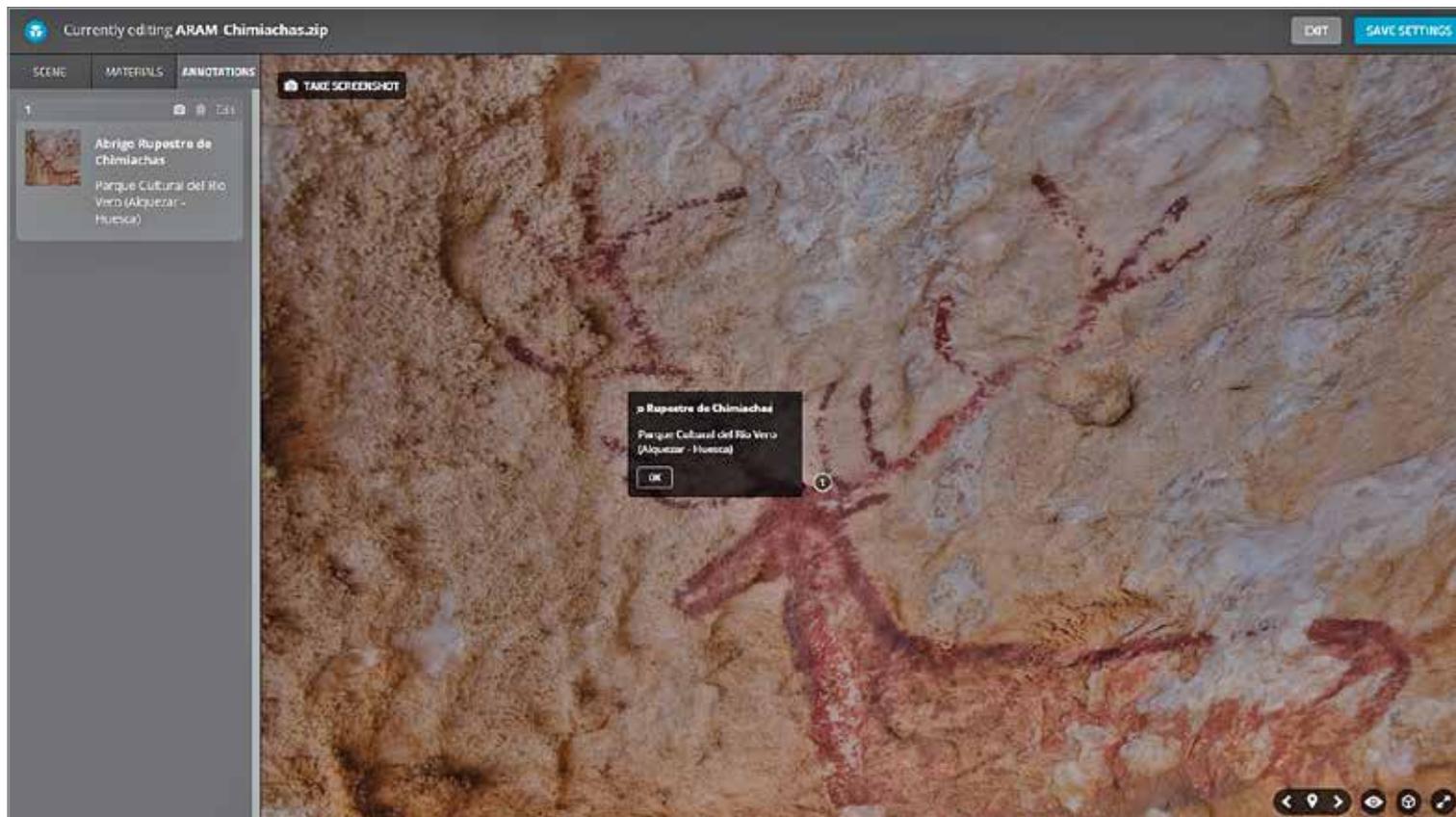


FIG. 213. Anotaciones sobre el modelo 3D vinculado a otro tipo de información contextual del abrigo rupestre de Chimiachas (Parque Cultural del río Vero, Huesca).

por una persona con derechos de edición. Esta persona, como gestor, dispondrá capacidades para:

- Dar de alta una cueva o abrigo rupestre.
- Añadir, editar y suprimir los datos.
- Añadir, editar y suprimir elementos arqueológicos.
- Posicionar de forma visual en la representación gráfica, por ejemplo de la cueva, la localización de un elemento arqueológico.
- Añadir, editar y suprimir ficheros de elementos adicionales, y relacionarlos con elementos arqueológicos.

El uso de un usuario sin derechos de edición dispondrá de acceso, únicamente, al módulo de explotación de datos, donde se podrá:

- Interrogar la base de datos con diversos criterios (por ejemplo: dónde encontrar representaciones parietales de manos negativas en ocre).
- Visualizar en forma de listado los resultados de la interrogación.
- Visualizar de manera gráfica el resultado de la interrogación.
- Interactuar gráficamente con la representación de realidad virtual de la cueva y con los posibles modelos 3D.
- Recuperar toda la información almacenada referente a cada uno de los ítems encontrados.
- Seguir de forma gráfica el flujo de relaciones. Por ejemplo, si hemos buscado figuras negativas de mano en ocre en la cueva x, podremos ver una de esas figuras *in situ*, y desde allí, podremos ver todas las demás figuras de esa cueva, de forma gráfica, o bien podremos saltar a figuras que responden al mismo criterio en otras cuevas.

3.7.5. Sistemas de visualización inmersivos

La utilización de sistemas inmersivos en arqueología está empezando a experimentar un notable ascenso en los últimos años con algunos ejemplos en Dell'Unto (2014: 151-158) y Forte (2014: 113-127) que acarrean una clara dualidad entre los sistemas que consiguen enriquecer la investigación científica y aquellos que su finalidad es únicamente divulgativa. Este último autor lo ha denominado como *cyberarcheology* o *teleimmersive archaeology*. Los avances tecnológicos en sistemas de visualización inteligente permiten, además de trabajar con los modelos tridimensionales, generar puntos de vista reales dentro del espacio arqueológico.

Los diferentes ensayos realizados a lo largo de este trabajo se han completado con el modelo de gafas de realidad inmersiva Oculus Rift DK1 (<https://www.oculus.com>). No obstante, existe una constante e incesante renovación de modelos. De todos ellos, destacamos los modelos económicos que mediante descarga de una plantilla, trabajan con el sistema Google Cardboard, con unas especificaciones del visor Cardboard de dominio público, publicitadas bajo el lema «hazlo tú mismo». Otro tipo de sistemas con un coste económico comedido permiten, mediante imágenes equirectangulares que interactúan con los giróscopos de los sistemas de móviles, visualizar visitas «virtuales» en espacios arqueológicos o arquitectónicos.

El planteamiento técnico que hemos desarrollado en este trabajo, ha consistido en aglutinar documentación geométrica con visualización gráfica, siempre dentro del mismo proceso, en ejemplos sobre todo ligados al arte rupestre (Cueva de Maltravieso, Roucadour y un conjunto de abrigos rupestres en el Parque Cultural del río Vero), que por diferentes circunstancias de conservación o dificultades de acceso no permiten una visita física de los enclaves arqueológicos. El proceso se basa en el aprovechamiento de la información en el momento de captura de la información, con datos geométricos y gráficos. De esta manera, seguimos un orden lógico

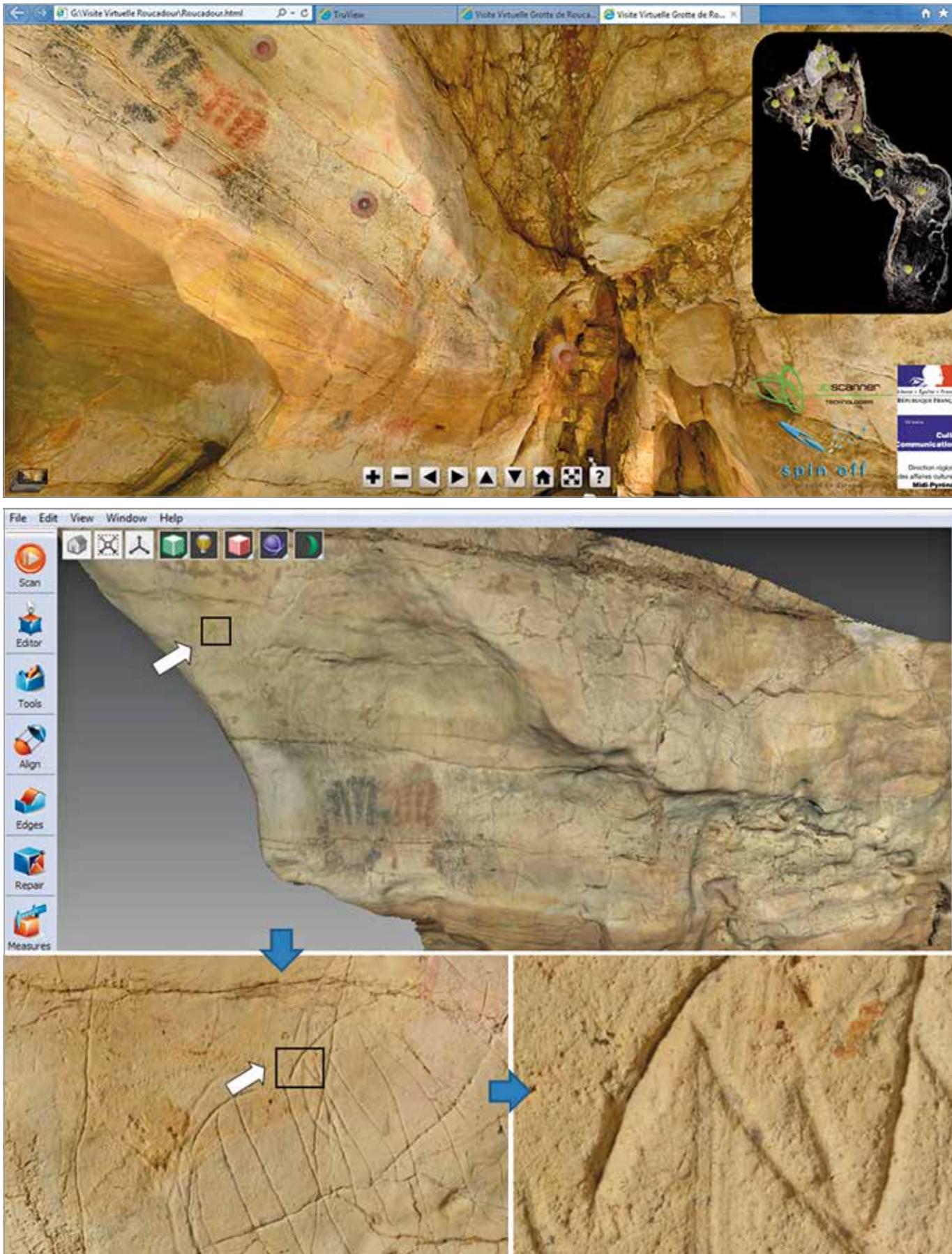


FIG. 214. Visualización inmersiva con puntos de acceso a diferente tipo de información de la diaclasa lateral decorada de la cueva de Roucadour (Lot, Thémines) con las gafas Oculus Rift* (Angás / Le Guillou / Mauduit, 2014: 31-33, FIGS. 6-9).

* Visualizador inmersivo para navegadores Chrome y Firefox aprovechando la imagen equirectangular de varios escaneados realizados en las cuevas de Roucadour (Thémines) y Maltravieso (Cáceres) con las gafas de realidad virtual Oculus Rift Development Kit. El ensayo realizado con estos ejemplos ha consistido en la integración con el *plugin* experimental NPAPI para JavaScript, permitiendo la acción del giróscopo de las gafas <https://github.com/benvanik/vr.js> (último acceso: noviembre de 2017).



FIG. 215. Imágenes esféricas aéreas del teatro romano de *Bilbilis* (Calatayud) a una altura de 85 metros (imagen superior), y presa romana de Muel a una altura de 70 metros.

en el procesamiento de la información, aprovechando las imágenes gráficas para crear puntos de vista inmersivos programables para introducir cualquier otro tipo de información contextual.

Los resultados permiten visualizar la documentación geométrica realizada desde un modo totalmente inmersivo dentro de cada escaneado. Si lo analizamos desde la perspectiva arqueológica es posible una observación mucho más directa del bien patrimonial ya que prescindimos de la parte interpretativa o abstracta (calcos,

imágenes de falso color o delineaciones) para estudiar directamente el espacio donde se inscribe el patrimonio. No obstante, se trata de un sistema de visualización que entendemos debe contar y combinarse con otro tipo de herramientas científicas para aprovechar todas sus posibilidades, prescindir de ellas supone focalizarlo únicamente como herramienta divulgativa.

Desde una visualización aérea existen diferentes opciones de imagen y video esférico inmersivo utilizadas en arquitectura y arque-



FIG. 216. Ejemplos de recorridos virtuales que combinan además, el calco como espacio inmersivo de los conjuntos rupestres del abrigo Contiguo a la Paridera de las Tajadas (Bezas, Teruel)* y abrigo de La Vacada (Castellote, Teruel)**.

logía, que integran en el caso de la imagen una combinación a cualquier tipo de información adicional mediante una base de datos. A continuación, destacaremos algunos ejemplos de imágenes esféricas aéreas de algunos conjuntos patrimoniales¹²⁹.

Respecto a la visualización inmersiva, hemos observado a lo largo de esta investigación diferentes tipos de técnicas que dividiremos en:

- Técnicas de visualización «directas», modelo tridimensional real texturizado con la imagen visible o mediante imagen esférica.
- Técnicas de visualización «indirectas», por medio de aplicación de algoritmos de decorrelación o aplicaciones de falso color.
- Técnicas de visualización «subjetivas». Son aquellas que necesitan de un proceso de abstracción bidimensional e interpretación cognoscitiva del patrimonio para recalcar aquellos detalles que demuestran la singularidad del bien patrimonial y no resultan perceptibles mediante el uso de otro tipo de técnicas. Este proceso lo hemos visto en otras disciplinas como la arquitectura con la línea, la arqueología con el plano de la excavación y dibujo de materiales, y la geografía con la generación del mapa y sus topologías (vid. FIG. 223). En el caso del arte rupestre, este proceso se rea-

liza por medio del calco. De esta manera, la combinación de toda esta información, gestionadas en diferentes capas, en una visualización inmersiva, enriquece notablemente su estudio y análisis. Además, en arte rupestre, este conjunto de técnicas lleva a uno de los grandes retos en su investigación en los últimos 100 años, a través de la percepción del espacio y su contexto¹³⁰.

Igualmente, ofrece un conjunto de posibilidades de divulgación muy valiosas, principalmente en aquellos enclaves que la orografía dificulta su acceso para su visita (como el ejemplo del abrigo rupestre de La Vacada en Castellote, Teruel) y para los conjuntos que por su delicado estado de conservación el acceso está restringido (Cueva de Maltravieso, Cáceres).

- Técnicas de visualización «virtuales». Reproducen este mismo espacio inmersivo directamente sobre un modelo tridimensional desaparecido o desmembrado. Esta técnica resulta muy útil, sobre todo, y de manera directa, cuando permite la visualización de los bienes patrimoniales que ya no existen, o bien se encuentran muy fragmentados y, por ende, no existe otra técnica posible¹³¹. Principalmente, en este caso se utilizan técnicas de anastilosis virtual (Angás / Ramón, 2016: 15-27). Igualmente, no debemos olvidar que en los últimos años se han desarrollado un vasto conjunto de ejemplos infográficos, generados normalmente *ex novo*, que está teniendo un calado profundo en el sector arqueológico, debido principalmente a programas gratuitos como Blender.

129 Vid. apdo. 3.4.1 con el resto de ejemplos desarrollados en el año 2010 en http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/ (último acceso: noviembre de 2017).

* Recorrido virtual por el «Arte rupestre Patrimonio Mundial de Bezas (Teruel)» financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte dentro de las ayudas a Patrimonio Mundial, Ayuntamiento de Bezas (Teruel) y Parque Cultural de Albaracín. Calcos y fichas realizados por Manuel Bea.

** Recorrido virtual del «Abrigo de La Vacada» (Castellote, Teruel) financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte dentro de las ayudas a Patrimonio Mundial, la Comarca del Maestrazgo y el Parque Cultural del Maestrazgo. Calcos y fichas realizados por Manuel Bea.

130 Vid. apdo. 3.6.2 sobre la aplicación desarrollada para el conjunto de los abrigos rupestres de la Comarca del Matarraña / Matarranya, sobre todo los ejemplos de Roca del Moros y Els Secans en el barranco de Calapatá (Cretas, Teruel).

131 Vid. *supra* apdo. 3.6.1.

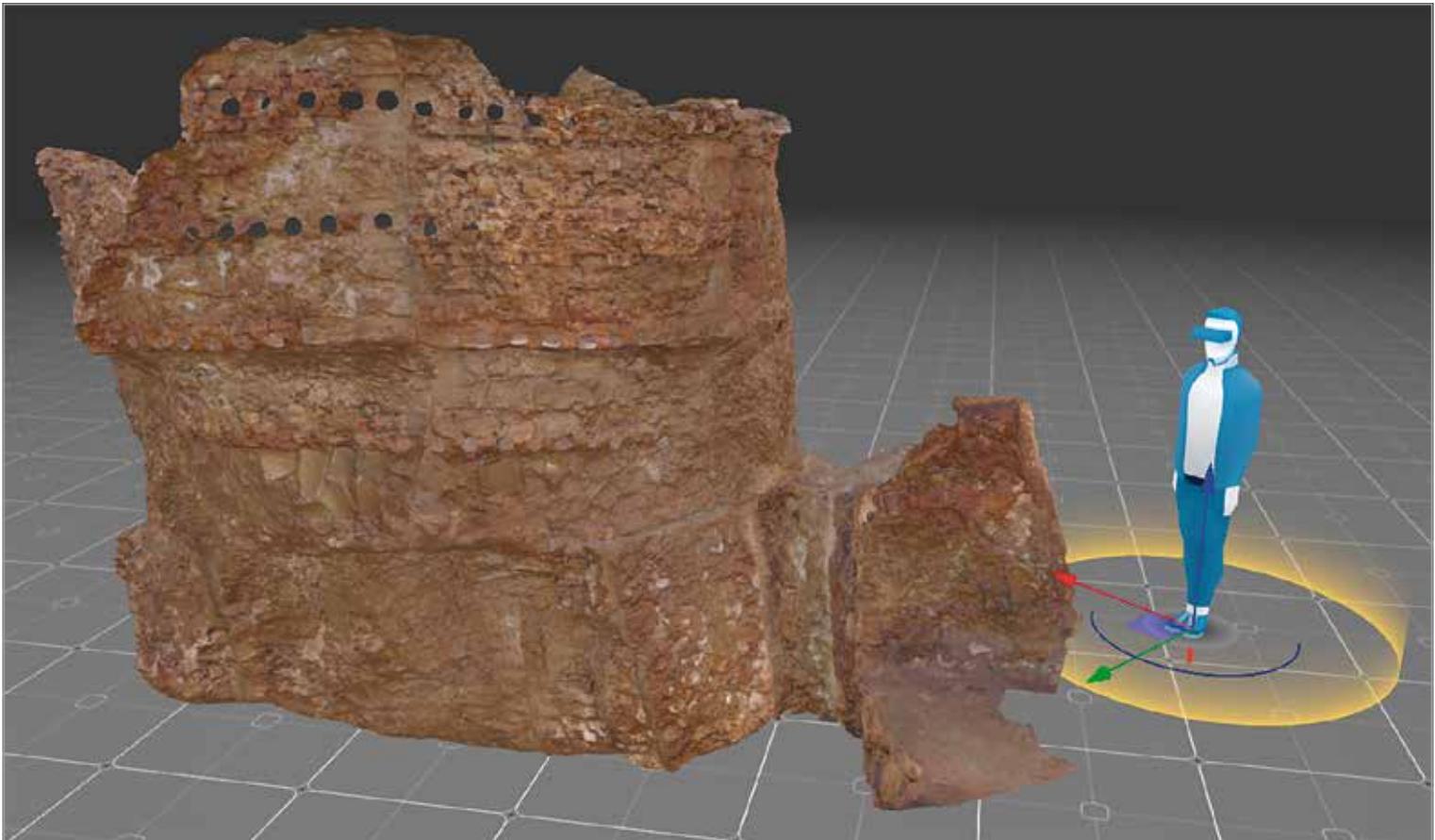


FIG. 217. Ejemplo de un desarrollo de realidad inmersiva con la escala de un avatar de 1,6 metros, en la plataforma *sketchfab*, sobre un horno islámico de birlas ss. XI-XII (Angás / Ramón, 2016: 15-27). En este caso, el modelo tridimensional final se obtiene mediante aplicación de técnicas de anastilosis virtual sobre un conjunto de fragmentos con un escáner 3D de luz estructurada.

3.7.6. Conclusiones

Todo este carácter dual, científico y divulgativo del patrimonio cultural que hemos expuesto a lo largo de los ensayos realizados en esta investigación, se encuentra en un periodo de evolución continua sobre la gestión de la información espacial. El avance de modelos 3D, no sólo cartográficos sino topográficos, está exigiendo que las propias bases de datos con componente espacial o *web mapping* interactúen de igual modo con este tipo de formatos. Los gestores de información geográfica tienen la capacidad de relacionar toda la información espacial a nivel cartográfico y establecer a través de base de datos cuestiones como las siguientes: preguntas entre el tipo de información que queremos obtener, relaciones entre atributos y otro tipo de análisis a nivel predictivo. Ahora bien, el problema lo encontramos en cómo gestionar toda la información en el denominado *world big data* (Van Rees, 2015: 28-29). Los ficheros 3D llevan años adaptándose a formatos web con los antiguos ficheros *vrmf*, *obj* y *dae*, –por citar algunos ejemplos–, y los recientes sucesores *X3D* y *JSON* basados en librerías JavaScript. Este tipo de información son los estándares reconocidos en los últimos proyectos europeos (3D-COFORM, EUROPEANA, ARIADNE, CARARE, 3D-ICONS, 3D-PITOTI, HANDPAS), subrayando la importancia del uso de herramientas y *software* de código abierto que permiten la visualización de modelos tridimensionales en plataformas digitales y navegadores web, tal y como se ha destacado en determinados proyectos como CARARE (Martínez / Ruiz, 2013: 447-448), 3D-PITOTI (<http://3d-pitoti.eu/>), ARIADNE (Forte *et al.*, 1997), 3D-COFORM (<http://www.3d-coform.eu/index.php/downloads>), 3D-ICONS (Guidi *et al.*, 2015). En este sentido, entendemos que con este tipo de archivos la adaptación tecnológica ha empezado antes por la parte visual que por la relacional, es decir, se ha pri-

mado más la parte gráfica a través de HTML 5 y WebGL que la parte en la que las coordenadas y texturas que conforman los modelos tridimensionales llaman a bases de datos y consigan tablas de datos relacionales en el patrimonio cultural. Asimismo, el avance hoy en día se encuentra, desde nuestro punto de vista, en soluciones transitorias que de un modo sencillo se pueda obtener esta información. Una de estas soluciones es, por ejemplo, la vinculación de modelos 3D como repositorios fácilmente consultables en Internet sin la necesidad de instalación de programas específicos. Así, hemos visto a través del ejemplo del proyecto ARAM (Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia), concebido como un espacio de mejora de la accesibilidad virtual a los abrigos rupestres para toda la sociedad, cómo trata de rellenar vacíos de conocimiento en la línea de lo apuntado por diversos autores y para distintos contextos patrimoniales (Hall / Piggitt, 2002; Lewenstein, 2003), aunque flexibilizando al acceso a los contenidos y la interacción con los mismos (Vaquerizo / Ruiz, 2013), además de ofrecer ventajas como la inmediatez de la información y la calidad gráfica de los resultados, aportando información adicional. El desarrollo de este proyecto se presenta como un espacio de consulta científico-técnica, pero también como un almacén de documentación gráfica digital (fotografías del abrigo, del entorno, de los motivos rupestres o detalles de estos, imágenes equirectangulares, infografías, imágenes tridimensionales, fichas de contenido teórico, etc.) que aúna un importante componente de difusión gráfica y visual estructurado a partir de una rigurosa base científica¹³².

