

La Ciencia y el Arte IV

Ministerio de
Educación, Cultura
y Deporte

Ciencias experimentales
y conservación del patrimonio

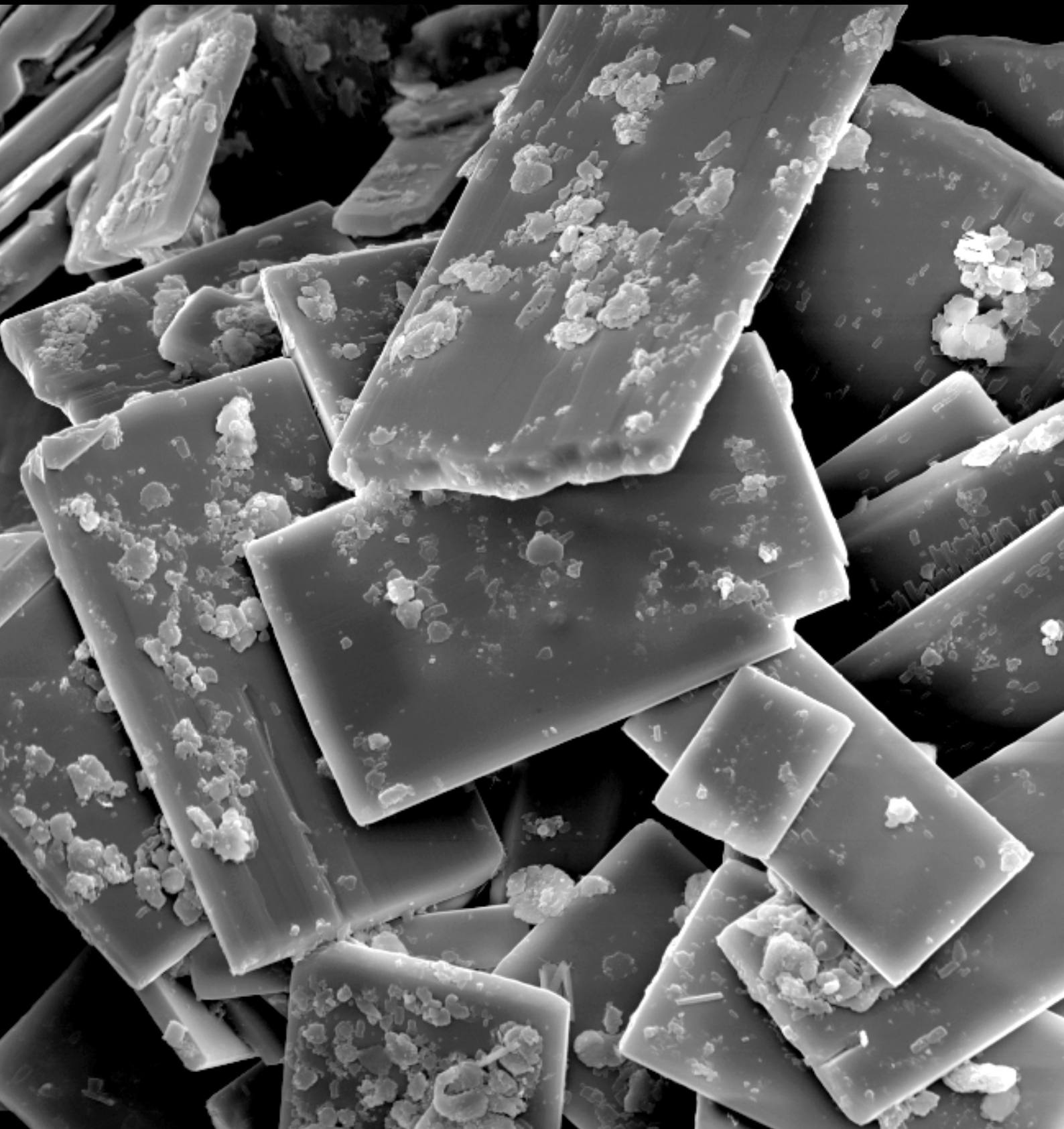


Imagen de cubierta

Imagen SEM-SE de las eflorescencias de singenita desarrolladas sobre latón en el Mausoleo de Gayarre (El Roncal, Navarra).
Fotografía: José V. Navarro.

La Ciencia y el Arte IV

Ciencias experimentales y conservación del patrimonio

Edición 2013

Coordinación científica
Miriam Bueso

Coordinación de las jornadas
Daniel Vázquez
Universidad Complutense de Madrid
Marián del Egido
Instituto del Patrimonio Cultural de España
David Juanes
Instituto Valenciano de Conservación y Restauración

Consejo editorial del IPCE
Isabel Argerich Fernández
Félix Benito Martín
Ana Carrassón López de Letona
Soledad Díaz Martínez
María Domingo Fominaya
Guillermo Enríquez de Salamanca González
Adolfo García García
Lorenzo Martín Sánchez
Alfonso Muñoz Cosme
María Pía Timón Tiemblo

Corrección de textos
Educación y Patrimonio

Maquetación
Errata naturae



MINISTERIO DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE

Edita:
© SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
Subdirección General
de Documentación y Publicaciones

© De los textos e imágenes: sus autores

NIPO: 030-13-241-5

ÍNDICE

Pág.

Consideraciones en torno a los estudios científicos aplicados a la conservación del patrimonio cultural	7
Marián del Egado, David Juanes y Miriam Bueso	

I. TÉCNICAS DE ANÁLISIS APLICADAS A BIENES CULTURALES..... 25

Estudio radiológico de las momias egipcias del Museo Arqueológico Nacional de Madrid	26
Esteban Llagostera Cuenca	

La Guardia Civil en la protección del patrimonio cultural subacuático: tecnología aplicada	48
Miguel Ángel Sanchidrián Roperio	

Arqueosismología: una nueva fuente de datos sísmicos y una herramienta para la protección del patrimonio	53
Miguel Ángel Rodríguez-Pascua, Raúl Pérez-López, Fidel Martín-González, Jorge Luis Giner-Robles y Pablo G. Silva	

La espectrometría de masas en tándem. Aplicación a la caracterización de las tintas en manuscritos del siglo xv al siglo xix	70
David Romera, Jose Sancenón, Miguel Gamón, Gemma Contreras, David Juanes y Gonzalo Fernández	

Termografía de infrarrojos aplicada a la conservación del patrimonio cultural	93
María Teresa Gil Muñoz y Juan Antonio Herráez Ferreiro	

II. CASOS DE APLICACIÓN..... 113

Últimas aportaciones de los láseres para la restauración de metales arqueológicos	114
Joaquín Barrio, M. ^a Cruz Medina, Juan P. Cid, A. I. Pardo, C. Escudero y E. Catalán	

Limpieza de pintura mural con bacterias	136
Pilar Bosch Roig, José Luis Regidor Ros y Rosa M. ^a Montes Estellés	

Extractos naturales para la desinfección y desinsectación de bienes culturales. Las plantas medicinales y el patrimonio histórico	148
Ramón Morales, Paloma Blanco, Paloma Lalana, Manuel Pardo de Santayana y Nieves Valentín	

La reflectografía infrarroja y la historia del arte	163
Ana González Mozo	

Estrategias aplicadas en el estudio del estado de conservación de la obra <i>Guernica</i> de Picasso	178
Jorge García Gómez-Tejedor	

Análisis de la microrugosidad mediante técnicas portátiles: aplicaciones y casos de estudio en patrimonio	198
Rafael Fort, Mónica Álvarez de Buergo, Carmen Vázquez-Calvo y Luz S. Gómez-Villalba	

III. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN	217
Conservación del patrimonio paleontológico. Criterios de intervención e innovaciones tecnológicas destinadas a su puesta en valor	218
Soledad Díaz, Manuel Blanco, Félix Pérez-Lorente, José Vicente Navarro, Josep Gisbert, Raquel Ferrer, Daniel Ayala y Pedro Pablo Pérez	
Efectos derivados de las intervenciones de conservación y restauración aplicados sobre material pétreo en el Conjunto Arqueológico de Mérida. Avance de investigación	227
Natalia Pérez Ema, Rosa Bustamante Montoro y Mónica Álvarez de Burgo	
Documentación, valorización y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro	234
Jorge Angás Pajas y Paula Uribe Agudo	
Identificación de hongos causantes de pudrición en las bóvedas de las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada mediante técnicas de biología molecular	245
Víctor M. Menguiano Chaparro, José Román Pérez Castiñeira y Marta Sameño Puerto	
Reconocimiento y estudio de los efectos arqueosísmicos generados en el patrimonio durante el terremoto de Lorca: proyecto RESCATELO	251
Fidel Martín-González, Miguel Ángel Rodríguez-Pascua, Raúl Pérez-López y Jorge Luis Giner-Robles	
Nanomateriales para la conservación y preservación de obras mueble e inmueble. Posibles enfoques aplicados al patrimonio documental	259
Elena González, Carmen Peña y Emma Sánchez	
Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento (CREMEL)	268
Emilio Cano, Diana Lafuente, J. Pérez, M. ^a Llanos Flores, I. Martínez, Inmaculada Traver, Livio Ferrazza, Soledad Díaz, Emma García, E. Martín y P. Letardi	
La contaminación por compuestos orgánicos en museos y exposiciones: estudio, análisis y efectos sobre el patrimonio cultural metálico	273
Diana Lafuente y Emilio Cano	
Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multispectrales. Ensayos en la cueva del tío Garroso (Alacón, Teruel)	279
María Sebastián López, Marcos Palomo Arroyo, Joaquín A. Rincón Ramírez, Santiago Ormeño Villajos y Juan Manuel Vicent García	
Protocolo analítico científico aplicado a la identificación de microorganismos y al estudio del biodeterioro en bienes culturales. Análisis en pintura sobre lienzo	288
Fernando Poyatos Jiménez, Inés Martín Sánchez y Fernando Bolívar Galiano	
La conservación de materiales óseos: antiguos tratamientos y nuevas alternativas de intervención	298
Trinidad Pasíes Oviedo	
Preeminencia y complementariedad: reflexión sobre las relaciones interdisciplinarias en los estudios del patrimonio cultural. El caso de la serie de retratos de los condes de Flandes y los abades de Nuestra Señora de las Dunas de Koksijde, Bélgica	306
Francisco Mederos-Henry, Aline Genbrugge, Karen Bonne y Julia Kohl	

Consideraciones en torno a los estudios científicos aplicados a la conservación del patrimonio cultural

Marián del Egado

Instituto del Patrimonio Cultural de España
marian.delegido@mecd.es

David Juanes

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales
djuan@ivcr.es

Miriam Bueso

Instituto del Patrimonio Cultural de España
miriam.bueso@mecd.es

Introducción: En la actualidad, la mayor parte de las técnicas de análisis que se emplean en el estudio de los bienes culturales, se han desarrollado previamente en otras áreas de investigación científica, la industria, la medicina y la ingeniería, y se han adaptado a sus necesidades específicas derivadas de la propia naturaleza única de las obras de arte y bienes de interés cultural. Uno de los aspectos que más preocupa a los profesionales y responsables de estos objetos es el daño que puede sufrir al emplear estas técnicas de análisis. Este hecho es clave para entender la terminología que existe y que es objeto de reflexión en este trabajo: ¿se puede hablar de análisis no destructivo en el diagnóstico de obras de arte? ¿La toma de muestra en bienes culturales es necesariamente destructiva? Y, ¿por qué se habla de técnicas no destructivas a la tecnología que no requiere muestra, y sin embargo está demostrado que interacciona de algún modo con la materia produciendo alguna modificación?

Fruto de este esfuerzo de introspección, se pondrá de manifiesto el diferente concepto y denominación que se tiene a la hora de clasificar las técnicas de análisis en el campo industrial y en el campo de la conservación del patrimonio cultural.

Palabras clave: Terminología, técnicas de análisis, conservación de patrimonio cultural.

Abstract: At present, most of the analysis techniques used in the study of cultural property has developed before in other areas of scientific research, industry, medicine and engineering, and has adapted to their needs derived from the specific nature of unique works of art and cultural assets. One of the greatest concern to professionals and managers of these objects is the damage that can occur when using these technologies of analysis. This is important to understanding the terminology that exists and that is reflected upon in this paper: is it possible to talk about non-destructive analysis in the diagnosis of artworks? Is the capture of sample in cultural property necessarily destructive? And why do we talk about non-destructive techniques to tech-

nology that requires no sample is shown yet that somehow interacts with matter and produces any change?

The result of this effort of introspection, it will show the different concept and name that you have when sorting analysis techniques in industry and in the field of cultural heritage conservation.

Keywords: Terminology, analysis techniques, cultural heritage conservation.

Estado de la cuestión

La conservación científica del patrimonio cultural se basa en una necesaria imbricación de las ciencias experimentales aplicadas y las humanidades tal como queda reflejada en las recomendaciones y cartas internacionales en materia de conservación y restauración. La primera referencia al respecto se encuentra en la Conferencia Internacional de Atenas de 1931 en la que se apuesta por «la colaboración en cada país de los conservadores de monumentos y de los arquitectos con los representantes de las ciencias físicas, químicas y naturales para lograr resultados seguros de cada vez mayor aplicación...». Esta premisa inicial se repetirá en todos los documentos posteriores y evolucionará aplicándose a todo el patrimonio cultural entendido en el sentido más amplio y para todas las actividades encaminadas a la conservación del mismo.

Los vestigios de la historia de la civilización humana son herramientas básicas en la investigación histórica, artística y antropológica; pero además, tienen una naturaleza material que debe estudiarse y conservarse para proveer de herramientas objetivas en la reconstrucción presente y futura de nuestra historia. Desde el punto de vista de las ciencias experimentales, los bienes culturales constituidos por materia más o menos compleja (minerales, aceites grasos, material proteico, material celulósico, metales, etc.). Son las humanidades las que le otorgan el valor histórico-artístico a esta materia. En este sentido, la interdisciplinariedad debe ser una característica intrínseca de la conservación imprescindible para su progreso (Torraca, 1982). Pese a ello, el acercamiento más tradicional al estudio del patrimonio cultural se realiza desde las humanidades, y los estudios científicos siguen siendo, en ocasiones, motivo de desconfianza y controversia, a pesar de que, en las últimas décadas, es cada vez más común la introducción de estudios científicos y técnicos previos a la intervención, y de seguimiento en todo proyecto de conservación. Así lo reflejan desde sus inicios las Cartas Italianas del Restauo de Venecia (1964) o de Roma (1972). Con posterioridad, el *Documento de Pavía para la preservación del patrimonio cultural: hacia un perfil europeo del conservador-restaurador* defiende el «intercambio interdisciplinar entre los conservadores-restauradores de Bienes Culturales y los representantes de las disciplinas científicas y humanísticas, tanto desde la enseñanza como desde la investigación...». Esta situación obliga a ser especialmente cuidadoso en los usos de las técnicas, en la asunción de los riesgos que implican y las formas de transmisión de los resultados, de modo que la información recabada sea la requerida para cada caso concreto y pueda transmitirse de forma clara, útil y transparente. Esta generación de confianza, tan necesaria para trabajar con los profesionales relacionados con la gestión, tutela, conservación y preservación, así como la investigación del patrimonio cultural, es un aspecto muy presente entre los científicos. Si no se cuida adecuadamente, puede impedir la existencia de una participación o cooperación adecuada y necesaria, en la conservación de los bienes culturales.

Uno de los principales escollos que se encuentra a la hora de aplicar los estudios científicos al estudio de bienes de interés cultural es la clasificación ampliamente extendida entre

técnicas destructivas y técnicas no destructivas. Existe un rechazo de entrada a la aplicación de técnicas tradicionalmente clasificadas como destructivas. El término técnicas no destructivas está muy extendido y enraizado dentro de la conservación del patrimonio cultural. Existe numerosa bibliografía y manuales dirigidos a conservadores y restauradores que emplea este término para referirse a aquellas técnicas como las más adecuadas para el estudio de obras de arte. Un ejemplo lo podemos ver en las *Cartas del Restauo* de Atenas (1931), Venecia (1964), París (1972), Roma (1972) y Copenhague (1984), y en la *Carta de la conservación y restauración de los objetos de arte y cultura* (1987) que recoge que «donde sea posible, deberá llevarse a cabo también el examen de las condiciones internas del objeto. [...] tal verificación, que en primera instancia se entiende como un examen óptico, en la medida de lo posible deberá ser corroborada por análisis y exámenes de carácter físico, químico y numérico, elegidos con absoluta prioridad entre aquéllos que no sean destructivos. Análisis y exámenes, realizados en estrecha colaboración con los expertos de los diversos sectores, serán registrados cuidadosamente en el diario de restauración». Otro ejemplo lo encontramos en *Open Archive* de ICOMOS donde menciona, en la clasificación técnicas científicas y metodológicas para la conservación, los ensayos no destructivos (Archive, 2012), o en el documento *Principios para la conservación y conservación y restauración de pintura mural* (Centre, 2003), donde se dice que «los métodos de investigación deben ser no destructivos¹». Otros ejemplos se encuentran en libros específicos de conservación y restauración como por ejemplo en *Stone Conservation* (Doehne *et al.*, 2010), donde se menciona que «los estudios científicos deben empezar por fotografías y otras informaciones no destructivas. Además comenta que se debe considerar las técnicas mínimamente destructivas siempre que sea posible tomar muestras para análisis en laboratorio». Un último ejemplo es el manual *Scientific examination for the investigation of paintings: a handbook for conservator-restorers* (Pinna *et al.*, 2009), donde describe todas las técnicas de análisis que pueden aplicarse a la pintura sobre tabla y lienzo diferenciando entre técnicas no destructivas y micro destructivas.

Esta terminología y división de técnicas también se refleja en los propios centros de conservación y museos de diferentes partes del mundo. Existen varias instituciones como el IRPA donde se describe que: «El laboratorio de pintura estudia los componentes de las capas pictóricas de las pinturas (pigmentos, tintes aglutinantes, barnices, aditivos, etc.). Para este propósito, el laboratorio utiliza diferentes técnicas de análisis no destructivas y muestras microscópicas» (Heritage, 2012). Los laboratorios de investigación de los museos de Francia (CR2MF) en los que en su página web se recoge «la necesidad de preservar la integridad de la obra favoreciendo los no destructivos y en especial los que requieren sólo pequeñas muestras o incluso mejor los que permiten análisis *in situ* sin toma de muestra. Por otra parte, en muchos casos, se utilizan instrumentos móviles, preferentemente, compactos y portátiles, posible gracias a la miniaturización de sus componentes» (France, 2012).

Por tanto, en muchas de las fuentes de consulta por conservadores y restauradores aparece el término no destructivo; sin embargo, a la vista de los ejemplos, en los centros de conservación y restauración no se descarta la toma de muestras en los estudios científicos, ya que están más relacionados con el extenso corpus normativo relacionado con la conservación del patrimonio cultural.

En el campo de las ciencias experimentales el término no destructivo relacionado con técnicas aplicadas al patrimonio también está muy extendido. No hace falta más que hacer una búsqueda en Internet con las palabras clave y aparecen un gran número de artículos y publicaciones en los que se emplean técnicas denominadas no destructivas para estudios concretos,

¹ *The methods of investigation should be as far as possible non-destructive.*

o se diseñan nuevas técnicas de análisis no destructivas aplicadas al patrimonio cultural enumerando las ventajas e inconvenientes de esas técnicas (Janssens *et al.*, 2004; Pinna *et al.*, 2009 y Denker *et al.*, 2006).

De igual modo existe un gran número de congresos internacionales dedicados a las técnicas no destructivas aplicadas a la conservación de bienes culturales. Los más recientes han sido «ART'11»², «TECHNART 2011»³, «GRC»⁴, «Synchrotron Radiation in Art and Archaeology»⁵, entre otros, lo que demuestra la importancia y el auge de este campo del conocimiento.

Las técnicas no destructivas

Desde el punto de vista etimológico es necesario aclarar una serie de conceptos. Los ensayos no destructivos, según la propia Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND), «consisten en ciertas pruebas a las que se somete un objeto para verificar su calidad o el estado de la misma, sin que éste resulte dañado o inutilizado, una vez efectuados aquellos»⁶. En primer lugar, el término ensayo tiene una connotación de prueba, algo que no es aplicable a bienes culturales. En obras de arte, debido a su alto valor histórico, artístico y, en muchas ocasiones, económico, no es posible hacer ensayos o pruebas. Todos los métodos de análisis y estudios científicos que se aplican en bienes culturales han sido testados en otros materiales y adaptados por los científicos dedicados a la conservación de acuerdo con los criterios profesionales aceptados internacionalmente. Por tanto, nunca se encuentran asociados los términos «ensayos no destructivos» y patrimonio.