132 Conviene destacar la relación con las aplicaciones ya citadas de restauración digital (*vid. apdo. 3.6.2*), como el ejemplo de la aplicación para dispositivos móviles «Matarranya Rock Art» (<http://www.3dscanner.es/matarranya/app/>) que se concibe como una herramienta didáctica orientada a la recuperación del arte



FIG. 218. Esquema de trabajo desarrollado en el proyecto ARAM (Arte Rupes- tre y Accesibilidad Multimedia) sobre la integración de modelos tridimensionales en una plataforma web.

Además, es necesario recalcar que otro de los factores que está posibilitando la consecución de bases de datos tridimensionales relacionales es la alta velocidad de muchos sistemas de fibra de internet y los servidores virtuales que permite el almacenaje y carga de modelos a gran velocidad por parte de cualquier usuario.

En todo caso, es importante no perder la referencia fundamental de establecer, entre el variado conjunto de profesionales (arquitectos, diseñadores gráficos, ingenieros topógrafos, historiadores del arte, informáticos, arqueólogos, etc.) que se dedican a documentar y representar el patrimonio cultural, unos procedimientos de intervención conjuntos. Dada la dificultad manifiesta de que la totalidad de los equipos de trabajo apliquen un mismo protocolo documental, la transparencia científica y profesional, así como buena parte del futuro de la información generada, pasa por la implementación de los metadatos, que deberían hacerse visibles y dinámicos (García / Caballero, 2011), permitiendo en un futuro una trazabilidad de la información. Pero al margen de aspectos de carácter metodológico y de aplicación tecnológica, consideramos meridiana la necesidad de eliminar de todo este proceso documental su etiqueta (ampliamente extendida) de Finalidad para subrayar su naturaleza de Medio. En cualquier disciplina en la que se apliquen las técnicas y métodos referidos, y para cualquier objetivo, el protocolo documental debe ser tenido en cuenta como un medio (herramienta) para alcanzar un objetivo (que varía, naturalmente, en función de la naturaleza del mismo: investigación, conservación, gestión y difusión) y no como un fin en sí mismo. La tecnificación de la documentación de las disciplinas relacionadas con el patrimonio ha diluido, en muchas ocasiones, el contenido en favor de la forma, aspecto que tal vez se explique por la manifiesta falta de profesionales de la arqueología relacionados con la industria de la difusión (Santacana, 2012: 138). En muchas ocasiones, la forma (la difusión visualmente atractiva) se ha concebido como un fin, sin contar en todos los casos con una base de reflexión sobre los contenidos, más allá de la espectacularidad grá-

rupestre destruido del término de Cretas (Teruel). Para ello, y mediante la generación de modelos tridimensionales, fotografías esféricas 360°, elaboración de calcos digitales y la restitución virtual de los motivos pictóricos, se permite al investigador y al visitante poder conocer los conjuntos rupestres destruidos no sólo en su estado de conservación actual, sino también tal cual fueron al ser descubiertos y cómo debieron de ser nada más realizarse por los artistas levantinos. Junto al aparato gráfico se ofrecen fichas descriptivas de los motivos rupestres, ampliando la información sobre los conjuntos, así como del arte levantino en general. Mediante la integración de diferentes tecnologías (escáner 3D, fotogrametría, fotografía y restitución digital) se ha encontrado una fórmula respetuosa que permite restaurar digitalmente los conjuntos destruidos, logrando una restitución integral que recupera la ausencia del bien.

fica. El grado de madurez actual en el uso de las nuevas tecnologías, y la cada vez más y mejor idea asumida de que el lenguaje de la arqueología debe dejar de ser incomprensible para la sociedad en general (Vizcaíno, 2013), nos brinda una oportunidad única para conseguir que técnica y contenido difundan la información de forma efectiva. La sistematización documental y la difusión de sus resultados, en todos sus aspectos, debería entender que su objetivo último no es otro que la Sociedad. La verdadera propietaria del patrimonio, bien sea esta como objeto de estudio (a través de los elementos documentados) o bien como agente de disfrute del patrimonio, sustentado en un equilibrio de valores, como los de la investigación, conservación y difusión, ya comentados en Juste *et al.* (eds. 2012).



4. Resultados y conclusiones



4. Resultados y conclusiones

4.1. Clasificación de los resultados obtenidos

Se presentan a continuación los resultados, abordando las técnicas desarrolladas, analizadas y revisadas, con los resultados más significativos para cada clasificación patrimonial expuesta dentro del capítulo de ensayos. Asimismo, este apartado constituye el resumen de todo lo anteriormente expuesto, contribuyendo con planteamientos que traspasan el simple carácter gráfico y geométrico a otro que además sea más funcional.

Indudablemente las soluciones propuestas serán perfeccionadas en los próximos años, como es obvio, con otro tipo de ideas acordes entre la relación de las necesidades del patrimonio y la tecnología vigente de cada momento. Sin embargo, hemos visto a lo largo de esta monografía cómo en los últimos ciento cincuenta años cada uno de los hitos tecnológicos alcanzados han protagonizado, en un momento concreto, lo que algunos autores (Nir, 1985; Almagro, 1999; González-Reyero, 2006; Valle, 2007; Roecker, 2008) han bautizado como una «democratización» en el uso de una determinada técnica. Actualmente, nos encontramos en la misma situación de dotar de utilidad organizativa al conjunto de nuevos sistemas de documentación existentes para cada clasificación patrimonial: objetos muebles, arte rupestre, monumentos arquitectónicos y arqueología, que permitan relacionar información y dar un paso más allá del mero componente visual.

La única diferencia actual respecto al pasado es que este nuevo modo de gestión de la información hace confluír cada uno de los avances singulares logrados en un único modo integral que permite obtener e interpretar la documentación geométrica del patrimonio cultural.

4.1.1. Análisis de las técnicas y su tendencia social

Si analizamos desde un punto de vista global el uso de las herramientas dedicadas a la documentación del patrimonio, observamos que técnicas como el láser escáner 3D ha sufrido un retroceso respecto a su uso en los últimos años. Para analizar las causas debemos de tener en cuenta, fundamentalmente, la revitalización protagonizada por las técnicas fotogramétricas (SfM) de auto-calibración en programas de correlación automática de imágenes para las reconstrucciones tridimensionales. Esta hegemonía, que protagonizó el láser escáner 3D, surgió prácticamente con el cambio de

milenio y apenas ha durado diez años, cuando este tipo de técnicas han dejado de ser las únicas alternativas. Entre las razones de esta retracción debemos de centrar la atención en causas, fundamentalmente, económicas y sociales. Las económicas resultan obvias ante un tipo de tecnología con unos costes muy elevados. Además, entra en juego cierta obsolescencia tecnológica, tanto en el hardware como en el software, con un coste adicional y un flujo constante en el mantenimiento, que además requiere de un periodo de amortización excesivamente corto, siendo frecuentemente de difícil compatibilidad con la gestión del patrimonio cultural. En consecuencia, la inversión en la compra de estos sistemas en el patrimonio se realizó fundamentalmente en centros de investigación, instituciones o universidades. Por esta razón, en muchas ocasiones no se tuvo en cuenta el tipo de mantenimiento paralelo y, por ello, se ha producido un desuso de los mismos. Estos factores económicos han influido negativamente en su utilización. Además, si analizamos las causas sociales, estas estarían relacionadas con el «efecto democratizador», expuesto en el capítulo de la clasificación de las técnicas (*vid.* cap. 2), que prácticamente han sufrido en algún período cada una de las técnicas descritas. Atendiendo a este proceso generalizado en los últimos ciento cincuenta años, vemos su continuidad basada en una instrumentación con unos costes elevados, muy sectorizado, que evidentemente no es asequible para todo tipo de proyectos. Por este hecho, si repasamos rápidamente la evolución, vemos esta consolidación social o democratización en diferentes períodos, en aquello que la gráfica de Gartner denominaba meseta de la productividad¹, desde:

- a) La historia de la fotografía con la introducción del carrete kodak a finales del siglo XIX.
- b) La aviación a partir de la primera Guerra Mundial.
- c) Las técnicas de computación sobre todo a partir de los años ochenta y noventa del siglo pasado.
- d) La fotogrametría con el clásico *photogrammetry for everybody* (Almagro, 1999) a finales del siglo XX.

En este sentido, podríamos casi reproducir una segunda fase de difusión de estas técnicas a partir del año 2010. Con un aumento de software de correlación automática de imágenes (SfM), en paralelo

¹ *Vid.* cap. 2 sobre la clasificación y análisis de las herramientas empleadas en la documentación del patrimonio con las gráficas Gartner de sobreexpectación tecnológica <https://www.gartner.com> (último acceso: octubre de 2017).

a la comercialización y uso de los drones para diferentes tipos de aplicaciones y sectores, de registro geométrico y de teledetección.

Sin embargo, el auge del conjunto de programas de correlación basa su éxito en la sencillez y la capacidad de que cualquier profesional relacionado con el patrimonio, pueda desarrollar sus propios proyectos con algo de entrenamiento y nociones básicas topográficas. Pero, sobre todo, en la autogestión y globalización de los datos proporcionados. De esta manera, los sistemas de láser escáner 3D se están reservando para espacios interiores, sobre todo arquitectónicos o entornos subterráneos, debido a su complejidad, y para otro tipo de disciplinas exógenas al patrimonio como la ingeniería (torres de alta tensión, ingeniería naval, túneles, complejos industriales) donde el uso de esta tecnología resulta fundamental por las múltiples ventajas que ofrece en cuanto a precisión, tiempo y resultados.

4.1.2. Bienes muebles

El uso actual del escáner 3D dentro del patrimonio resulta esencial sobre todo para espacios confinados, como, por ejemplo, en la documentación arquitectónica de interiores, tal y como hemos analizado en el apartado dedicado a la arqueología urbana del teatro romano de *Florentia* (*vid. supra* apdo. 3.3.2.2) y la del arte rupestre en cuevas (*vid. supra* apdo. 3.2). En estos lugares los sistemas basados en imagen tienen problemas por su complejidad geométrica o carencia de iluminación. En cambio, hemos visto que en la documentación de objetos muebles, dependiendo de sus dimensiones, es primordial el uso de esta tecnología u otro tipo de escáneres 3D como los de luz blanca estructurada. En este sentido, tenemos que tener en cuenta que la precisión y la limpieza de las mallas tridimensionales resultan fundamentales, más cuando los procesos de documentación llevan paralelos la reproducción física del bien mueble.

Asimismo, si planteásemos la documentación del ejemplo de la escultura La Piedad (*vid. supra* apdo. 3.1) con otro tipo de técnicas, su digitalización tendría grandes dificultades, por ejemplo, mediante procesos de correlación automática de imágenes y también por sistemas de escáner de luz blanca estructurada de medio alcance, aunque algunas veces hemos visto ejemplos de este tipo, como en el tratamiento expuesto en la digitalización del modelo tridi-

mensional de la escultura de El David de Miguel Ángel (Scopigno, 2006: 60-63). En este ejemplo, debido a su morfología y tamaño, fue necesario disponer de elementos externos que facilitasen el trabajo como elevadores, lo que representa una dificultad añadida no siempre solventable. En el caso de La Piedad, la precisión y escasez de ruido de la nube de puntos resultó clave para poder generar un modelo mallado y posteriormente una réplica del mismo. Para la precisión, además de la nominal de cada instrumento, tenemos que tener en cuenta que para este tipo de objetos muebles podemos sufrir un error angular con posibles discrepancias al documentar pequeñas partes en el modelo global. Por ello, muchas veces para un mismo bien, la solución se ha basado en la combinación de ambos tipos de escáneres con diferente rango de adquisición (TLS, triangulación, luz estructurada) como el ejemplo del Arco de Benevento (Alessandri / Ucelli, 2006: 69-91).

Una vez analizada la experiencia en la documentación de objetos muebles con unas proporciones más reducidas respecto al ejemplo planteado, constatamos la adecuación de sistemas de correlación de imágenes como técnicas de bajo coste para la documentación sistemática de piezas de una excavación arqueológica, museos, colecciones, etc. Reservando, de este modo, otro tipo de técnicas como las de escáner 3D de luz estructurada o triangulación, a piezas que por su naturaleza requieran una mejor estructura geométrica en el mallado, y cuando además sea necesaria su reproducción física por prototipado o por mecanizado.

4.1.3. Arte rupestre: cuevas y abrigos

Si atendemos a los resultados obtenidos dentro del apartado de la documentación del arte rupestre debemos distinguir, ante todo, las diferencias y soluciones técnicas entre las cuevas y los abrigos. Aunque la documentación en cuevas puede inducir a pensar que son más complejas que los abrigos, hemos podido comprobar en todos los ejemplos realizados en este estudio que las dificultades logísticas para poder alcanzar un abrigo, por ejemplo en la zona del Gallinero en el Parque Cultural del río Vero (proyecto ARAM), pueden superar ampliamente las dificultades de la documentación en una cueva. Además de los problemas logísticos que representa como primer obstáculo en el tipo de estrategia a desarrollar, encontramos otro tipo de dificultades características en los abrigos



FIG. 219. Modelo tridimensional parcial en formato PDF3D de las inscripciones de las exedras del pórtico del foro de Los Bañales (Biota-Uncastillo), realizado con un escáner de luz blanca estructurada Artec MHT con una resolución de 500 micras.

con luz solar directa o indirecta para poder conseguir un ajuste radiométrico homogéneo en la documentación gráfica de los paneles rupestres. En las cuevas resulta más fácil obtener unas condiciones lumínicas estables y uniformes con sistemas de luz artificial (led, tubos fluorescentes, flashes sincronizados, etc.), aunque también en estas podemos encontrar pátinas de agua sobre las paredes que provocan múltiples reflejos que resultan altamente complicados para atenuar.

Efectivamente, la documentación del arte rupestre, tanto en cuevas como en abrigos, ha sido una de las que más dificultades han originado en los tipos de patrimonio para su correcta documentación para esta investigación. Los conjuntos con arte rupestre representan un caso singular de estudio y difusión cultural. Cuestiones relativas a su conservación, visita y actuaciones dirigidas a la adecuación de los mismos y de su entorno resultan siempre complejas, sobre todo en el caso del arte paleolítico. Pero a todas esas dificultades se unen otras nuevas en el caso del arte rupestre postpaleolítico, generalmente al aire libre. La dificultad en el acceso a los sitios, la mala conservación general de los conjuntos, la vulnerabilidad ante acciones vandálicas, así como la menor espectacularidad, en cierto grado, de los contenidos pictóricos hacen que las actuaciones sobre estos bienes culturales resulten muy complejas. Además, requiere prácticamente el uso y la combinación de todas las técnicas citadas en el capítulo de clasificación de técnicas topográficas, desde las clásicas, con el empleo de un sistema GNSS para la georreferenciación de su proyección en planta, que muchas veces resuelve problemas catastrales y por ende de propiedad vertical, hasta el uso fundamental de una estación total para trazar perfectamente una red topográfica con la técnica de la poligonal, que garantice la geometría de la cueva, sirviendo de base, dentro del sistema de coordenadas correspondiente, para el resto de técnicas de documentación tridimensional posteriores. Ulteriormente todas estas técnicas se combinan, normalmente, como si se tratase de unas *matrioskas* rusas, donde todo queda enlazado con la siguiente relación: desde la topografía clásica (sistema GNSS y estación total) al escáner 3D, seguido de la fotogrametría y los escáneres submilimétricos de luz blanca estructurada, gestionado en diferentes escalas y unido dentro de un mismo sistema de coordenadas. El conjunto global de una cueva se suele documentar con los escáneres de tipo TLS o con los de tecnología SLAM, pero para la documentación, por ejemplo, de los paneles se suelen combinar por su mayor resolución geométrica y gráfica los escáneres de luz blanca estructurada y los sistemas de correlación automática de imágenes para reconstrucción 3D. En algunos ejemplos realizados en estos últimos años (Niaux, Roucadour, Cussac), que no se han incluido en este estudio, hemos po-

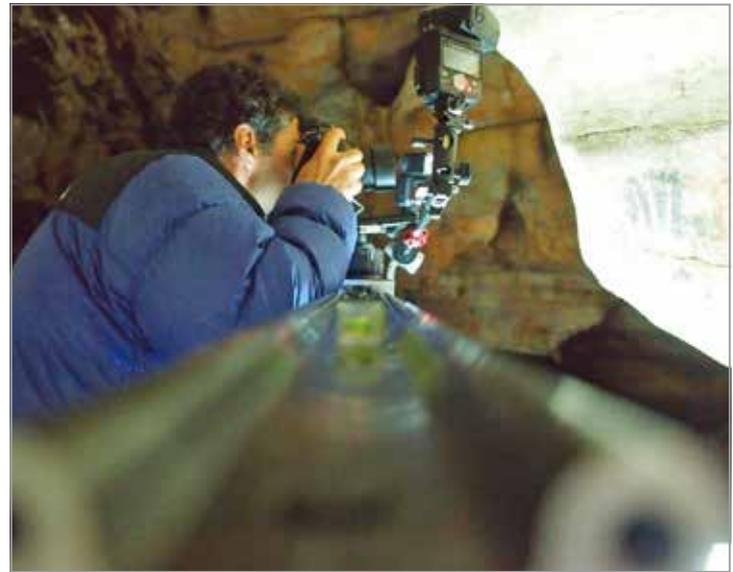


FIG. 220. Sistema *slider* diseñado para la documentación de pinturas y grabados rupestres en cuevas y abrigos para (1) una correlación automática de imágenes (arriba) y (2) escáner de luz blanca estructurada (abajo). Cueva de Roucadour, Thémimes (Angás / Le Guillou / Mauduit, 2014: 32).

didado perfeccionar la integración de un sistema *ad hoc* diseñado para el uso de estas técnicas fotogramétricas. Este sistema consiste en una barra con un carril a modo de *slider* que podemos posicionar a diferentes distancias del soporte, teniendo en cuenta la longitud focal de la cámara en la parte superior y el solape necesario longi-

TABLA 19

Principales resultados obtenidos mediante el empleo de técnicas de documentación del arte rupestre paleolítico en cuevas

CUEVAS DOCUMENTADAS CON ARTE RUPESTRE PALEOLÍTICO	MODELO 3D COMPLETO O PARCIAL DE LA CUEVA	SISTEMA DE GESTIÓN WEB DATA SERVER	APOYO MEDIANTE TOPOGRAFÍA CLÁSICA	DOCUMENTACIÓN DE PANELES CON PINTURAS	DOCUMENTACIÓN DE PANELES CON GRABADOS	COMBINACIÓN DE TÉCNICAS FOTOGAMÉTRICAS Y ESCÁNER DE LUZ ESTRUCTURADA
Fuente del Trucho (Asque-Colungo)	●	●	●	●	●	●
Cussac (Le Buisson de Cadouin)	●	●	●	●	●	●
Gargas (Aventignan)	●	●	●	●		
Roucadour (Thémimes)	●	●	●	●	●	●
Maltravieso (Cáceres)	●	●	●	●	●	●

TABLA 20

Principales resultados obtenidos mediante el empleo de técnicas de documentación del arte rupestre en abrigos levantinos

ABRIGOS DOCUMENTADOS CON ARTE RUPESTRE LEVANTINO	MODELO 3D COMPLETO O PARCIAL DEL ABRIGO	ORTOFOTO DE LOS PANELES RUPESTRES	IMAGEN ESFÉRICA	COMBINACIÓN DE TÉCNICAS FOTOGAMÉTRICAS Y ESCÁNER DE LUZ ESTRUCTURADA	SISTEMA DE GESTIÓN WEB DATA SERVER	PROYECTO ARAM
<i>Chimiachas</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Val del Charco del Agua Amarga</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Roca dels Moros</i>	●	●	●	●	●	
<i>Els Gascons</i>	●	●	●	●	●	
<i>El Torico</i>	●	●	●	●		●
<i>El Arquero del Pudial</i>	●	●	●	●		●
<i>Barranco del Prado de las Olivanas</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Huerto de las Tajadas</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Paridera de las Tajadas</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Contiguo a Paridera</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Ceja de Piezarrodilla</i>	●	●	●	●	●	
<i>Cabras Blancas</i>	●	●	●	●	●	
<i>Cerrada del Tío Jorge</i>	●	●	●	●	●	
<i>Paridera de Tormón</i>	●	●	●	●	●	
<i>El Milano</i>	●	●	●	●	●	●

tudinal y transversalmente. Prácticamente, es la misma técnica que se reproduce a otro tipo de escala mediante una planificación de vuelo con un sistema dron, pero en este caso para un alzado rupestre. Además para este sistema, a lo largo de estos últimos años, hemos ido incorporando diferentes soluciones lumínicas con el fin de reproducir de manera homogénea cada toma fotográfica. Este sistema fue diseñado por primera vez en la documentación de los grabados rupestres de la diaclasa de la galería lateral decorada de la cueva de Roucadour (Thémines, Lot). Posteriormente, se fue adaptando y modificando a otro tipo de documentaciones como, por ejemplo, la de abrigos rupestres en el Parque Cultural de Albarra-cín (Teruel) y al Parque Cultural del río Vero (Huesca). Además, el empleo de este sistema permite una documentación del color homogénea con unos parámetros verificables mediante el uso de cartas de color calibradas. Para obtener una iluminación uniforme en cada fotografía se optó por la incorporación en este *slider* de un sistema de flashes separados de la cámara a la misma distancia mediante unas rótulas específicas. Los flashes estaban sujetos a la cámara de forma que cuando se movía la iluminación no variaba entre una toma y la siguiente. Su control se realizaba de manera remota, con lo que de este modo uno de ellos estaba regulado para servir como fuente principal de luz en un ángulo oblicuo que permitiese resaltar, en el caso de Roucadour, los grabados, mientras el otro servía como flash de relleno esclavo de las sombras provocadas por el primero.

La referencia externa de este sistema se realizó mediante un nivel láser con el fin de establecer siempre la horizontalidad y verticalidad mediante ambos sistemas (Angás/Le Guillou/Mauduit, 2014).

4.1.4. Monumentos arquitectónicos

Este tipo de patrimonio es el que mejor tiene definido el protocolo de actuación en la documentación geométrica. Esta normalización está ligada a una fuerte tradición historiográfica y metodológica heredada desde hace siglos en la documentación de alzados, plantas y secciones (Ortega, 2011: 46-63) en la historia de la arqueología vertical. El discurso de la representación del patrimonio arquitectónico está muy interiorizado con el uso de la línea como elemento imprescindible para la interpretación personal de un edificio (Almagro 2011: 26-45). Este carácter subjetivo parte de la transformación de las actuales ortofotos, como elemento objetivo, hacia una interpretación mediante la línea, de cada uno de los elementos arquitectónicos que definen los diferentes planos geométricos. En este proceso no se puede determinar unos parámetros técnicos objetivos totalmente reproducibles por otro técnico con la misma información que defina la delineación, puesto que se trata de un proceso interpretativo de cada autor. Sin embargo, esta tradición a la hora de la representación de la planta, alzado y sección, se ha ido adaptando paulatinamente al uso de modelos tridimensiona-

TABLA 21
Principales resultados obtenidos mediante el empleo de técnicas de documentación del arte rupestre en abrigos esquemáticos

ABRIGOS DOCUMENTADOS CON ARTE RUPESTRE ESQUEMÁTICO	MODELO 3D COMPLETO O PARCIAL DEL ABRIGO	ORTOFOTO DE LOS PANELES RUPESTRES	IMAGEN ESFÉRICA	COMBINACIÓN DE TÉCNICAS FOTOGAMÉTRICAS Y ESCÁNER DE LUZ ESTRUCTURADA	SISTEMA DE GESTIÓN WEB DATA SERVER	PROYECTO ARAM
<i>Barfaluy 1,2,3</i>	●	●	●	●		●
<i>Covacho Grande de las Escaleretas</i>	●	●	●	●		●
<i>Fajana de Pera I-II y superior</i>	●	●	●	●		●
<i>Gallinero I, IIA, IIB, IIIA y IIIB</i>	●	●	●	●		●
<i>Lecina Superior</i>	●	●	●	●		●
<i>La Fenellosa</i>	●	●	●		●	●
<i>Covacho del Morro</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Peña de los Plantíos</i>	●	●	●	●		●
<i>La Calderita</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Cueva de La Serreta</i>	●	●	●	●	●	●
<i>El Milano (Esquemático)</i>	●	●	●	●	●	●

TABLA 22
Principales resultados obtenidos en la documentación de monumentos arquitectónicos realizados en otros proyectos y no citados en este trabajo

MONUMENTOS ARQUITECTÓNICOS DOCUMENTADOS (MUNICIPIO)	MODELO 3D COMPLETO O PARCIAL	ORTOFOTO DE LOS ALZADOS	ESTUDIO DE PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES	ORTOFOTO DE LA PLANTA	SISTEMA DE GESTIÓN WEB DATA SERVER	ORTOFOTO AÉREA MEDIANTE SISTEMAS RPAS
<i>Castillo de Alfajarín</i>	●	●	●	●	●	
<i>Murallas romanas (Zaragoza)</i>	●	●		●	●	
<i>Convento de San Francisco (Zaragoza)</i>	●	●			●	
<i>Monasterio de Fitero</i>	●	●	●		●	
<i>Castillo de Ablitas</i>	●	●	●	●	●	
<i>Capilla de San Marcos (la Seo, Zaragoza)</i>	●				●	
<i>Mausoleo de Fabara</i>	●	●	●	●	●	●
<i>Palau de Requesens (Molins de Rei)</i>	●	●	●	●	●	
<i>Teatro romano de Bilbilis</i>	●				●	
<i>Termas romanas de Labitola</i>	●				●	
<i>Iglesia románica de San Juan de Rasal</i>	●	●	●	●	●	
<i>Iglesia románica de Santa María de Iguacel</i>	●		●		●	



FIG. 221. Ejemplo de integración interdisciplinar de modelos tridimensionales en planes directores de monumentos arquitectónicos para establecer el estado actual y un plan de intervención. Plan Director del Castillo de Alfajarín (2016). Diputación Provincial de Zaragoza. Arqu. Elías del Pino. Dib. Amelia Andrés.

les. De esta manera, encontramos cada vez más muestras sobre la utilización de las últimas herramientas de documentación arquitectónica para la generación de planes directores de edificios o entornos arquitectónicos. Un buen ejemplo al respecto es el proyecto dirigido por la Diputación de Zaragoza en el Plan Director del Castillo de Alfajarín (2016), integrando desde un punto de vista interdisciplinar a arquitectos, delineantes, geólogos, restauradores, arqueólogos y un equipo de prospección geofísica². En este proyecto cada una de las partes técnicas ha trabajado con la misma base documental topográfica: nubes de puntos, modelos digitales del terreno, secciones sobre modelos 3D, *web data server*, ortofotos de plantas/alzados y mallas, todos obtenidos con técnicas de topografía clásica, TLS y fotogrametría terrestre.

Por otro lado, la arquitectura, empujada por su amplio bagaje en la historia de la representación del patrimonio, ha sido la única disciplina patrimonial que ha dado un salto cualitativo hacia el empleo generalizado de los BIM como herramienta estandarizada. En este sentido, ha jugado un papel clave la influencia inglesa desde el año

2011. En España se estima su implantación obligatoria bajo marco jurídico entre 2018-2020 (*vid. supra* n. 125).

4.1.5. Yacimientos arqueológicos

Los resultados obtenidos en la documentación de los diferentes yacimientos arqueológicos expuestos en este estudio varían dependiendo de sus características particulares y del lugar donde se encuentran.

En este estudio hemos abordado diferentes tipologías de yacimientos arqueológicos, algunos de ellos relacionados con la arqueología urbana. Por ello, para los que se encuentran actualmente en espacios interiores (como el ejemplo romano abordado en el Círculo Católico de Huesca, apdo. 3.3.2.1), constatamos como mejor técnica el uso de escáneres tridimensionales combinado con topografía. Sin embargo, para las zonas exteriores hemos comprobado, como mejor técnica, la utilización de las alternativas de bajo coste mediante el uso de correlación automática de imágenes y referencias métricas para reconstrucción tridimensional, siempre cuando sean zonas que no excedan una superficie exterior no superior a 2000 m². Para una zona de mayores dimensiones se recomienda el uso de un sistema dron del tipo multirrotor hasta 10 hectáreas, y un sistema de ala fija para una extensión mayor. Estos sistemas son muy adecuados en su combinación con la teledetección, pa-

² Proyecto interdisciplinar realizado por la Diputación Provincial de Zaragoza (Equipamientos Municipales) en junio de 2016, coordinado por el arquitecto Elías del Pino Jiménez. Con un equipo integrado por Javier Peña Gonzalvo (arquitecto), José F. Casabona (arqueólogo e historiador), Laura de Juan Mangas (estudio petrológico), Jorge Angás (documentación geométrica), Lluís Mari Sala (prospección geofísica), Amelia Andrés Sebastián (delineación) y Javier Fuertes Garay (maquetación).



FIG. 222. Reproducción de una vista axonométrica y sección longitudinal sobre la nube de puntos de la Capilla de San Marcos (Seo de Zaragoza)*.

TABLA 23

Principales resultados obtenidos en la documentación de los yacimientos arqueológicos documentados en otros proyectos y no analizados en este trabajo

YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS DOCUMENTADOS (MUNICIPIO)	MODELO 3D COMPLETO O PARCIAL	DOCUMENTACIÓN POR TOPOGRAFÍA CLÁSICA	DELINEACIÓN DE LA PLANTA	ORTOFOTO DE LA PLANTA	SISTEMA DE GESTIÓN WEB DATA SERVER	ORTOFOTO AÉREA MEDIANTE SISTEMAS RPAS
<i>Contrebia Belaisca (Botorríta)</i>	●	●	●	●	●	
<i>Villa romana de La Malena (Azuara)</i>		●	●			
<i>La Caridad (Caminreal)</i>	●			●		●
<i>Los Bañales (Uncastillo)</i>	●			●		●
<i>Cueva de Chaves (Bastarás)</i>	●			●	●	
<i>Cueva de Drólica (Sarsa de Surta)</i>		●	●			
<i>Calzada romana Mercat San Antoni (Barcelona)</i>	●	●		●	●	
<i>Hornos romanos Badalona</i>	●	●		●	●	
<i>Zona arqueológica del Castillo de Uncastillo</i>		●	●			

ra la prospección arqueológica o delimitación de zonas de captación de hasta 2000 hectáreas. Este tipo de técnicas nos ofrecen un mayor elenco de posibilidades frente a las planimetrías tradicionales, no exentas de interpretación tanto en la documentación co-

mo en el dibujo, generadas normalmente con el uso de una estación total o sistema GNSS. De este modo, podemos trazar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos a través de la unión de los puntos mediante líneas y con la delineación arquitect-

* Proyecto realizado en 2014 conjuntamente con el profesor de la Universidad de Zaragoza Jorge Santolaria para el trabajo fin de grado de Juan Monzón titulado: «Utilización de técnicas de ingeniería inversa de documentación gráfica y geométrica, para su posterior uso en el diseño de un producto museográfico basado en técnicas de realidad aumentada para la difusión del patrimonio histórico-artístico».



FIG. 223. Esquema del proceso diacrónico de abstracción, simultáneo en diferentes disciplinas, para facilitar la lectura e interpretación de la información a través de visualizaciones bidimensionales con un marcado componente subjetivo que permite focalizar la atención en un determinado tipo de información.

tónica del apartado anterior. Igualmente, las topografías tradicionales también adquieren un componente subjetivo cuando se toman una serie de puntos y posteriormente se unen mediante una abstracción del espacio por medio de líneas. Evidentemente ocurre lo mismo que en la arquitectura, ya que establecemos una simplificación seleccionada bajo un criterio arqueológico, o muchas veces meramente técnico, para entender el conjunto de espacios y poder interpretar el conjunto arqueológico. El sistema que proponemos mediante la combinación de ortofotos y modelos tridimensionales permite no tener que interpretar la información que seleccionamos en campo y poder disponer de todos los datos en los análisis ulteriores de laboratorio. Asimismo, este tipo de estrategia admite otros posibles estudios interpretativos sin necesidad de volver a tomar la información.

4.1.6. Reconstrucciones tridimensionales

Este conjunto de técnicas se consolida como una herramienta muy útil para plantear hipótesis arqueológicas y arquitectónicas de muy diversa índole mediante reconstrucciones tridimensionales. Hemos visto a lo largo del estudio tres ensayos particulares relacionados con tres tipos de patrimonio diferentes: arte rupestre, arqueología y arquitectura. Los tres relacionados, asimismo, con destrucciones por factores naturales, factores antrópicos y factores sociopolíticos, en el caso de la reconstrucción de pinturas rupestres perdidas de los abrigos de Roca dels Moros y Els Gascons en Cretas (Teruel), en el acueducto de Los Bañales de Uncastillo (Zaragoza) como propuesta arquitectónica y un último caso especial, como la reconstrucción de una excavación arqueológica de urgencia, previos al desmonte parcial del yacimiento de la Primera Edad del Hierro del Cabezo de la Cruz (Muel, Zaragoza) en el año 2004, con los materiales documentados en la excavación.

En todos ellos se constata la utilidad de este tipo de herramientas como fuente documental para formular hipótesis y, en último lugar, como instrumento divulgativo del patrimonio cultural. En este sentido, debemos advertir la necesidad de asignar un equilibrio entre lo científico y lo divulgativo, estableciendo un control en este último apartado que no desvirtúe todo un trabajo científico hacia plataformas infográficas carentes de rigor histórico, absorbidas por una tendencia social.

Respecto a la experiencia de los ejemplos que hemos abordado de reconstrucciones en yacimientos arqueológicos, que han sufrido el expolio y destrucción en diferente grado en los últimos años en

Aragón (*vid. apdo. 3.6.1*), constatamos que una correcta documentación en una campaña arqueológica debe englobar varios apartados: un procedimiento desarrollado que explique cómo se ha abordado la excavación, una clasificación de los materiales hallados y un informe final. Sin embargo, muy pocas veces queda documentada, clasificada e inventariada la información topográfica (puntos, sistema de coordenadas, bases, planos, conjunto de imágenes, etc.) de la misma manera que los materiales hallados. La razón la encontramos en la dificultad de adaptar una cultura metodológica a unas nuevas herramientas y procedimientos de trabajo. Por esta razón, deberemos reflexionar sobre un aspecto importante y afirmar que de la misma manera que el material arqueológico sin unidad estratigráfica pierde gran parte de su información contextual, igualmente cualquier excavación sin un conjunto básico de metadatos que contextualicen el proceso desarrollado, en este caso el topográfico, pierde indistintamente la información esencial para su interpretación presente y futura.

De esta manera, establecer una topografía en cualquier excavación dentro de un sistema de coordenadas absoluto no es una cuestión baladí, resulta fundamental para garantizar el futuro del patrimonio cultural arqueológico, principalmente por tres razones:

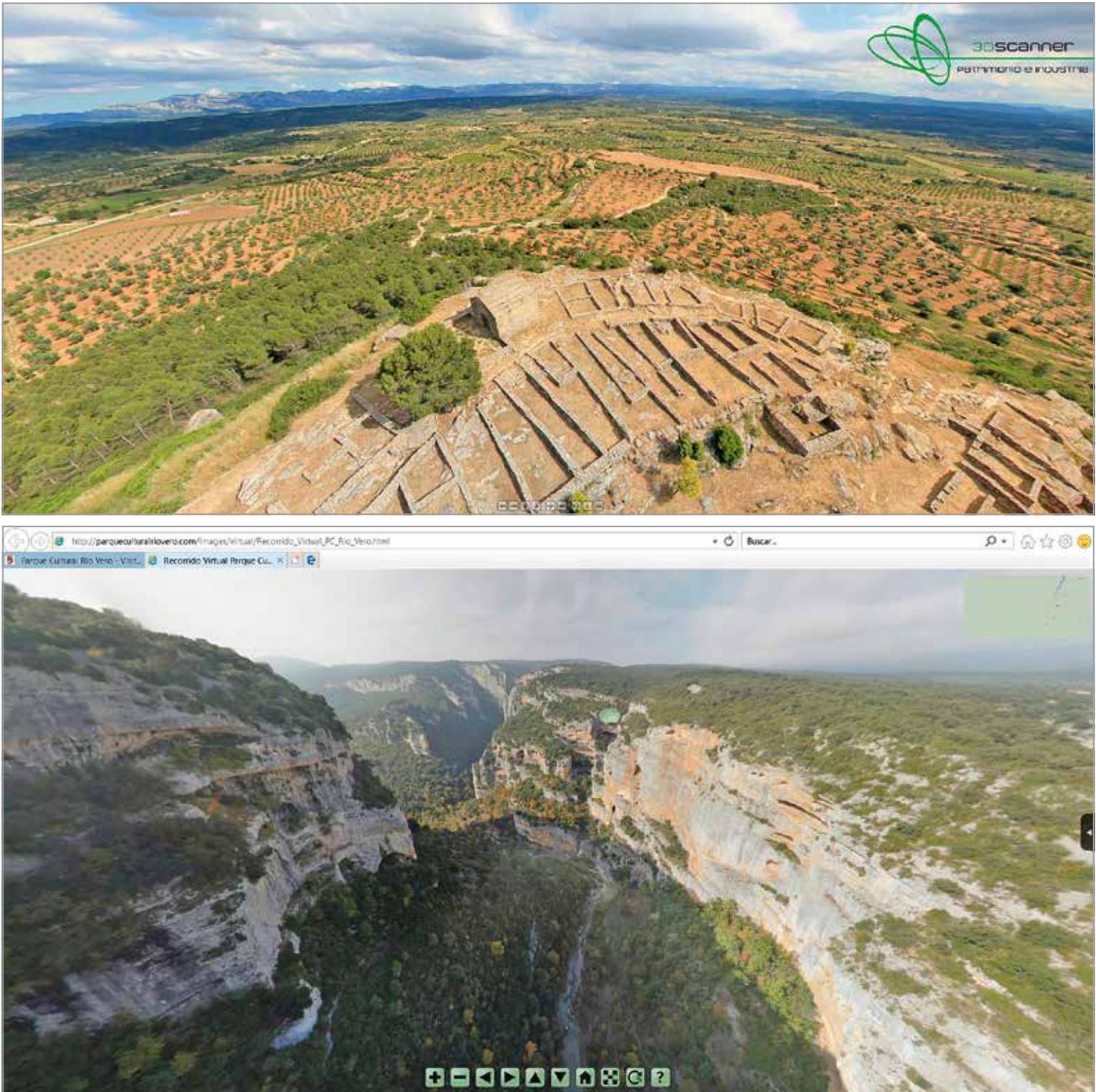
- Permite establecer una planimetría que sirva de base para la documentación, comparación, análisis y publicación de resultados en cada momento.
- Posibilita ampliar progresivamente en diferentes campañas el área de excavación dentro de un mismo sistema de coordenadas, obteniendo una visión del conjunto incluso cuando las fases precedentes hayan sido rellenadas (Gutiérrez / Angás, 2009)³.
- Y sobre todo, como el caso de la cueva de Chaves (Romeo *et al.*, 2017), la posibilidad de monitorizar de un modo diacrónico cualquier patología geomorfológica o estructural (producida por agentes naturales o antrópicos) que altere las condiciones físicas de un yacimiento arqueológico.

4.1.7. Arqueología del paisaje

De acuerdo a las diferentes experimentaciones planteadas con los sistemas RPAS o drones, para la documentación fotogramétrica de baja altura⁴, ha sido el único conjunto de ensayos que además ha llevado pareja una actividad de fabricación e integración de dos aeronaves desarrolladas *ex profeso*. Este hecho se ha debido a la voluntad de utilizar y aprovechar los mismos sensores que ya disponíamos para fotogrametría terrestre. En este sentido, ha constituido uno de los factores que ha retrasado esta parte de la investigación, debido fundamentalmente a las dificultades de integración completa de todos los sistemas analizados. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios en los dos sistemas multirrotadores, pero en cambio en el sistema de ala fija para grandes superficies resultó muy complejo lograr una plena estabilidad del sistema y poder extraer datos para nuestra investigación por las problemáticas ya citadas en el capítulo 2 de clasificación de herramientas. De esta manera, el sistema de ala fija fue suplido por un sistema comercial, continuando con varias experimentaciones a día de hoy. Sin embargo, finalmente el problema se transformó en ventaja puesto que

3 Para una mayor información consúltese como ejemplo el proyecto desarrollado en la consolidación y generación de un modelo tridimensional de las Murallas romanas de la calle Mártires en Zaragoza en diferentes fases de construcción de una edificación *vid. Gutiérrez / Angás, 2009: 95:102*.

4 Consúltese el apdo. 2.3 de clasificación de herramientas y los diferentes casos de estudio realizados en la «documentación de lo que no se ve» en arqueología, *vid. apdo. 3.5*.



FIGS. 224-225. Imagen aérea esférica del poblado ibérico de San Antonio de Calaceite. Abajo, imagen aérea del núcleo rupestre de Gallinero sobre Mallata en el Parque Cultural del Río Vero (Alquézar).

utilizamos un ala fija con sistema RTK-PPK que proporcionó una gran versatilidad que evita el apoyo topográfico en campo gracias al sistema RTK y PPK. Sin duda, ofrece una mayor velocidad para documentar grandes áreas o zonas inaccesibles por tierra con una precisión centimétrica.

Respecto a los dos sistemas multirrotores adaptados, han constituido una parte muy importante de este estudio de investigación ya que se ha obtenido una integración con la mayoría de sensores visibles, de infrarrojo cercano y multispectrales que disponíamos. Además, una vez finalizada toda la fase de fabricación de la estructura, vuelos de pruebas, integración de los sensores y extracción de

la información, se ha realizado la caracterización de la aeronave para cumplir con la legislación vigente e incluirlos dentro del listado responsable de operador de Aeronaves RPAS de AESA del Ministerio de Fomento⁵. Igualmente, continuando con la normativa de

5 Para el ejercicio de las actividades previstas en el art 50.3 de la Ley 18/2014 por aeronaves pilotadas por control remoto de hasta 25 kg de masa máxima al despegue (MTOM) se deberá presentar ante la Agencia Estatal de Seguridad Aérea una comunicación previa y declaración responsable (art. 50.6 Ley 18/2014) con una antelación mínima de cinco días al día del inicio de la operación. Actualmente se ha introducido el Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se

TABLA 24

Resultados obtenidos mediante el empleo de sistemas drones o RPAS en varios yacimientos arqueológicos y su entorno inmediato

YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DOCUMENTADO MEDIANTE DRONES / RPAS (MUNICIPIO)	ORTOFOTO GEORREFERENCIADA PARA SISTEMA CAD	MODELO 3D Y CURVADO PARA SISTEMA CAD	COMBINACIÓN CON DATOS DE LÁSER ESCÁNER 3D TERRESTRE	IMAGEN ESFÉRICA AÉREA	ANÁLISIS MULTIESPECTRAL	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN ARQUEOLÓGICO
<i>Cabezo de Alcalá (Azaila)</i>	●	●			●	●
<i>Campo Real (Sos del Rey Católico)</i>	●	●			●	●
<i>Valdeherrera (Calatayud)</i>	●	●			●	●
<i>Labitolosa (La Puebla de Castro)</i>	●	●			●	●
<i>La Caridad (Caminreal)</i>	●	●			●	●
<i>Los Collados (Jaulín)</i>	●	●		●		
<i>Cabezo Morrudo (Rodén-Fuentes de Ebro)</i>	●	●		●		
<i>Morredón (Fréscano)</i>	●	●		●	●	●
<i>Los Bañales (Uncastillo)</i>	●	●	●	●		
<i>Alto de la Cruz (Fréscano)</i>	●	●			●	●
<i>Presa de Muel (Muel)</i>	●	●	●	●		●
<i>Acueducto (Albarracín-Gea-Cella)</i>			●	●		
<i>Acueducto (Lodosa-Alcanadre)</i>			●	●		
<i>Andelo(s) (Mendigorría)</i>	●	●	●	●		
<i>Bilbilis (Calatayud)</i>	●	●	●	●		●
<i>San Antonio de Calaceite</i>	●			●		

la legislación actual, hemos tenido que cumplir con los requisitos personales de habilitación de uso para estos sistemas, con los diferentes exámenes teóricos, prácticos, de aptitud médica y de responsabilidad civil profesional.

Comparativamente, cada uno de los sistemas multirrotadores se han desarrollado para funciones diferentes:

Los resultados del sistema de ocho motores se han utilizado, para la extracción de información con una cámara multiespectral debido a su alta capacidad de carga. De este modo, se ha obtenido un desarrollo estable que permite integrar este sistema y programar una planificación de vuelo sobre un yacimiento arqueológico para posteriormente extraer los diferentes canales correspondientes a las diferentes longitudes de onda. Este sistema ha contribuido a la elaboración de una publicación sobre los resultados previos en su

utilización en la detección de estructuras arqueológicas soterradas (Uribe *et al.*, 2015: 464-466) en los yacimientos de Valdeherrera y Labitolosa. Además, con la integración de un soporte estabilizado *gimbal*, ha sido posible generar inspecciones e imágenes equirrectangulares con cámaras *réflex Full Frame* como los ejemplos del núcleo rupestre de Valonsadero, Parque Cultural del Río Vero en la zona de Mallata, San Antonio de Calaceite, Cabezo Morrudo en Rodén, Los Collados en Jaulín y el Morredón en Fréscano (*vid.* tabla adjunta).

Por otro lado, desde el punto de vista gráfico, esta técnica permite la toma fotográfica cenital u oblicua, y además se pueden acoplar las imágenes captadas en un punto espacial y generar fotografías equirrectangulares. De esta manera, el denominado dron se posiciona en una coordenada x, y, z en el espacio y gira sobre su eje gracias al servo donde se localiza la cámara fotográfica. La creación de estas imágenes esféricas incorpora como novedad la visualización de un punto de vista aéreo, desde el que cualquier usuario puede ir desplazándose sobre las imágenes, proporcionando una excelente documentación gráfica sobre cualquier conjunto patrimonial.

desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. <https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf> (último acceso: diciembre de 2017).