Además, existe otro matiz. En los laboratorios de análisis, se entiende por técnica no destructiva aquella en que la muestra analizada queda inalterada al finalizar el proceso de análisis. Estas técnicas se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, y cualquier tipo de prueba que no implique una alteración de la muestra examinada. Con esta definición, técnicas como la fluorescencia de rayos X mediante dispersión de longitudes de onda (WDXRF), microscopía electrónica de barrido (MEB), la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en bancada (fig. 1), incluso, la difracción de rayos X (DRX) y la resonancia magnético nuclear (RMN), se englobarían dentro de esta definición, ya que la definición no incluye la selección y la preparación previa al análisis, como pueden ser la toma de muestra, la trituración, la homogeneización, la disolución, etc.

Sin embargo, dentro del ámbito de la conservación del patrimonio el término «no destructivas» se refiere a aquellas en las que no es necesaria la toma de muestras. Esto no quiere decir que estas técnicas de análisis no generen modificaciones en las propiedades físicas o químicas del objeto. Un ejemplo es la técnica LIBS, en la que un láser induce la generación de plasma en la superficie del objeto, a partir del cual, se realiza un análisis químico-elemental. Por tanto, esta técnica no requiere la toma de muestra, pero genera microcráteres en el objeto de un tamaño del orden de micras. Otro aún más evidente, es la técnica PIXE, que permite el

² «ART'11 10th International Conference on *non-destructive investigations* and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage». Del 13 al 15 de abril de 2011. Florencia, Italia.

³ «TECHNART 2011 Non-destructive and microanalytical techniques in art and cultural heritage». Del 26 al 29 de abril 2011. Berlín, Alemania.

⁴ «Scientific Methods in Cultural Heritage Research. Non-Destructive Imaging and Micro-Analysis in Cultural Heritage». Del 29 de julio al 3 de agosto de 2012. West Dover, VT. EE. UU.

⁵ «Synchrotron Radiation in Art and Archaeology». Del 6 al 8 de junio de 2012. Nueva York. EE. UU.

⁶ Disponible en: <http://www.aend.org/informacion/queson.html> (Consulta: 10 de junio de 2012).

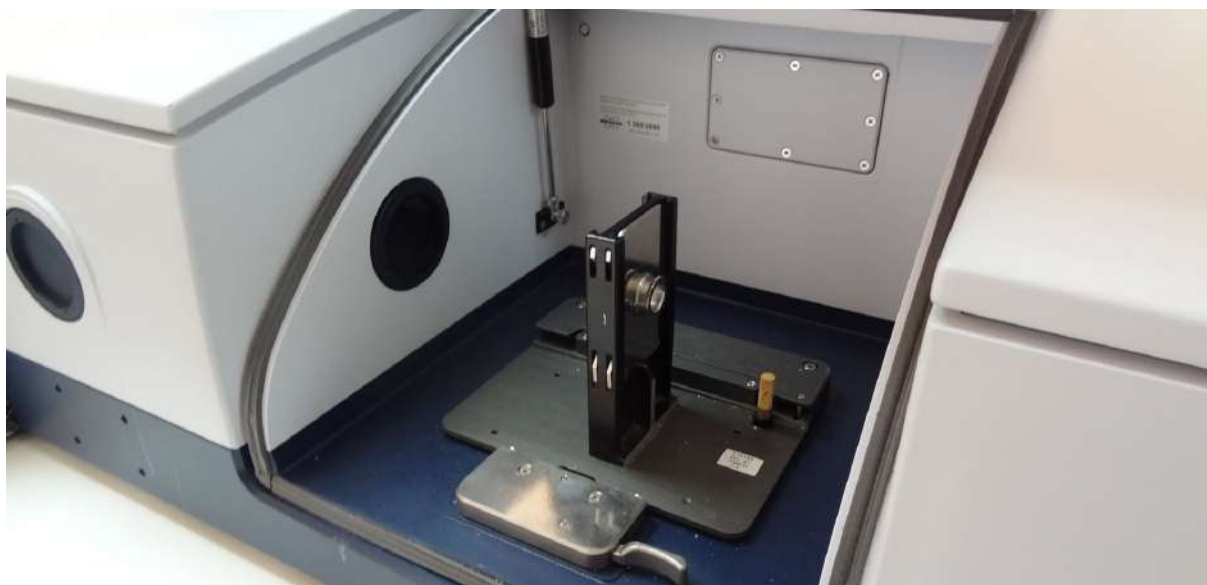


Figura 1. Equipo de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en bancada. En este equipo la pastilla queda inalterada durante el análisis.

análisis mediante el impacto de haces de iones de alta energía y la posterior detección de la energía emitida. Esta técnica, sin embargo, modifica los centros de color de los pigmentos blancos, produciendo un oscurecimiento en las zonas de impacto (fig. 2) (Gutiérrez, 2011). Estos oscurecimientos según la bibliografía son reversibles por lo que esta técnica es considerada no destructiva en la bibliografía sobre técnicas de laboratorio, y es sin toma de muestra, pero ¿lo es en bienes culturales?

En general todas las técnicas consideradas tradicionalmente como no destructivas se basan en una interacción electromagnética con el objeto estudiado. Una de las técnicas de análisis químico elemental no destructiva y sin toma de muestra por excelencia y de gran implantación en los museos y centros de restauración es la fluorescencia de rayos X. Esta técnica consiste en lanzar un haz de radiación sobre el objeto con el fin de excitarlo y detectar la fluorescencia originada al desexcitarse, por lo que existe una interacción entre la radiación y la materia. Nunca

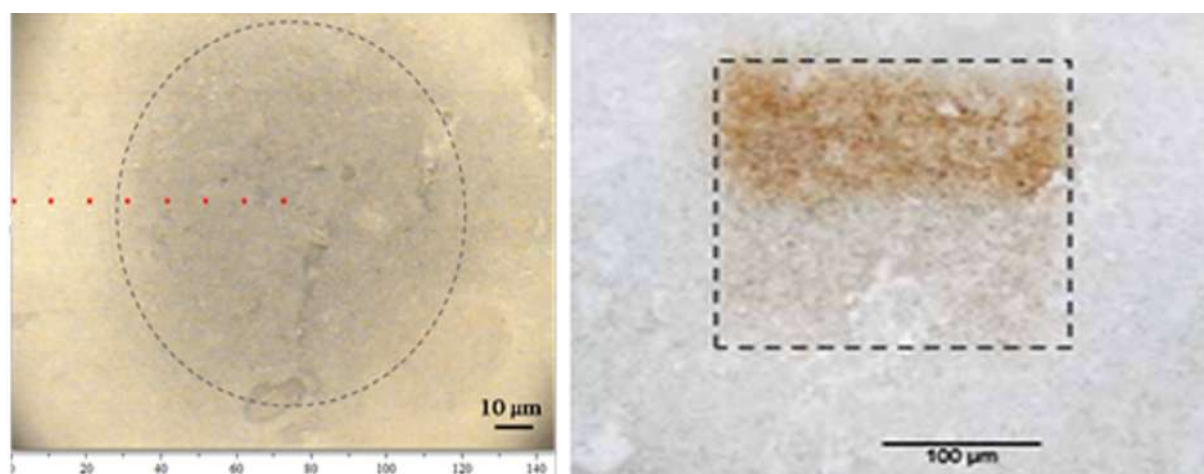


Figura 2. Izquierda: la irradiación con un haz de protones a 3 MeV a dosis elevadas evidenció la formación de una marca cuya tonalidad fue más oscura en los blancos de plomo. Derecha: reversibilidad de los pigmentos irradiados mediante una lámpara OSRAM L36W/3 de luz UV (350-400 nm) durante 25 días.

se han visto efectos nocivos o alteraciones en los objetos estudiados. Sin embargo, se han hecho ensayos en los que se observa que un haz de rayos X produce efectos de amarilleamiento y aumento de la fragilidad en muestras de papel (Mantler y Klikovits, 2004). Este resultado sin las debidas consideraciones puede ser muy alarmante. Sin embargo, los ensayos se realizaron con unas condiciones que se alejan mucho de la realidad habitual de los estudios de bienes culturales. Se utilizaron tiempos de exposición de hasta dos horas e intensidades que, dependiendo del equipo empleado, llegan a ser hasta de 1.000 veces superior a lo que se suele emplear con los equipos portátiles más extendidos, por lo que la energía absorbida por el objeto es muy alta. Por tanto, una técnica en la que no se ha evidenciado ninguna alteración del objeto estudiado, puede llegar a deteriorarlo si se sobrepasan ciertos límites. Estos límites son fácilmente alcanzables con los nuevos sistemas de radiación sincrotrón y microhaces policapilares, por lo que hay que establecer protocolos de trabajo en estos casos. Hay que mencionar sin embargo, que esta es la única referencia que recoge un daño medible sobre la superficie de un objeto. No han aparecido nuevas investigaciones acerca del daño inducido por los equipos de fluorescencia de rayos X en los objetos analizados.

Estas investigaciones no significan que todas las técnicas de análisis con rayos X puedan afectar al objeto. Un caso que se podría pensar sería si el estudio de objetos textiles o documentos mediante técnicas radiográficas también podría producir alteraciones de este tipo. También se ha estudiado el efecto de este tipo de estudios sobre soporte textil; se ha puesto de manifiesto que no se evidencia ningún tipo alteración ya que las condiciones de trabajo en las que existe una gran distancia entre la fuente y el objeto limita mucho la cantidad de energía que recibe (Garside y O'Connor, 2007; O'Connor y Brooks, 2007).

Otra técnica comúnmente aceptada como técnica de análisis no destructiva es la fotografía ultravioleta. Es una de las técnicas de análisis global sin toma de muestras que más habitualmente se realiza en la mayoría de los estudios previos, sin pensar que puede originar algún efecto sobre el objeto estudiado. Sin embargo, es sabido que la luz produce alteraciones acumulativas en capas de recubrimiento como barnices y efectos de pérdida de color en tintes naturales (Gupta, 1999; McLaren, 1956). A pesar de ello, no se asocia la fotografía ultravioleta con una técnica destructiva y se aplica a pintura y tejidos (fig. 3). Con las debidas precauciones y protocolos de trabajo adecuados esto es así. Sin embargo, este examen produce un efecto



Figura 3. Estudio de imagen con fluorescencia ultravioleta de una escultura.



Figura 4. Imagen de los dos fragmentos de papel después del análisis mediante VP-SEM-EDX con un equipo Hitachi 3400 N.

acumulativo de deterioro en el objeto analizado. Este hecho normalmente se asume sin más problemas porque está muy asimilado que la información que proporciona es de gran ayuda para el restaurador, por ejemplo en pintura, a la hora de poner de manifiesto zonas de intervenciones anteriores.

Con estos dos ejemplos se ha pretendido mostrar que toda técnica de análisis puede provocar alguna alteración del objeto. Este hecho debe ser asumido y tenido en cuenta por los profesionales de la conservación a la hora de realizar estudios científicos. El hecho de que una técnica de análisis no requiera toma de muestras no implica necesariamente que la técnica sea inocua para el objeto.

Las técnicas destructivas

Las técnicas tradicionalmente clasificadas como con toma de muestra no necesariamente implican la alteración de la muestra analizada. Un ejemplo lo podemos ver en la microscopía electrónica de barrido. Hasta el desarrollo de los equipos de presión variable, se podían realizar análisis de objetos conductores de la electricidad de forma no destructiva, sin toma de muestra y sin preparación previa siempre que cupieran en el interior de la cámara de vacío. Con los equipos de presión variable su aplicación se ha extendido a materiales aislantes como papel, tejidos, cerámica, etc. Esta técnica se empleó en el estudio de dos manuscritos ocultos bajo el escapulario bordado de dos casullas de los siglos xv-xvi, una procedente del Museo Catedralicio de Segorbe (Castellón) y la otra de los fondos de la Hispanic Society of America (Nueva York). En este estudio, los análisis radiográficos mostraron indicios de la presencia de un texto oculto debajo del bordado. Esto motivó la realización de una inspección visual que permitió descubrir textos escritos en papel bajo el bordado. Se pudo coger un fragmento desprendido de papel de cada casulla que fue analizado mediante microscopía electrónica de barrido a presión variable (VP-SEM-EDX) (fig. 4). Este análisis evidenció que las tintas y los soportes empleados en ambos documentos eran similares. Estos fragmentos fueron devueltos a su lugar original finalizado el estudio. Estos resultados, junto con la identificación del soporte y los estudios históricos y artísticos dieron como resultado que ambas casullas tienen un mismo origen (Pérez García y Jaén Sánchez, 2011).

Uno de los grandes problemas que genera los análisis con toma de muestra es la falta de concienciación por parte de algunos responsables de las obras de arte. En muchas ocasiones se llega a extremos en los que está mal visto, o directamente se niega el permiso para coger una muestra de una fachada de un monumento porque es una técnica destructiva, sin pararse a pensar que, por ejemplo, la erosión debida al viento, la lluvia y la contaminación genera una pérdida de material mucho mayor en un año, que la pérdida que sufre el monumento por tomar esa micromuestra. De hecho, existen numerosos trabajos en el ámbito de la construcción en el que se crean modelos matemáticos para evaluar el grado de deterioro de edificios debidos a los fenómenos de erosión generados por la lluvia y el viento (Erkal *et al.*, 2012). Tampoco se tiene en cuenta que la información que puede aportar esa pequeña cantidad puede permitir un diseño del proceso de intervención más adecuado y evitar intervenciones desastrosas que generen graves daños por falta de información.

La toma de muestras es algo intrínseco en algunos estudios analíticos que, como contrapartida, ofrecen una información vital. Sin este tipo de estudios es realmente complicado obtener información acerca de los materiales y la superposición de capas que presenta el objeto, la identificación de intervenciones anteriores, y las alteraciones producidas por agentes externos o por envejecimiento natural. Los estudios con micromuestras son esenciales para responder a aquellas cuestiones que derivan de los estudios sin toma de muestra proporcionando una inestimable ayuda en los procesos de intervención, aconsejando el empleo de un determinado producto de restauración, la eliminación de alguna sustancia o elemento de deterioro, o desaconsejando un método nocivo o proponer nuevos materiales anteriormente contrastados. Estos datos son imprescindibles para determinar si un protocolo de actuación es correcto o requiere de una revisión.

Un ejemplo del tipo de información que se tiene con estos estudios fue el realizado al *Cielo de Salamanca*, una pintura mural renacentista de 1480-1490 atribuida a Fernando Gallego, que decoraba el cielo de la antigua biblioteca de la Universidad Salamanca (García *et al.*, 2010). En 1950 los restos de esta pintura mural fueron arrancados mediante *strappo* y reubicados en el museo de la universidad. En el estudio de estas pinturas se empleó técnicas sin toma de muestra de análisis global (fotografía visible, fotografía ultravioleta, fotografía infrarroja y termografía), técnicas de análisis puntual sin toma de muestra (fluorescencia de rayos X) y por último, se realizó la toma de micromuestras en base a los resultados obtenidos con las técnicas anteriores, de forma selectiva y representativa. El estudio de estas micromuestras puso de manifiesto los problemas de conservación que existían en la pintura que de otro modo no se hubieran podido observar ni estudiar.

En la figura 5, que corresponde a la sección transversal de una micromuestra de una estrella amarilla pintada sobre fondo azul del cielo, se observa una primera capa compuesta de un material de relleno aglutinada con parafina. A continuación, hay una delgada capa de cola animal, una gruesa capa de recubrimiento de cera de abeja y finalmente, una capa amarilla. En la imagen se observa la separación que existe entre las capas debida al bajo poder adhesivo de la cera de abeja. Además, la cera provocó la presencia de manchas en la superficie de la pintura debido a que la suciedad se adhiere muy fácilmente sobre ella.

Las estratigrafías de otras micromuestras revelaron otros problemas de conservación como pérdidas de soporte y de capas pictóricas originales, degradación, rotura escalonada de la pictórica, etc. Toda la información obtenida con las diferentes técnicas fue esencial a la hora de diseñar el protocolo de intervención en la obra.

Las técnicas de análisis con toma de muestras también aportan información de incalculable valor desde el punto de vista histórico y artístico. Donde este hecho es más evidente es en los estudios de pintura y escultura policromada. Los estudios de secciones estratigráficas son en estos

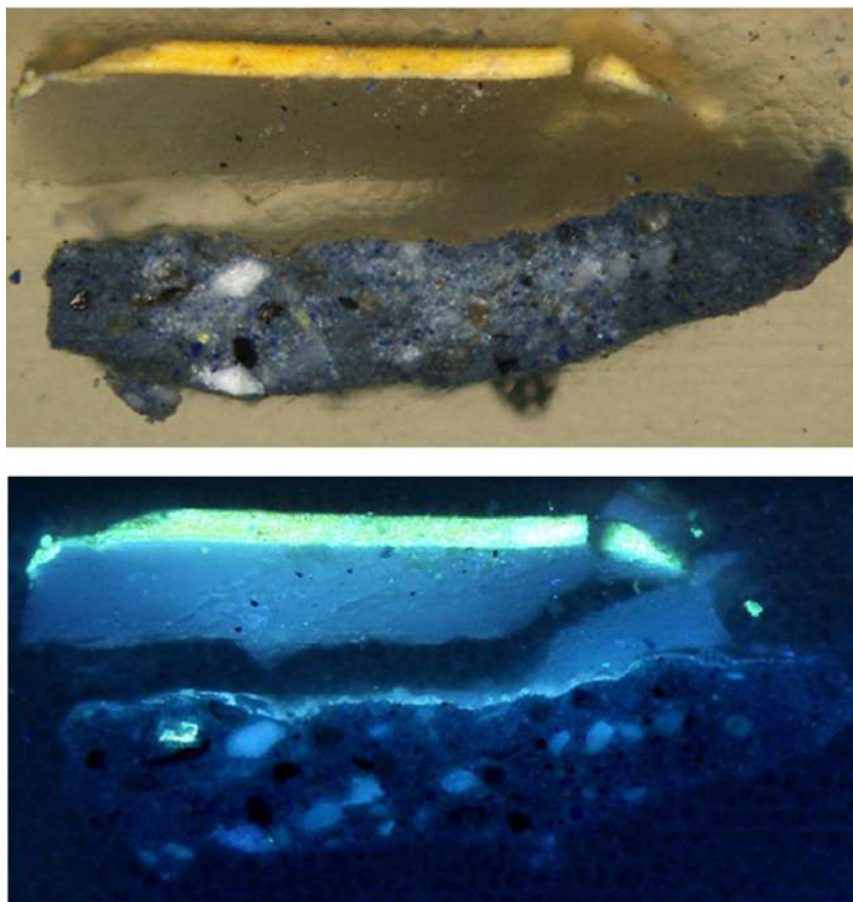


Figura 5. Sección transversal de una micromuestra de una estrella amarilla pintada sobre fondo azul del cielo con obtenida con luz visible (arriba) y lámpara de Wood (abajo).



Figura 6. Izquierda: archivo de micromuestras del Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Derecha: archivo de micromuestras del Instituto del Patrimonio Cultural de España.

casos los instrumentos básicos a la hora de conocer la evolución histórica de una pieza, su método de ejecución, y los que pueden aportar información sobre la técnica que sigue propia de un artista.

Antes de decidirse por una técnica de análisis, hay que valorar cuánta muestra es requerida para obtener un resultado con un grado de precisión adecuado, valorar si la cantidad de muestra es representativa del objeto de modo que pueda extrapolarse el resultado, si las zonas de toma de muestra pueden verse alteradas por ello, y cuál es el límite permitido en la toma de muestra para no dañar el objeto o los valores intrínsecos asociados a él. En general, parece destructiva una técnica que necesita de toma de muestra por el hecho de producir una separación irreversible de material en el bien cultural.

Otro aspecto muy positivo que debe señalarse es que la toma de micromuestras posibilita la existencia de archivos custodiados en institutos y centros de restauración que pueden consultarse o revisarse durante generaciones sin necesidad de recurrir nuevamente al bien cultural analizado (fig. 6). Ello debe tenerse muy presente, ya que somos muy conscientes de que las nuevas tecnologías avanzan a una velocidad vertiginosa y permitirán obtener en el futuro datos cada vez más exactos.

En este sentido, un ejemplo ilustrativo son los diferentes estudios que se han realizado a la *Dama de Baza* del Museo Arqueológico Nacional (Madrid). El primer estudio fue llevado a cabo por José María Cabrera en los años setenta, a partir de la toma de micro muestras que fueron analizadas por la tecnología disponible en aquel momento, lo que permitió identificar con precisión todos los pigmentos presentes en la escultura. Las láminas delgadas preparadas en estos estudios fueron archivadas y se conservan en la actualidad. En 2006, surgió la posibilidad de realizar un nuevo estudio de la *Dama de Baza* mediante fluorescencia rayos X con el equipo portátil del IPCE, con el objetivo de profundizar más en el conocimiento de esta escultura y complementar el estudio realizado por la Universidad de Valencia a finales de los años noventa (Gómez *et al.*, 2008). Con esta técnica de análisis se realizó un amplio barrido de la escultura sin que existiera riesgo para su conservación e integridad. Estos nuevos análisis, confirmaron la presencia de estaño en tres zonas que corresponden a joyas distintas, lo que sugería la intencionalidad en su aplicación. Este hecho motivó la toma selectiva de micro muestras que permitiese verificar esta hipótesis. En la sección transversal de las micromuestras (fig. 7) aparece una capa oscura que corresponde a una lámina de estaño.