Los resultados que se pueden alcanzar con esta técnica en cualquier excavación arqueológica o conjunto patrimonial son los siguientes:

- Información fotográfica aérea tanto nadiral como oblicua.
- Imágenes esféricas aéreas con capacidad de programación e integración en un navegador web.
- Generación de ortofotos mediante técnicas fotogramétricas con información visible, multispectral y termográfica.
- Dibujo planimétrico de estructuras a través de las ortofotos en soporte CAD.
- Generación de modelos 3D de los cuales se puede extraer cualquier sección, MDT, MDS, curvas de nivel, cubicación, monitorización, etc..

El apoyo del vuelo sobre puntos topográficos incorporados en un sistema absoluto permite un rápido control estructural y geomorfológico, además proporciona la ampliación del área de excavación dentro del mismo sistema de coordenadas. Este hecho, sumado a su gran versatilidad y bajo coste, si lo comparamos con otros tipos de herramientas de documentación métrica, lo convierte en un instrumento muy útil en conjuntos arqueológicos ya que permite una rápida documentación en cada fase de la propia excavación.

Para la integración del sistema de cuatro motores se ha utilizado una variante con autopiloto *open source* arducopter de 3DRobotics APM 2.5. Este sistema ha representado una síntesis más moderna del primero, privándole de gran parte de la capacidad de carga y del *gimbal* para su uso en zonas que por su extensión sean necesarios vuelos más extensivos que requieran un despegue vertical por la morfología de la zona (vegetación, barrancos, escarpes, etc.). El resultado ha sido un sistema más portátil y ligero con una mayor autonomía. Los tipos de sensores que puede llevar son los de espectro visible e infrarrojo cercano (NIR), ya comentados, reservando el multispectral para el primer sistema por su alta capacidad de carga.

El resultado de ambas aeronaves ha proporcionado los primeros resultados en la documentación fotogramétrica de diferentes yacimientos arqueológicos y detección de estructuras soterradas como se ha analizado en el apartado de *Arqueología del paisaje: documentar lo que no se ve* (vid. apdo. 3.5).

En conclusión, la utilización de estos sistemas en la documentación del patrimonio ofrece varias ventajas como complemento y combinación con los sistemas de registro topográfico clásicos (estación total y sistema GNSS) y tecnología láser escáner 3D. Permite una rápida documentación gráfica a través de las diversas tomas fotográficas y de igual modo se puede extraer información métrica si se combina con puntos topográficos localizados sobre el terreno, los cuales resultan básicos para la alineación de las imágenes, la construcción del modelo tridimensional y su inclusión a un sistema de coordenadas internacional –por ejemplo EPSG:25830 Proyección UTM ETRS89 Huso 30 N–.

4.2. Conclusiones

La constatación del cambio de tendencia en la documentación del patrimonio, identificado a partir del primer decenio del siglo XXI, ha sido generada principalmente por factores económicos y políticos como consecuencia de una crisis generalizada que ha repercutido en los planteamientos sociales del uso de las denominadas *tecnologías de la información y la comunicación* (TIC) en la preservación de los bienes patrimoniales. El uso de estas TIC como «motor de masas» (Ubieto, 2007: 25-26) ha dado cabida a otro tipo de disciplinas que buscan no tanto una documentación «clásica», orientada a fines

únicamente técnico-científicos, sino al uso de la tecnología como medio divulgativo (vid. *supra* apdo. 1.1). Este objetivo final de la documentación y la utilización de las tecnologías es hoy en día, quizá, el más atractivo, influido por una tendencia social y el reiterado uso indiscriminado de los términos «virtual» y «tridimensional»⁶. En consecuencia, esta polivalencia ha tenido efectos de diversa índole en la representación e interpretación del patrimonio así como en el conjunto de profesionales que lo integran. Las ventajas del reiterado uso del patrimonio con fines divulgativos han sido claras, permitiendo un fuerte desarrollo en la elaboración de múltiples proyectos, pese a que frecuentemente no ha quedado bien definida la relación ambivalente entre el significado científico y el componente divulgativo. Sin embargo, las desventajas vienen de la mano de un desgaste tecnológico excesivo por la presencia continua de estas herramientas en proyectos como justificación de una tendencia social. A este hecho se unió la utilización de determinadas herramientas como los escáneres tridimensionales o drones cuando la técnica todavía no estaba plenamente desarrollada. Respecto a la utilización de estas técnicas, hemos conocido proyectos en los que no eran necesarias o en los que, una vez aplicados y obtenidos los datos, estos no fueron procesados adecuadamente debido a la indefinición de criterios previos antes de comenzar el proyecto. Este tipo de efectos «contra-tecnológicos» en las TIC, basados en experiencias sociales negativas, se han incrustado sobre todo en los niveles institucionales, constituyendo actualmente –además de los factores económicos (vid. *supra*)–, uno de los frenos en la implantación y gestión de nuevos proyectos. En consecuencia, remarcamos que para evitar todo este tipo de problemas ha de recurrirse a la utilización de anteproyectos, como ya defendían algunos autores hace casi un decenio (Valle, 2006: 19), y que muy pocos realizan a día de hoy (D’Anna, 2015: 4) (IAPH, 2011). Estos planteamientos previos deberían reflejar la acreditación de la cualificación de los ejecutantes, instrumentos, necesidades, alternativas y resultados propuestos. Dada esta reiterada carencia de no recurrir a este tipo de reflexiones antes de la ejecución de un proyecto de documentación con unas determinadas técnicas, debemos insistir en la práctica de otro tipo de soluciones, quizá más generalistas, para conocer la madurez de los resultados de una determinada tecnología en la sociedad. Por ello, resulta interesante reflexionar sobre el análisis del ejemplo de la consultora Gartner, dedicada a la investigación de las tecnologías, y comprobar cómo expresa mediante su gráfica *hype cycle* o «ciclo de sobreexpectación» este problema que denomina abismo de desilusión después de un pico de expectativas sobredimensionadas de una determinada tecnología⁷. Realizando un análisis generalista, comprobamos cómo esta desaceleración del uso *per se* de la tecnología, iniciada en el primer decenio del siglo XXI, se constata en la búsqueda de un carácter funcional en contraposición de lo meramente gráfico, tanto en el sesgo de los grandes proyectos europeos como en las publicaciones científicas en general. Tras este problema, predominan las investigaciones que buscan más el pragmatismo que propicie una mejor gestión de los resultados obtenidos en la documentación tridimensional del patrimonio y no meramente el carácter gráfico de la información. Los primeros ejemplos de esta nueva búsqueda más funcional surgen a partir de los años 2008 y 2009 (algunos auspiciados por el séptimo programa marco europeo)⁸ en forma de manuales y pliegos técnicos nacionales e internacionales que intentan organizar un protocolo de gestión. A partir de este punto es cuando

6 Obsérvense las diferentes definiciones propuestas en el capítulo 1 sobre el estado de la cuestión entre «arqueología virtual» (Reilly, 1991) y «documentación geométrica» (Valle, 2007).

7 Vid. cap. 1 sobre el estado de la cuestión con una descripción más profunda acerca de las gráficas analíticas Gartner en las TIC.

8 Proyectos europeos como por ejemplo: CARARE, 3DCOFORM, 3DICONs. Vid. apdo. 1.3.

empieza a primar más la parte organizativa que la meramente gráfica, lo que nos permite afirmar que ahí acaba la etapa de «monumentos en 3D» plasmados en videos, con muy poco aporte científico, y a renglón seguido entablar un diálogo más serio con el que buscar la funcionalidad entre bases de datos y modelos⁹.

La obtención de estas bases de datos como resultados de la documentación está relacionada con el aumento de canales de información que propician que cualquier usuario conozca, de modo teórico y práctico, sin ningún tipo de filtro, todas las posibilidades existentes e intente extraer la máxima información posible de cada una de ellas. Se trata de una tendencia general aunque siguen perdurando un buen número de congresos que combinan arqueología y nuevas tecnologías en los que solamente una minoría de sus participantes son arqueólogos. En este sentido, este hecho sorprendente se combina con congresos internacionales dedicados a técnicas computacionales en la arqueología que, en muchas ocasiones, focalizan una mayor atención en el instrumento como medio que a los propios resultados científicos.

Estas incongruencias son ejemplos que no dejan de ser un término representativo del uso de las «nuevas tecnologías» en la documentación del patrimonio, ejemplos muchas veces originados por la necesidad de una justificación científica por medio del último avance como velo a la escasez de resultados obtenidos. Para ello, resulta inevitable recordar que el uso de las nuevas tecnologías en la documentación del patrimonio no garantiza ningún tipo de éxito (Almagro, 2011: 26-45). Es necesario conocer el problema y plantear diferentes opciones, y además resulta imprescindible conocer una variedad de posibilidades para poder seleccionar la que mejor se adapta a nuestro objetivo. Así, hemos podido observar que casi siempre la obtención de buenos resultados está relacionada con la combinación de técnicas desde un punto de vista profesional híbrido, en la frontera de varias disciplinas.

En este sentido, el carácter heterogéneo en la utilización de nuevas tecnologías en la caracterización y documentación del patrimonio requiere el desarrollo de unas nuevas técnicas. En muchas ocasiones, la complejidad de éstas aleja la comprensión interdisciplinar sin establecer una metodología estandarizada. Así, es necesario realizar una sistematización de procedimientos, dirigidos, por una parte, al análisis científico y, por otra, a su posterior comprensión y divulgación de los datos generados y sus posibilidades. Pensamos que es necesario dirigir el proceso de documentación hacia una combinación de objetivos de documentación, control preventivo¹⁰, conservación e interpretación en beneficio del análisis científico más completo. Para la plena implantación tecnológica, resulta necesario proporcionar métodos de fácil divulgación a través, por ejemplo, de la creación de bases de datos bajo entornos web 3D. Este tipo de información permite una visualización y análisis instantáneo con una valiosa información gráfica y métrica del modelo tridimensional. Hemos visto cómo uno de los objetivos de las técnicas de digitalización tridimensional es optimizar en tiempo y resultados la documentación métrica y gráfica de cualquier elemento. De esta manera,

9 Como proyecto destacable sobre un acercamiento entre funcionalidad de modelos 3D arqueológicos y bases de datos destacamos el proyecto QueryArch3D de Agugiaro / Remondino (2014) en <http://www.mayaarch3d.org/> (último acceso: octubre de 2015).

10 Un ejemplo de documentación e integración de metodologías lo encontramos en el proyecto de Santa María de Iguacel (Jaca) combinando el láser escáner, topografía, termografía, fotogrametría y fuentes arqueológicas. Angás / Serreta (2010): «Valorización y difusión del patrimonio arqueológico mediante un entorno web 3D. Documentación de Santa María de Iguacel (XI d.C.) mediante láser escáner 3D», *Virtual Archaeology Review*, [S.l.], v. 1, n. 1, pp. 63-67, ISSN 1989-9947. <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4774> doi: <https://doi.org/10.4995/var.2010.4774>. Proyecto de investigación financiado por el Instituto de Estudios Altoaragoneses (2007-2008).

se obtiene una fidedigna documentación para el análisis y control mientras se produce un significativo aumento de los datos del registro. La creación de bases de datos interactivas a nivel de usuario bajo ficheros, por ejemplo en lenguaje JavaScript, en navegadores que integran WebGL, potencia un método divulgativo de libre acceso en red que hace más efectivo el carácter técnico-científico.

En la búsqueda del desarrollo de un nuevo método científico que integre las técnicas de registro actuales, deducimos varios aspectos cruciales:

4.2.1. La gestión informática de la información generada: regulación del proceso en la codificación de los metadatos

Cada aplicación requiere un tratamiento o técnica individualizada tanto de campo como de procesamiento con varios programas informáticos. La recopilación de la información permite crear archivos documentales (metadatos) del monumento en una fecha concreta. Es preciso crear soportes de seguridad y almacenamiento estandarizados por la gran cantidad de información recogida. Una posible solución es estandarizarlo en grandes archivos genéricos tipo ASCII o XML que puedan ser importados y tratados en el futuro ya que es necesario hacer perdurable el registro a cualquier tipo de programa informático, evitando la obsolescencia de su codificación. De este modo, toda la información geomática de un punto en un fichero ASCII queda sintetizada en aproximadamente siete valores dispuestos para cada punto de los millones registrados. Cada punto tiene tres coordenadas cartesianas, x, y, z, además de, según el tipo de instrumento que se utiliza, otros tres valores que representan el cromatismo RGB y un último valor que expresa la reflectancia o valor de la intensidad, que cuantifica la cantidad de luz que refleja una determinada superficie. Independientemente, toda esta información puede quedar georreferida a cualquier sistema de coordenadas local o absoluto, por ejemplo: UTM ETRS89, WGS84¹¹. De esta manera, será necesario otro tipo de información o metadato que acompañe a este documento que explique la información contextual. Ponernos de acuerdo en qué es lo primordial y cómo se organiza, será una tarea compleja. Esta misión debería estar dirigida por organismos gubernamentales internacionales y nacionales a modo de recomendaciones básicas (*vid. supra* apdo. 1.1). En este estudio hemos sugerido la adaptación de estándares reconocidos en otras disciplinas como la geografía y biblioteconomía. En este sentido, esta investigación ha pretendido establecer una propuesta conceptual basada en los resultados de unos determinados ensayos, señalando aquellos puntos de convergencia en base a las experiencias desarrolladas, pero lejos de llevar a cabo una tarea que inequívocamente pensamos que debe de ser asumida por las instituciones locales, nacionales e internacionales en consenso con el grupo de profesionales que gestionan el patrimonio.

4.2.2. Representación gráfica en soportes bidimensionales vs. tridimensionales

El trabajo de implantación de la tercera dimensión en el patrimonio requiere de un largo cambio conceptual de la cultura metodológica heredada, cambio que afectará desigualmente y de modo intrínseco

11 Según el Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio de 2007 se regula el sistema geodésico oficial en España, adoptando el sistema de referencia geodésico global, ETRS89, sustituyendo al sistema geodésico de referencia regional ED50 sobre el que se compilaba la cartografía oficial en la Península Ibérica, Islas Baleares, y el sistema REGCAN 95 en las Islas Canarias. Permitiendo la integración de la cartografía oficial española con los sistemas de navegación y cartografía de otros países europeos. En este sentido, quedó establecido su adopción y obligación en el Registro Central de Cartografía a partir del 1 de enero de 2012.

a los tipos de soporte de representación y a los diferentes sectores profesionales que se encargan de documentar el patrimonio. Si analizamos cómo acaba la información que extraemos de un proyecto, podríamos comprobar como la mayor parte de ellos concluyen en una publicación en formato papel o digital pero de carácter únicamente bidimensional. Asimismo, si atendemos a los canales de difusión científicos clásicos, claramente deducimos que está fallando el soporte de representación ya que la interrogación que nos surge es clara: ¿qué ganamos con este tipo de documentación frente, por ejemplo, a cualquier grabado del siglo XIX reproduciendo planta, alzado y sección para crear una vista axonométrica de un conjunto arquitectónico? Deducimos, por ello, que el verdadero cambio tiene que ir paralelo a la representación gráfica en otro tipo de soporte. En consecuencia, una respuesta concluyente a la representación gráfica debería conformarse tanto a través del cambio de metodología como de los canales de representación hacia todos los soportes tridimensionales que hemos ido detallando en esta investigación.

4.2.3. Acceso público a la información

La simplificación de sistemas representa uno de los grandes objetivos actuales, la clave del proceso técnico que estandarice el uso de las herramientas. Para una mayor implantación del proceso, tiene que «democratizarse» la gestión de los resultados geométricos a nivel público a través de un consenso técnico, científico y de propiedad intelectual. Los datos generados tienen que resultar de fácil acceso gráfico y métrico para fomentar la autogestión y que se incentive la utilización de estas herramientas en la investigación. Hemos comprobado cómo se ha repetido continuamente en los últimos ciento cincuenta años esta democratización en otro tipo de técnicas como la fotografía, la aviación, la computación y actualmente en el empleo de sistemas drones o RPAS con fines geométricos y gráficos, en los que es posible la aplicación de técnicas de teledetección para la documentación de estructuras arqueológicas soterradas. Este hecho ha representado una búsqueda hacia la autogestión, sin la necesidad en este caso de imágenes satelitales, y la apertura de una determinada técnica a la sociedad en su conjunto. La singularidad a la que nos enfrentamos actualmente es el uso de toda esta variedad de información desde un punto de vista científico y divulgativo dentro del mismo proceso documental.

4.3. La necesidad de un carácter híbrido en la frontera de varias disciplinas

Tras analizar todo el panorama actual relacionado con la documentación, hemos constatado cómo la combinación e interoperabilidad entre sectores está consiguiendo, en muchas ocasiones, que se propicie la innovación como resultado de la aplicación e interacción en la frontera de varias disciplinas. Esta apuesta por un marcado carácter híbrido es la propuesta que hemos constatado en todos los proyectos analizados y que más implantación está teniendo actualmente en proyectos interdisciplinarios nacionales e internacionales. Consecuentemente, en la documentación del patrimonio, la adopción de un carácter heterogéneo entre el conjunto de profesionales que se dedican a su documentación (arquitectos, ingenieros topógrafos, historiadores del arte, arqueólogos, geólogos, químicos, etc.) debería constituir una constante y no un reto. Por ello, habría que redefinir y explicar el conjunto de técnicas empleadas combinando varias disciplinas y no ceñirse a un único análisis desde una única perspectiva. Resulta interesante señalar cómo la búsqueda de técnicas de documentación se ha repetido a lo largo de la historia con los mismos objetivos en disciplinas totalmente

divergentes (Cantó, 2001: 29-55)¹². No por esta divergencia se debe obviar el estudio de la regulación de estos procesos de documentación, es por ende que resulte útil analizar los estándares que regulan cada fase de un proyecto.

Por otro lado, si atendemos al proceso de documentación o registro en la metrología dimensional, dentro de la ingeniería inversa, existe una larga lista de estándares a los que es necesario ceñirse para comprobar la calidad del proceso (Smith y Van Laan, 1987: 17-39). Establecer continuas comparaciones entre técnicas de trabajo debería constituirse como un reflejo paralelo con el fin de conseguir una trazabilidad de la información que entregamos o utilizamos. En la documentación industrial, por ejemplo, también se puede extrapolar el término *as built* como resultado de la documentación, en un período de tiempo concreto, del estado actual de un componente y su comparación diacrónica con el diseño proyectado (Jardí/Angás, 2010: 235-241) y (Angás *et al.*, 2010: 58-61)¹³. Salvando las distancias y posibles anacronismos entre dos disciplinas totalmente diferentes, el resultado muestra ciertas analogías en el registro y análisis de cualquier patología estructural, por ejemplo, arquitectónicas. Si analizamos cómo organizar toda esa información generada, los sectores comienzan a converger porque la importancia reside fundamentalmente en el dato y en cómo se ha registrado esa información dentro del proceso que se ha empleado a través de información contextual (metadatos). Cómo organizar y gestionar la información tridimensional es la clave del mismo problema. Para ello existen, por ejemplo, programas que organizan información arquitectónica de edificios a través de los BIM (*Building Information Modeling*) (Eastman *et al.*, 2011) así como alguna aproximación a su aplicación en estudios sobre arqueología (Scianna *et al.*, 2014)¹⁴, aunque hemos comprobado a lo largo de este estudio cómo no siempre las soluciones para arquitectura son válidas para la arqueología. Uno de los principales logros, todavía en desarrollo, consiste en la integración de bases de datos no centralizadas relacionadas entre sí a través de metalenguajes en la denominada *web semántica*. Este hecho se ha podido observar durante toda la investigación y, sobre todo, en el capítulo de resultados con bases de datos relacionales (*vid.* apdo. 3.7). Creemos que representa el verdadero reto actual en la organización y gestión de la documentación geométrica del patrimonio a través de esta herramienta junto con la creación de utilidades que permitan la lectura legible de metadatos (información adicional o suplementaria) de forma automática por parte de programas. Así, en este sentido, se consigue ofrecer una presentación formal y ordenada de los contenidos (y de información acerca de los mismos) que facilita su procesamiento. La finalidad no es otra que la de mejorar la capacidad relacional e interoperabilidad (posibilidad de intercambiar información y de utilizarla) de los sistemas informáticos. La cartografía, por ejemplo, utiliza para su organización las denominadas Infraestructuras de Datos Espaciales de España (IDEE)¹⁵ como ejemplo del Consejo Superior Geográfico del Ministerio de

12 En arquitectura destacamos el ya mencionado trabajo –*vid.* cap. 1 dedicado al estado de la cuestión– del inconcluso «viaje arquitectónico-anticuario de Fray José Ortiz y Sanz» a fines del siglo XVIII. En este sentido, además de estudio sobre la representación del patrimonio nos sirve como carta arqueológica de la España neoclásica, donde se retoman tratados clásicos como la obra vitruviana, frente a las nuevas tendencias prerrománticas donde el sentimiento predomina a la razón en los dibujos del patrimonio cultural de los viajeros del romanticismo (Ortiz y Sanz, 1797).

13 Podríamos establecer un claro paralelismo metodológico entre las primeras fases de aplicación de una técnica industrial de registro en la digitalización de plantas industriales y el propio patrimonio. Con la particularidad que en el sector industrial es imprescindible reflejar mediante un procedimiento, previamente aprobado, cuál va a ser el protocolo y las técnicas a utilizar con un patrón de trazabilidad respecto a los resultados obtenidos.

14 *Vid.* apdo. 3.7.4 con la normativa de los BIM en nueva construcción.

15 Infraestructura de datos espaciales de España a través del portal de acceso a la información geográfica de España www.idee.es (último acceso: octubre de 2015).

Fomento. Una de las soluciones que proponemos en este trabajo, dada la dificultad de establecer un protocolo común (Juste *et al.*, eds. 2012) respecto a la toma de datos en la documentación geométrica del patrimonio cultural, es la utilización y adaptación de normativas ISO ya totalmente extendidas dentro la clasificación de la información geográfica. En esta materia el *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) establece la necesidad del uso de los metadatos sometidos a tres acciones básicas:

- Conservar los datos e inversiones realizadas por otro organismo desde la propia reusabilidad de la información.
- Elaborar catálogos de información comunes para utilizar información y datos de un modo más eficiente y en definitiva compartir esfuerzos.
- Incorporar información que facilite la transferencia de los datos, logrando la interoperabilidad de la información cuando los autores son diferentes.