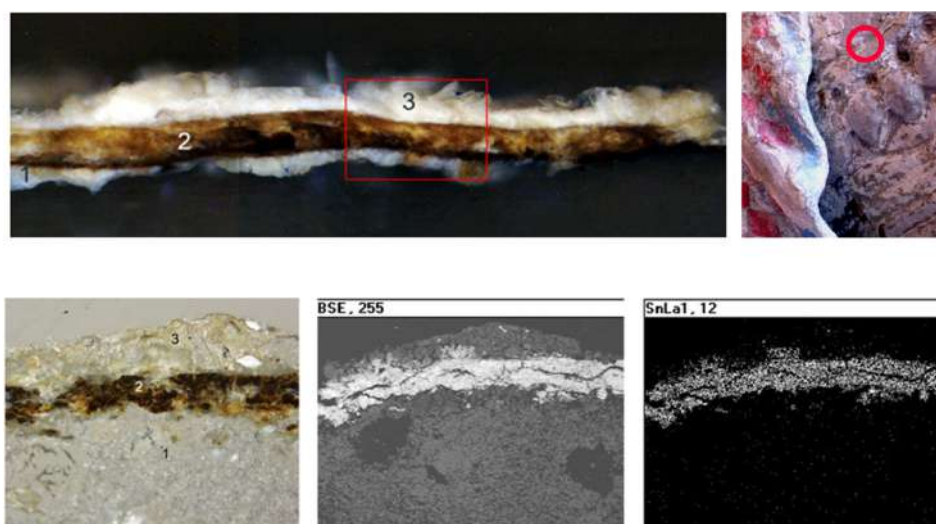


Figura 7. Arriba: estratigrafía de la zona del tocado donde se observa la lámina de estaño. Abajo: estudio realizado en la actualidad de la lámina delgada preparada en los años setenta del tocado sobre la frente, mediante microscopía óptica y MEB-EDX.

En este punto surgió la duda de por qué no se había detectado este elemento en los análisis de los años setenta, por lo que se decidió acudir al archivo de muestras y recuperar una de las láminas delgadas de una zona analizadas mediante fluorescencia rayos X y que mostró la presencia de estaño (fig. 7). Los nuevos análisis realizados con técnicas actuales identificaron la presencia de una lámina de estaño mineralizada. Lamentablemente, en los años setenta no se disponía de los equipos del análisis que pudieran detectar la presencia de este elemento. Éste es un buen ejemplo de la importancia del archivo de micro muestras.

La continuación de estos estudios en otras colecciones ha permitido mostrar que las damas ibéricas, además de policromadas, presentan algunos de sus ornamentos metalizados con láminas doradas o plateadas. Esta tecnología es coherente con las esculturas de época que se realizaban en el arco mediterráneo.

Por tanto, la mayor dificultad de estas consideraciones en bienes culturales se debe a que se une la obligación, a las ya existentes en el mundo de los materiales industriales o tecnológicos, de proceder de modo que el bien cultural se vea afectado lo mínimo posible por la realización del análisis. Por ello, en el ámbito de los bienes culturales, si se quiere mantener la terminología sobre destructividad o no, hay que evaluar la no destructividad, destructividad o microdestructividad de la técnica utilizada en cada caso, y tomar decisiones individualizadas.

¿Existe la técnica ideal?

En el fondo, lo que buscamos desde el punto de vista de conservación de bienes culturales es una técnica ideal que no diferirá mucho de la técnica ideal en el diagnóstico industrial. En conservación del patrimonio cultural sería más que deseable una técnica que permitiera el análisis global y puntual de daños estructurales, que proporcionara información sobre elementos, compuestos químicos y secciones estratigráficas, que no necesitara la toma de muestras y que fuera inocua, que fuera portátil y que realizara el análisis *in situ* y *on-line*, barato, y que tuviera un sistema asistido de análisis que facilitara la interpretación de los datos. A la espera de que se desarrolle esta técnica de análisis ideal, la única alternativa que queda es utilizar diferentes técnicas de análisis complementarias que proporcionen el máximo de información sin alterar los valores histórico-artísticos de la obra, generando el mínimo daño, adaptadas a cada tipo de material y estado de conservación.

En este sentido, tanto el Instituto del Patrimonio Cultural de España como el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, siguen una metodología de estudio que permite optimizar la información que proporcionan las técnicas de análisis globales y puntuales sin toma de muestra y las técnicas con toma de micromuestra (Pérez *et al.*, 2010). Los análisis se realizan siguiendo una secuencia lógica en la que los resultados de una técnica sirven de base para el estudio con la siguiente, teniendo presente que las técnicas que se empleen están subordinadas al bien cultural y en especial, al objetivo que se pretende, algo que se olvida con frecuencia (fig. 8). Este protocolo de actuación comprende, en primer lugar, técnicas no destructivas sin toma de muestra, comenzando por los estudios globales y continuando con los puntuales. Dentro del primer grupo se engloban todas aquellas técnicas basadas en la obtención de una imagen con distintas longitudes de onda, desde las más sencillas como la fotografía visible (con luz reflejada o transmitida, con iluminación rasante, etc.) o la endoscopia, fotografía mediante fluorescencia ultravioleta; o más complejas como la reflectografía infrarroja, el análisis multiespectral, la radiografía y la tomografía axial computerizada (TAC).

Los resultados de los análisis globales sirven de punto de partida para el análisis puntual no destructivo y sin toma de muestras mediante distintas técnicas espectroscópicas como la

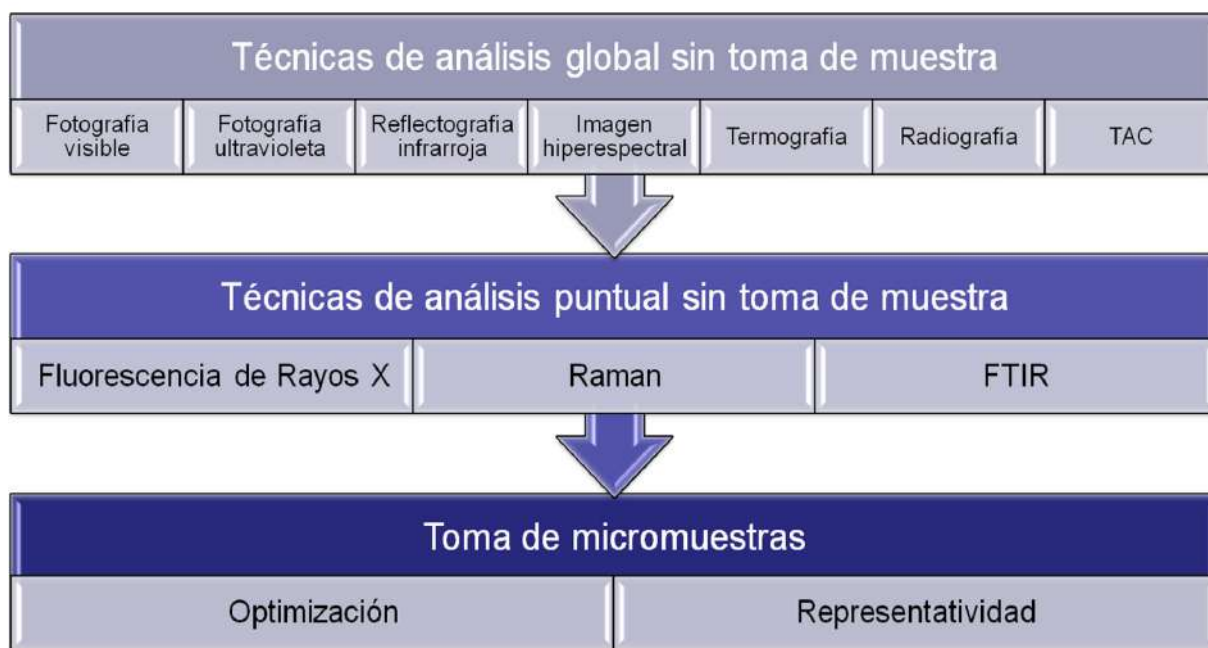


Figura 8. Esquema de la metodología de estudio diseñada con el objetivo de optimizar la información que proporcionan cada una de las técnicas de análisis.



Figura 9. Imagen de la escultura previa a su intervención e imágenes de los cortes coronal y sagital de la pieza obtenidos mediante TAC médico.

fluorescencia de rayos X, el Raman y el FTIR. El desarrollo de técnicas portátiles permite realizar grandes barridos a las obras sin que éstas sufran daños, por lo que se pueden realizar estudios de aquellas zonas en las que no es posible la toma de muestra, ya sea porque afecta a la lectura de la obra o porque implicaría una pérdida irreparable desde el punto de vista material e histórico (Martín de Hijas *et al.*, 2004; 2008). Una vez llegado a este punto, y si todavía hay cuestiones por resolver, se continúa a las técnicas microdestructivas con toma de micromuestras. Este paso tiene como base todos los resultados de los análisis anteriores, por lo que es un proceso optimizado, que minimiza su número y con ello el daño que sufre el objeto.

Un ejemplo de esta metodología es el estudio de la *Inmaculada Concepción* del Monasterio de San Jerónimo de Granada, cuya autoría es anónima, pero se relaciona con la escuela de Alonso Cano. Es una escultura religiosa de uso devocional (157 cm x 54 cm x 60 cm), tallada en madera y policromada con la técnica de talla, característica de la imaginería española del siglo XVII (Ferrazza *et al.*, 2012).

Se realizó un estudio mediante TAC con el fin de analizar el modo en que se talló la escultura (fig. 9). Para ello se emplearon varios listones de madera probablemente de diferente especie. La parte superior del pecho bajo los hombros es maciza y se realiza añadiendo tablas laterales y traseras a las que descienden de la cabeza para dar volumen a la escultura. También permitió observar un hueco que se extiende desde la parte superior del pecho hasta los pies, lo que explica la ligereza de la escultura.

Otros aspectos destacados del análisis fueron la presencia de pequeñas separaciones entre las tablas, la existencia de agujeros y grietas que se taparon en una intervención anterior, y la extrema delgadez del soporte en algunas zonas de la parte delantera y trasera de la escultura, lo que provoca que el manejo de la pieza deba ser delicado para evitar posibles perforaciones y daños en su estructura (fig. 10). Por último, se detectaron determinadas zonas donde la policro-

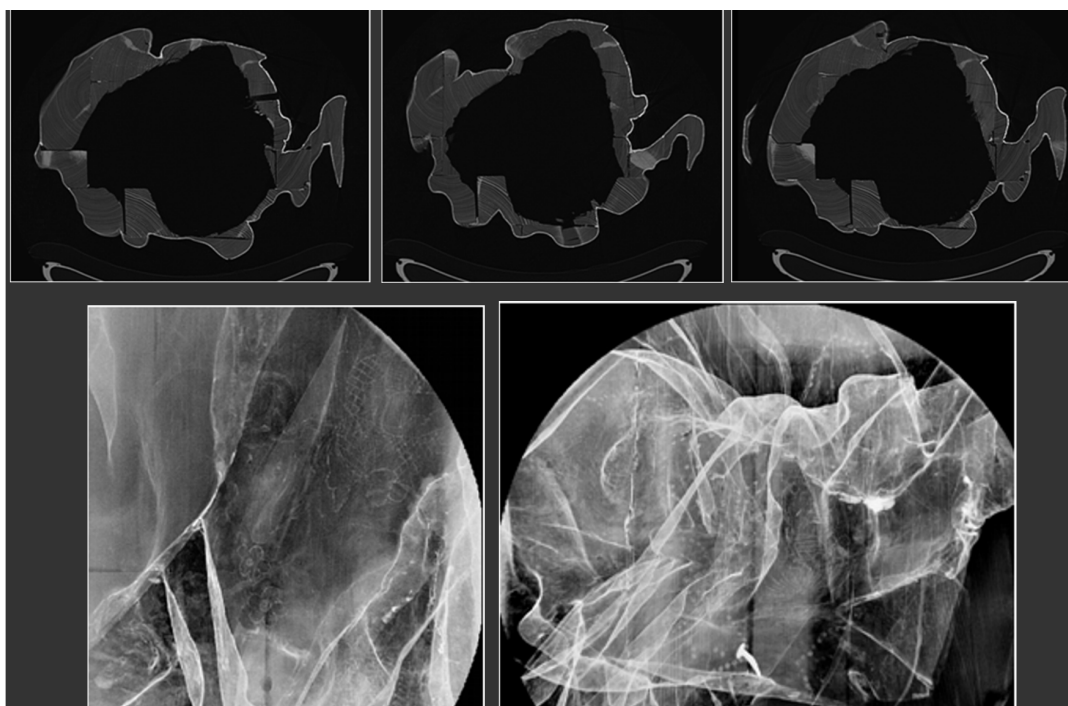


Figura 10. Arriba: cortes axiales donde se observa la presencia de pequeñas separaciones, agujeros, y la extrema delgadez del soporte en algunas zonas de la parte delantera y trasera de la escultura. Abajo: imágenes radiográficas donde se aprecia un esgrafiado oculto en el manto y en la vestidura.



Figura 11. Sección estratigráfica de una zona de dorado donde se observa que debajo del falso oro hay un dorado de pan de oro, y primeras pruebas de limpieza de la escultura.

mía mostraba una mayor densidad que otras, por lo que se realizó un estudio radiográfico de la escultura; mostró la existencia de un esgrafiado oculto en el manto y en la vestidura (fig. 10). Este hecho motivó la toma de muestra selectiva de zonas específicas que mostraron la existencia de un esgrafiado de mucha mayor calidad bajo la capa externa de policromía. Los estudios previos han permitido orientar y asesorar en el proceso de restauración que ha permitido recuperar el esgrafiado posiblemente original (fig. 11).

La práctica demuestra que los estudios analíticos, con o sin toma de muestra, proporcionan resultados que se buscaban y otros inesperados y que su combinación potencia esta posibilidad que puede enriquecer enormemente los resultados. Esta metodología analítica combinada también puede generar nuevas preguntas y dudas, que no se planteaban en un principio, y que pueden tener una gran importancia en la conservación del objeto.

Avances en técnicas de análisis en conservación

Los avances que se están realizando en técnicas de análisis y diagnóstico aplicados a bienes culturales se están orientando mayoritariamente al diseño y puesta a punto de técnicas de análisis sin toma de muestras. Se están haciendo grandes avances en técnicas como la imagen hiperespectral aplicadas a bienes culturales. Se están diseñando nuevos equipos portátiles sin toma de muestras que permiten aplicar técnicas de análisis que hasta ahora estaban limitadas al traslado de obras al laboratorio o a la toma de micro muestras. Un ejemplo son los nuevos equipos de resonancia magnética nuclear portátiles que se están utilizando para el estudio de pintura y soporte documental (Blümich *et al.*, 2009; 2010) o los equipos FTIR y de fluorescencia rayos X portátiles tipo pistola. Por otro lado, se están diseñando nuevos equipos en los que se unen más de una técnica de análisis como por ejemplo un sistema que permite el análisis *in situ* mediante fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X, que también se está empleando en el análisis de pinturas (Chiari y Serrazin, 2008).

Conclusiones

La calificación sobre técnicas destructivas o no destructivas para el estudio de bienes culturales no puede extrapolarse de la clasificación tradicional que de las técnicas analíticas se realiza en un laboratorio habitual de materiales. Esta diferenciación viene dada por la naturaleza única y no estandarizable de los materiales que conforman los bienes culturales, su evolución y estado de conservación y las alteraciones fruto del paso del tiempo y los avatares que la historia ha producido en su naturaleza material y propiedades físicas.

En este sentido sería deseable que se revisara en el corpus normativo y en las recomendaciones internacionales toda terminología en relación con el uso de técnicas de estudio aplicadas a la conservación de los bienes culturales para evitar el desconcierto y la confusión entre los profesionales que desde distintos ámbitos se dedican a la custodia del patrimonio cultural.

En este escenario, el uso de técnicas complementarias, partiendo de barridos físicos y químicos generalizados que permitan minimizar los puntos de toma de micro muestras y optimizar la interpretación de los resultados analíticos es la metodología que proporciona mejores resultados, como corroboran los resultados obtenidos por los laboratorios de los institutos de conservación de bienes culturales.

Por último, al constituirse como una excelente herramienta de documentación, no sólo para la investigación sino también para la conservación de los bienes culturales, los profesionales responsables de su gestión pueden utilizarla como un instrumento de planificación y establecer prioridades de intervención tanto en un bien cultural aislado como en conjunto.

Agradecimientos

A todos aquellos compañeros y profesionales sin cuya contribución, trabajo y esfuerzo, no sería posible este avanzar en la conservación del patrimonio cultural.

Bibliografía

- ARCHIVE, I. O. (2012): ICOMOS Open Archive [en línea]. Disponible en: <<http://openarchive.icomos.org/view/subjects/F.html>> [Consulta: 10 de junio de 2012].
- BLÜMICH, B.; CASANOVA, F., y APPELT, S. (2009): «NMR at low magnetic fields», en *Chemical Physics Letters*, vol. 477, pp. 231-240.
- BLÜMICH, B.; CASANOVA, F.; PERLO, J.; PRESCIUTTI, F.; ANSELMi, C., y DOHERTY, B. (2010): «Noninvasive Testing of Art and Cultural Heritage by Mobile NMR», en *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, pp. 761-770.
- CENTRE, U. I. D. (2003): *Wall paintings: ICOMOS principles for the preservation and conservation-restoration of wall paintings*. Paris: Centre de Documentation de l'ICOMOS.
- CHIARI, G., y SERRAZIN, P. (2008): «Portable non-invasive XRD/XRF instrument: A new way of looking at objects surface», en *9th International Conference on NDT of Art*. Jerusalem, Israel.
- DENKER, A.; DOWSETT, M.; ADRIAENS, A., y GIUMLIA-MAIR, A. (2006): *COST Action G8: Non-destructive Analysis and Testing of Museum Objects*. Fraunhofer IRB
- DOEHNE, E., y PRICE, C. A. (2010): *Stone conservation: an overview of current research*. Getty Conservation Institute.

- ERKAL, A.; D'AYALA D., y SEQUEIRA, L. (2012): «Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials», en *Building and Environment*, vol. 57, pp. 336-348.
- FERRAZZA, L.; JUANES BARBER, D., y OHIRIHUEL FERRÁNDIZ, M. (2012): «A case study on wooden polychromed sculpture: the Virgin of the Inmaculada Concepción», en *ICOM-CC. Polychrome Sculpture: Artistic Traditions and Construction Techniques Symposium*. Glasgow.
- FRANCE, C. D. R. E. D. R. E. M. D. (2012): «Centre de Recherche et de Restauration es Musées de France» [en línea]. Disponible en: <http://www.c2rmf.fr/homes/home_id21888_u112.htm> [Consulta: 10 de junio de 2012].
- GARCÍA, M.^a A.; GÓMEZ, M.; JUANES, D., y VEGA, C. (2010): «The Sky of Salamanca. An Example of Experimental. Methodology Applied to a Singular Work of Art», en *2nd Latin-American Symposium on Physical and Chemical Methods in Archaeology, Art and Cultural Heritage Conservation*. Edición de José Luís Ruvalcaba Sil, Javier Reyes Trujeque, Jesús Ángel Arena Alatorre y Adrián Velázquez Castro Cancún. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, pp. 23-28.
- GARSDIE, P., y O'CONNOR, S. (2007): «Assessing the risks of radiographing culturally significant textiles», en *e-Presevation Science*, vol. 4, pp. 1-7.
- GÓMEZ, M.; JUANES, D.; NAVARRO, J. V.; MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M.; ALGUERÓ, M.; GONZÁLEZ, E., y ARTEAGA, A. (2008): «Revisión y actualización de los análisis de la policromía de la Dama de Baza. Comparación con la Dama de Elche», en *Bienes culturales. Ciencias aplicadas al patrimonio*. Madrid: Instituto del Patrimonio Histórico Español, vol. 8, pp. 211-222.
- GUPTA, D. (1999): «Fastness properties of natural dyes. Part I: Introduction and review of literature», en *Colourage*, vol. 46, pp. 35-38.
- GUTIÉRREZ, C. (2011): «Ventajas y limitaciones del análisis de los bienes culturales con PIXE: el caso de los vidrios romanos y de los pigmentos blancos en la pintura», en *La ciencia y el Arte III. Ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 269-280.
- HERITAGE, R. I. F. C. (2012): *Painting Laboratory* [en línea]. Disponible en: <<http://www.kikirpa.be/EN/50/349/Painting.htm>> [Consulta: 10 de junio de 2012].
- JANSSEN, K., y GRIEKEN, R. (2004): *Non-destructive microanalysis of cultural heritage materials*. Amsterdam, Elsevier.
- MANTLER, M., y KLIKOVITS, J. (2004): «Analysis of art objects and other delicate samples: Is XRF really nondestructive?», en *Advanced in X Ray analysis*, vol. 47, pp. 42-46.
- MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M., y JUANES, D. (2008): «Aplicación de métodos de análisis sin toma de muestra en fotografía histórica. Estudios de una colección procedente del Museo Sorolla», en *Bienes culturales. Ciencias aplicadas al patrimonio*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 147-156.
- MARTÍN DE HIJAS, C.; JUANES, D., y GARCÍA, M.^a A. (2004): «Análisis de los documentos autógrafos de isabel i pertenecientes al fondo documental del Monasterio de nuestra Señora de Guadalupe», en *Bienes culturales. Guadalupe y la Reina Isabel*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 81-102.
- MCLAREN, K. (1956): «The spectral regions of daylight which cause fading» en *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, vol. 72, pp. 86-99.
- O'CONNOR, S., y BROOKS, M. M. (2007): *X-radiography of textiles, dress and related objects*. Amsterdam; London: Elsevier/Butterworth-Heinemann.