Cualquiera de las tres acciones anteriormente citadas coincide plenamente con las necesidades que posee la digitalización del patrimonio en cuestión de conservación de la información. En el transcurso de este estudio de investigación hemos sido testigos, en pocos años, de ejemplos de pérdidas de información relacionadas con la representación del patrimonio que, sin duda, influyen de manera negativa en la conservación del mismo. Sin un estado primigenio del bien patrimonial no se puede establecer un patrón de comparación, con análisis y auscultaciones periódicas, ni ampliaciones en la documentación del yacimiento o monumento¹⁶. No hay duda en la propia complejidad del problema y, por ende, no se quiere caer en simplificaciones, sobre todo, en el entramado de competencias de instituciones locales, comarcales, provinciales, autonómicas, nacionales e internacionales. Cada una de ellas almacena este tipo de documentación de un modo particular, sin una clasificación global que sintetiza de algún modo los tres puntos citados anteriormente. La geografía, además, va más allá, sentando normativas ISO como la 19115:2003 con un modelo general de metadatos con especificaciones técnicas ISO/TS 19139 para la implementación de los metadatos como ficheros XML y extensiones ISO/CD 19115-2 para la descripción de recursos de información geográfica específicos (Sánchez *et al.*, 2008:77). De toda experiencia se desprende, como conclusión, la necesidad de extraer de estas normativas ya creadas una propia que sintetice mediante ficheros XML, datos básicos que acompañen a cada trabajo entregado a cualquier institución. Este tipo de ficheros presentan múltiples ventajas que evitan una posible obsolescencia ya que se pueden visualizar en cualquier editor de texto. Además existen programas libres y *open source* que permiten gestionar eficazmente estos ficheros así como su automatización¹⁷.

Si analizamos, por ejemplo, otra disciplina con ciertos paralelismos en la gestión de la documentación y extrapolamos la problemática, observamos cómo la biblioteconomía y la documentación adquieren igualmente puntos convergentes con el patrimonio cultural, en cuanto a las soluciones que plantea. El registro en este caso es un compendio de información bibliográfica registrada en una escala dilatada en el tiempo, pero cómo organizar y gestionar toda esa información continúa siendo el principal objetivo. Jordi Serra (2008: 19-27) sintetiza los principales problemas de los documentos electrónicos administrativos o de archivo en estos apartados:

- a) La disociación o la independencia del soporte. Coincide en patrimonio con la disyuntiva en cuanto representación 2D

¹⁶ A lo largo de esta investigación hemos podido comprobar, desgraciadamente, los riesgos arqueológicos que puede ocasionar la falta de un protocolo de almacenaje de la información en Romeo *et al.* (2017), Fatás *et al.* (2014), Picazo / Rodanés (2009).

¹⁷ Véase por ejemplo los programas libres Notepad ++ y CatMDedit (apdo. 2.5.2).

o 3D del patrimonio. Se trata de resolver un cambio del tipo de soporte físico al digital.

- b) La virtualidad o la separación de los componentes. No existe actualmente una política que determine con ciertas garantías cómo y cuáles deben de ser el número de copias incrementales que garanticen la vigencia de la información¹⁸.
- c) La modificabilidad o el carácter dinámico, sobre todo en el entendimiento de la información y su «democratización». En este punto se ha avanzado mucho en los últimos diez años, consiguiendo un acercamiento tecnológico ayudado por la también amplia variedad de programas de gestión adaptados a las necesidades particulares y compatibilidad con un entorno web.
- d) La obsolescencia o la dependencia de un interfaz tecnológico en perpetua evolución. En este último apartado es necesario asegurar la perdurabilidad de la información a través de formatos de código abierto que aseguren la compatibilidad a largo plazo. De esta manera, resulta incuestionable establecer un conjunto de procedimientos que regulen la gestión no sólo de la información sino de los procesos. Para la mayoría de los autores el problema de la preservación digital es doble, por la perdurabilidad del soporte¹⁹ y por la posible incompatibilidad a largo plazo de lo que se han denominado «formatos propietarios». En síntesis, todos los sectores coinciden en que la preservación digital se plantea más como un problema organizativo que tecnológico, hecha en la que la responsabilidad institucional debería adquirir un papel clave o por lo menos establecer unas recomendaciones básicas.

Desde este punto de vista consideramos que el conjunto de procedimientos debería abordar dos premisas básicas. En primer lugar, la unificación mediante bases de datos, contemplando ya estándares con formatos muy sencillos como, por ejemplo, los ya mencionados XML o ASCII. En segundo lugar, una clara apuesta por la simplificación, con formatos comunes e intercambiables de software libre, fácilmente comprensibles a nivel de usuario del tipo PDF3D (utilizado en el proyecto europeo CARARE como formato reconocido estándar de intercambio de la información tridimensional), X3D o JSON (que son fácilmente integrables sin ningún tipo de visualizador en navegadores compatibles con WebGL). Simplemente, atendiendo a estos dos elementos básicos, seríamos capaces de contribuir a un entendimiento más sencillo y a una mejor conceptualización de la información tridimensional mediante formatos globalmente accesibles, tal y como hemos expuesto en las diversas experimentaciones del apdo. 3.7 sobre resultados enfocados a la gestión de modelos tridimensionales en bases de datos.

Esta accesibilidad, que proponemos como conclusión final, lleva implícita el efecto denominado «democratizador» de la sociedad de la información de los últimos años, que permite una amplia difusión y con ello la comprensión por parte de cualquier usuario. El patrimonio cultural, en general, no ha sido ajeno a este proceso, lo que ha llevado al surgimiento de un movimiento que se ha lla-

¹⁸ Para esta cuestión remitimos al lector al apdo. 2.5.2 de documentación de bajo coste y *software* libre y *open source*.

¹⁹ Sobre el año 2000 coincidiendo con el cambio de milenio hubo un debate (De Lusenet, 2003: 112-118) acerca de la controvertida conservación de la documentación digital y su obsolescencia, tanto en sus diversos formatos como en los sistemas destinados a su reproducción. De esta manera, se propuso una preservación híbrida con otros sistemas tradicionales como el microfilm de sales de plata, que puede soportar una duración en circunstancias normales de 500 a 1000 años. Además tiene la ventaja de que garantiza, en cualquier momento, su legibilidad con sistemas clásicos como una lente convergente.

mado *public archaeology*. Con esto se ha pretendido, esencialmente e inicialmente en países anglófonos, redefinir las relaciones entre el sector profesional e investigador de la arqueología y el público en general o sociedad, tratando de mejorar la imagen pública de la disciplina (Holtorf, 2007). Todo ello ha llevado a hablar de una forma de *democratisation of communication, activity or administration; through communication with the public* (Richardson, 2014: 444), subrayando la importancia de conceptos tan interesantes como el de *digital communities* (Smith y Waterton, 2009: 121) como resultado de la interacción comunicativa de los usuarios.

La tendencia aludida ha experimentado un gran auge debido a varios factores. Por un lado, la creciente implicación social de la arqueología, sobre todo en países anglófonos²⁰, en los que ha existido tradicionalmente una mayor conciencia del componente profesional en materia de patrimonio cultural con la sociedad (Rodríguez/ Matas, 2013) pero también apreciable en experiencias más cercanas (Vaquerizo y Ruiz, 2013). El componente social de la arqueología, especialmente en la difusión de los resultados extraídos de la investigación, *no sería nada sin la sociedad que la genera y sostiene* (Vaquerizo, 2013). Junto a este componente más de carácter social, debemos atender igualmente al tecnológico, el acceso global al mismo y las nuevas tendencias surgidas en los últimos años, sobre todo en la web (Martínez y Ruiz, 2013) y en especial el uso de *software* libre y plataformas colaborativas. Cada vez son más frecuentes el uso de formatos *open source* gracias a la difusión de congresos como el FOSS4G (*Free and Open Source Software for Geospatial*)²¹ y otros específicos dentro del campo arqueológico dirigidos al uso de estos formatos de código abierto como el *ArcheoFoss. Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica*, ambos desarrollados anualmente desde 2006.

Por último, debemos insistir cómo es necesaria una especificación que recoja diversas recomendaciones para la trazabilidad procesual, geométrica del método utilizado y, sobre todo, de la verificación de sus objetivos a través de un orden lógico de equilibrio y desarrollo. Las técnicas y herramientas pueden variar dependiendo de los objetivos y las necesidades desde simples flexómetros hasta escáneres tridimensionales o drones. Mediante esta planificación se quiere evitar el excesivo protagonismo que muchas veces cobran más las herramientas que los resultados y el propio bien patrimonial. Resulta obvio recalcar, como hemos comprobado a lo largo de este estudio, que ni el uso de la mejor tecnología garantiza el éxito de un proyecto, ni tampoco la utilización de un único instrumento puede conseguirlo sin una visión interdisciplinar.

4.4. Propuestas de futuro

La adopción de nuevas tecnologías en la documentación geométrica del patrimonio cultural lleva implícita la adopción de una com-

binación de un método y diferentes técnicas para su investigación así como su difusión. Sin embargo, la aparente velocidad tecnológica junto con la inmediatez social, no ha permitido establecer una lógica procesual en el conjunto de procedimientos y técnicas necesarias en los proyectos de documentación geométrica. Este estudio ha pretendido además, establecer una reflexión sobre el estado de la cuestión, repasando cada una de las técnicas y herramientas actuales en diferentes experimentaciones de proyectos de documentación, subrayando cada una de las dificultades actuales en la representación de las diferentes clasificaciones del patrimonio y aportando para cada una de ellas puntos de partida que contribuyan a establecer un correcto desarrollo en el proceso de creatividad, innovación, cultura y educación. Con todo ello, se debe atender a la necesidad manifiesta de tratar de alcanzar un consenso acerca de la creación y uso de un protocolo de documentación globalmente aceptado.

El análisis de diferentes técnicas de documentación y, sobre todo, las conclusiones extraídas de nuestros ensayos realizados en los últimos diez años, buscan contribuir a la creación de una propuesta de documentación general que permita generar información gráfica y geométrica exhaustiva de cada entidad patrimonial. Las características singulares de cada elemento documentado determina la necesidad de adaptar una normalización a las características intrínsecas del mismo.

Al margen de las adaptaciones metodológicas, y como tratamos en el capítulo de herramientas, el proceso de captación de datos y la trazabilidad de los mismos (metadatos) debe contar siempre con la mayor precisión. El volumen de información generada resulta ingente y, en muchas ocasiones, no aprovechable por las administraciones para las que se genera. Falta de formación de personal, de medios materiales (hardware) y de programas determinan que gran parte de la información generada descansa en los cajones o discos duros de las administraciones, generándose lo que podríamos denominar un «efecto bumerán», toda vez que, una vez lanzada la información, ésta vuelve al punto de origen (generador) tal cual fue entregada ante la imposibilidad de su aprovechamiento.

La solución a dicha problemática no es sencilla ni única, son diversos los aspectos que deben abordarse, pero uno de los puntos más importantes es, sin duda, el origen de la misma. Así, junto a los principios básicos de documentación que proponemos, hemos planteado para los resultados obtenidos una serie de herramientas que minimicen todo lo posible ese «efecto bumerán», permitiendo a un amplio número de personas interactuar con la información generada a diferentes niveles, según interés y grado de implicación legal con el bien, convirtiendo la información cuantitativa (registrada y almacenada) en información cualitativa (procesada e interpretada).

Al enorme potencial de la información generada por las técnicas digitales y de documentación tridimensional en diferentes campos (investigación, conservación, gestión) se une el de la difusión. Para este último aspecto, proponemos diversas vías de aproximación, todas ellas relacionadas con plataformas digitales que aproximan al usuario de forma intuitiva y, muchas veces gratuita, a un mejor conocimiento del patrimonio, tratando de equilibrar los contenidos al aparato gráfico en una apuesta manifiesta por la interacción y equilibrio entre documentación y difusión.

Si atendemos, por otro lado, a la manera en que ha influido la tendencia social de los últimos años, constatamos un aumento de términos como virtual, tridimensional y técnicas estereoscópicas que, ayudado por las nuevas tecnologías, han cobrado un gran protagonismo.

20 Esta particularidad resulta muy notoria en determinados casos, esencialmente en Estados Unidos, donde la arqueología y trabajos relacionados con ésta (excavaciones, prospecciones...) quedan abiertos (con supervisión de especialistas) a la participación de asociaciones, aficionados y personas con cierto interés en la materia sin que, en todos los casos, deban acreditar su formación en la misma. Esta perspectiva se muestra más cerrada en el viejo continente, al menos en la experiencia española, donde toda actividad arqueológica con fines de investigación queda centralizada en universidades o en el CSIC sin que, en principio, exista participación de personas que no se hayan especializado en arqueología o sean estudiantes de especialidad. En esta tesitura es donde aparecen interesantes controversias acerca del propio término de «arqueología pública» y su definición, no carente de críticas (Almansa, 2013), visiones mitificadas de la profesión (Vizcaíno, 2013) o de problemáticas específicas, como la de los procesos de construcción de la interpretación del pasado (Salerno, 2013).

21 *Free and Open Source Software for Geospatial* <http://2015.foss4g.org/> (último acceso: septiembre de 2017).

nismo. Existen diversos factores y sectores que además están contribuyendo a su pleno desarrollo, entre ellos, factores económicos como nuevas plataformas y posibilidades de reproducción con la ayuda de otros sectores. De esta manera, debemos precisar un factor relevante cuando los límites de la representación tridimensional o virtual escapan de cualquier medio físico (monográficos) o digital (computador). El campo de interacción entre el bien patrimonial y el investigador o usuario se está expandiendo buscando otros límites en los que el espectador pueda interactuar o percibir la documentación patrimonial en su propio contexto (espacio inmersivo). Este desarrollo escapa de los propios límites que comentábamos anteriormente –físico y digital– y por ello entra en juego el entorno inmediato en el que se inscribe el bien patrimonial. En este sentido, vemos cómo ha habido una evolución del concepto de patrimonio en los últimos cincuenta años, reflejado en las diferentes convenciones y cartas internacionales que se desprenden de la UNESCO e ICOMOS (*vid. supra*, cap. 1, «Estado de la cuestión»). Exactamente, observamos cómo ha habido un avance del concepto de patrimonio definido como un trinomio: histórico, geográfico y, más recientemente, social. La Carta de Venecia de 1964 establece al respecto el primer cambio de este concepto: Art. 1 «La noción de monumento histórico comprende tanto la creación arquitectónica aislada, como el ambiente urbano o paisajístico que constituya el testimonio de una civilización particular, de una evolución significativa o de un acontecimiento histórico. Esta noción se aplica no sólo a las grandes obras, sino también a las obras modestas que con el tiempo hayan adquirido un significado cultural»²². Posteriormente se han ido sucediendo otro tipo de convecciones que han ratificado esta relación indivisible entre el espacio natural y el monumento histórico²³.

El ejemplo más claro es el paso de las clásicas infografías de un medio digital a su interacción con el paisaje a través de diferentes tecnologías como la realidad aumentada, realidad inmersiva o la combinación de ambas. Otro ejemplo de interacción con el medio y desarrollo de las reconstrucciones infográficas son los *video mapping projection* aplicados al patrimonio (Monzón 2015, 166-191)²⁴. Se pretende la búsqueda de nuevas percepciones sensoriales con unos límites diferentes, en los que el espectador conjugue la virtualidad con el espacio físico real, no limitándose de este modo a un área digital específica, más allá de una pantalla de ordenador (Forte, 2014: 114). Concretamente la tendencia va encaminada a soluciones donde predomine la inmersión en el medio. En este sentido, tanto el investigador como cualquier tipo de usuario pueden interactuar de una manera mucho más directa. A lo largo de esta investigación esta técnica la hemos visto en varias experimentaciones (Proyecto HANDPAS²⁵ y el Proyecto ARAM –Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia– que engloba un conjunto de más de 35 abri-

gos y cuevas rupestres en España) sobre todo ligadas al arte rupestre mediante el uso de diferentes soportes de realidad inmersiva²⁶, aprovechando cada uno de los escaneados realizados en la fase de digitalización. En consecuencia, este tipo de accesibilidad tiene una doble vertiente: dirigida al espacio y al objeto arqueológico. Por un lado, la inmersión en el espacio arqueológico nos introduce plenamente en lugares con una accesibilidad compleja o limitada bien por el estado de conservación (cueva de Maltravieso)²⁷ o por la dificultad en el acceso (abrigos rupestres del proyecto ARAM situados en el barranco del río Vero)²⁸. La ventaja en la visualización mediante estas técnicas deriva en la posibilidad de poder interactuar con un sensor inercial que permite detectar la aceleración lineal (acelerómetros) y la velocidad angular (giroscopios), además de disponer de una visión estereoscópica del medio donde nos encontramos. Sin embargo, si tratamos un objeto mueble mediante el empleo de estos sistemas tendremos que disponer de algún sistema tipo *gamepad* o *joystick* para su movimiento de traslación y rotación, puesto que el eje del sistema de referencia cambia respecto a nuestro punto de vista cuando cambiamos el centro del espacio inmersivo al eje del propio objeto. Este procedimiento permite la visualización de cualquier tipo de bien mueble digitalizado con una alta calidad gráfica. Asimismo, como enumerábamos en el apartado de bases de datos relacionales, se trata de una aportación que permite, además de la visualización en navegadores que admitan WebGL, sin ningún tipo de programa adicional, la generación de etiquetas descriptivas de cada una de las partes que integran el bien patrimonial²⁹.

Sin duda, nos encontramos en una etapa muy incipiente de lo que pueden considerarse bases de datos relacionales de modelos tridimensionales como futuro cercano. En los próximos años constituirán un punto de avance en la documentación geométrica del patrimonio documental, en una clara demanda funcional una vez lograda la gráfica, como base de consulta científica, de intercambio entre museos, instituciones, centros de investigación o meramente empleada con fines didácticos.

A modo de epílogo, este trabajo ha pretendido congelar un momento concreto de la documentación geométrica del patrimonio cultural, es decir, analizar mediante una retrospectiva el conjunto de las principales técnicas actuales para trazar diferentes caminos que contribuyan a resolver cada una de las dificultades propias que nos hemos encontrado en el conjunto de ensayos representativos desarrollados, y que tienen como protagonista principal la incapacidad de resolver los ritmos diacrónicos entre tecnología, metodología y necesidades sociales. Como hemos visto en otras disciplinas, se trata de un problema organizativo y no tecnológico, completamente exógeno al patrimonio. De esta manera, hemos planteado nuevas perspectivas que, creemos, contribuirán en los

22 https://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf (último acceso: noviembre de 2017).

23 Convención del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de 1972 celebrada en París: <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/dms/mecd/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio-mundial/patrimonio-mundial-unesco/definicion/convention-es.pdf> (último acceso: noviembre de 2017).

24 *Vid. fig 222*. En el trabajo de documentación que realizamos en la Capilla de San Marcos de La Seo de Zaragoza en 2014 junto con el profesor de la Universidad de Zaragoza Jorge Santolaria, se aborda una combinación de documentación con técnicas de escáner 3D de diferencia de fase, tiempo de vuelo y fotogrametría con la finalidad de obtener una información que sirva como propuesta de restauración de dicha Capilla. Además se realizó una propuesta museográfica gracias a técnicas de *video mapping projection* realizada por Juan Monzón para su TFG titulado «Utilización de técnicas de ingeniería inversa de documentación gráfica y geométrica, para su posterior uso en el diseño de un producto museográfico basado en técnicas de realidad aumentada para la difusión del patrimonio histórico-artístico» (2015: 166-191).

25 <http://handpas.juntaex.es/> (último acceso: noviembre de 2017).

26 Las diferentes experimentaciones realizadas a lo largo de este trabajo de investigación se han completado con el modelo de gafas de realidad inmersiva Oculus Rift DK1 <https://www.oculus.com>. No obstante, existen otro tipo de modelos económicos incluso descargables que trabajan con el sistema Google Cardboard con unas especificaciones del visor Cardboard de dominio público, publicitadas bajo el lema «hazlo tú mismo». https://www.google.com/intl/es_ALL/get/cardboard/manufacturers/

27 http://handpas.juntaex.es/virtual/Cueva_Maltravieso/Cueva_Maltravieso_3D.html

28 <http://3dscanner.es/proyectoaram/category/conjuntos-rupestres/arte-esquemático/gallinero/>
http://parqueculturalriovero.com/images/virtual/Recorrido_Virtual_PC_Rio_Vero.html (último acceso: noviembre de 2017).

29 Para un mayor detalle véanse los diferentes modelos tridimensionales (arquitectura, esculturas, arte rupestre, arqueología, grandes superficies, objetos muebles, componentes y plantas industriales) realizados como base de la experimentación, y otro tipo de ensayos no incluidos, realizados para este estudio en el siguiente enlace: <https://sketchfab.com/jorge.angas> (último acceso: noviembre de 2017).

próximos años en la búsqueda de otras soluciones en la documentación del patrimonio.

Después de casi dos años desde la defensa de la tesis doctoral en la que se ha basado esta investigación, algunos puntos de vista han cambiado o han sufrido variaciones, como es obvio, pero, sin lugar a dudas, esta transformación solamente se ha producido una vez establecido un punto cero o punto de partida que ha sido el objetivo principal de esta monografía. Con ello, esperamos igualmente que este estudio pueda contribuir a la normalización metodológica de los procesos de investigación patrimonial a través del consenso (todavía no logrado) del conjunto de disciplinas, profesionales e instituciones que integran la documentación gráfica y geométrica del Patrimonio Cultural.