- PÉREZ, C.; JUANES, D., y DEL EGIDO, M. (2010): «Las ciencias experimentales en los institutos de conservación», en *La Ciencia y el Arte II. Ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 9-17.
- PÉREZ GARCÍA, C., y JAÉN SÁNCHEZ, M.^a G. (2011): «Hallazgo de manuscrito oculto en dos casullas. Ejemplo del estudio paralelo de tejidos conservados en la geografía valenciana con piezas de la colección de the Hispanic Society of America», en *L'art dels velluters: sederia de los siglos XV-X*. Valencia: Consorci de Museus de la Comunitat Valenciana.
- PINNA, D.; GALEOTTI, M., y MAZZEO, R. (2009): *Scientific examination for the investigation of paintings: a handbook for conservator-restorers*. Firenze: Centro Di.
- TORRACA, G. (1982): «The Scientist's Role in Historic Preservation with Particular Reference to Stone Conservation», en *Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments*. Washintong: The National Academies Press, pp. 13-21.

I. Técnicas de análisis aplicadas a bienes culturales

Estudio radiológico de las momias egipcias del Museo Arqueológico Nacional de Madrid

Esteban Llagostera Cuenca

Colaborador científico del IPCE

estebanllagostera@hotmail.com

Resumen: Este artículo trata, del estudio radiológico realizado a las momias egipcias que se encuentran en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid. Dicho estudio fue llevado a cabo en los primeros meses del año 1976, en el propio museo, a petición del entonces director el profesor doctor Martín Almagro Bosch.

Palabras clave: Egipto, momia, falsificación, radiología, paleopatología.

Abstract: This paper is about an X-ray study on Egyptian mummies of the Museo Arqueológico Nacional of Madrid. The research was done within the premises of the Museum, on personal request of the Museum Director, Martín Almagro Bosch, and was performed during the first three months of 1976.

Keywords: Egypt, mummy, forgery, radiology, Palaeopathology.

En el año 1816 Madrid quiso hacer un obsequio a la reina doña Isabel de Braganza, segunda esposa del rey Fernando VII, según consta en el acta municipal del día 5 de abril de ese año, convirtiendo la huerta del licenciado Francisco del Bayo, el Almacén de Aceite y Pescado del Ayuntamiento de Madrid y otras propiedades más, en un precioso jardín que, según el cronista y escritor Mesonero Romanos¹ (1803-1882): «Mide nada menos, que la considerable extensión de más de 13 fanegas² de tierra y en su centro tiene un lindísimo palacio, decorado con bellas pinturas al fresco y suntuoso adorno de muebles». El techo de ese antiguo palacete, que representa «La Aurora», fue pintado sobre tela por Zacarías González Velázquez y hoy podemos admirarlo en el Museo Romántico de Madrid.

Este obsequio a la reina Isabel fue desde entonces conocido como el «Casino de la Reina», en la acepción primitiva italiana de: casa elegante de recreo para conversar, leer, etc. La pintura sobre tela *La Noche* que, al igual que la anterior, decoraba un techo del Casino de la Reina, fue pintada también por Zacarías González Velázquez (hoy se encuentra en el Museo Romántico de Madrid).

¹ Primer cronista oficial de Madrid.

² La fanega es una tradicional unidad de medida para áridos. En Castilla, equivalía a 55,5 litros. A su vez se subdividía en dos almudes o doce celemines. Su origen es anterior al Sistema Métrico Decimal.

Este lugar de recreo y reuniones culturales estuvo situado dentro del triángulo que forman las calles, Embajadores, Ribera de Curtidores y Ronda de Toledo, entre las calles del Casino (de ahí su nombre), Peña de Francia, Las Américas, Santiago el Verde, Huerta del Bayo, Mira El Sol y Ventorrillo. La Ribera de Curtidores no llegaba entonces hasta la Ronda de Toledo como ahora, pues quedaba cortada por los jardines del Casino de la Reina. En el plan urbanístico «El Futuro Madrid» de Fernández de los Ríos, aprobado por el Ayuntamiento de Madrid el 17 de marzo de 1869, se proyectaba la prolongación de la Ribera de Curtidores, que atravesaría la zona ajardinada del Casino de la Reina, pero hasta hoy (144 años después) sólo se ha realizado una mezquina prolongación de la Ribera de Curtidores.

En la actualidad, estas callejuelas se encuentran por detrás de la Escuela Universitaria de Magisterio Santa María y el Instituto Cervantes, cuyos jardines y campos de deporte son parte del antiguo Casino de la Reina.

El 21 de marzo de 1867 se publicó en la *Gaceta de Madrid* un Real Decreto de la reina Isabel II, hija de Fernando VII y de M.^a Cristina de Borbón, por el que se creaba el Museo Arqueológico Nacional. Previamente, la reina Isabel II, había cedido El Casino de la Reina al Estado. La primera sede del Museo Arqueológico Nacional estuvo ubicada en dicho palacete, que fue desmantelado en 1893. El primer director fue Pedro Felipe Monlau (1808-1871)³. Posteriormente, en el mes de julio del año 1895, el Museo Arqueológico fue trasladado a su actual emplazamiento en el 13 de la calle Serrano.

El cronista oficial de la Villa de Madrid y bibliotecario de la reina, Pedro de Répide⁴ (1882-1948), nos ha dejado la siguiente crónica, a propósito de la desaparición del Casino de la Reina: «Más tarde, toda sombra de realeza huyó de aquel jardín, y se instaló en el edificio que ocupara el Casino, el Museo Arqueológico Nacional de Madrid, y más tarde, desapareciendo la vieja Escuela de Veterinaria, vecina de las Salesas Reales, edificóse la nueva Escuela de Veterinaria, en terrenos del Casino, y el regio jardín, ya desmembrado, quedó al servicio de esa institución. El noble edificio de estilo neo-mudéjar, es una de las obras más notables del arquitecto Francisco Jareño, que lo terminó en el año 1881». Realizadas unas reformas, desde el año 1960 alberga al Instituto Cervantes, al haberse trasladado la Escuela de Veterinaria a la Ciudad Universitaria.

Y continúa el cronista Pedro de Répide: «Gracias a que salvóse la elegante puerta, que daba acceso a los jardines por la Ronda de Toledo, es hoy la que da entrada al Parque de Madrid, por la Plaza de la Independencia» (Parque del Retiro).

El actual edificio del Museo Arqueológico es también obra del arquitecto Francisco Jareño, y fue construido expresamente como Palacio de Bibliotecas y Museos; en él se celebró la «Exposición Conmemorativa del IV Centenario del Descubrimiento de América». Desde que finalizó esa magna exhibición alberga las colecciones del museo, compartiendo el edificio con la Biblioteca Nacional.

Algunas de las piezas que se exhiben actualmente en el MAN (Museo Arqueológico Nacional), se encontraban con anterioridad repartidas entre el Museo del Prado, el Gabinete Numismático y también en la sección de Antigüedades de la Biblioteca Nacional y en la colección de la Escuela Superior de Diplomática. Lógicamente, en años sucesivos las colecciones se fueron ampliando con los bienes encontrados en las excavaciones realizadas por los miembros

³ Catedrático de la Universidad de Barcelona y doctor en Medicina.

⁴ Cronista oficial de Madrid. Escritor y periodista.

del Museo Arqueológico en diversos lugares, como por ejemplo: el Cerro de los Santos (Montealegre, Albacete), Grecia, Egipto, etc. (los llamados por aquel entonces «Viajes Científicos») y también, por las excavaciones actuales en Heracleópolis Magna y Oxirrínco (Egipto), así como donaciones y adquisiciones varias.

Con motivo de la «Exposición de Arte Faraónico», celebrada en Madrid entre octubre de 1975 y enero de 1976, se impartieron, en la Biblioteca Nacional, una serie de conferencias sobre «Historia y Civilización del Antiguo Egipto». Estuve invitado a las mismas, y el 11 de diciembre de 1975, pronuncié una conferencia titulada: «Las Radiaciones Ionizantes en arqueología: Radiografía de Momias Egipcias».

A esta conferencia, asistió el profesor Martín Almagro, entonces director del museo y comisario de la exposición y actos culturales. Al terminar mi presentación el doctor Almagro, ante el numeroso auditorio, se dirigió a mí y me pidió que le hiciera el estudio radiológico completo de las momias egipcias, tanto humanas como zoológicas que posee el museo. Accedí a ello muy gustoso y quedamos en mantener una reunión de trabajo, para realizar todos los preparativos necesarios y programar aquel proyecto tan importante.

Llevado a cabo este encuentro, al que asistió también doña M.^a Carmen Pérez Díe, actual conservadora de la Sección de Antigüedades Egipcias y del Próximo Oriente, se acordó comenzar la investigación en el mes de febrero de 1976, habida cuenta que había que preparar y programar sistemáticamente, todos los pasos a seguir, además quedamos de acuerdo en publicar todo el trabajo y los resultados obtenidos, como así se hizo dos años después.

Deseo destacar que, conté con la total colaboración de M.^a Carmen Pérez Díe, la cual, durante los meses que duró el estudio radiológico, trabajó paralelamente realizando la parte histórica del proyecto y me ayudó en todo momento facilitándome toda la información que necesitaba. El profesor Martín Almagro, puso el museo entero a mi disposición, facilitándome todo tipo de ayuda. Debido a que realizamos toda la exploración radiológica, con un tipo especial de película de tipo industrial (las momias son cuerpos deshidratados) y que en el museo no poseían laboratorio de revelado, tuve que realizar el procesado de la película en la consulta radiológica de un profesional amigo, teniéndome que trasladar frecuente y repetidas veces a ese laboratorio, durante las diez semanas que duró la exploración de las momias.

Afortunadamente, la colección egipcia no estaba por aquel entonces expuesta al público, lo cual facilitó enormemente nuestra labor, al no tener que trabajar por las noches, como es lo habitual, con lo cual se evita tener que cerrar las salas. Una vez conocida la magnitud exacta de las piezas objeto de la investigación y del trabajo a realizar con las mismas, establecimos un orden de procedimiento y de prioridades.

Primero radiografié las momias humanas, bautizándolas por el orden en que las iba estudiando. Es costumbre, el privilegio que tiene el autor, de asignarles un nombre por el que después serán reconocidas, independientemente del verdadero nombre de la momia, si es que lo tiene. Este orden, y nombre del bautizo, no corresponde a ningún criterio cronológico, ni a la secuencia de los números de inventario del museo, del expediente o del catálogo. Los nombres que les di, fueron: momia Madrid-I (en números romanos), Madrid-II, Madrid-III, etc. que fue el orden que seguí al radiografiarlas.

Referente a las momias zoomorfas (posteriormente pude observar que no todas eran zoológicas), las bauticé como paquetes (de paquetes funerarios) y les añadí las letras mayúsculas en la secuencia del abecedario, es decir: Paquete Madrid-A, Paquete Madrid-B, etc. de esta manera se facilita su identificación.

La toma de radiografías se realizaron en los almacenes donde se encontraban guardadas, desde hacía más de noventa años. Para realizar el estudio, utilicé un aparato de rayos X portátil, de mi propiedad.

A pesar de ello, tuve que mover las momias del lugar en que se encontraban, hasta una zona de la sala más despejada donde íbamos a proceder a su examen radiológico. Esto lo hicimos con sumo cuidado, y organizamos el procedimiento de trabajo de tal forma, que sólo hubiese que moverlas una sola vez, durante toda la exploración radiográfica.

Para lograr este ideal, se me ocurrió diseñar una especie de «cama» cuyo somier era de alambres de acero inoxidable (al igual que toda la «cama» para evitar cualquier óxido), estando sujetos al borde de la misma, por unos muelles. Las patas de esta «cama» son muy cortas (unos 18 cm), con objeto de permitir el poder deslizar, por debajo de ella, los chasis que albergan en su interior la película radiográfica.

Una vez realizadas las pruebas de exposición y de centrado correspondientes, procedí a realizar el estudio, en el siguiente orden. Siempre, hago un examen radiológico completo de cada momia el cual, según mi técnica, consta de 24 radiografías: siete ántero-posteriores; siete pósterio-anteriores; siete laterales y tres en los pies; lo cual no quiere decir que pueda hacer algunas más, si los hallazgos así lo aconsejasen. En este caso serían zonografías.

Voy a facilitar algunos pequeños datos de las momias humanas, con objeto de ir las conociendo mejor: Madrid-I y Madrid-II son parte de la colección que Eduardo Toda i Güell⁵ (1885-1941). Cónsul de España en El Cairo, en el año 1887 las vendió al museo; Madrid-I, es anónima, pues por ninguna parte aparece su nombre. En Madrid-II, en la inscripción de sus cartonajes se hace referencia a un sacerdote del dios Min llamado Nesmin. Madrid-III, fue donada al MAN por el Rey Daminos en 1887. No lleva cartonajes aunque el féretro con el que entró en el museo, dice que pertenece a un tal Bak.

Madrid-IV, fue donada al Museo por Ignacio Bauer, en el año 1925; el personaje se llama Nespamedu. Madrid-V, fue adquirida a Lameyer, quien dijo que procedía de Saqqara. El féretro en el que venía es de un personaje llamado Tare-Meten-Bastet.

Hablando solamente de las momias humanas, se trata de una colección bastante amplia, habida cuenta que en España, tenemos solamente 10 momias egipcias enteras, en nuestros museos:

- Seis en Madrid (una en la Facultad de Medicina: la hija de Ramsés II).
- Una en el Museo del Oriente Bíblico de Montserrat (una mujer joven).
- Una en Palma de Mallorca (Seminario Conciliar).
- Una en Vich (cantora del templo de Amón).
- Una en Villanueva y Geltrú (un niño pequeño).

Que nosotros sepamos, no existe ninguna otra momia egipcia entera.

En la colección privada que el oftalmólogo Joaquín Barraquer Moner tiene en su clínica de Barcelona, existen dos cabezas de momias egipcias totalmente desvendadas y anónimas. Le fueron regaladas por un paciente; un médico egipcio agradecido, que al regresar a El Cairo se hizo con dos momias y les cortó la cabeza con una sierra (se pueden ver perfectamente, las marcas de los dientes en el cuello). De ambas, hice un estudio muy detallado, que publiqué en su día.

⁵ Diplomático, arqueólogo y sinólogo. En esos años España no tenía todavía embajador en Egipto.

Les vamos a detallar el estudio realizado a cada una de las momias del MAN y así las iremos inspeccionando en profundidad. Se van a introducir conmigo en su interior, con objeto de que las conozcan por dentro, y no sólo por las vendas exteriores. El hombre está acostumbrado a conocer y reconocer las cosas que le rodean, por su aspecto exterior, debido a la limitación de sus órganos visuales para hacerlo de otro modo. Es decir, sólo conocemos la piel o superficie del mundo que nos rodea. Para poder ver los objetos «por dentro», en aquellos años, teníamos que acudir a los rayos X.

Madrid-I

Sus medidas externas son: altura: 159 cm; anchura máxima en hombros: 34 cm.

Se trata de una momia adulta, vendada y partida interiormente a la altura de las rodillas. Las vendas y bandaletas externas se encuentran en muy mal estado de conservación, y en algunas zonas, como en la cabeza y la pelvis, están sueltas y rotas, aunque no se exterioriza ninguna parte de su anatomía. Está cubierta con cinco plantillas policromadas y un cartónaje-máscara. No existe féretro conocido (fig. 1).



Figura 1. Momia Madrid-I.

Informe radiológico

- Cráneo: no presenta fracturas. La boca se encuentra ligeramente abierta (1-1,5 mm) y le faltan algunas piezas dentales. Tiene desgaste de las caras triturantes por abrasión. La cabeza se encuentra ligeramente inclinada hacia delante y a la derecha. Presenta signos muy marcados de falta de osificación, de las suturas de los huesos del cráneo, lo cual es síntoma de raquitismo, por falta o inadecuada alimentación en la infancia.

Las partes blandas de la nariz y pabellones auditivos se encuentran muy bien conservados, al igual que ambos labios. Los cabellos se encuentran impregnados de betunes y bálsamos endurecidos.

El aspecto de la región nasal hace pensar que fue escogida esta vía para la extracción cerebral debido a la rotura del tabique; lo cual es muy importante para la datación, puesto que antes de la XVIII dinastía no hay evidencia de tal práctica en la momificación.

- Tórax: está muy bien conservado. Ambas cavidades pulmonares aparecen rellenas con material de diferente densidad y apariencia granular, lo cual hace pensar que se trate de arena y bitumen⁶. Parece que el mediastino fue respetado, pues en ambas cavidades el relleno es independiente. Los brazos están extendidos a lo largo del cuerpo y presentan normalidad anatómica.

En el hemotórax derecho, a la altura de la XII vértebra dorsal y a 2,5 cm del perímetro torácico, se observa entre el material de relleno un objeto parecido a un anillo. Tiene forma de serpiente, con cabeza y ojos diferenciados; de bordes bien definidos, no llega a cerrarse del todo. Creemos que se trata de un anillo de metal o un amuleto de oro, siendo por su forma y situación dentro del tórax un objeto atípico.

- Abdomen: la cavidad abdominal se encuentra igualmente ocupada por material de relleno. Todas las articulaciones y huesos, que aparecen, están dentro de los límites normales. No hemos podido evidenciar paquete visceral alguno, aunque de existir no sería visible debido al compacto relleno. La cavidad pelviana, está igualmente ocupada por el material de relleno.
- Piernas y pies: los fémures y rodillas, presentan total normalidad. Existe una gran separación de la articulación tibio-femoral, la cual fue producida sin duda alguna, durante el proceso de momificación; lo llamamos traumatismo *post-mortem*. La tibia derecha, tiene una rotación externa de unos 80 grados y ambos peronés están fracturados. Todas estas anomalías, indudablemente, son de origen *post-mortem*.

Ambos pies están igualmente dentro de los límites anatómicos normales, aunque el derecho, así como la tibia, están rotados externamente, debido a la separación de la articulación de la rodilla comentada.

- Conclusión: se trata de una momia femenina, de unos 25 años de edad a su fallecimiento, de complexión débil y seguramente enfermiza. Probablemente, su momificación se realizó durante un periodo de tiempo situado entre la XXIII y la XXVI dinastías (818-525 a. C.).

⁶ También llamado betún de Judea. Es una mezcla de líquidos orgánicos, altamente viscosa, negra y pegajosa. Al enfriarse y/o secarse, se solidifica y se adhiere tenazmente.

Madrid-II

Altura máxima: 163 cm.

Momia adulta vendada. Llama inmediatamente la atención su carencia de pies. Al retirarla del féretro en que se encontraba, nos sorprende lo liviano de su peso (unos 6 kg) y la ausencia total del olor característico de las momias egipcias. Aunque las plantillas que lleva son auténticas, enseguida nos dimos cuenta que se trataba de una falsificación bien hecha, aunque con el fallo de no haberle simulado los pies (fig. 2).

Informe radiológico

- Cráneo: en su cara posterior observamos un tablón de madera revestido de tela de saco sujeta a la tabla con unos clavos modernos (hechos a máquina), así como por algunos alfileres de tipo actual. Para darle forma utilizaron abundante tela de saco y trapos, fijados en la posición deseada, por unas vendas exteriores envejecidas y manchadas expresamente.
- Pies: presentan las mismas características que la «cabeza». Creemos, que se trata de una falsificación relativamente moderna que, situamos inmediatamente anterior al año 1887, fecha en que esta falsa momia fue adquirida por el Museo Arqueológico Nacional de Madrid. Se da la circunstancia, que esta «momia» le fue vendida a Eduardo Toda i Güell, cónsul de España en El Cairo, dentro de un féretro auténtico y también con cartonajes auténticos. Por lo tanto, no es de extrañar que le engañasen, habida cuenta que nuestro cónsul no era un experto, ni tampoco tenía medios para autentificarla *in situ*.

No nos cansaremos de repetir, para evitar estos engaños, que el 90% de los cartonajes y sarcófagos no pertenecen a las momias que los acompañan y viceversa. No en su origen, sino por haberlos removido después, y así poder obtener mayores beneficios, al venderlos por separado.

- Conclusión: se trata de una burda falsificación, enmascarada con unos auténticos cartonajes.



Figura 2. Momia Madrid-II.

Madrid-III

Altura: 156 cm; anchura máxima entre hombros: 32 cm (las medidas son exteriores con el vendaje incluido y no del cuerpo humano que las vendas encierran).

Momia adulta y vendada, cubierta con un sudario de lino completamente suelto.

Al levantar el sudario vemos que el rostro está desvendado, aunque cubierto totalmente por resina solidificada y restos de vendaje adherido. Su cara no se puede distinguir. El occipucio presenta un semicírculo libre de vendas de unos 2,5 cm. Posee una bandaleta, a la altura de los tobillos, que dando dos vueltas, le sujeta el sudario. Está desprovista de plantillas y llegó al museo dentro de un féretro antropomorfo. Es pesada dura y de una sola pieza (fig. 3).

Informe radiológico

- Cráneo: no se observan fracturas. La boca se encuentra cerrada y le faltan 19 piezas dentales; nueve en el maxilar superior y diez en el inferior. Llama la atención varias piezas dentales sueltas, que en la radiografía ántero-posterior se pueden ver a la altura de la región nasal. Pero en la radiografía lateral podemos apreciar que están situadas en la faringe y glotis, encontrándose completamente libres. La cavidad bucal, se encuentra ocupada por un taponamiento, lo cual induce a pensar que, al proceder a esta operación provocaron, estos arranquitos debido al muy precario estado de su boca, por padecer una grave paradontosis, que pudo provocar una extensa infección y septicemia, que habría llegado a hacer desaparecer a los alveolos por una suma delgadez de su maxilar inferior. Durante el proceso de momificación, al desprenderse los dientes, quedaron en el lugar que hoy ocupan. Esto ocurrió, debido a la posición yacente durante el proceso de momificación.

Además, en la radiografía, podemos apreciar perfectamente, el nivel horizontal de resina solidificada que, empapando las vendas y cabellos, evidencia el masivo uso de resina fundida que se utilizaba en épocas tardías. La columna cervical aparece intacta, con una manifiesta rigidez en toda su extensión.

- Tórax: todos sus huesos aparecen dentro de sus límites normales. Presenta ligera calcificación de los cartílagos costales. Las clavículas están muy elevadas, debido a la fuerte compresión del vendaje. Existen dos masas compactas de resina solidificada al parecer asidas por ambas palmas de las manos. Pero en la proyección radiográfica lateral realizada se ve que se encuentran en ambos ápices pulmonares. Todo el hemitórax derecho está ligeramente ocupado por material de relleno, de aspecto granular, más en las bases que en los ápices.
- Abdomen: en el lado izquierdo, podemos apreciar una opacidad circular de unos 5 cm de diámetro que hace pensar se trate de una torunda de lino empapada en resina, que taponaba la incisión tradicional de la evisceración del cuerpo, durante el proceso de momificación. En todo el abdomen existe material de relleno. Estos materiales, en general, están formados por, arena, serrín, lino, resina, cascotes, gravilla, betún de Judea, etc. La pelvis es de aspecto ginecoideo y dentro de ella, en el lado derecho, se observa un objeto al parecer metálico de bordes muy irregulares que, a pesar de haberlo analizado exhaustivamente, no hemos podido identificar. Es un objeto totalmente atípico: ¿amuleto?, ¿artefacto de la momificación?
- Piernas y pies: anatómicamente hablando, en los muslos no presenta ninguna anomalía, pero entre ambos existe gran cantidad de material de relleno (gravilla, resina, vendas de lino

y arena). Se observa cierta calcificación de ambas arterias femorales. No existe anomalía manifiesta, ni cuerpo extraño alguno, en las rodillas ni en las piernas.

- Los pies, se encuentran en muy buen estado de conservación y no se observa ninguna alteración anatómica, ni amuleto.
- Conclusión: se trata de una momia femenina, de 60-65 años de edad al morir. Presenta ciertos padecimientos propios de su edad, como son: arterioesclerosis, pérdida de piezas dentales, artritis y calcificaciones de los cartílagos costales. Es una momia del período Ptolemaico tardío.

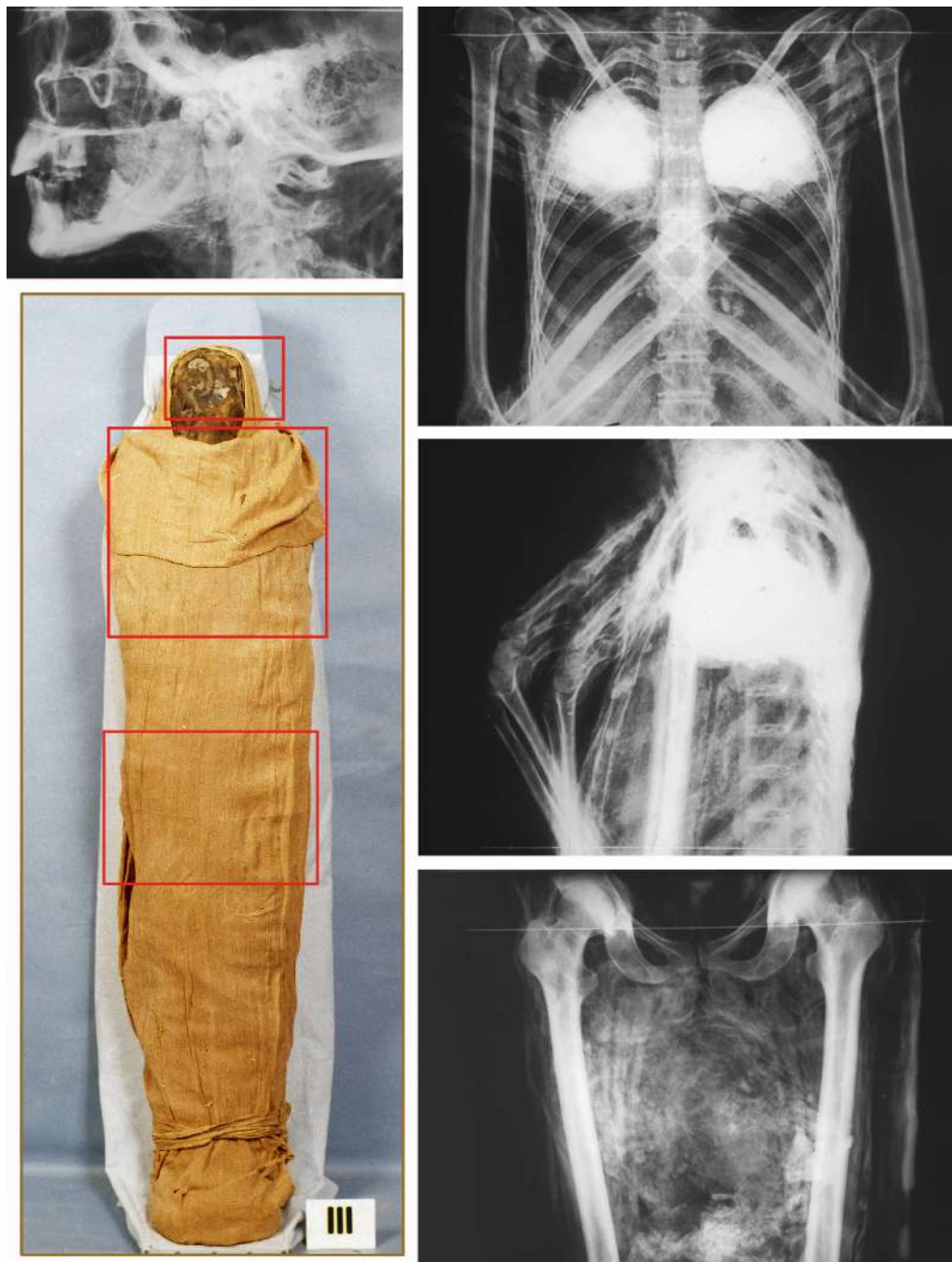


Figura 3. Momia Madrid-III.

Madrid-IV

Altura: 160 cm; anchura máxima entre hombros: 39 cm.

Momia adulta y totalmente vendada; es muy pesada (40-45 kg), gruesa y de una sola pieza. No se exterioriza ninguna parte de su anatomía. Está cubierta por cinco plantillas doradas con relieves de dioses y jeroglíficos, de fina realización, las cuales, en la cabeza y en los pies son cartonajes completos, llegando a no poder quitarle los cartonajes de ambas, para el estudio radiográfico, sin causarle daños irreparables. Por ello no se retiran.

Por debajo de las plantillas existe un sudario muy deteriorado, de lino muy fino, y por debajo de éste se puede observar un vendaje recubierto de bitumen oscuro, en varios planos de vendas y betún. Es una particularidad en los vendajes de muchas momias (fig. 4).

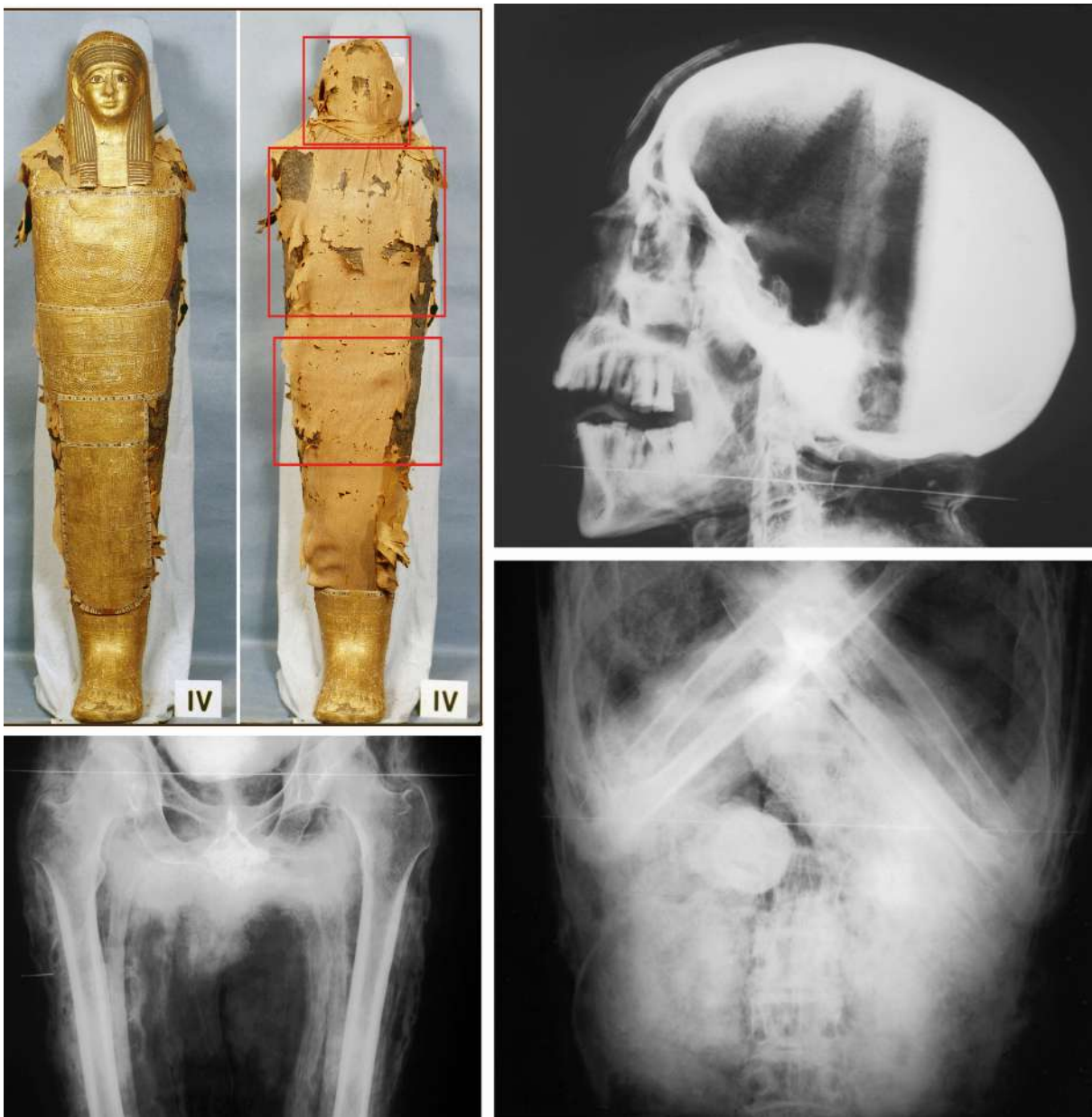


Figura 4. Momia Madrid-IV.

Informe radiológico

- **Cráneo:** es un cráneo grande, de indudable aspecto androide. No presenta ningún tipo de fracturas ni fisuras. El tabique nasal está fracturado; sin duda alguna fue roto al realizar la evisceración cerebral por esta vía. Las cavidades orbitarias presentan como relleno pequeños paquetes de lino impregnado en bitumen. Las fosas nasales están taponadas. La boca se encuentra entreabierta 1,5 cm y en la proyección ántero-posterior, se puede apreciar un objeto que recubre el labio inferior y ligeramente el borde del superior, de forma más o menos rectangular y a la altura de los incisivos y caninos. En la proyección lateral, se puede apreciar que este objeto tiene una aleta que se introduce en la boca, descansando sobre la lengua. Se trata de una placa lingual que, por la densidad que presenta, no es metálica; creemos pueda ser de cuero o material similar. Existe un extenso nivel de bitumen solidificado en la parte posterior del cráneo, así como otro menos denso a unos 3,5 cm por encima del anterior. Este bitumen fue introducido en el cráneo en estado de fusión, por vía nasal, después de la extracción cerebral. El primer nivel se forma cuando el betún de Judea está aún muy caliente y el segundo nivel, se produce al solidificarse y contraerse. Téngase en cuenta que el proceso de momificación se realizaba siempre con el cadáver en posición horizontal y que su duración, era de unos 70 días.

Volviendo a la placa lingual, aunque no es muy corriente, no nos debe extrañar puesto que su propietario es un sacerdote del templo del dios Min. Recordemos que, al leer un sacerdote los libros sagrados, al finalizar dice: «palabra de Dios». En la liturgia de cualquier religión (antes y ahora), el sacerdote lleva la palabra de Dios al pueblo o habla en nombre de Dios a los fieles. Por lo tanto, el verbo divino, la palabra de Dios, materializada en la lengua del sacerdote, era protegida (en el Antiguo Egipto) durante el proceso de momificación, con estas placas linguales.

- **Tórax:** este sacerdote tenía un problema en la columna vertebral, que se distingue en su curvatura lateral (cifosis derecha). Ambos hemitórax muestran cierta opacidad, debida a la presencia de bitumen intratorácico y a cuatro paquetes que contienen sus vísceras. Estos paquetes se prolongan hacia el abdomen, lo cual nos muestra que el diafragma no fue respetado. Cada uno de estos paquetes representa a uno de los cuatro hijos de Horus⁷ que eran los dioses protectores de las vísceras de los muertos. Tiene los brazos cruzados sobre el pecho; el derecho sobre el izquierdo, con las manos cogiendo los brazos opuestos, a la altura de los músculos deltoides. Los dedos pulgares están unidos al resto de los dedos (no en oposición). En ambas muñecas, se apreciaban una especie de pulseras, de 21 mm de ancho, de aspecto no metálico.

En la proyección lateral, se observa posteriormente, gran cantidad de un nivel de resina, que tiene un espesor medio de 12 cm. En la parte anterior, que está libre, se pueden diferenciar perfectamente los paquetes viscerales.

- **Abdomen:** en esta cavidad, continúan los paquetes viscerales, el material de relleno y el bitumen fundido. Éste se extiende desde el tórax, con gran profusión, por toda la cavidad. En la proyección lateral, podemos apreciar a la altura de la incisión de la evisceración, una figurilla

⁷ Dios celeste de la antigua mitología egipcia. Osiris, Isis y Horus, fueron la tríada más importante de los dioses egipcios. Se le representa con cabeza de halcón, ciñendo las coronas del Alto y del Bajo Egipto. Sus cuatro hijos representaban los puntos cardinales, y fueron: Imsety, con cabeza humana, era el dios protector del hígado del difunto. Representaba el viento del sur; Hapy, con cabeza de babuino, era el dios protector de los pulmones. Representaba el viento del norte; Duamutef, con cabeza de chacal, era el dios protector del estómago. Representaba el viento del este, y Qebsenuf, con cabeza de halcón, era el dios protector de los intestinos. Representaba el viento del oeste.

con cabeza humana de 7 cm de longitud, que parece ser uno de los cuatro hijos de Horus con cabeza humana, posiblemente Imsety, que era el dios protector del hígado. Es parcialmente radiolúcida (transparente a los rayos X), lo cual nos induce a pensar que sea de cera o de cera y betún de Judea. Estos amuletos, son bastante frecuentes, pudiéndolos encontrar realizados en diversos tipos de materiales.

Solicitamos, a la Facultad de Farmacia, de la Universidad Complutense de Madrid, un análisis del bitumen encontrado entre las capas del vendaje, para diferenciarlo de una posible resina; el resultado proporcionó, la existencia de un betún natural oxidado, en el espectro infrarrojo⁸.

- Pelvis: la estructura ósea no presenta alteraciones dignas de mención, excepto ligeras modificaciones reumáticas de las articulaciones. Un paquete de relleno la ocupa en gran parte. Es de indudable aspecto androide.
- Piernas y pies: en ambos muslos se aprecia a la perfección las arterias femorales calcificadas. No se observan fracturas, pero sí la ausencia de los cartílagos articulares en las rodillas, lo cual hace que los fémures y las tibia aparezcan como muy juntos e impactados. Podría ser también que se haya producido una reabsorción de los mismos debido al proceso de momificación.

La simetría en la colocación de los pies, tanto en la proyección cráneo-caudal como en la lateral, es admirable. El pie derecho parece una réplica del izquierdo y viceversa. Es el trabajo milimétrico de un excelente artesano. No existe anomalía alguna. El cartonaje o «bota» se manifiesta claramente.

- Conclusión: se trata de una momia masculina adulta, muy bien realizada, con una técnica muy depurada y utilizando gran cantidad de bitumen. Su edad al morir era de 40-50 años. La momificación fue realizada durante el periodo Ptolemaico. Tanto el cartonaje de los pies («bota»), como la propia colocación de los mismos, tan simétricos, son típicos de este período, así como los brazos cruzados sobre el pecho, siempre el derecho sobre el izquierdo.

Madrid-V

Momia adulta, desvendada, muy dañada, con abundantes destrozos y falta de varias partes de su anatomía. Le faltan las manos, los pies y con los huesos de las piernas (tibia y peroné) invertidos; los de la pierna derecha en la izquierda y viceversa. Posteriormente, le restablecí estos huesos en su posición anatómica correcta (fig. 5).

Se encuentra en un lento proceso de descomposición pues, además de apestar, gotea muy lentamente a la altura del hemitórax derecho. Por encontrarse en estas pésimas condiciones, no la pudimos mover, pues además, tiene la cabeza separada del cuerpo, por rotura del cuello. Por lo tanto, tuvimos que hacer las radiografías sobre la mesa en que se encontraba, por ello son bastante deficientes y sólo pudimos tomar radiografías laterales, excepto de la cabeza, por estar separada a nivel de la quinta vértebra cervical.

- Cráneo: debido a la ausencia del tabique nasal, la vía de extracción del cerebro fue sin duda alguna a través de las fosas nasales. El maxilar inferior está fracturado a la altura del primer premolar del lado derecho, faltando el resto, si exceptuamos un residuo de la rama ascen-

⁸ Nuestro agradecimiento a la Facultad de Farmacia.



Figura 5. Momia Madrid-V.

dente del lado izquierdo. Faltan varias piezas dentales, y las que están presentes se encuentran muy desgastadas por la abrasión.