5. Bibliografía



5. Bibliografía

- ABER, J.S. / MARZOLFF, I. / RIES, J.B. (2010): *Small-format aerial photography. Principles, techniques and geoscience applications*, Amsterdam.
- AGUAROD OTAL, C. (2010): *Ayer y hoy del foro de Caesaraugusta* (catálogo de exposición), Museo del Foro, Zaragoza.
- AGUGIARO, G. / REMONDINO, F. (2014): «3D GIS for Cultural Heritage sites: the query Arch3D prototype», en REMONDINO, F. / CAMPANA, S. (eds.): *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, Archaeopress, BAR International Series 2598, Oxford, pp. 145-150.
- AGUSTÍN, L., et al. (2013): *Representación del espacio arquitectónico 2011-12*, Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- ALESSANDRI, C. / UCCELLI, F. (2006): «The 3D Laser Scanner in integrated analyses of archaeological sites», en CAMPANA, S. / FRANCOVICH, R. (eds.): *Laser scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e tecnologie digitali 1*, Quaderni del Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti, Sezione Archeologica, Università di Siena, Florencia, pp. 69-91.
- ALEXANDER, C. / PINZ, A. / REINBACHER, C. (2015): «Multi-scale 3D rock-art recording», *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2, 2-3, pp. 181-195.
- ALMAGRO GORBEA, A. (1999): «Photogrammetry for everybody», XVII *CIPA International Symposium on Architectural Photogrammetry*, 3-6 de octubre de 1999, Recife / Olinda (Brasil).
- (2002): *El Acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)*, Artifex, Ingeniería romana en España, Madrid, pp. 213-237.
 - (2004): *Levantamiento Arquitectónico*, Universidad de Granada, Granada.
 - (2011): «Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC», en DOMINGO FOMINAYA, M. / SÁNCHEZ LUENGO, A.J. (eds.): *Documentación gráfica del Patrimonio* (publicación digital), Ministerio de Cultura, pp. 26-45.
 - (2013): «Surveying World Heritage Islamic monuments in North Africa. experiences with simple photogrammetric tools and no previous planning», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIV International CIPA Symposium*, Strasbourg, vol. II-5/W1, pp. 13-18.
- ALMANSA SÁNCHEZ, J. (ed.) (2013): *Arqueología pública en España*, JAS Arqueología, Madrid.
- ANDREU PINTADO, J., et al. (2008): «Cuestiones urbanísticas en torno a la 'Civitas' de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)», *SPAL*, 17, Sevilla, pp. 233-266.
- ANDREWS, D., et al. (2009): *Measured and Drawn. Techniques and practice for the metric survey of historic buildings (second edition)*, English Heritage, Swindon.
- ANGÁS, J. (2005): «Santuarios como indicadores de frontera en el territorio noroccidental de Vulci siglos VII-III a.C. Italia centro-tirrenica», *Salduie*, 5, Zaragoza, pp. 65-94.
- (2011): «Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio», en DOMINGO FOMINAYA, M. / SÁNCHEZ LUENGO, A.J. (eds.): *Documentación gráfica del Patrimonio* (publicación digital), Ministerio de Cultura, pp. 154-163.
 - (2012): «Nuevas técnicas de documentación geométrica y análisis del arte rupestre», en JUSTE, M.N., et al. (eds.): *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, Patrimonio Mundial*, Comarca de Somontano de Barbastro, Barbastro, pp. 61-71.
- ANGÁS, J. / BEA, M. (2014a): «Propuesta conceptual y metodológica en la documentación gráfica y geométrica del arte rupestre. Proyecto ARAM (Arte Rupestre y Accesibilidad Multimedia)», en MEDINA-ALCAIDE, M^aA., et al. (eds.): *Sobre rocas y huesos: las sociedades prehistóricas y sus manifestaciones plásticas*, Fundación Cueva de Nerja / Universidad de Córdoba, Córdoba, pp. 348-365.
- (2014b): «Documentación geométrica de la cueva con arte paleolítico de la Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca)», en CORCHÓN, M^aS. / MENÉNDEZ, M. (eds.): *Cien años de arte rupestre paleolítico. Centenario del descubrimiento de la cueva de la Peña de Candamo (1914-2014)*, Universidad de Salamanca, Salamanca, pp. 209-219.
- ANGÁS, J. / BEA, M. / COLLADO, H. / AGUILAR, J.C. / GARCÍA, J.J. (2015): «La cueva de Maltravieso (Cáceres, España): la dualidad de un nuevo método de registro tridimensional científico y divulgativo», *XIX International IFRAO Rock Art Conference*, Cáceres, pp. 201-214.
- ANGÁS, J. / BEA, M. / ROYO, J.I. (2013): «Documentación geométrica mediante tecnología láser escáner 3D del arte rupestre en la cuenca del Matarraña (Teruel)», en SAN NICOLÁS DEL TORO, M. (ed.): *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla, Murcia, pp. 91-101.
- ANGÁS, J. / BEA, M. / URIBE, P. (2015): «Projet Calypso: Mémoire prospectif d'aide à la définition des caractéristiques techniques d'une base de données sur les grottes ornées de Midi-Pyrénées, associée aux modèles scan 3D», *Convention Direction régionale des affaires culturelles DRAC de Midi-Pyrénées* (estudio inédito), Francia.
- ANGÁS, J. / COLLADO, H. (2018): «Metodología de documentación y análisis geométrico para el proyecto HANDPAS mediante microfo-

- togrametría y escáner tridimensional de luz blanca estructurada», en COLLADO, H. (coord.): *HANDPAS. Manos del pasado. Catálogo de representaciones de manos en el arte rupestre paleolítico de la península ibérica*, Mérida, pp. 17-28.
- ANGÁS, J. / HINOJO, E. (2017): «Documentación tridimensional mediante escáner láser 3D y técnicas fotogramétricas del Baluarte de Sant Antoni (Barcelona): democratización y valorización de resultados», *II Jornadas de Patrimonio Defensivo de Época Moderna*, Universitat de Barcelona, Barcelona, pp. 193-208.
- ANGÁS, J. / JARDÍ, X. / PONTES, A. / MACH, I. / TARRASA, F. / GARCÍA, M. (2010): «Determinación de elevaciones reales de tuberías para ANAV y CNAT mediante tecnología de escaneado láser 3D», *Revista de la Sociedad Nuclear Española*, 310, Madrid, pp. 58-61.
- ANGÁS, J. / LE GUILLOU, Y. / MAUDUIT, E. (2014): «Vers une normalisation de la documentation 3D de parois ornées: Les grottes de Niaux (Ariège) et de Roucadour (Lot)», *Karst, grottes et 3D, Karstologia*, 63, pp. 21-34.
- ANGÁS, J. / MIRANDA, J.V. / SERRETA, A. (2010): «Étude de faisabilité relative à la réalisation d'un système géographique (SIG-3D) appliqué au patrimoine souterrain», *Convention Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) de Midi-Pyrénées* (estudio inédito), Toulouse.
- ANGÁS, J. / RAMÓN, N. (2016): «Anastilosis virtual de tres hornos islámicos de Zaragoza como herramienta de interpretación e investigación arqueológica», *Salduie*, 16, Zaragoza, pp. 15-27.
- (e.p.): «Escáner 3D y Anastilosis como sistema de documentación y alternativa a la imposibilidad de conservar *in situ* restos arqueológicos, en *I Congreso Nacional de Arqueología Profesional*, 2017, Zaragoza.
- ANGÁS, J. / SERRETA, A. (2010a): «Valorización y difusión del patrimonio arqueológico mediante un entorno web 3D: Documentación de Santa María de Iguacel XI d.C.) mediante láser escáner 3D», *Virtual Archaeological Review*, 1, vol. 1, pp. 63-67.
- (2010b): «Assessment, dissemination and standardization of geometric data recording of Archaeological Heritage obtained from 3D laser scanning», *Virtual Retrospect 2009*, Ausonius Éditions, Bordeaux, pp. 187-193.
- ANGÁS, J. / URIBE, P. (2015): «Documentation géomatique, valorisation et diffusion du patrimoine hydraulique de la vallée de l'Èbre», en BORAU, L. / BORLENGHI, A. (eds.): *Aquae Ductus. Actualité de la recherche en France et en Espagne. Actes du Colloque International de Toulouse*, Aquitania supp., 33, Bordeaux, pp. 309-314.
- (2017a): «Técnicas geomáticas para la documentación e investigación del patrimonio cultural», en MARTÍN-BUENO, M. / SAÉNZ, C. (eds.): *Manual de Topografía aplicada a la arqueología*, Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 99-126.
 - (2017b): «RPAS o drones aplicados al patrimonio cultural: de la documentación geométrica a las imágenes multiespectrales», *La Ciencia y el Arte VI. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*, Ministerio de Educación Cultura y Deporte, Madrid, pp. 68-81.
- ANGÁS, J. / URIBE, P. / BEA, M. (2016): «Método y técnicas de aplicación de sistemas drones o RPAS en la investigación arqueológica», en LORENZO, J.I. / RODANÉS, J.M. (eds.): *Actas del I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés*, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y Ciencias de Aragón, vol. 1, Zaragoza, pp. 541-549.
- ANGÁS, J. / URIBE, P. / SERRETA, A. (2013): «Social Spreading of Geometric, Recorded data from a range of types 3D scanners via a Web Data Server», *Computer Applications in Archaeology*, Southampton, pp. 363-375.
- ANGULO, R. / PINTO, F. / RODRIGUEZ, J. / PALOMINO, A. (2017): «Digital Anastylis of the Remains of a Portal by Master Builder Hernán Ruiz: Knowledge Strategies, Methods and Modelling Results», *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 7, pp. 32-41.
- ARBACE, L., et al. (2012): «Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue», *Journal of Cultural Heritage*, 14, Elsevier, Ámsterdam, pp. 332-345.
- ARENILLAS, M. (2003): «Presas romanas en España», *Ingeniería y territorio*, 62, Barcelona, pp. 72-78.
- ARNOLD, D. (2008): *3D-COFORM. Tools and Expertise for 3D Collection Formation*, ID 231809, University of Brighton. <http://www.3d-coform.eu/>
- ARRANZ, J.J. (2013): *Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial* (tesis doctoral), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- ASENSIO, J.A. (2003): «El *sacellum in antis* del «Círculo Católico» de Huesca (Osca, Hispania Citerior), un ejemplo precoz de la arquitectura templaria romana en el Valle del Ebro», *Salduie*, 3, Zaragoza, pp. 93-128.
- ATZBERGER, C., et al. (2014): «ARCTIS — A MATLAB® Toolbox for Archaeological Imaging Spectroscopy», *Remote Sensing*, 6, Basel, pp. 8617-8638. <http://doi.org/10.3390/rs6098617>
- AUER, M., et al. (2014): «Web-based visualization and query of semantically segmented multiresolution 3D models in the field of Cultural Heritage», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-5, Riva del Garda (Italia), pp. 33-39.
- AZEMA, M., et al. (2010-2011): «La grotte ornée paléolithique de Baume Latrone France, Gard): la 3D remonte le temps», en CLOTES, J. (ed.): *L'Art Pléistocène dans le monde, Actes du Congrès IFRAO, Préhistoire, Art et Sociétés, Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées LXX-LXVI*, Tarascon-sur-Ariège, pp. 214-215, CD, 1221-1238.
- BALDELLOU, V. (1991): «Memoria de las actuaciones de 1988 y 1989 en la zona del río Vero (Huesca)», *Arqueología Aragonesa. 1988-1989*, Zaragoza, pp. 13-18.
- (1994): «Memoria de la actuación de 1991 en la zona del río Vero (Huesca)», *Arqueología Aragonesa. 1991*, Zaragoza, pp. 11-14.
- BARCELÓ, J.A. / VICENTE, O. (2011): «Qué hacer con un modelo arqueológico virtual. Aplicaciones de la inteligencia artificial en visualización científica», *Virtual Archaeology Review*, vol. 2, 4, Valencia, pp. 53-57.
- BARRIENTOS, A., et al. (2007): «Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones» (edición digital): <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- BASSANI, M. / GHEDINI, F. (2011): «Strutture architettoniche a uso religioso nelle domus e nelle villae della Cisalpina», *Religionem Significare, Antenor Quaderni* 19, Roma, pp. 99-134.
- BEA, M. (2012a): *Arte rupestre de la Comarca del Matarraña / Matarranya*, Comarca del Matarraña, Teruel.
- (2012b): «Nuevas perspectivas de análisis para el arte levantino del Maestrazgo. Los abrigos del Arquero y del Torico Castellote, (Teruel)», *Zephyrus*, LXX, Salamanca, pp. 49-67.
- BEA, M. / ANGÁS, J. (2014): «The conservation of Spanish Levantine Rock Art in Aragón, Spain, Using 3-D Laser Scanning», en DARVILL, T. / BATARDA, A. P. (eds.): *Open-air rock art Conservation and Management State of the Art and Future Perspectives*, Routledge Studies in Archaeology Series, Londres, pp. 159-166.
- (2015): *Matarranya Rock Art. Restitución virtual del arte rupestre. Comarca del Matarraña/Matarranya*, Teruel. Descarga aplicación IOS y Android: <http://3dscanner.es/matarranya/app/>
 - (2015a): *Las pinturas rupestres de Bezas y Tormón Teruel*, Parque Cultural de Albarracín, Teruel.
 - (2015b): «Las representaciones levantinas de bovinos de la casa forestal de Tormón (Teruel): Ceja de Piezarrodilla y Cerrada del Tío Jorge», *Zephyrus*, LXXV, Universidad de Salamanca, Salamanca, pp. 73-84. <http://dx.doi.org/10.14201/zephyrus2015757384>

- (2016a): «Planteamientos interpretativos para el arte levantino a partir del estudio del abrigo del arquero de los Callejones Cerrados (Albarracín, Teruel)», *Zephyrus*, LXXVII, Universidad de Salamanca, Salamanca, pp. 59-78.
<http://dx.doi.org/10.14201/zephyrus2016775978>
 - (2016b): «Nuevos planteamientos para el arte rupestre de la sierra de Albarracín», en LORENZO, J.I. / RODANÉS, J.M. (eds.): *Actas del I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés*, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y Ciencias de Aragón, vol. 1, Zaragoza, pp. 121-129.
 - (2016c): «Nuevas metodologías de documentación para la investigación y difusión del arte rupestre en Aragón», en LORENZO, J.I. / RODANÉS, J.M. (eds.): *Actas del I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés*, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y Ciencias de Aragón, vol. 1, Zaragoza, pp. 523-531.
 - (2017): «Geometric Documentation and Virtual Restoration of the Rock Art Removed in Aragón (Spain)», *Journal of Archaeological Sciences: Reports*, 11, Elsevier, Ámsterdam, pp. 159-168.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.025>
- BEA, M. / DOMINGO, R. / PÉREZ-LAMBÁN, F. / REKLAITYTE, I. / URIBE, P. (2010): «Prospecciones arqueológicas en el término municipal de La Muela (Zaragoza)», *Salduie*, 10, Zaragoza, pp. 237-258.
- BEA, M. / DOMINGO, R. / URIBE, P. / REKLAITYTE, I. / FATÁS, L. (2009): «Actuaciones arqueológicas en los abrigos de Roca dels Moros y Els Gascons (Cretas, Teruel) y de La Fenellosa (Beceite, Teruel)», *Salduie*, 9, Zaragoza, pp. 393-418.
- BEA, M. / MAZO, C. / UTRILLA, P. (e.p.): «Cueva Hermosa (Calcena). Un nuevo conjunto de arte rupestre paleolítico en Aragón», en LORENZO, J.I. / RODANÉS, J.M. (eds.): *II Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés*, 2017, Zaragoza.
- BELTRÁN, A. (1968): *Arte Rupestre Levantino*, Monografías Arqueológicas IV, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- (1977): «Las obras hidráulicas de Los Bañales», *Simposio Segovia y la arqueología romana*, Barcelona, pp. 91-127.
 - (1984): «Cabré y el arte rupestre», *Juan Cabré Aguiló 1882-1982: Encuentro homenaje*, Zaragoza, pp. 41-43.
 - (1993): *Arte prehistórico en Aragón*, Ibercaja, Zaragoza.
 - (2005): *Corpus del arte rupestre levantino del Parque Cultural del río Martín*, Asociación Parque Cultural río Martín, Zaragoza.
- BELTRÁN, A. / BALDELLOU, V. (1981): «Avance al estudio de las cuevas pintadas del Barranco de Villacantal (Huesca)», *Altamira Symposium*, Ministerio de Cultura, Madrid, pp. 131-140.
- BELTRÁN, F. (2006a): «El valle medio del Ebro durante el periodo republicano: de limes a conventus», *La invención de una geografía de la Península Ibérica*, Málaga / Madrid, pp. 217-240.
- (2006b): «An Irrigation Decree from Roman Spain. The *LexRivi Hiberiensis*», *Journal of Roman Studies*, 96, Cambridge, pp. 147-197.
- BELTRÁN, M. (1976): *Arqueología e historia de las ciudades antiguas del Cabezo de Alcalá de Azaila (Teruel)*, Monografías Arqueológicas, 19, Zaragoza.
- (1991): «La Colonia Celsa», *Actas de la casa urbana hispanorromana*, 1988, Zaragoza, pp. 131-164.
 - (2013): *Azaila. Estado de la cuestión en el año 2013, (Contiene documentación inédita de Juan Cabré)*, *Caesaraugusta*, 83, Zaragoza.
- BENNETT, R., et al. (2012): «The application of Vegetation Indices for the prospection of Archaeological features in grass-dominated Environments», *Archaeological Prospection*, 19, Wiley John & Sons online library, Hoboken, pp. 209-218.
- BLÁNQUEZ PÉREZ, J. / RODRÍGUEZ NUERE, B. (eds.) (2004): *El arqueólogo Juan Cabré (1882-1947): La fotografía como técnica documental*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- BOSCH-GIMPERA, P. (1924): «Les pintures del Barranc del Calapatá de Cretas Baix Aragó», *Bulletí de la Associació Catalana d'Antropologia, Etnologia i Prehistoria II*, Editorial Catalana, Barcelona, pp. 131-146.
- (1970): «Chronologie de l'art levantin espagnol» *Valcamonica Symposium, Actes du Symposium International d'ArtPréhistorique*, Centro Camuno di Studi Preistorici, Capo di Monte (Valcamonica, 1968), pp. 69-77.
- BRAASCH, O. (2007): «Gallipoli Ahead-air survey between the Baltic and Mediterranean» en KUZMA, I.: *Publikácia vznikla v rámci Centraexcellentnosti SAV Výskumné centrum Najstarsích dejín Podunajska priArcheologickom ústave SAV*, Nitra, pp. 84-96.
- BRANDI, C. (2002): *Teoría de la restauración*, Alianza, Madrid.
- BREUIL, H. / CABRE, J. (1909): «Les peintures rupestres du Bassin inférieur de l'Èbre», *L'Anthropologie*, XX, Paris, pp. 1-21.
- BREUIL, H. / LANTIER, R. (1959): *Les hommes de la Pierre ancienne Paléolithique et Mésolithique*, Payot, Paris.
- BREUIL, H. / SERRANO, P. / CABRE, J. (1912): «Les peintures rupestres d'Espagne, IV. Les abris del Bosque à Alpera (Albacete)», *L'Anthropologie*, XXIII, Paris, pp. 529-562.
- BRUTTINI, J. (2013): *Archeologia urbana a Firenze. Lo scavo della terza corte di Palazzo Vecchio indagini (1997-2006)*, Florencia.
- BRYAN, P. / BLAKE, B. / BEDFORD, J. (2009): *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, English Heritage, Swindon.
- CABRÉ, J. (1909): *Catálogo artístico-monumental de la provincia de Teruel. Vol. I* (edición digital) Ministerio de Cultura / CSIC, Madrid.
- (1915): *Arte rupestre en España*, Memoria núm. 1 de la Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas, Madrid.
- CALDWELL, D. / 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, Elsevier, Ámsterdam, pp. 140-151.
- CAMPANA, S. (2011): *Remote Sensing, GIS, GPS e tecniche tradizionali. Percorsi integrati per lo studio dei paesaggi archeologici. Murlo-Montalcino e bassa Val di Cornia*, Tesis de Doctorado, vol. 1, ciclo XV, Universidad de Siena / Universidad de Padova / Universidad de Pisa / Universidad de Venecia, Italia.
- CAMPANA, S. / FORTE, M. / LIUZZA, C. (2010): *Space, Time, Place. Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, BAR International Series 2118, Archaeopress, Oxford.
- CAMPANA, S. / FRANCOVICH, R. (eds.) (2006): «Laser Scanner e GPS», *Paesaggi archeologici e tecnologie digitali*, 1, Florencia.
- CANO, J. (2017): *Calibración de sensores multispectrales y su aplicación en UAVS. Caso de estudio: análisis de la cámara sequoia*, trabajo final de Máster, Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección, Universidad de Zaragoza.
- CANTÓ, A. M. (2001): «El viaje arquitectónico-anticuario de Fray José Ortiz y Sanz: una carta arqueológica de España a fines del siglo XVIII», *SPAL*, 10, Sevilla, pp. 29-55.
- CARTAILHAC, E. (1902): «La grotte d'Altamira, Espagne. Mea culpa d'un sceptique», *L'Anthropologie*, 13, Paris, pp. 348-354.
- CASSEN, S., et al. (2014): «Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: lasergrammetric and photographic recording in Gavrinis passage tomb (Brittany, France)», *Journal of Archaeological Science*, 45, Elsevier, Ámsterdam, pp. 126-140.
- CHUVIECO, E. (2010): *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*, Ariel Ciencias, Barcelona.

- CLOGG, P. / DÍAZ-ANDREU, M. / LARKMAN, B. (2000): «Digital image processing and the recording of rock art», *Journal of Archaeological Science*, 27, Elsevier, Ámsterdam, pp. 837-843.
- COLLADO, H. (coord.) (2018): *HANDPAS. Manos del pasado. Catálogo de representaciones de manos en el arte rupestre paleolítico de la península ibérica*, Mérida.
- COOPER, E. S. (2000): «Technological advances in rock art recording», *ESRARA Newsletter*, 5(4), pp. 15.
- CORNELIS, B., et al. (2009): «Crack detection and in painting for virtual restoration of paintings. The case of the Ghent Altarpiece», *Signal Processing*, 93, Elsevier, Ámsterdam, pp. 605-619.
- CRAWFORD, O.G.S. (1924): *Air Survey and Archaeology*, Southampton, Printed for H.M. Stationery Office at the Ordnance Survey.
- D'ANNA, C.M., et al. (2015): «Documentación geométrica del mausoleo romano de «La Sinagoga» (Sádaba, Zaragoza)», *Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)*, LDGP_mem_038-1 (publicación digital).
- DAVID, B. / BRAYER, J. / MCNIVEN, I. / WATCHMAN, A. (2001): «Why digital enhancement of rock paintings works rescaling and saturating colours», *Antiquity*, 75, Departamento de Arqueología Universidad de Durham, Durham, pp. 781-792.
- D'ERRICO, F. (1996): «Image analysis and 3-D optical surface profiling of Upper Palaeolithic mobiliary art», *Microscopy and Analysis*, Wiley John & Sons, Hoboken, pp. 27-29.
- DE LUSENET, Y. (2003): «Microfilm and Digitization as Choices in Preservation», *Liber Quarterly*, 13, Munich, pp. 112-118.
- DE FRANCESCO, G. (2009): «Websites and intellectual property rights», en POGGIANI-KELLER, R. / DIMITRIADIS, G. / COIMBRA, F. / LIBORIO, C. / RUGGIERO, M.G. (eds.): *Rock Art Data Base: New methods and guidelines in archiving and cataloguing*, BAR International Series 1996, Oxford, pp. 69-76.
- DEFRASNE, C. (2014): «Digital image enhancement for recording rupes-trian engravings: applications to an alpine rock shelter», *Journal of Archaeological Science*, 50, Elsevier, Ámsterdam, pp. 31-38.
- DELL'UNTO, N. (2014): «The use of 3D models for intra-site investigation in archaeology», en REMONDINO, F. / CAMPANA, S. (eds.): *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR International Series 2598, Oxford, pp. 151-158.
- DELL'UNTO, N. / LEANDER, A.M. / DELLEPIANE, M. / CALLIERI, M. / FERDANI, D. / LINDGREN, S. (2013): «Digital reconstruction and visualization in archaeology Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project», *Digital Heritage International Congress (Digital Heritage)*, 1, Marsella, pp. 621-628.
- DEMETRESCU, E. / FONTANA, S. (2009): «Archeo-restituzioni territoriali e urbane. Valutazione del rischio archeologico e software open source», *Archeologia e Calcolatori*, suplemento 2, Monterotondo, pp. 95-106.
- DERENY, E. E. (1993): «Low cost soft copy mapping», *SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision*, SPIE 1944, Orlando, Florida, pp. 233-230.
- DÍAZ-ANDREU, M. (2012): «A hundred years of post-Palaeolithic rock art in Spain», *The Levantine Question, Archaeolingua*, Budapest, pp. 23-53.
- (2014): «La documentación de grabados rupestres en 3D. La experiencia británica», *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla, Murcia, pp. 13-20.
 - (2015): «El pintor y dibujante Antonio Bregante Ribas y la documentación en arte rupestre levantino», en PÉREZ APARICIO, J. (ed.): *1915-2015. 100 anys. Real Academia Valenciana*, Sección de Estudios Arqueológicos V, Serie Arqueológica, Varia XII, Diputación de Valencia, Valencia, pp. 235-276.
- DODD, J. (2013): *Petroglyphs as paintings. The application of digital image enhancement to the study of Årsand 1, Hordaland, Western Norway*, Adoranten, Bradshaw Foundation, pp. 116-124.
- DOMINGO, I. / BEA, M. (2016): «From Science to Heritage: new challenges for World Heritage rock art sites in Mediterranean Spain in the Twenty-First century», en BRADY, L.M. / TAÇON, P.S.C. (eds.): *Relating to Rock Art in the Contemporary World: navigating symbolism, meaning and significance*, University Press of Colorado, Boulder, Colorado, pp. 213-244.
- DOMINGO, I. / VILLAVARDE, V. / LÓPEZ-MONTALVO, E. / LERMA, J.L. / CABRELLES, 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*, 4, Elsevier, Ámsterdam, pp. 1879-1889.
- DONEUS, M. / VERHOEVEN, G. / ATZBERGER, C. / WESS, M. / RUIS, M. (2014): «New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels», *Journal of Archaeological Science*, 52, Elsevier, Ámsterdam, pp. 84-96.
- DOWNEY, R. R. (1980): *A History of Archaeological Air Photography in Great Britain*, Londres.
- DUMAZET, S. / CALLET, P. / GENTY, A. (2008): «Spectral Modeling and Virtual Restoration on a Polychrome Medieval Sculpture», *The 16-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, University of West Bohemia, Pilsen, pp. 207-214.
- EASTMAN, C. / TEICHOLZ, P. / SACKS, R. / LISTON, K. (2011): *BIM Handbook. Aguide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, Wiley John & Sons, Hoboken.
- EISENBEISS, H. (2009): *UAV Photogrammetry*, Tesis doctoral, University of Technology Dresden, Dresden.
- EISENBEISS, H. / ZANG, L. (2006): «Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application», *ISPRS International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 36 (5), Elsevier, Ámsterdam, pp. 90-96.
- EZQUIERRA, B. (2008): «El acueducto romano de Albarracín-Gea-Cella», *Comarca de La Sierra de Albarracín*, Albarracín, pp. 175-180.
- FARJAS, M. (2003): «Las Ciencias cartográficas en la arqueología: La búsqueda de la métrica en los modelos de divulgación científica», *DATUM XXI*, 3, Asociación de Ingenieros de Geodesia y Cartografía, Madrid, pp. 4-12.
- (2012): *La topografía y sus métodos: Principios de investigación*, Astrolabio, Bilbao.
- FARJAS, M. / BELLIDO, D. / GONZÁLEZ, L. (2015): *Tecnología UAV en yacimientos arqueológicos. Análisis de precisión de los modelos digitales de superficie y de los productos fotogramétricos derivados*, Publicia, Madrid.
- FARJAS, M. / GARCÍA-LÁZARO, F.J. (2008): *Modelización Tridimensional y Sistemas Láser Escáner aplicados al Patrimonio Histórico*, La Ergástula, Madrid.
- FARJAS, M. / GARCÍA-LÁZARO, F.J. / ZANCAJO, J. / MOSTAZA, T. (2009): «Automatic Point-cloud Surveys in Prehistoric Site Documentation and Modelling», *Computer Applications to Archaeology*, Williamsburg, pp. 22-26.
- FATÁS, L. / GRAELLS, R. / LORRIO, A. / ROMEO, F. (2014): «Dos nuevos cascos hispano-calcídicos en contexto urbano: los oppida celtibéricos de Aratis (Aranda de Moncayo, Zaragoza) y Contrebia Carbica (Villas Viejas, Cuenca)», *Boletín del Seminario de estudio de Arte y Arqueología*, LXXX, pp. 13-51.
- FATUZZO, G. / MUSSUMECI, G. / OLIVERI, S.M. / SEQUENZIA, G. (2011): «The «Guerriero di Castiglione»: reconstructing missing elements with integrated non-destructive 3D modelling techniques», *Journal of Archaeological Science*, 38, Elsevier, Ámsterdam, pp. 3533-3540.