Carece de cuero cabelludo, así como de cabellos y de las partes blandas de la cara, aunque existen restos del vendaje de lino y de bitumen adheridos en algunas pequeñas zonas. Dentro de la cavidad craneal presenta dos niveles de resina, los cuales se producen por las causas anteriormente descritas, en Madrid-IV.

- Tórax, abdomen, pelvis y brazos: a través de los varios orificios por rotura que presenta en sus cavidades naturales, se observa gran profusión de bitumen en su interior, lo cual se corrobora por radiografía. La pelvis presenta varias fracturas, especialmente el hueso ilíaco del lado izquierdo y está desprovista de partes blandas. Por la posición de los huesos fracturados de los antebrazos y los muñones de las manos (que no existen), éstas debieron estar situadas sobre la región pudenda.
- Conclusión: momia de sexo incierto, en muy mal estado de conservación –debido a haber sido desvendada cruentamente y por manos muy inexpertas– no sólo a nivel egiptológico, sino también en el plano anatómico. Lo más atrevido de este mundo es la ignorancia. Creemos que puede pertenecer a un período de tiempo comprendido entre la XXIII y la XXVI dinastías, o quizá podamos extenderla hasta la XXX dinastía.

En el Museo Arqueológico Nacional, también existen paquetes funerarios zoomorfos, que vamos a analizar.

Paquete Madrid-A

Longitud total: 37 cm.

Es de los llamados por su forma, de ibis, estando confeccionado con tejido de lino. Fue realizado con arte y buen gusto. Su forma es cónica, siendo más ancha en la parte superior. En su tercio inferior presenta una escarapela hecha de lino combinando los colores beige y marrón y en la parte superior está el dios Toth con cabeza de ibis sagrado, sentado en un trono arcaico. Ambos motivos, están cosidos a la pieza de lino que forma la totalidad del paquete.

Informe radiológico

En su interior solamente son visibles dos huesos largos, de un ave sin identificar. El resto del paquete contiene, posiblemente, solo serrín u otra materia similar, debido a su liviano peso.

Paquete Madrid-B

Medidas: 8 × 14 cm.

Paquete de forma compacta, envuelto en tiras de tejido de lino embadurnadas de betún. Presenta abundantes ataques de insectos necrófagos.

Informe radiológico

Radiológicamente es un objeto mudo. No se observa nada en su interior, por lo que parece ser un objeto amorfo. Podría ser un pedazo de carne momificada, para alimento del muerto en la otra vida.

Paquete Madrid-C

Longitud total: 13 cm.

Paquete de forma parecida a una momia de halcón. Está vendado y embadurnado exteriormente con abundante bitumen.

Informe radiológico

Por radiografía, se observa una masa opaca y lo que parece un conjunto de huesos de ave, sin haber podido diferenciar cabeza alguna. ¿Es una momia falsa?

Paquete Madrid-D

Longitud total: 27 cm.

Paquete de forma cilíndrica con «cabeza» en una extremidad; está vendado con bandeletas de dos colores, rotas y en muy mal estado de conservación.

Informe radiológico

Los últimos 5 cm opuestos a esa «cabeza» fueron añadidos después de haber realizado primeramente un paquete más pequeño. En su interior se aprecian, en total desorden y fracturados, diversos huesos que no acertamos a determinar a qué animal pueda pertenecer. ¿Tal vez de gato?

Paquete Madrid-E

Longitud total: 37 cm.

Paquete hecho con vendas; algunas policromadas, aunque rotas y deshilachadas. Su estado de conservación es muy deficiente. Tiene cabeza y cuerpo diferenciados. En la parte correspondiente a la boca y por rotura de las vendas, se distinguen unos dientes (fig. 6).

Informe radiológico

Se observa una momia incompleta de gato africano (*Felis silvestris lybica* L.)⁹, debido a que este felino está partido a la altura de las vértebras lumbares y le falta la pelvis, las extremidades inferiores y la cola.

- Cráneo: está completo pero la cabeza está separada del tronco, y tanto las vértebras cervicales como las costillas están sueltas, presentando fracturas y luxaciones múltiples. Los demás



Figura 6. Paquete Madrid-E.

⁹ Carl von Linné. Científico sueco, naturalista, botánico y zoólogo. Se le considera el fundador de la clasificación de los seres vivos o taxonomía. En 1758, publicó su obra trascendental *Systema Naturæ*, en la que estableció la actual nomenclatura zoológica binominal.

huesos del cráneo y de las extremidades anteriores están bien conservados, si exceptuamos la ausencia de algunos dedos en las patas anteriores.

Paquete Madrid-F

Longitud total: 39 cm.

Paquete de los llamados por su forma, de ibis. Se encuentra en muy mal estado de conservación, sobre todo en su parte superior (la más ancha), por la que asoma una pequeña cabeza de cocodrilo suelta, de 4 cm de longitud. Está confeccionado con tejido y vendas de lino, y una especie de red de hilos de lino.

Informe radiológico

Podemos observar un laberinto informe de huesos de ave (sacos aéreos), todos fracturados y en total desorden; el mayor de ellos mide 8 cm de longitud. Hacia la parte inferior, la más estrecha, vemos una pequeña pluma de cola de ave; el tercio inferior está vacío, sin resto alguno.

Paquete Madrid-G

Longitud total: 42 cm.

Paquete que recuerda la forma de un ánade, duro y pesado, envuelto en una pieza de lino, aunque en su interior, no existe vestigio de ningún animal.

Informe radiológico

Se observa una masa de un material granuloso, compacto y aplanado, que ocupa todo el paquete, el cual está roto por su mitad. Creemos que se trata de una burda falsificación. No podemos valorar, ni comprender la presencia de esa pequeña cabeza de cocodrilo.

Paquete Madrid-H

Longitud total: 42 cm.

Paquete hecho con tela de lino, embadurnada con bitumen, lo que le da un color pardo oscuro. Tiene forma de ibis. Por rotura del tejido, en el lateral derecho, deja ver gran cantidad de cálamos de plumas de ala de ave y una pata. En la parte superior, se distingue el cráneo y una cuenca orbitaria vacía (fig. 7).

Informe radiológico

Se distingue perfectamente, la anatomía de un ibis sagrado (*Threskiornis aethiopica* L.). La momia de esta ave se encuentra muy bien conservada y entera, estando su cuerpo doblegado en forma de herradura de manera que su última vértebra se halla situada por debajo del pico.



Figura 7. Paquete Madrid-H.

Las alas y patas se encuentran flexionadas por sus articulaciones. Si desdoblásemos este ibis, tendría una longitud, desde la punta del pico, hasta la última vértebra de 78 cm.

La proyección craneocaudal, presenta una perfecta y total simetría. El animal se encuentra completo y entero. Es una momia muy bien realizada, por manos muy expertas.

Paquete Madrid-I

Longitud total: 32 cm.

Momia con aspecto exterior de cocodrilo, realizada con gusto y arte exquisitos. Su cabeza está embadurnada con betún, mientras que sus ojos y fauces están realzados con tiras de lino de color beige, superpuestas y adheridas, lo que le da un aspecto muy simpático. El cuerpo está primorosamente vendado, con tres capas de bandaletas estrechas formando rombos. Su confección y estilo nos está diciendo que se realizó en época romana (fig. 8).

Informe radiológico

En las tomas realizadas, se observa un pequeño cocodrilo (*Crocodilus niloticus*, L.), cuya cabeza está separada del tronco, y a la cual le falta el maxilar superior y las primeras vértebras cervicales. A dos centímetros de la base del cráneo se inicia la columna vertebral, en la cual, hemos podido contar hasta treinta y cuatro vértebras. Carece en absoluto de las cuatro extremidades, clavículas, omóplatos y de la pelvis. Se trata de un cocodrilo no nato, puesto que no llegó a su desarrollo.



Figura 8. Paquete Madrid-I.

Paquete Madrid-J

Longitud total: 31 cm.

Este paquete tiene forma compacta y típica de halcón, envuelto en vendas de lino embadurnadas profusamente con bitumen. Se diferencia claramente su cabeza (fig. 9).

Informe radiológico

Momia de halcón (*Falco peregrinus*, T.)¹⁰, perfectamente conservada. Existe cierta cantidad de relleno, en la cavidad abdominal. Tiene la cabeza lateralizada unos 45°, el pico entreabierto, y las patas extendidas. Se pueden distinguir perfectamente las plumas de las alas y de la cola.

Esta momia, posee un féretro de madera tallada en forma de halcón, que está de pie sobre sus patas, pero no existen sus garras. Estaba recubierto todo su cuerpo con una capa de pintura dorada, aunque en la actualidad, en la mayoría de su cuerpo, ha desaparecido quedando sólo en la espalda y pecho. En su espalda posee una cavidad tallada en la madera, en forma de hornacina de unos 3 × 9 cm donde reposa la momia del halcón.

Y con estas diez momias zoomorfas terminamos el estudio radiológico de todas las momias egipcias que posee el Museo Arqueológico Nacional de Madrid.

¹⁰ Marmaduke Tunstall (1743-1790), ornitólogo británico. Estableció la nomenclatura binominal para las aves.



Figura 9. Paquete Madrid-J.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Juanjo Maríñez y Alejandro Almazán de la Fototeca Digital del IPCE (Área de Documentación y Difusión) el trabajo de digitalización, así como a Míriam Bueso (Área de Investigación y Formación del IPCE) el posterior tratamiento de imagen de las diapositivas que acompañan el artículo.

Bibliografía

- ADAMS, B. (1984): *Egyptian Mummies*. Edit. UK: Shire Publications Ltd, Aylesbury.
- BARRY, H. S. K. (1965): *A Brief Study of Mummies and Mummification*. El Cairo: Editorial al-Takadum Press.
- BALOUT, L. *et al.* (1985): *La Momie de Ramsès II*. París: Editorial Recherches sur les Civilisations.
- BERGUA, J. B. (1973): *El Libro de los Muertos de los Antiguos Egipcios*. Madrid: Editorial Bergua.
- BOUDET, J. (1955): «Les Secrets des Embaumeurs», en *Aesculape* 26. París, pp.224-232.
- CAPART, J. (1943): «Chats Sacrés», en *CdÉ* 17. París, pp. 35-37.
- COCKBURN, A. (1980): *Mummies, Disease, and Ancient Cultures*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- DAVID, A. R. *et al.* (1978): *Mysteries of the Mummies*. London: Edit. Cassell.
- (1979): *The Manchester Museum Mummy Project*. Manchester: A. R. David.
- DELORENZI, E., y GRILLETTO, R. (1989): *Le Mumie del Museo Egizio di Torino*. Milano: Cisalpino.

- DEWACHTER, M., y BUCAILLE, M. (1976): «Ramsès II et la Nubie. Momies Pharaoniques et Études Médicales», en *Archéologia*. Bruxelles: Soumilion.
- FAGAN, B. M. (1975): «Mummies, or Restless Dead», en *Horizon*, vol. 17, n.º 3. New York: American Heritage, pp. 64-77.
- GOYON, J. C., y JOSSET, P. (1988): *Un Corps pour l'Éternité. Autopsie d'une Momie*. París: Le Léopard d'Or.
- GRAY, P. H. K., y SLOW, D. (1968): *Egyptian Mummies in the City of Liverpool Museums*. Liverpool: Liverpool Corporation.
- HACHISUKA, M. U. (1926): «Egyptian Birds Mummies», en *Japanese Journal of Ornithology*, vol. 6, n.º 26. Tokyo.
- HARRIS, J. E., y WEEKS, K. R. (1973): *X-Raying the Pharaohs*. New York: Charles Scribner's Sons.
- HARRIS, J. E., y WENTE, E. F. (1980): *An X-Ray Atlas of the Royal Mummies*. Chicago-London: The University of Chicago Press.
- HASSAN, K. (1967): *Dictionary of Pharaonic Medicine*. El Cairo: The National Publication House.
- HERÓDOTO (1971): *Historiae*, Volumen Secundum, Liber Secundus. [Edición bilingüe griego-español]. Madrid: CSIC.
- IKRAM, S., y DODSON, A. (1998): *Mummy in Ancient Egypt. Equipping the Dead for Eternity*. London: Thames and Hudson.
- KLEISS, E. (1987): *Tiermumien im Alten Ägypten*. Berlin-Hamburg: Paul Parey.
- LANGTON, N. B. (2000): *The Cat in Ancient Egypt*. London: Paul Kegan.
- LECA, A. P. (1971): *La Médecine Égyptienne au Temps des Pharaons*. París: Roger Dacosta.
— (1976): *Les Momies*. París: Hachette.
- LEEK, F. F. (1972): *The Human Remains from the Tomb of Tut'Ankhamûn*. Oxford: Griffith Institute.
— (1981): «Reevaluation des arguments en faveur de l'existence d'une profession dentaire au troisième millénaire avant J.C. en Égypte», en *Bull. et Mém. de la Société. d'Anthropol. de Paris*, tome 8, série XIII. Paris, pp. 377-380.
- LETELLIER, B., y ZIEGLER, Ch. (1977): *Les Animaux dans l'Égypte Ancienne*. Lyon: Museum d'Histoire Naturelle de Lyon.
- LLAGOSTERA, E. (1968): «La Radiografía, Proporciona el Último Retrato de Tut-Ankh-Amon», en *Radiografía y Fotografía Médicas*, n.º 11. Madrid: Kodak, S. A.
— (1973): «Radiological Aspects of the Egyptian Mummies», en *V World Congress of the I.S.R.R.T.* Madrid.
— (1975): «Radiography in Archaeology», en *Shadows, N. Z.-S. R.*, vol. 18, n.º 1. New Zealand.
— (1977a): «Aplicación de la Radiografía al Estudio de Momias Egipcias», en *Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Paleontología*, vol. 32. Madrid.
— (1977b): «La Momia Medieval de Colmenar», en *Cisneros*, vol. 61. Madrid.
— (1978): «Estudio Radiológico de las Momias Egipcias del Museo Arqueológico Nacional de Madrid», en *Monografías Arqueológicas*, n.º 5. Madrid.
— (1979): «Radiological Aspects of the Egyptian Mummies of the Museo Arqueológico Nacional of Madrid», en *Acts of the First International Congress of Egyptologists in Cairo*. Berlin, Edit. Akademie Verlag, pp. 691-696.
— (1981): «Aspects Inédits de l'Étude Radiologique de Ramsès II», en *Bull. et Mém. de la Soc. d'Anthropol. des Ancients Egyptiens de Paris*, tomo 8, série XIII. Paris.
— (1983): «Estudio Radiológico de las Momias Egipcias del Museo del Oriente Bíblico de Montserrat», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XIX-2. Madrid, pp. 293-319.

- (1984): «Introducción a la Medicina Egipcia», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XX. Madrid, pp. 189-195.
 - (1991): «Studio Scientifico di Due Teste di Mummia Egiziana, Propietà del Prof. Joaquín Barraquer, Oftalmologo di Barcellona», en *Atti VI Congresso Internazionale di Egittologia*, vol. II. Torino: International Association of Egyptologists, pp. 273-277.
 - (1992): «El Papiro Egipcio», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXVIII. Madrid, pp. 21-31.
 - (1993): «Estudio Antropológico de la Momia Guanche Madrid-I», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXIX. Madrid: pp. 37-42.
 - (1995): «The Mummy of a Daughter of Ramesses II in Madrid», en *Proceedings of the Seventh International Congress of Egyptologists*. Cambridge, 3-9 September. Leuven: C.J. Eyre. Uitgeverij Peeters, pp. 691-696.
 - (1996a): «La Momia de una Hija del Faraón Ramsés II en Madrid», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXXII. Madrid, pp. 325-334.
 - (1996b): «La Hija de Ramsés II», en *Revista de Arqueología*, año XVII, n.º 178. Madrid, pp. 8-13.
 - (1999): «La egiptomanía en Madrid», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXXV. Madrid, pp. 115-127.
 - (2000): «Sir William Flinders Petrie (1853-1942) y los Retratos Funerarios de Al-Fayum», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXXVI. Madrid, pp. 141-151.
 - (2001): «Obeliscos, Alminares y Campanarios», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XXXVII. Madrid, pp. 115-126.
 - (2005): «Exhibición de la Reproducción Fotográfica de la Tumba de la Reina Nefertari [QV66], en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid», en *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas*, año XLI. Madrid, pp. 91-105.
 - (2006-2007): «La Medición del Tiempo en la Antigüedad. El Calendario Egipcio y sus «herederos», el Juliano y el Gregoriano», en *Espacio, Tiempo y Forma*, serie II, 19-20. Madrid: UNED, Facultad de Geografía e Historia, pp. 61-76.
 - (2012): *El Egipto Faraónico en la Historia del Cine*. Madrid: Editorial Visión Libros.
- LLAGOSTERA, E., y LIZANA, J. (1982): «Estudio Radiológico de dos momias de peces egipcios», en *Boletín de la Asoc. Española de Orientalistas*, Año XVIII, pp. 139-145. Madrid.
- MALEK, J. (1993): *The Cat in Ancient Egypt*. London: British Museum Press.
- O'CONNOR, D., y SILVERMAN, D. (1980): *The Egyptian Mummy, Secrets and Science*. Pennsylvania: The Univ. of Pennsylvania.
- PACE, M. M. (1974): *Wrapped for Eternity: The Story of the Egyptian Mummy*. Brooklyn: McGraw-Hill Book Co.
- POSENER, G., y SAUNERON, S. (1959): *Dictionnaire de la Civilisation Égyptienne*. Paris: F. Hazan.
- RACHELWILTZ, Boris de (1989): *El Libro de los Muertos de los Atiguos Egipcios*. Según el Papiro de Torino [Museo Egipcio de Torino]. Barcelona: Destino.
- RICE, M. (1999): *Who's Who in Ancient Egypt*. London-New York: Routledge.
- ROHRIG, C. H. (1988): *Mummies & Magic*. Boston: Museum of Fine Arts.
- RUFFER, M. A. (1921): *Studies in the Palaeopathology of Egypt*. Chicago: University of Chicago Press.
- SMITH, G. E., y DAWSON, W. R. (1991): *Egyptian Mummies*, Reprint of 1924, Edit. Kegan Paul International Ltd, London.
- STEELE, Phillip (1998): *The Best Book of the Mummies*. New York: Edit. Kingfisher.
- STROUHAL, E., y VYHNÁNEK L. (1979): *Egyptian Mummies in Czechoslovak Collections*. Praha: Musei Nationalis Pragæ.

- TODA i GÜELL, E. (1887): *La Muerte en el Antiguo Egipto*. Madrid: M.G. Hernández.
- TRUMBLE, Kelly (1996): *Cat Mummies*. New York: Clarion.
- VAGN NIELSEN, O. (1970): *Human Remains. Metrical and non-Metrical anatomical variations*. Copenhagen-Oslo-Stockholm: Scandinavian University Books.
- WALLIS BUDGE, E. A. (1992): *El Libro Egipcio de los Muertos*, según el Papiro de Ani [Museo Británico]. Buenos Aires: Editorial Kier.
- (1995): *La Momia*. Barcelona: Editorial Humanitas.
- ZIEGELMAYER, G., y WILDUNG, D. (1985): *Münchner Mumien*. München: Staatliche Sammlung Ägyptische, Kunst.

La Guardia Civil en la protección del patrimonio cultural subacuático: tecnología aplicada

Miguel Ángel Sanchidrián Roperó

Ministerio de Interior. Guardia Civil
sanchidrian@guardiacivil.es

Resumen: La protección del patrimonio cultural subacuático comprende todos aquellos rastros de existencia humana que estén o hayan estado bajo el agua, parcial o totalmente y que tengan un carácter cultural o histórico. En este sentido, la Guardia Civil cuenta con recursos humanos y equipamiento para poder hacer frente al expolio que sufre en colaboración con otras instituciones. Entre la tecnología que dispone cabe destacar SIVE, un sistema que permite detectar movimientos sospechosos en las zonas donde se encuentran los pecios.

Palabras clave: Guardia Civil, patrimonio arqueológico subacuático, SIVE.

Abstract: The Underwater Cultural Heritage protection encompasses all traces of human existence that lie or were lying under water and have a cultural or historical character. In this sense, the Spanish Civil Guard (Guardia Civil) has expertise and equipment to safeguard it in collaboration with other institutions. Among technology features include SIVE, a system that can detect suspicious movements in areas near wrecks.

Keywords: Guardia Civil, Underwater archaeological heritage, SIVE.

La Guardia Civil: su ámbito de actuación

Hay que señalar como premisa que todo el patrimonio cultural de los pueblos son señas de identidad propias y en relación con los estados ribereños cuentan con un sin fin de tesoros arqueológicos tanto a nivel terrestre como marítimo.