- FLYSCHOOL (2014): *Manual del alumno de RPAS de FLYschool*.
- FORTE, E.N. / WENTLAND, M.H.K. / DUVAL, E. (1997): «The ARIADNE Project Part 1: Knowledge pools for computer-based and telematics-supported classical, open and distance education», *European Journal of Engineering education*, 22 (1), pp. 61-74.
- FORTE, M. (2014): «Virtual reality, cyberarcheology, teleimmersive archaeology», en REMONDINO, F. / CAMPANA, S. (eds.): *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR International Series 2598, Archaeopress, Oxford, pp. 113-127.
- FOUCHER, P. / SAN JUAN-FOUCHER, C. / RUMEAU, Y. (2007): *La grotte de Gargas. Un siècle de recherches*, Communauté de communes du canton de Saint-Laurent-de-Neste.
- FRITZ, C. / TOSELLO, G. (2007): «The hidden meanings of forms: method of recording palaeolithic parietal art», *Journal of Archaeological Method and Theory*, 14 (1), Springer, Luxemburgo, pp. 48-80.
- GABELLONE, F. (2009): «Ancient contexts and virtual reality: From reconstructive study to the construction of knowledge models», *Journal of Cultural Heritage*, 10, Elsevier, Ámsterdam, pp. 112-117.
- GARCÍA, N.E. / CABALLERO, S.D. (2011): «Metadatos: necesidad e importancia de integrar estándares», en BARBER, E. (ed.): *II Encuentro Nacional de Catalogadores. La cooperación y las normas para la organización y tratamiento de la información en las bibliotecas argentinas*, Buenos Aires, Biblioteca Nacional, pp. 113-124.
- GARCÍA-GÓMEZ, I. / FERNÁNDEZ DE GOROSTIZA, M. / MESANZA, A. (2011): «Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios», *Arqueología de la arquitectura*, 8, CSIC / UPV-EHU, pp. 25-44.
- GARCÍA-GUINEA, J. / ALMENDROS, G. / BENAVENTE, D. / CORRECHER, V. / PÉREZ-GARCÍA, A. / RECIO-VÁZQUEZ, L. / SÁNCHEZ MORAL, S. (2012): «Materiales de construcción incompatibles dentro de las esculturas estereotómicas de Ávalos en el Valle de Caídos (Madrid, España)», *Materiales de Construcción*, 63, pp. 117-129. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.07011>
- GARCÍA-GUINEA, J. / RECIO-VÁZQUEZ, L. / ALMENDROS, G. / BENAVENTE, D. / CORRECHER, V. / PÉREZ-GARCÍA, A. / SÁNCHEZ-MORAL, S. / FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2012): «Petrophysical properties, composition and deterioration of the Calatorao biogenic stone: case of the sculptures masonry of the Valley of the Fallen (Madrid, Spain)», *Environmental Earth Sciences*, 69, pp. 1733-1750. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2007-2>
- GÓMEZ-FRAILE, J.M. (2005): «Sobre la antigua Cartografía y sus métodos. Los fundamentos numéricos de la Hispania de Claudio Ptolomeo», *Iberia. Revista de la Antigüedad*, 8, Universidad de La Rioja, Logroño, pp. 35-64.
- GONZÁLEZ-REYERO, S. (2007): *La fotografía en la arqueología española 1860-1960: 100 años de discurso arqueológico a través de la imagen*, Madrid.
- GRAHAM, B. / HOWARD, P. (eds.) (2008): *The Ashgate Research Companion to Heritage and Identity*, Ashgate Publishing Limited, Hampshire, England & Burlington, USA.
- GUARNIERI, A. / PIROTTI, F. / VETTORE, A. (2010): «Cultural heritage interactive 3D models on the web. An approach using open source and free software», *Journal of Cultural Heritage*, 11, Elsevier, Ámsterdam, pp. 350-353.
- GUIDI, G. (2014): *3D Digitisation of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage. Final Report on Data Acquisition*, 3D-ICONS project funded under the European Commission's ICT Policy Support Programme, project no. 297194. <http://www.3dicons-project.eu/>
- GUIDI, G., et al. (2015): «Massive 3D Digitization of Museum Contents», en TONIOLO, L. / BORIANI, M. / GUIDI, G. (eds.): *Built Heritage: Monitoring Conservation Management*, pp. 335-446.
- GUTIÉRREZ, S. (2001): *Arqueología. Introducción a la historia material de las sociedades del pasado*, Universidad de Alicante, Alicante.
- GUTIÉRREZ, F.J. / ANGÁS, J. (2009): «Documentación geométrica de la muralla romana en el nº 2-4 de la calle Mártires de Zaragoza mediante escaneado láser 3D», *Kausis*, 6, Escuela Taller de Restauración de Pintura Mural de Aragón II, Gobierno de Aragón, Zaragoza, pp. 95-102.
- HALL, C.M. / PIGGIN, R. (2002): «Tourism business knowledge of World Heritage: a New Zealand case study», *International Journal of Tourism Research*, 4, Wiley John & Sons online library, Hoboken, pp.401-411.
- HARMAN, J. (2005): «Using decorrelation Stretch to enhance rock art images», *American Rock Art Research Association Annual Meeting*, Reno. <http://www.dstretch.com/Presentations.html>
- HERNÁNDEZ-PACHECO, E. (1924): *Las pinturas prehistóricas de la cueva de La Araña Valencia*, Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid.
- HERNANDO, A. (1996): *La imagen de un país. Juan Bautista Labaña y su mapa de Aragón (1610-1620)*, Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- HIERNARD, J. (1997): «Bituriges du Bordelais et Bituriges du Berry : l'apport de la numismatique», *Revue Archéologique de Bordeaux*, 87, Bordeaux, pp. 61-65.
- HILL, A.C. (2013): «UAVs at MarjRabba, Israel: low-cost high-tech tools for aerial photography and photogrammetry», *The SAA archaeological Record*, Society for American Archaeological Record, 13 (1), Washington, pp. 25-29.
- HOFFMAN, D. / PIKE, A.W.G. / GARCÍA-DÍEZ, M. / PETTIT, P.B. / ZILHAO, J. (2016): «Methods for U-series dating of CaCO₃ crusts associated with Palaeolithic cave art application to Iberian sites», *Quaternary Geochronology*, 36, pp. 104-119.
- HOFFMANN, D. / UTRILLA, P. / ALISTAIR, P. / BEA, M. / BALDELLOU, V. / GARCÍA-DÍEZ, M. / ZILHÃO, J. (2014): «Chronology of Palaeolithic rock art at Fuente del Trucho: Style, U-series dates and comparison with Cantabrian sites», *Conference paper at the XVII UISPP Congress, Session. The chronology of Palaeolithic cave art: new data, new debates*, 1-7 de septiembre de 2014, Burgos.
- HOFFMANN, D. / UTRILLA, P. / BEA, M. / PIKE, A. / GARCÍA-DÍEZ, M. / ZILHAO, J. / DOMINGO, R. (2017): «U-series dating of Palaeolithic rock art at Fuente del Trucho (Aragón, Spain)». *Quaternary International*, 432 (part B), pp. 50-58
- HUETE, A.R. (1988): «A soil-adjusted vegetation index (SAVI)», *Remote Sensing Environment*, 25, Elsevier, Ámsterdam, pp. 295-309.
- IAKOVLEVA, L. / PINÇON, G. (1999): «L'art pariétal sculpté dans l'habitat du Roc-aux-Sorciers à Angles-sur-l'Anglin (Vienne, France)», *L'Anthropologie*, 103, 4, París, pp. 549-568.
- INSTITUTO ANDALUZ DEL PATRIMONIO HISTÓRICO (IAPH) (2011): *Recomendaciones técnicas para la documentación geométrica de entidades patrimoniales*, versión 1.0 de 23 de noviembre de 2011, Junta de Andalucía, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla. <http://www.iaph.es/>
- ISLER, V. / WILSON, B. / BAJCSY, R. (2006): «Building a 3D virtual museum of Native American baskets», *3D data Processing, Visualization and Transmission*, IEEE Computer Society, Washington, pp. 954-961.
- JARDÍ, X. / ANGÁS, J. (2010): «Democratization of 3D Applications in Nuclear Power Plants, Laser scanning 3D technology implementation in Spanish PWRs», *18th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE 18*, 17-21 mayo, Xi'an (China), pp. 235-241.
- JENSEN, J. (1996): *Introductory digital Image processing*, Universidad de California, California.
- JIMÉNEZ, A. (1975): «De Vitruvio a Vignola: autoridad de la tradición», *Habis*, 6, Editorial Universidad de Sevilla, Universidad de Sevilla, Sevilla, pp. 253-293.

- (1980): «Análisis de una propuesta de integración de formas arquitectónicas», *BSAAV (Boletín del Seminario de Arte y Arqueología de Valladolid)*, XLVI, Valladolid, pp. 165-170.
 - (1982): «Relaciones métricas en arquitectura. Análisis de tres propuestas», *Homenaje a Sáenz de Buruaga*, Institución Cultural Pedro de Valencia, Madrid, pp. 427-438.
- JUSTE, M.N. (1991-1995): *Informes de la excavación presentados a la DGA entre los años 1991-1995*.
- (1994): «Excavaciones en el solar del Círculo Católico (Huesca): un fragmento de la ciudad Sertoriana», *Bolskan*, 11, Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, pp. 133-171.
 - (2000): «Bolskan-Osca, ciudad iberorromana», *Empúries*, 52, Barcelona, pp. 87-106.
- JUSTE, M.N. et al. (eds.) (2012): *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, Patrimonio Mundial*, Comarca de Somontano de Barbastro, Barbastro.
- KOUTSOUDIS, A. / VIDMAR, B. / IOANNAKIS, G. / ARNAOUTOGLIOU, F. / PAVLIDIS, G. / CHAMZAS, C. (2014): «Multi-image 3D reconstruction data evaluation», *Journal of Cultural Heritage*, 15, Elsevier, Ámsterdam, pp. 73-79.
- LABAÑA, J.B. (1895): *Itinerario del Reino de Aragón*, Diputación Provincial de Zaragoza, Zaragoza.
- (2006): *Itinerario del Reino de Aragón*, edición facsímil, Prames / IFC, Zaragoza.
- LASAPONARA, R. / MASINI, N. (eds.) (2012): *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*, Springer, Luxemburgo.
- LERMA, J.L. / VILLAVERDE, V. / GARCÍA, A. / CARDONA, J. (2006): «Close range photogrammetry and enhanced recording of Palaeolithic rock art», *Commission V Symposium, IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (25-27 Septiembre, 2006, Dresden, Germany)*, XXXVI (part 5), pp. 147-154.
- LODEIRO, J.M. (1995): *Aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental*, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid / Castilla-La Mancha.
- LÓPEZ, V. / MARTÍNEZ, T. / SANTACANA, J. (2013): «Nuevos formatos para nuevos tiempos. Tecnologías móviles y didáctica del patrimonio», *Arqueología pública en España, JAS Arqueología*, Madrid, pp. 453-472.
- LÓPEZ-MENCHERO, V.M. (2013): «International Guidelines for Virtual Archaeology: The Seville Principles», en CORSI C. / SLAPŠAK B. / VERMEULEN F. (eds.): *Good Practice in Archaeological Diagnostics, Natural Science in Archaeology*, Springer, Cham, pp. 269-283. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_16
- LÓPEZ-MORENO, J.I., et alli. (2016): «Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981». *CRYOSPHERE*, 10-2, pp. 681-694. <https://doi.org/10.5194/tc-10-681-2016>
- LORBLANCHET, M. (1993): «Finalités du relevé. In L'Art Pariétal Paléolithique. Techniques et Méthodes d'étude», *Comité des Travaux Historiques et Scientifiques*, París, pp. 329-338.
- (1995): *Les grottes ornées de la Préhistoire. Nouveaux Regards*, París.
- LORRIO, A.J. / SÁNCHEZ, M^aD. (2009): «La necrópolis celtibérica de Monreal de Ariza, Zaragoza», *Caesaraugusta*, 80, Zaragoza.
- LUCIANI, E. (1978): *History of Land Surveyors, and Surveyors from the origins Up to 1900*, Roma.
- MAAR, H. / ZOGG, H.M. (2014): *Optimized Measuring Meets Individual Demands – the WFD Technology*, Leica Geosystems, Heerbrugg.
- MAESTRO, E. (2005): «Acerca de una figurita cerámica procedente de Los Castellazos de Mediana de Aragón (Zaragoza)», *Salduie*, 5, Zaragoza, pp. 143-157.
- (2009): «El yacimiento oscense de la Vispesa: la cerámica de barniz negro helenístico», *Empúries*, 55, Barcelona, pp. 125-139.
- MAGALÓN, M.A. / SILLIERES, P. (2013): *Labitosa (La Puebla de Castro, province de Huesca, Espagne). Une cité romaine de l'Hispanie Citérieure*, Mémoires, 33, Ausonius Éditions, Bordeaux.
- MANTOVANI, F. / MARCOLONGO, B. (1992): *Fotogeologia. Il Telerilevamento nelle Scienze della Terra*, Roma.
- MAÑANA-BORRAZAS, P. / RODRÍGUEZ, A. / BLANCO-ROTEA, R. (2008): «Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)», *Arqueología de la Arquitectura*, 5, CSIC / UPV-EHU, pp. 15-32.
- MARTÍN, J. (2002): *Historia de la Cartografía y de la Topografía*, Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid.
- MARTÍN, P. / LLAMASA, J. / GÓMEZ, J. / ZALAMA, E. / CASTILLO, J. (2014): «Using 3D digital models for the virtual restoration of polychrome in interesting cultural sites», *Journal of Cultural Heritage*, 15, Elsevier, Ámsterdam, pp. 196-198.
- MARTÍN-BUENO, M. (1975): «El abastecimiento y distribución de aguas al Municipium Augusta Bilbilis», *H.A.V*, Valladolid, pp. 205-222.
- MARTÍN-BUENO, M. / SÁENZ, J.C. (2001-2002): «La ínsula I de Bilbilis», *Salduie*, 2, Zaragoza, pp. 127-158.
- (2016): *La ciudad celtibero-romana de Valdeherrera (Calatayud)*, *Monografías Arqueológicas*, 50, Zaragoza.
 - (eds.) (2017): *Manual de Topografía aplicada a la arqueología*, Zaragoza.
- MARTÍN-BUENO, M. / SÁENZ, C. / ÍÑIGUEZ, L. (2012): «Novedades pictóricas del Municipium Augusta Bilbilis. El edificio C.IV», *Espacio, Tiempo y Forma, Serie I, Prehistoria y Arqueología*, UNED, Madrid, pp. 1-4.
- MARTÍN-BUENO, M. / SÁENZ, C. / KRAUSZ, S. / MATHÉ, V. (2009): «La ciudad celtibérica de Valdeherrera Calatayud, Zaragoza: Prospecciones geofísicas», *Salduie*, 9, Zaragoza, pp. 419-439.
- MARTÍNEZ BEA, M. (2005): «Breve aproximación historiográfica a los estudios pioneros sobre arte rupestre en el Bajo Aragón y Maestrazgo turolense», *Salduie*, 5, Zaragoza, pp. 57-63.
- MARTÍNEZ-BEA, M. / ANGÁS, J. / SEBASTIÁN, M. (2009): «Metodología», en MARTÍNEZ BEA, M.: *Las pinturas rupestres del abrigo de La Vacada (Castellote, Teruel)*, *Monografías Arqueológicas*, 43, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 33-39.
- MARTÍNEZ, A. (1992): *Topografía Espeleológica*, Federación Española de Espeleología, Madrid.
- MARTÍNEZ, A. / RUIZ, A. (2013): «La digitalización del material arqueológico y su difusión en internet», *Arqueología pública en España, JAS Arqueología*, Madrid, pp. 439-452.
- MARTÍNEZ, S. (2014): *Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes* (tesis doctoral), Escola Politècnica Superior / Universidad de Santiago de Compostela, Lugo.
- MARTÍNEZ-GRAÑA, A.M. / GOY, J.L. / CIMARRA, C.A. (2013): «A virtual tour of geological heritage: Valourising geodiversity using Google Earth and QR code», *Computers & Geosciences*, 61, Elsevier, Ámsterdam, pp. 83-93.
- MASCIONE, C. (2006): *Il rilievo strumentale in archeologia*, Roma.
- MERLO, S. (2016): *Making Visible: Three-dimensional GIS in Archaeological Excavation*, BAR International Series, 2801, Archaeopress, Oxford.
- MEZQUÍRIZ, M.A. (1979): «El acueducto de Alcanadre-Lodosa», *Trabajos de Arqueología Navarra*, 1, Institución Príncipe de Viana, Pamplona, pp. 139-147.
- MEZQUÍRIZ, M.A. / UNZU, M. (1988): «De hidráulica romana: el abastecimiento de agua a la ciudad romana de Andelos», *Trabajos de Arqueología Navarra*, 7, Institución Príncipe de Viana, Pamplona, pp. 237-266.