En este último ámbito, el marítimo es donde tiene su desarrollo competencial en exclusiva la Guardia Civil, según establece la Ley Orgánica 2/1986, de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad; así en el mar territorial es donde, a través de las unidades especializadas del Servicio Marítimo de la Guardia Civil, llevan a cabo una labor preventiva de protección del patrimonio arqueológico subacuático frente a organizaciones que ilícitamente comercian con los pecios marinos.



Figura 1. GEAS Sevilla-Guardia Civil. Localización de restos arqueológicos de procedencia subacuática (2003).

Esta labor se desarrolla por los Servicios Marítimos Provinciales (SMP,s.) y los Grupos Especialistas de Actividades Subacuáticas (GEAS) desplegados por el litoral español. De ellos, destacan los GEAS (fig. 1), ya que, al tener como misión la vigilancia, prevención y protección del patrimonio cultural, histórico y natural sumergido, hace de ellos un bastión importante a la hora de luchar contra la expoliación.

Por otra parte, la Ley de Patrimonio Histórico Español señala que se autoriza al Gobierno a la creación en las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado de un grupo de investigación especializado en este ámbito. La Guardia Civil, a este mandato normativo cuenta, para responder, con las especialidades siguientes: Unidad Central Operativa del Servicio de Policía Judicial, Servicio de Protección de la Naturaleza y Servicio Marítimo.

Ahondando más en esta materia, destaca el acuerdo de colaboración suscrito entre el Ministerio de Cultura¹ y el Ministerio de Interior (21 de diciembre de 2012) donde señala, entre otras cuestiones, que se remitan las cartas arqueológicas subacuáticas a las Unidades de la Guardia Civil, estableciendo, al mismo tiempo, una especial protección del entorno de estas zonas.

Así las actuaciones preventivas y reactivas que se llevan por las Unidades Marítimas y Subacuáticas del Servicio Marítimo, conlleva una especial atención a las zonas donde se localizan los pecios y restos arqueológicos sumergidos.

¹ Actualmente Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Por todo ello, se estableció un protocolo de actuación frente a la presencia de buques que puedan estar expoliando pecios o zonas arqueológicas subacuáticas. En este protocolo, entró en juego una de las herramientas tecnológicas punteras con que cuenta el Cuerpo de la Guardia Civil, el sistema integral de vigilancia exterior (SIVE).

El SIVE: una herramienta tecnológica

La «Convención sobre la protección del Patrimonio Cultural Subacuático» (celebrada en París el 2 de noviembre de 2001) ya nos hablaba del papel actual que juegan las tecnologías aplicadas a las actividades subacuáticas, tanto autorizadas como no, que buscan el expolio de los yacimientos arqueológicos subacuáticos con objeto de ser dirigidas a la explotación comercial.

Para hacer frente a estos retos, en especial aquellos de carácter ilícito, la Guardia Civil cuenta con una herramienta de una gran utilidad que tiene un potencial tecnológico extraordinario para la protección del Patrimonio Cultural Sumergido; hay que referirse al Sistema Integral de Vigilancia Exterior-SIVE.

Esta herramienta se puso en marcha en el año 1997, obedeciendo a la necesidad de impermeabilizar y controlar la frontera sur de la Unión Europea. En su fase experimental tuvo su enclave en Algeciras y con el paso del tiempo se ha extendido a todo el litoral andaluz y mediterráneo, añadiendo Ceuta, Melilla y las Islas Canarias.

Este sistema es puntero en Europa, es un dispositivo operativo que, sobre un soporte técnico, facilita la vigilancia permanente de la franja del mar territorial y su entorno; estableciendo una serie de alarmas en los puntos calientes de protección según las cartas arqueológicas,



Figura 2. Estación sensora. Imagen: http://www.guardiacivil.es/imagenes/Especiales/sive/umv_sensoroptico.jpg

así como la activación de una señal, en caso de situarse una embarcación más de un tiempo dado, en las coordenadas de las zonas a proteger, procediendo a la movilización de los medios navales.

El soporte técnico de este sistema se basa en un despliegue de estaciones sensoras en el litoral costero. Cada estación cuenta con un radar, un sistema optrónico y una antena de comunicaciones, que permiten detectar, identificar y seguir cualquier embarcación sospechosa (fig. 2).

Tecnología subacuática en la Guardia Civil

La Guardia Civil a través de la especialidad de los GEAS cuenta con los medios técnicos siguientes:

- Sónar de barrido lateral, equipo que se utiliza emitiendo ondas acústicas que permiten reflejar en su rebote el relieve del lecho marino.
- Robot submarino, equipo en el que se integran otros que permiten tomar imágenes, funcionar como sónar y además ser capaz de coger pequeñas piezas a unas distancias de profundidad que pueden llegar a los doscientos metros.
- Equipo especial con suministro desde superficie, es una herramienta que se utiliza para tener a buzos con seguridad bien en poca profundidad o bien a gran profundidad. Como permite el suministro de aire desde la superficie, consigue prolongar el trabajo del buzo varias horas.
- Torpedos submarinos, se consigue una gran movilidad al buzo con lo que se facilita el reconocimiento de grandes áreas en un corto tiempo.

Lucha contra el expolio arqueológico

Sirve de muestra la operación «Bahía» desarrollada en el año 2006 en Cádiz donde se desmanteló una red de carácter internacional dedicada al expolio arqueológico submarino.

De todos los medios utilizados por la organización delictiva, destaca un sofisticado dispositivo, llamado magnetómetro; este equipo portátil es capaz de encontrar distintas materias de origen arqueológico, a través del barrido de varias frecuencias, discriminando la búsqueda en función de los parámetros aplicados por el cazatesoros. En definitiva, busca y encuentra en posibles enterramientos submarinos restos de calcio, oro, bronce, plata, hierro, etc.

Conclusiones

En primer lugar, como debilidades a tener en cuenta, está el desconocimiento, por parte de la sociedad en general, de los múltiples cometidos que pueden desarrollar y del gran potencial de trabajo del personal que compone la Guardia Civil.

En segundo lugar, las diferentes administraciones públicas deben ser conscientes y responsables de su labor en la parte que les afecta y por tanto hacer los esfuerzos necesarios para proteger estos espacios.

Por último y como fortalezas en la lucha contra la expoliación, se cuenta con un Cuerpo como la Guardia Civil, que tiene entre sus facetas una presencia de carácter global, altamente especializado y capaz de proyectar medios tanto humanos como materiales en cualquier espacio con una repuesta temporal inmediata.

Referencia normativa

Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español (BOE del 29 de junio de 1985).

Ley Orgánica 2/1998, de 13 de marzo, de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad (BOE del 14 de marzo de 1998).

Plan Nacional de protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático. Aprobado mediante acuerdo del Consejo de Ministros el 30 de noviembre del 2007.

«Convención sobre la protección del Patrimonio Cultural Subacuático», realizada en París el día 2 de noviembre de 2001, ratificada por España el 06/06/2005 y entrada en vigor el 2 de enero de 2009 (BOE del 5 de marzo de 2009).

Acuerdo de Colaboración entre el Ministerio de Cultura y el Ministerio de Interior el 21 de diciembre de 2011, en materia de protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático.

Web oficial de la Guardia Civil: www.guardiacivil.es/es/prensa/especiales/sive

Artículos de prensa

Nota de prensa de la Oficina Periférica de Comunicación de la Guardia Civil en Sevilla, publicada el 3 de febrero del 2006, sobre la Operación «Bahía», en la que se dismantela una red dedicada al expolio de restos arqueológicos submarinos.

Arqueosismología: una nueva fuente de datos sísmicos y una herramienta para la protección del patrimonio

Miguel Ángel Rodríguez-Pascua

Instituto Geológico y Minero de España, Madrid
ma.rodriguez@igme.es

Raúl Pérez-López

Instituto Geológico y Minero de España, Madrid
r.perez@igme.es

Fidel Martín-González

Área de Geología y Geoquímica. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid
fidel.martin@urjc.es

Jorge Luis Giner-Robles

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid
jorge.giner@uam.es

Pablo G. Silva

Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca
pgsilva@usal.es

Resumen: La arqueosismología es una técnica multidisciplinar enfocada al estudio de terremotos en el pasado histórico mediante yacimientos arqueológicos y patrimonio cultural. La inclusión del análisis estructural geológico en el estudio de las deformaciones sísmicas del patrimonio cultural, permite conocer cuál ha sido el origen de las mismas y cómo se comportará este patrimonio en el futuro. También puede aportar nuevos datos a los catálogos sísmicos, con terremotos no registrados documentalmente. La arqueosismología se muestra como una herramienta adecuada para aplicar en la prevención contra terremotos de nuestro patrimonio cultural.

Palabras clave: Terremoto, arqueosismología, Efectos Arqueológicos de Terremotos (EAEs), análisis estructural geológico, prevención.

Abstract: The Archaeoseismology is a multidisciplinary technique focused in the study of the historical earthquakes by archaeological sites and cultural heritage. The inclusion of structural geological analysis, in the study of seismic deformations of cultural heritage, which has been possible to know the origin of them and how they behave this heritage in the future. The Archaeoseismology can also add new data to the seismic catalogs with unregistered earthquakes.

The Archaeoseismology is an appropriate tool to apply for protection against earthquakes of our cultural heritage.

Keywords: Earthquake, Archaeoseismology, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Geological Structural Analysis, prevention.

Introducción

Podríamos definir la arqueosismología como la disciplina encargada del estudio de los terremotos a través del estudio de sus efectos extraídos de yacimientos arqueológicos y/o patrimonio cultural. A pesar de que la arqueosismología empezó a crearse a finales del siglo XIX, en los últimos años, ya ha pasado de ser un modismo a una disciplina conocida y aplicada en el ámbito del estudio de los terremotos. Lyell en su *Principios de Geología* de 1872, ya cita varios casos de excavaciones arqueológicas utilizadas para determinar la presencia de terremotos en el pasado. Los diferentes esfuerzos realizados por múltiples autores desde los años ochenta (Rapp, 1982; Zang *et al.*, 1986; Stiros, 1988a y b; Nikonov, 1988, y Guidoboni, 1989) ha hecho que esta técnica multidisciplinar sea conocida en el ámbito de la sismología y comience a ser tenida en cuenta, aunque otros autores ya habían introducido con anterioridad los terremotos en las interpretaciones arqueológicas (Lanciani, 1918). Cuando en los años noventa se realiza una recopilación del estado del conocimiento llevada a cabo por Stiros y Jones (1996), coinciden tanto en la necesidad de la colaboración multidisciplinar entre arqueología, sismología, geología, ingeniería, arquitectura e historia, así como en preguntarse ¿qué criterios son necesarios para identificar efectos sísmicos en un yacimiento arqueológico? La primera afirmación está ampliamente aceptada y el trabajo multidisciplinar es absolutamente necesario para poder avanzar en el estado del conocimiento en arqueosismología.

En cuanto a los criterios a tener en cuenta para discriminar el origen sísmico de las deformaciones encontradas en un yacimiento arqueológico aún son objeto de debate científico. En este sentido han surgido trabajos como el de Sintubin *et al.* (2008) en el que proponen una metodología con estructura de árbol lógico para cuantificar un factor de potencial arqueosísmico de un yacimiento arqueológico. Pero para poder discriminar el origen sísmico de estructuras de deformación en yacimientos arqueológicos es necesario aplicar una metodología científica, para lo cual, lo primero que se necesita es una clasificación de estructuras en función de su origen. Rodríguez-Pascua *et al.* (2011) proponen una clasificación de efectos arqueológicos de Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects*, EAEs) que cubre este paso inicial. Una vez clasificados estos efectos se lleva a cabo un análisis estructural geológico para poder determinar si son estructuras que siguen patrones de deformación orientados por el movimiento del terreno o no, en este sentido Giner Robles *et al.* (2011) editan una guía metodológica de trabajo en este ámbito.

Desde 2009 se han celebrado dos congresos internacionales en arqueosismología, asociados al IGCP 567 (*Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone*) de la UNESCO. El primero fue celebrado en Baelo Claudia (Cádiz) y el segundo en Corinto (Grecia). Uno de los objetivos principales de este IGCP es el establecimiento de una metodología reglada en arqueosismología y el intercambio de conocimientos entre las distintas disciplinas que trabajan en los equipos de trabajo en arqueología. En 2012 se celebró la tercera reunión, en este caso en Morelia (México) con objeto de difundir estas metodologías en el continente americano, tan rico en yacimientos arqueológicos y fuertes terremotos.

Metodología

La arqueosismología es un método científico multidisciplinar que tiene un doble objetivo, por un lado el determinar terremotos no registrados históricamente y por otro el estudio del comportamiento sísmico del patrimonio cultural. Con todos estos datos, se abren nuevas posibilidades para el estudio de fallas activas mediante paleosismología, datos para completar los catálogos sísmicos, su aplicación a la peligrosidad y riesgo sísmico y la creación de protocolos de actuación para protección del patrimonio en caso de sismo, así como la toma de medidas preventivas (fig. 1). En el caso de la paleosismología el flujo metodológico es reversible, puesto que investigaciones paleosismológicas en fallas activas también nos pueden poner sobre la pista de yacimientos arqueológicos que pudieron ser afectados por estos paleoterremotos.

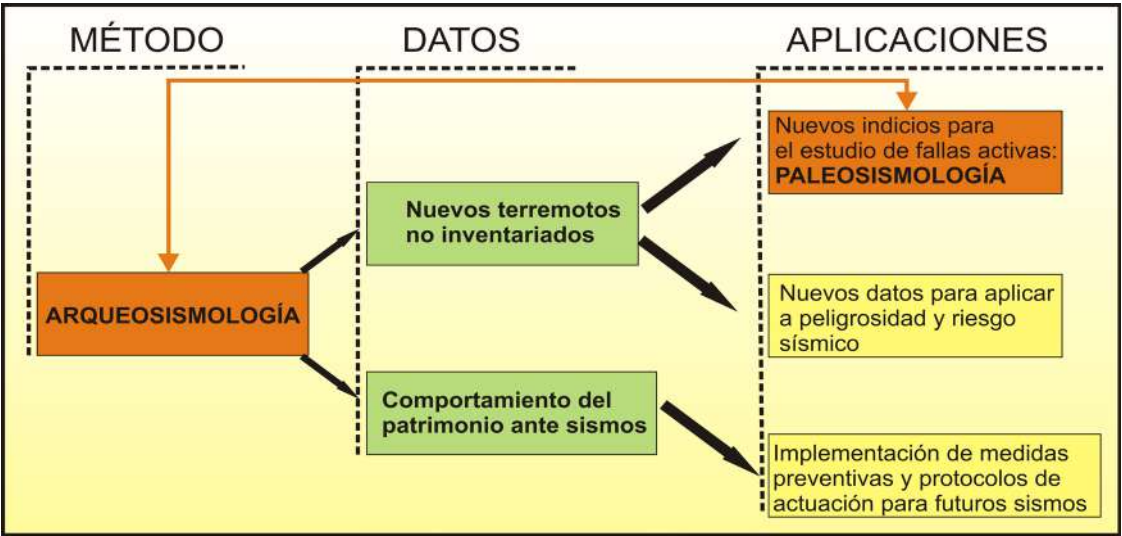


Figura 1. Aplicaciones y tipos de datos que generan los estudios arqueosismológicos.

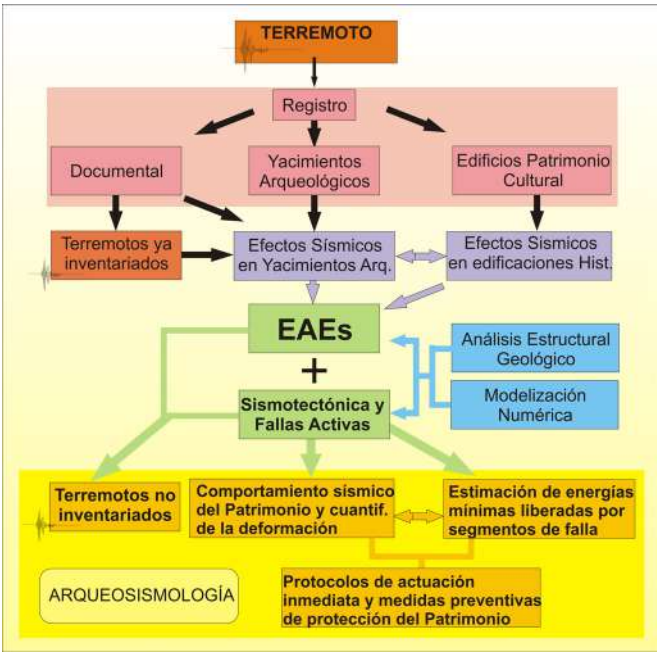


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología arqueosismológica.

Para poder identificar terremotos en el pasado histórico se puede recurrir a tres tipos de registro (fig. 2):

- Documental.
- Arqueológico.
- Construcciones del patrimonio cultural.

Con toda esta información podremos llegar a catalogar nuevos terremotos y estudiar sus efectos sobre el patrimonio, o a poder estudiar los efectos de terremotos ya registrados. Con toda esta información, y el trabajo de campo, podremos catalogar los diferentes EAEs. Los EAEs se muestran como buenos indicadores para la identificación de terremotos no registrados históricamente, permitiendo la cuantificación de la deformación y su aplicación a la protección del patrimonio cultural. Estas metodologías han sido testadas con éxito en el reciente terremoto de Lorca (11 de mayo de 2011) (Martínez Díaz *et al.*, 2011) y han sido utilizadas tanto en la estabilización de edificios históricos como en los planes de restauración (De la Hoz, 2012).

Con toda la información previa recopilada se pasaría al estudio en detalle de las deformaciones que representan los EAEs, mediante análisis estructural geológico y/o modelización numérica mediante computación. El objetivo principal es calcular las orientaciones de las deformaciones de las construcciones y su relación, tanto con la falla que generó el terremoto, como con la llegada de las ondas sísmicas al yacimiento. Todos estos datos arqueosísmicos pueden ser corroborados y validados por técnicas paleosismológicas, las cuales van a permitir calcular los parámetros sismogénéticos de la falla que produjo el sismo, entre ellos la secuencia sísmica de los últimos terremotos que afectaron al yacimiento arqueológico.

Por tanto, los resultados esperables de la arqueosismología son principalmente:

- Hallazgo de terremotos no inventariados.
- Cuantificación de la deformación sísmica del patrimonio y conocimiento de su comportamiento ante terremotos.
- Aplicación en medidas preventivas y de protección del patrimonio, así como creación de protocolos de actuación.

El caso del terremoto de Lorca de 2011 también puso de manifiesto la necesidad de crear protocolos de intervención rápida, tanto desde un punto de vista de la protección del patrimonio, como de la toma de datos de EAEs, que permitan respaldar las intervenciones en la protección patrimonial (conclusiones de las «Jornadas de expertos sobre Patrimonio en Riesgo» que organizó el IPCE en Lorca; VV. AA. 2012). Todo esto indica el potencial de una disciplina que está emergiendo en la actualidad y que está respaldada por instituciones como INQUA (*International Association for Quaternary Research*) o la UNESCO mediante sus proyectos IGCP.

Efectos Arqueológicos de Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects, EAEs*)

En toda investigación arqueosismológica es necesario realizar una clasificación de EAEs previa a su estudio pormenorizado. Para este fin Rodríguez-Pascua *et al.* (2011) proponen una clasificación de EAEs, basada en los efectos que se producen durante el terremoto y los que tienen lugar después del mismo, es decir, efectos cosísmicos y postsísmicos. Los efectos cosísmicos se pueden dividir a su vez en efectos geológicos y efectos en la fábrica de los edificios.

Dentro de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (EAEs), los efectos postsísmicos o efectos indirectos, pueden dar pistas para iniciar una investigación arqueosísmica en un determinado yacimiento, pero no van a permitir determinar de forma directa la existencia de un terremoto en el pasado. Algunos de estos efectos son:

- Incendios.
- Reparación de construcciones.
- Elementos de reciclado anómalos.
- Abandonos injustificados.
- Falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica.
- Avenida súbita por roturas de presas artificiales o embalses naturales.
- Construcciones antisísmicas.

Las descripciones históricas de terremotos también aportan datos de edificaciones importantes que sufrieron daños, como puedan ser catedrales o palacios. Esta información permite focalizar la búsqueda de deformaciones arqueosísmicas en el campo. Mucha de esta información ya está recopilada y seleccionada por parte de catálogos como el de Galbis (1932 y 1940) o el de Martínez Solares y Mezcuza (2002). Sin embargo, existe más información referente a la especificación de daños en grandes construcciones, por ejemplo catedrales, cuyo contenido no ha sido objeto por parte de estos catálogos, centrados fundamentalmente en la identificación de eventos sísmicos, sin entrar en estos detalles. En algunos archivos catedralicios se puede encontrar información exhaustiva de estos efectos, como por ejemplo los daños producidos por el terremoto de Lisboa (1755) en la catedral de Coria (Martínez-Vázquez, 1999) o los efectos producidos en la colegiata de San Patricio en Lorca por el terremoto de 1674. De este modo se puede tener un dato orientativo de la deformación, dato que se puede contrastar observando los daños que han podido permanecer hasta nuestros días o las reparaciones de los mismos. En algunos casos también es posible encontrar información periodística con grabados de época en los que se puede extraer este tipo de deformaciones. Mención a parte merecen los terremotos acaecidos después de la invención de la fotografía, donde podemos observar de forma directa estos EAEs.