- MILS, J. / ANDREWS, D. (2011): *3D Laser Scanning for Heritage. Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*, English Heritage, Swindon.
- MINTO, A. (1921): *Marsiliana d'Albegna. Le scoperte archeologiche del Principe Don Tommaso Corsini*, Florencia.
- MIRANDA, A.A. / VON ALTROCK, P. (2005): «The Close Range Photogrammetry in the Documentation of the Rocks Art. Study of Case Archaeological Site Santinho Norte I – SC/Brazil», *CIPA 2005 XX International Symposium*, Torino, Italia.
- MONTERO RUIZ, I. / RODRÍGUEZ ALCAIDE, A.L. / VICENT GARCÍA, J.M. / CRUZ BERROCAL, M. (2000): «Técnicas analíticas basadas en el proceso de imágenes digitales multiespectrales», *Arkeos*, 7, pp. 13-34.
- MONTERROSO, A. (2011): ««Aqvvedctivm» Una lectura tridimensional en la Forma Urbis Marmorea», *Arqueología de la Arquitectura*, 8, CSIC UPV/EHU, España, pp. 65-84.
- MONTES, L. / UTRILLA, P. / MARTÍNEZ-BEA, M. (2006): «Trabajos recientes en yacimientos musterienses de Aragón. Una revisión de la transición Paleolítico Medio/Superior en el Valle del Ebro», en MAILLO, J.M. / BAQUEDANO, E. (eds.): *Miscelánea en homenaje a Victoria Cabrera. Zona Arqueológica*, 7 (1), Madrid, pp. 214-233.
- MONZÓN, J. (2015): «Un proyecto de realidad aumentada para la difusión de la capilla del monumento de La Seo de Zaragoza: aplicación de técnicas de documentación gráfica y geométrica basadas en la ingeniería inversa», *ARS & RENOVATIO*, 3, Centro de Estudios de Arte del Renacimiento (Instituto de Estudios Turolenses), Teruel, pp. 166-191.
- MORATA, B. (2010): *Fotografía documental de Cabré en las excavaciones de Cerralbo*. Fundación Museo de Cerralbo, Madrid.
- MORENO, A. (2014): «Infoaccesibilidad y realidad aumentada en el Museo Thyssen-Bornemisza», en DOMÍNGUEZ, A. / GARCÍA, J. / LAVADO, P. (eds.): *Educación y Accesibilidad en Museos y Patrimonio*, Universidad de Zaragoza, Huesca, pp. 825-830.
- MUDGE, M. / MALZBENDER, T. / SCHROER, C. / MARLIN, L. (2006): «New reflection transformation imaging methods for rock art and multiple-viewpoint display», en IOANNIDES, M. / ARNOLD, D. / NICCOLUCCI, F. / MANIA, K. (eds.): *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, 2006, Nicosia, Cyprus.
- MUSSON, C. / PALMER, R. / CAMPANA, S. (2005): *In volo nel passato. Aero-fotografia e cartografia archeologica*, Florencia.
- (2013): *Flights into the past. Aerial photography, photo interpretation and mapping for archaeology*, Aerial Archaeology Research Group and Archaeo-LandscapesEurope (ArcLand).
- NAGY, P. / UNOLD, W. / VOGT, S. (2001): «Flug in die Vergangenheit. Die Luftbildpropektion im Dienste der Archäologie», en *Helvetia Archaeologica*, Zürich, pp. 125-126.
- NAVARRO, M., et alli. (2014): «La presa romana de Muel (Zaragoza, España): ¿una obra militar?», en CADIOU, F. / NAVARRO, M. (eds.): *La Guerre et ses traces. Conflits et sociétés en Hispanie à l'époque de la conquête romaine (IIIe-Ier s. a.C.)*, Ausonius Mémoires, 37, Burdeos, pp. 573-598.
- NAVARRO, M. / MAGALLON, M^aA. (1999): «Las ciudades del prepirineo occidental y central en época alto-imperial: sus habitantes y su status», Simposio Internacional de Epigrafía E.I.E.G.L. Ciudades privilegiadas en el Occidente Romano, Sevilla, pp. 30-56.
- NIR, Y. (1985): *The Bible and the Image, History of photography in the Holy Land 1839-1899*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press.
- NÚÑEZ, A. / BUILL, F. / REGOT, J. / DE MESA, A. (2012): «Generation of virtual models of cultural heritage», *Journal of Cultural Heritage*, 13, Elsevier, Ámsterdam, pp. 103-106.
- OBERMAIER, H. (1925): *El Hombre Fósil*, Ediciones Istmo, edición facsimilar de 1985, Madrid.
- OKA, Y. / PERRY, J. (2002): «The use of digital imaging in the mass repair of Japanese historical documents and sutras: an alternative to direct leaf casting», *Works of art on paperbooks, documents and photographs: techniques and conservation*, Archetype Publications, Londres, pp. 149-153.
- OPITZ, R. / NOWLIN, J. (2012): «Photogrammetric modeling + GIS. Better methods for working mesh data», *ESRI.com*, Spring 2012, Redlands (California), pp. 46-49.
- ORTEGA, J. (2011): «El dibujo del patrimonio y su vida gráfica», *Documentación gráfica del Patrimonio*, Publicación digital: Ministerio de Cultura, Madrid, pp. 46-63.
- ORTIZ Y SANZ, J. (1787): *Los diez libros de Arquitectura de M. Vitruvio Polión*, Madrid (reeds. del C.O. de Aparejadores de Almería, 1974; Madrid, 1987; Lugo, 1989; del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid con introducción y edición de D. Rodríguez Ruíz, Madrid, 1991; y de Akal, 2007).
- (1797): *Noticia y plan de un viaje arquitectónico-anticuario encargado por Su Majestad a Don José Ortiz Sanz, el año de 1790*, Madrid (reed. en microforma, Universidad de Valencia, 1995, Valencia).
- OTERO, X. / FARJAS, M. / SANTOS, M. / ANGÁS, J. (2017): «Diferentes paisajes y análogas representaciones. Interpretación arqueológica con tecnologías de ingeniería inversa», *Primer Congreso en Ingeniería Geomática (CIGeo)*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, pp. 8-14.
- PALACIOS, H. / MARTÍN-BUENO, M. (2004): «La teledetección en arqueología: el instrumento SAR», *Salduie*, 4, Zaragoza, pp. 331-361.
- PALACIOS, H. / MARTÍN-BUENO, M. / URIBE, P. (2017): «Tecnología y arqueología», en MARTÍN-BUENO, M. / SAÉNZ, C. (eds.): *Manual de Topografía aplicada a la arqueología*, Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 127-164.
- PEI, S.C. / ZENG, Y.C. / CHANG, C.H. (2004): «Virtual restoration of ancient Chinese paintings using color contrast enhancement and Lacuna Texture Synthesis», *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (3), pp. 416-429.
- PEREIRA, J.M. (2013): *Gestión del color en proyectos de digitalización*, Barcelona.
- PERÉX AGORRETA, M.J., et al. (2012): *Métodos y técnicas de investigación Histórica I*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- PÉREZ, M. (2007-2008): «El culto en la casa romana», *AnMurcia*, 23, Universidad de Murcia, Murcia, pp. 195-225.
- (2008): «Un caso singular de estatua romana de culto doméstico», *AEspA*, 81, Madrid, pp. 273-287.
 - (2010): «Aproximación al culto doméstico en la Hispania romana. Algunas consideraciones», *Bollettino di Archeologia on line*, Roma, pp. 1-8. www.archeologia.beniculturali.it/pages/publicazioni.html
 - (2012): «El valor del culto en el paisaje doméstico. El caso hispano», *Actas de los Encuentros de Jóvenes Investigadores de Historia Antigua (2010-2011)*, Madrid, pp. 227-239.
- PICAZO, J.V. / RODANÉS, J.M. (2009): *Los poblados del Bronce Final y Primera Edad del Hierro. Cabezo de la Cruz, La Muela, Zaragoza*, Gobierno de Aragón, Zaragoza.
- PLETINCKX, D. / HASKIYA, D. (2011): *Connecting ARchaeology and ARchitecture in Europeana CARARE: Functional specification of requirements for preparing 3D/VR for Europeana*. <http://www.carare.eu/eng/Media/Files/D5.1-Req-Spec-for-preparing-3D-VR-for-Europeana>.
- RAMOS, F. (2013): «Interpretación del arte rupestre a través de dispositivos móviles», *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla, Murcia, pp. 162-163.
- REAL, L.F. (2013): «Introducción a los UAV y una visita al Salón de Seguridad y Defensa HOMSEC2013», *Antena de Telecomunicación*, pp. 14-21.

- REILLY, P. (1991): «Towards a virtual archaeology», *CAA 1990*, BAR International Series, vol. 565, Oxford, pp. 133-139.
- REJAS, J.G., *et al.* (2013): «Anomaly detection using remote sensing for the Archaeological Heritage registration», *Digital Heritage Congress*, Marsella, pp. 193-196.
- REMONDINO, F. / CAMPANA, S. (eds.) (2014): *Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR International Series, vol. 2598, Oxford.
- RHIND, D. W. (1988): «A GIS research agenda», *International Journal of Geographic Information Systems* 2, pp. 23-28.
- RICHARDSON, L. (2014): «The Day of Archaeology: blogging and online archaeological communities», *PCA European Journal of Post-Classical Archaeologies*, 4, Padova, pp. 421-446.
- RIPOLL, S. / BALDELLOU, V. / MUÑOZ, F.J. / AYUSO, P. (2001): «La Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca)», *Bolskan*, 18, Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, pp. 211-224.
- (2005): «La Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca, Espagne)», *INORA International Newsletter On Rock Art*, 42, Bradshaw Foundation, pp. 8-11.
- ROBIN, G. (2014): «Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: lasergrammetric and photographic recording in Gavrinis passage tomb (Brittany, France)», *Journal of Archaeological Science*, 45, Elsevier, Ámsterdam, pp. 126-140.
- RODÁ, I., *et al.* (1992): *Ciencias, metodologías y técnicas aplicadas a la arqueología*, Barcelona.
- RODRÍGUEZ, A. / VALLE, J.M. / LOPETEGUI, A. (2007): «Time transcendence, metadata and future utilization in 3D models of point clouds for Heritage elements», *Virtual Retrospect*, Ausonius Éditions, Bordeaux, pp. 115-123.
- RODRÍGUEZ, I. / MATAS, F.J. (2013): «Arqueólogos contra piteros, piteros contra arqueólogos», en ALMANSA, J. (ed.): *Arqueología pública en España*, Madrid, pp. 187-217.
- RODRÍGUEZ-ALMEIDA, E. (1977): «Forma Urbis marmorea: Nuovi elementi di analisi e nuove ipotesi di lavoro», *MEFRA Mélanges de l'Ecole Française de Rome Antiquité*, 89.1, pp. 219-256.
- ROECKER, I. (2008): «Democratizing the Process of Heritage Conservation, Research and Practice. An Internet-based Knowledge Assembly and Visualization Tool», en AL-QAWASMI, J. / CHIUNINI, M. / EL-HAKAIM, S. (eds.): *Digital Media and its Applications in Cultural Heritage*, pp. 341-355.
- ROGERIO, M.A. (2008): «Análisis de imagen de paneles rupestres: mucho más que la elaboración de calcos digitales», *Sautuola*, XIV, Instituto de Prehistoria y Arqueología Sautuola, pp. 423-436.
- ROMEO, F. / ROYO, J.I. / GONZALVO, I. / FATÁS, L. / ANGÁS, J. (2017): «Un nuevo sistema para la valoración económica de los daños en yacimientos arqueológicos expoliados», *Patrimonio Cultural y Derecho* 21, pp. 231-268.
- ROYO, J.I., *et al.* (2009): «Excavar, proteger y musealizar: el caso de la arqueología urbana en los albores del tercer milenio», en DOMÍNGUEZ, A. (ed.): *El patrimonio arqueológico a debate: su valor cultural y económico*, Huesca, pp. 125-172.
- RUBIO, D. / MARTÍNEZ, J. / BAENA, J. / FERNÁNDEZ, J.J. / FINAT, J. (2009): «Nuevos métodos para viejas tecnologías: análisis y documentación de los materiales arqueológicos mediante la aplicación de sistemas Láser-scanner 3D», *Virtual Archaeology Review*, Valencia, pp. 345-349.
- SÁENZ, C. / MARTÍN-BUENO, M. (2012): «La ciudad celtibérica de Valdeherrera (Calatayud, España)», *Aquitania*, 28, Bordeaux, pp. 7-32.
- SALERNO, V. (2013): «Arqueología pública: reflexiones sobre la construcción de un objeto de estudio», *Revista Chilena de Antropología*, 27, Santiago de Chile, pp. 7-37.
- SALVADOR, R. / BAUTISTA-CAPETILLO, C. / BURGUETE J. / ZAPATA, N. / SERRETA, A. / PLAYÁN, E. (2009): «A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers», *Irrigation Science*, 27, Springer, Luxemburgo, pp. 307-317.
- SÁNCHEZ, A. (2014): «El proyecto 3D-ICONS. El patrimonio de los iberos en la Biblioteca Digital Europea», *Revista PHI Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 86, Sevilla, pp. 124-141.
- SÁNCHEZ, A. / NOGUERAS, J. / BALLARI, D. (2008): «Normas sobre metadatos (ISO19115, ISO19115-2, ISO19139, ISO 15836)», *Mapping*, vol. 123, España, pp. 48-57.
- SANCHIRICO, C. (2007): *Elementi di topografia archeologica*, Università degli Studi di Siena, Siena.
- SANTACANA, J. (2012): «Arqueología, museología y comunicación», en FERRER, C. / VIVES-FERRÁNDIZ, J. (eds.): *Construcciones y usos del Pasado. Patrimonio arqueológico, territorio y museo*, Museu de Prehistòria de València, Valencia, pp. 137-151.
- SANTOLARIA, J. / CONTE, J. / GINÉS, M. (2013): «Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, Springer, Luxemburgo, pp. 2087-2106.
- SCAMPOLI, E. (2010): *Firenze, archeologia di una città (secoli I a.C.-XIII d.C.)*, Strumenti per la Didattica e la Ricerca, 107, Florencia.
- SCIANNA, A. / GRISTINA, S. / PALIAGA, S. (2014): «Experimental BIM applications in Archaeology: a work-flow», en POGGIANI-KELLER, R. / DIMITRIADIS, G. / COIMBRA, F. / LIBORIO, C. / RUGGIERO, M.G. (eds.): *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage. Documentation, Preservation and Protection*, Springer, Luxemburgo, pp. 490-498.
- SCOPIGNO, R. (2006): «Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale», en CAMPANA, S. / FRANCOVICH, R. (eds.): *Laser scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e tecnologie digitali 1*, Florencia, pp. 41-68.
- SEGLIE, D. (2001): *Prehistoric Art. Guide to Good Practice. EuroPreArt Project*, Culture 2000 EU Programme, CeSMAP Editions, Pinerolo.
- (2009): «The EuroPreArt project – Past Signs and present memories european prehistoric Art: Inventory, Contextualisation, Preservation and Accesibility», en POGGIANI-KELLER, R. / DIMITRIADIS, G. / COIMBRA, F. / LIBORIO, C. / RUGGIERO, M.G. (eds.): *Rock Art Data Base: new methods and guidelines in archiving and cataloguing*, BAR International Series, 1996, Oxford, pp. 31-38.
- SERRA, J. (2008): *Los documentos electrónicos. Qué son y cómo se tratan*, Barcelona.
- SMITH, P. / VAN LAAN, T. (1987): «Codes, Standards, and Regulations», *Piping and pipe support systems. Design and engineering*, McGraw-Hill Book Company, pp. 17-39.
- SMITH, L. / WATERTON, E. (2009): *Heritage, communities and Archaeology*, London, Duckworth.
- SOLÍS, M. (2009): «Métodos digitales para la restauración-reconstrucción virtual aplicada al estudio del arte rupestre», *El arte rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica*, Generalitat Valenciana, Valencia, pp. 343-349.
- STOLZE, F. (1882): *Persepolis, die achaemenidischen und sasanidischen Denkmäler und Inschriften von Persepolis, Istakhr, Pasargadae, Sh hp r*, 2 vols., Berlín.
- TONIOLO, L. / BORIANI, M. / GUIDI, G. (eds.) (2015): *Built Heritage: Monitoring Conservation Management*, Springer, Luxemburgo.
- TORRES, J. / GÓMEZ, J.A. (2011): *El copyright en cuestión*, Universidad de Deusto, Bilbao.
- TORRES-SÁNCHEZ, J. / LÓPEZ-GRANADOS, F. / SERRANO, N. / ARQUEIRO, O. / PEÑA, J.M. (2015): «High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

- Technology», *PLoS ONE*, 10 (6), e0130479, San Francisco. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- TRAVIGLIA, A. (2006): «Archaeological usability of hyperspectral images: successes and failures of images processing techniques», *From Space to place. Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, Roma, pp. 123-130.
- UBIETO, A. (2007): *Propuesta metodológica y didáctica para el estudio del patrimonio*, Pressas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza.
- URIBE, P. (2004): «Arquitectura doméstica en Bilbilis, la *Domus I*», *Salduie*, 4, Zaragoza, pp. 191-220.
- (2008): *La edificación doméstica urbana romana en el Nordeste de la Península Ibérica ss. I a.C.-III d.C.*, Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
 - (2015): «La arquitectura doméstica romana urbana en el valle medio del Ebro (siglos II a.C.-III d.C.)», *Aquitania suppl.* 37, Bordeaux.
- URIBE, P. / ANGÁS, J. / PÉREZ-CABELLO, F. / DE LA RIVA, J. / BEA, M. / SERRETA, A. / MAGALLÓN, M.A. / SÁENZ C. / MARTÍN-BUENO, M. (2015): «Aerial mapping and multi-sensors approaches from remote sensing applied to the Roman Archaeological Heritage», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, vol. XL-5/W4, 25-27 Febrero 2015, Avila, pp. 461-467.
- URIBE, P. / ANGÁS, J. / PÉREZ-CABELLO, F. / VICENTE, J. / EZQUERRA, B. (2018): «The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery», *Drones* 2, no. 3: 29, Basel. <https://doi.org/10.3390/drones2030029>
- UTRILLA, P. / BALDELLOU, V. (2001-2002): «Cantos pintados neolíticos de la Cueva de Chaves (Bastarás, Huesca)», en *Salduie*, Zaragoza, pp. 45-126.
- UTRILLA, P. / BALDELLOU, V. / BEA, M. / MONTES, L. / VIÑAS, R. (2014): «La cueva de la Fuente del Trucho (Asque-Colungo, Huesca)», en SALA, R. (ed.): *Los cazadores recolectores del Pleistoceno y del Holoceno en Iberia y el Estrecho de Gibraltar. Estado actual del conocimiento del registro arqueológico*, Universidad de Burgos / Fundación Atapuerca, Burgos, pp. 171-178.
- UTRILLA, P. / BALDELLOU, V. / BEA, M. / VIÑAS, R. (2013): «La cueva de la Fuente del Trucho Asque-Colungo, Huesca: Una cueva mayor del arte gravetiense», en DE LAS HERAS, C. / LASHERAS, J.A. / ARRIZABALAGA, A. / DE LA RASILLA, M. (eds.): *Congreso Internacional. El Gravetiense Cantábrico, estado de la cuestión*, Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, Santander, pp. 526-537.
- UTRILLA, P. / BEA, M. / ANGÁS, J. (2015): «La cueva de la Fuente del Trucho Asque (Colungo, Huesca, Spain): un arte para ser visto», *XIX International IFRAO Rock Art Conference*, Cáceres, pp. 1359-1366.
- UTRILLA, P. / MAZO, C. / SOPENA, M.C. / MARTÍNEZ-BEA, M. / DOMINGO, R. (2009): «A paleolithic map from 13,660 calBP: engraved stone blocks from the Late Magdalenian in Abauntz Cave (Navarra, Spain)», *Journal of Human Evolution*, 57, Elsevier, Ámsterdam, pp. 99-111.
- UTRILLA, P. / MONTES, L. / DOMINGO, R. / BEA, M. / ANGÁS, J. (2016): «Fuente del Trucho: diez años de trabajos arqueológicos (2005-2015)», en LORENZO, J.I. / RODANÉS, J.M. (eds.): *Actas del I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés*, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y Ciencias de Aragón, Zaragoza, pp. 35-45.
- UTRILLA, P. / MONTES, L. / HOFFMANN, D. / BALDELLOU, V. / BEA, M. / DOMINGO, R. / PIKE, A. (2014): «La Fuente del Trucho. Ocupación, estilo y cronología», *Congreso Internacional Cien Años de Arte Rupestre Paleolítico*, 3-5 (julio), Oviedo.
- UTRILLA, P. / MONTES, L. / MAZO, C. / ALDAY, A. / RODANÉS, J.M. / BLASCO, M.F. / DOMINGO, R. / BEA, M. (2010): «El Paleolítico superior en la Cuenca del Ebro a principios del siglo XXI. Revisión y novedades», en MANGADO, X. (ed.): *El Paleolítico Superior peninsular. Noveidades del siglo XXI*, Universitat de Barcelona, Barcelona, pp. 23-61.
- UTRILLA, P. / MONTES, L. / MAZO, C. / RODANÉS, J.M. (1988): «Algunas figuras inéditas en abrigos rupestres del Bajo Aragón», en *Congreso Internacional de Arte Rupestre (Caspe, Zaragoza)*, Prehistoria VII-VIII, Bajo Aragón, pp. 211-221.
- URIBE, P. / FANLO, J. / MAGALLÓN, A. / BEA, M. / MARTÍNEZ, R. / REKLAITYTE, I. / LAMBÁM, F. (2010): «La presa romana de Muel: novedades de hidráulica romana en el Valle del Ebro», *Aquam perducendam curavit*, Cádiz, pp. 333-345.
- URIBE, P. / ÍÑIGUEZ, L. / PÉREZ-RUIZ, M. (2014): «Arquitectura y repertorios decorativos domésticos de la Osca romana», *Bolskan*, 25, Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, pp. 11-25.
- URIBE, P., et al. (2015): «Le barrage de Muel (Zaragoza, España): une étude interdisciplinaire», en BORAU, L. / BORLENGHI, A. (eds.): *Aquae Ductus. Actualité de la recherche en France et en Espagne. Actes du Colloque International de Toulouse*, Aquitania suppl. 33, Bordeaux, pp. 327-331.
- VALLE, J.M. (2006): «La medida y representación del patrimonio: alternativas y criterios de selección», *Berceo*, 151, Instituto de Estudios Riojanos, Logroño, pp. 63-85.
- (2011): *Documentación Geométrica del Patrimonio: propuesta conceptual y metodológica* (tesis doctoral), Universidad de La Rioja, Logroño.
- VALLESPÍ, E. (1954): «Noticias de las pinturas rupestres del barranco dels Gascons (Calapatá, en Cretas, Teruel)», *Caesaraugusta*, 9-10, Zaragoza, pp. 133-136.
- VAN EYCKEN, L., et al. (2008): «A Common Infrastructure for Cultural Heritage Applications», *EPOCH Conference on Open Digital Cultural Heritage Systems*, Roma.
- VAN REES, E. (2015): «Adopting New Technology», *Geoinformatics*, 18 (abril-mayo), pp. 28-29.
- VANQUERIZO, D. (2013): *Córdoba, a pie de tierra*, El Almendro, Córdoba.
- VANQUERIZO, D. / RUIZ, A. (2013): «Arqueología somos todos...», en ALMANSÁ, J. (ed.): *Arqueología pública en España*, Madrid, pp. 221-247.
- VERHOEVEN, G. (2008): «Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared photography», *Journal of Archaeological Science*, Elsevier, Ámsterdam, pp. 3087-3100.
- (2009): *New Technologies, Methodologies, and Procedures for the Benefit of Aerial Archaeological Data Acquisition and Analysis*, Thesis, Faculty of Arts & Philosophy, Universiteit Gent.
 - (2011): «Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations», *Springer*, Luxemburgo, pp. 132-160.
- VERHOEVEN, G. / DOCTER, R. (2013): «The amphitheatre of Carnuntum - toward a complete 3D model using airborne structure from motion and dense image matching», *Proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection*, Viena, pp. 438-440.
- VERHOEVEN, G. / DONEUS, M. / ATZBERGER, C. / WESS, M. / RUS, M. / PREGESBAUER, M. / BRIESE, C. (2013): «New approaches for archaeological feature extraction of airborne imaging spectroscopy data», *Archaeological prospection: proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection*, Viena, pp. 13-15.
- VIARTOLA, L.M. (2011): «Acueducto romano de Los Bañales», *Caesaraugusta*, 82, Zaragoza, pp. 169-198.
- VIARTOLA, L.M. / ANDREU, J. / PÉREX, M.J. (2013): «The Roman Aqueduct bridge of Los Bañales (Uncastillo, Spain)», *BABESCH Annual Papers on Mediterranean Archaeology Supplement*, 24, The Netherlands, pp. 163-172.
- VICENTE, J. / EZQUERRA, B. (2003): «La tésera de Lazuro: un nuevo documento celtibérico en La Caridad (Caminreal, Teruel)», *Paleohispánica*, 3, Zaragoza, pp. 251-269.

- VIDIELLA, S. (1907): «Las pinturas rupestres del término de Cretas», *Boletín de Historia y Geografía del Bajo Aragón*, 2, Tortosa, pp. 68-75.
- VITALI, D. / MEGALE, L. (2009): «Digital Rights Management for archived Pictures in web contexts», en POGGIANI-KELLER, R. / DIMITRIADIS, G. / COIMBRA, F. / LIBORIO, C. / RUGGIERO, M.G. (eds.): *Rock Art Data Base: new methods and guidelines in archiving and cataloguing*, BAR International Series, 1996, Oxford, pp. 61-67.
- VIZCAÍNO, A. (2013): «Arqueología y sociedad. Entre el idilio y la incompreensión», en ALMANSA, J. (ed.): *Arqueología pública en España*, JAS Arqueología, Madrid, pp. 15-36.
- WATANABEA, N. / NAKAMURA, S. / LIU, B. / WANG, N. (2017): «Utilization of Structure from Motion for processing CORONA satellite images: Application to mapping and interpretation of archaeological features in Liangzhu Culture, China», *Archaeological Research in Asia*, 11, Elsevier, pp. 38-50.
- YASTIKLI, N. (2007): «Documentation of Cultural Heritage using digital photogrammetry and laser scanning», *Journal of Cultural Heritage*, 8, Elsevier, Ámsterdam, pp. 423-427.

Aplicaciones para dispositivos móviles:

Versión web para PC: <http://3dscanner.es/matarranya/>