EFFECTOS GEOLÓGICOS	<i>Efectos geológicos asociados a la falla</i>	- Escarpes de falla	
		- Levantamientos / hundimientos	
	<i>Efectos geológicos alejados del plano de falla</i>	- Licuefacciones y diques de arena	
		- Deslizamientos	
		- Caída de bloques	
		- Tsunamis/Seiches	
		- Colapsos en cavidades	
		- Pavimentos de argamasa plegados	
		- Fracturas y pliegues en enlosados regulares	
		- Fracturas y pliegues en enlosados irregulares	
		- Compactación de sustratos y rellenos antrópicos	

Figura 3. Conjunto de Efectos Arqueológicos de Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects*, EAEs) relacionados con los efectos geológicos producidos durante un terremoto (efectos primarios o cosísmicos). Fuente: modificada de Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011.

Los efectos geológicos se subdividen en efectos asociados al plano de falla que generó el terremoto, o alejados de éste (fig. 3). El efecto extremo sería la rotura de un yacimiento por el salto de falla generado durante el terremoto. Otros efectos geológicos asociados al plano de falla serían las subsidencias o elevaciones cosísmicas. Para poder identificar estos movimientos en el pasado arqueológico es necesario contar con niveles de referencia, como es el nivel del mar o el de masas lacustres. Así existen numerosos ejemplos de estos efectos, como el documentado por Lyell (1872) sobre la serie sísmica entre 1503 y 1511 acaecida en Puzzuoli (Italia), previa a la erupción del Monte Nuovo en 1534 (fig. 4A). Este autor describe la secuencia de relleno previa que cubrió el yacimiento después del hundimiento bajo las aguas del mar. Esta secuencia indica la presencia de erupciones anteriores al hundimiento y relleno de sedimentos continentales que posteriormente fueron recubiertos por sedimentos marinos con el hundimiento. Un ejemplo similar se puede contemplar en los restos del antiguo puerto oeste de Corinto en el golfo de

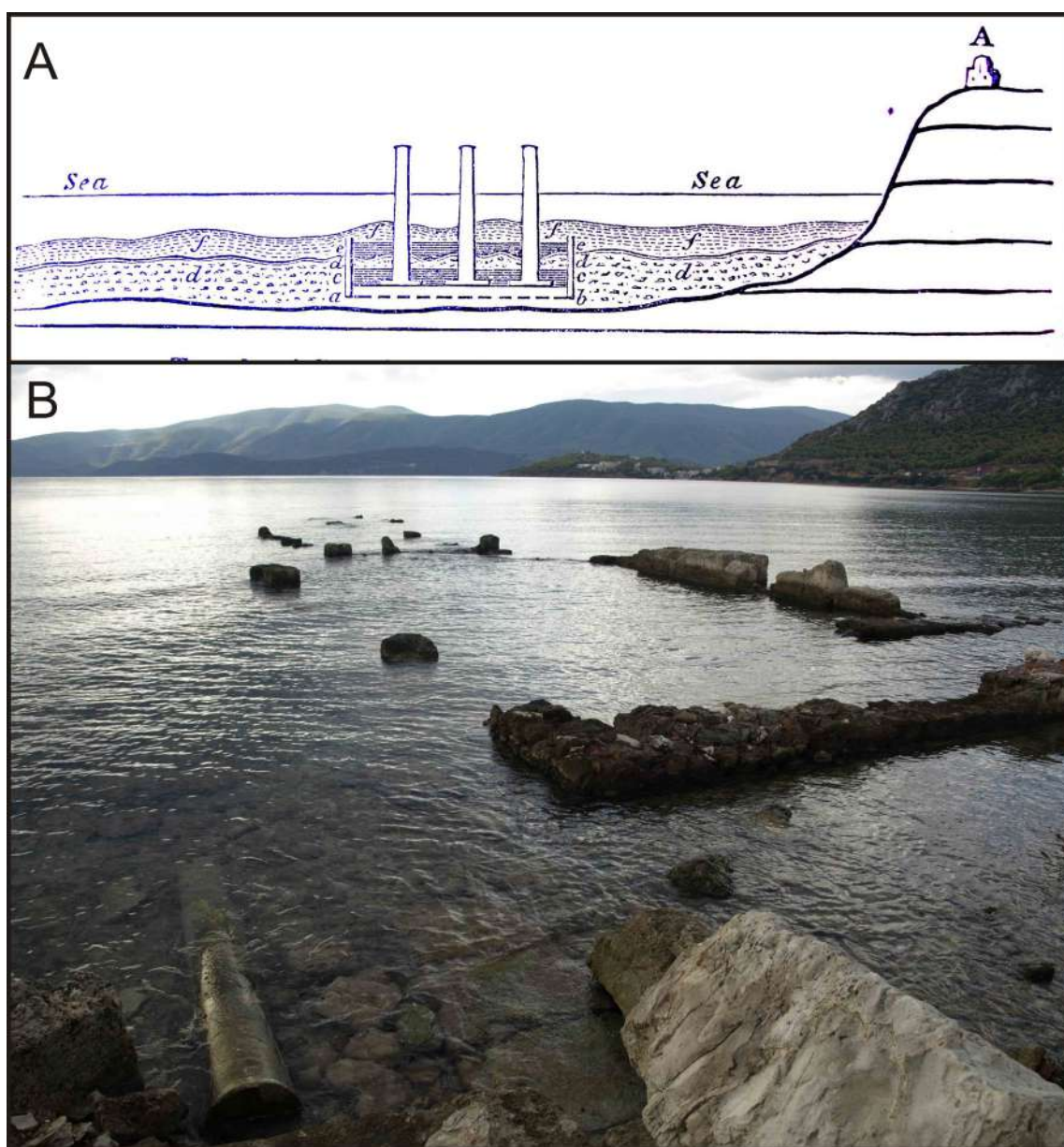


Figura 4. Subsidencia sísmica en: A) templo romano de Serapis hundido bajo el nivel del mar por las crisis sísmicas de 1503-1511 d. C. (Puzzuoli, Nápoles, Italia). Fuente: modificada de Lyell, 1872; B) restos sumergidos del puerto oeste de Corinto (Grecia) (480-146 a. C.) hundido de forma violenta tras un terremoto.

Salónica (Grecia), cuya edad está entre el 480 al 146 a. C. (fig. 4B). Estas instalaciones portuarias quedaron sumergidas por el giro del bloque superior de una falla normal durante un terremoto, haciendo que esta zona quedase sumergida en breves momentos durante el terremoto.

Los efectos geológicos alejados del plano de falla pueden estar asociados a fenómenos como la licuefacción, caída de bloques de roca, tsunamis, colapsos en cuevas o deformaciones en los pavimentos (fig. 3). Su origen es claramente geológico y el responsable de la deformación en el yacimiento es directamente dicho fenómeno. Uno de los ejemplos más espectaculares, a la vez que dañinos y efímeros en cuanto a su conservación, son las licuefacciones. Estas consisten en que el sustrato formado por sedimentos no consolidados empapados en agua se comporta durante un breve espacio de tiempo como un fluido. Esto puede generar tanto subsidencias, como daños directos en la cimentación de las edificaciones. Este fenómeno ha sido ampliamente

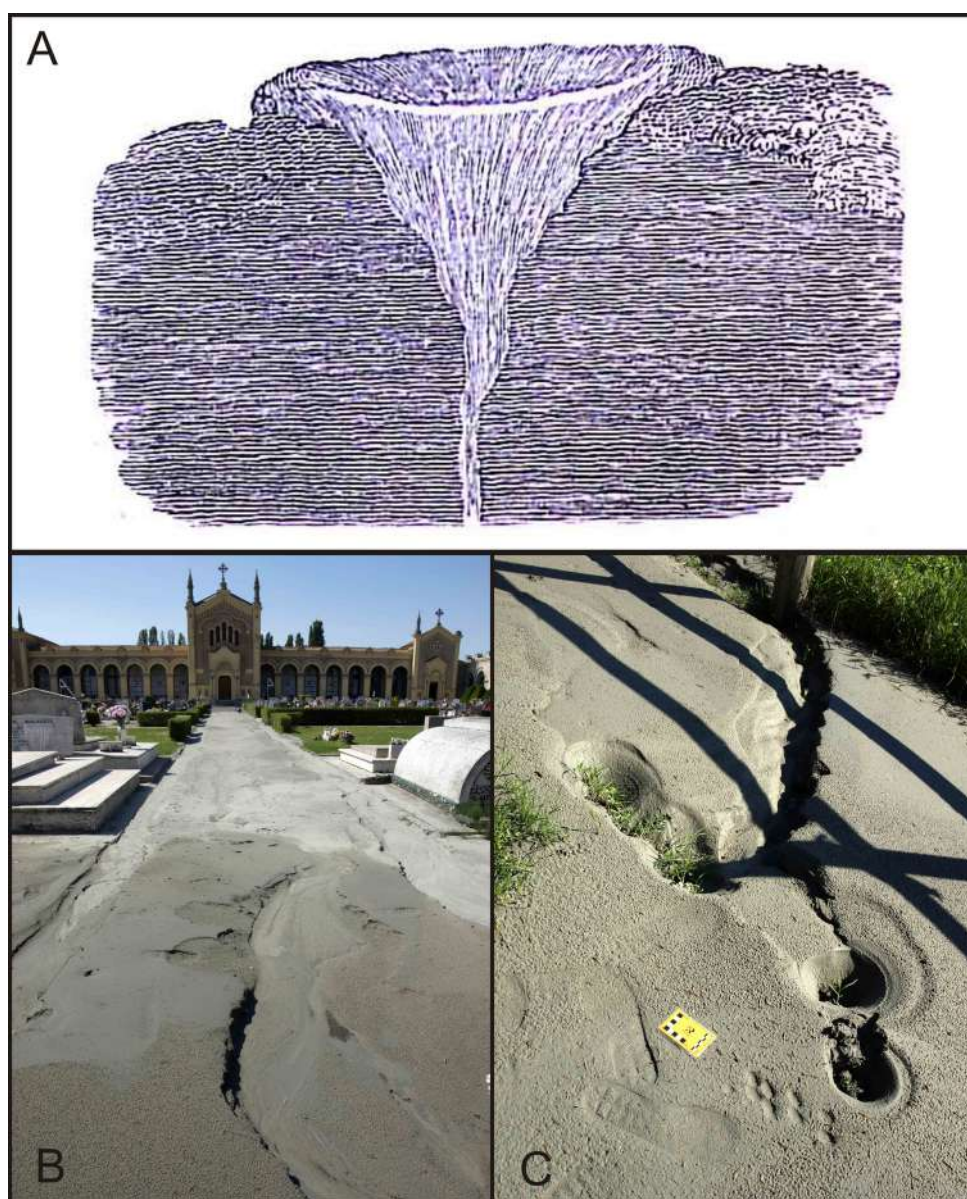


Figura 5. Fenómenos de licuefacción ejemplificados por volcanes de arena: A) grabado de una sección vertical de un volcán de arena generado por el terremoto de Calabria (Italia) de 1786 (modificada de Lyell, 1872); B) volcanes de arena en el cementerio de San Carlo (Italia), y C) conductos alimentadores de volcanes de arena en San Carlo (Italia), generados ambos por el terremoto del 20 de mayo de 2012 en la Emilia Romagna (Italia) ($M_w = 6,0$).

te documentado en la literatura histórica referente a grandes terremotos como en el terremoto de Calabria de 1786 (Lyell, 1872) (fig. 5A). En la serie sísmica de la Emilia Romagna (Italia) en mayo de 2012 también se pudieron registrar este tipo de fenómenos afectando a localidades enteras como San Carlo, con importantísimos daños asociados a este fenómeno (figs. 5A y B).

Los efectos en la fábrica de los edificios (fig. 6) se subdividen en los que están asociados a deformaciones permanentes del sustrato y/o cimentaciones de las construcciones y las que están generadas por la deformación transitoria del sustrato al paso de las ondas sísmicas. Por tanto, en el caso de las primeras podremos observar tanto las deformaciones del sustrato como las de la edificación, mientras que en las segundas solo observaremos los daños producidos en la fábrica del edificio.

EFFECTOS EN LA FÁBRICA DE LOS EDIFICIOS	<i>Estructuras de deformación generadas por deformación permanente del sustrato</i>	- Impactos entre el enlosado  - Contrafuertes desplazados y girados  - Muros basculados  - Muros desplazados  - Muros Plegados 
	<i>Estructuras de deformación generadas por deformación transitoria del sustrato</i>	- Fracturas penetrativas en bloques de sillería  - Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo  - Columnas caídas y orientadas  - Giros en bloques de sillería y columnas  - Bloques de sillares desplazados  - Claves de arco desplazadas  - Escalones y líneas de bordillo plegadas  - Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros)  - Bóvedas colapsadas  - Marcas de Impacto  - Cerámica aplastada  - Esquinas fracturadas 

Figura 6. Conjunto de Efectos Arqueológicos de Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects*, EAEs) relacionados con los efectos en la fábrica de los edificios, producidos durante un terremoto (efectos primarios o cosísmicos). Fuente: modificada de Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011.



Figura 7. Pliegues (anticlinales y sinclinales) en el enlosado irregular del *Decumanus Maximus* de Baelo Claudia (Cádiz), deformado por el terremoto que destruyó la ciudad en 350-395 a. C. Los pliegues representados en amarillo son perpendiculares a la pendiente topográfica y asociados a dicho terremoto. Los de color naranja son paralelos a la pendiente y están asociados a fenómenos de ladera.

Un buen ejemplo de las deformaciones permanentes del sustrato son los choques de baldosas que generan roturas parciales, indicando la orientación de la dirección de impacto. Un buen conjunto de estos efectos se pueden observar en el yacimiento arqueológico de la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz), así como pliegues en los enlosados, tanto regulares como irregulares (fig. 7). Esta ciudad fue afectada por dos terremotos: en 40-60 a. C. y 350-395 d. C., momento en el que fue abandonada, lo que ha hecho que permanezca prácticamente sin ocupaciones posteriores hasta nuestros días (Silva *et al.*, 2005; 2009).

Los EAEs asociados a la deformación transitoria del sustrato afectan a toda la fábrica del edificio o elemento constructivo, por lo que hay un amplio catálogo de estructuras (fig. 6). Se describirán aquí las más interesantes desde un punto de vista de su análisis y de la información que pueden aportar. Un EAE muy interesante son las caídas orientadas de columnas, ya que éstas nos van a marcar tanto la dirección como el sentido de llegada de la onda. Existen muchos ejemplos en la Antigüedad como el templo de Zeus en Olimpia, la ciudad nabatea de Petra o las columnatas de Susita en Israel. En la serie sísmica de la Emilia Romagna de mayo de 2012, concretamente en el terremoto del 28 de mayo ($M_w = 5,8$) pudimos documentar en la caída orientada hacia los $N354^\circ E$ de la columnata de uno de los laterales E-O del cementerio de Mirandola, siendo coherente con el resto de EAEs medidos en el propio cementerio y en la región (fig. 8). Esto viene a validar las hipótesis de partida planteadas para este EAE desde los inicios de la arqueosismología para la caída orientada de columnas.

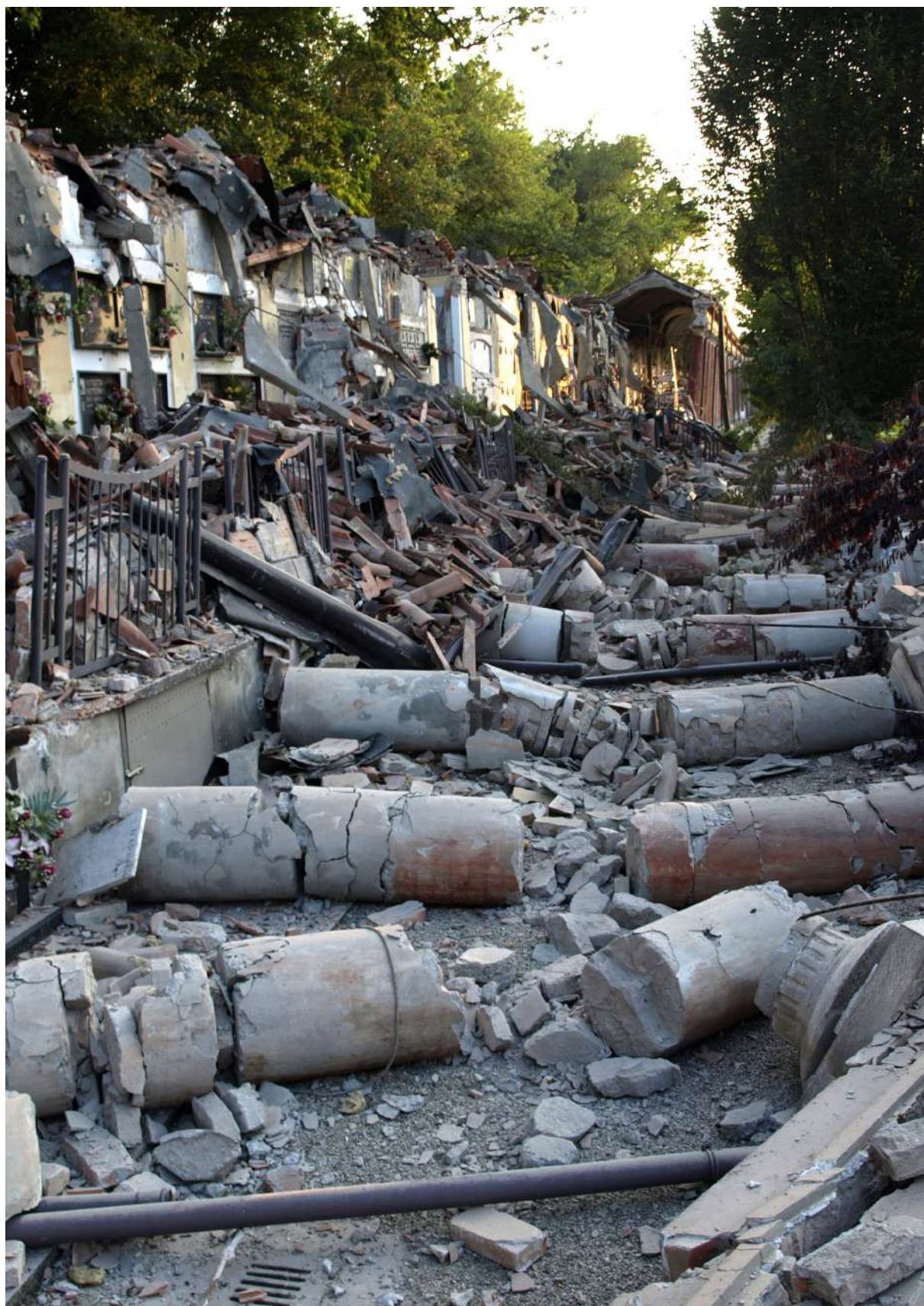


Figura 8. Caída orientada de la columnata del muro sur (de orientación E-O) del cementerio de Mirandola (Italia). La caída es hacia los N354° E, producida por el terremoto de la Emilia Romagna del 28 de mayo de 2012.

Otro elemento EAE clásico es la caída de las claves de los arcos; éstas se producen porque los esfuerzos que sustentan los arcos recaen en las paredes laterales y al moverse éstas, por los esfuerzos de cizalla alternantes en la misma dirección que el arco, descargan los esfuerzos de las dovelas haciendo que las claves caigan por el peso que sustentan dichos arcos. Se pueden generar tanto en bloques de sillería como en arcadas de ladrillo. Buenos ejemplos los podemos encontrar en los terremotos de Lorca de 2011 (fig. 9A) y de la Emilia Romagna de 2012 (fig. 9B).

Los pliegues y deformaciones en escalones y bordillos marcan muy bien las direcciones de compresión y en algunos casos incluso reflejan las ondulaciones a las que fueron sometidos durante el paso de las ondas sísmicas. Estas oscilaciones pueden generar la extrusión hacia fuera de los escalones, fenómeno que no se puede dar por otras causas, lo cual es utilizado como un buen marcador sísmico. La escalinata de la pirámide de Quetzalcóatl en la Ciudadela de Teotihuacán (México), es un buen ejemplo de este fenómeno, en el que se refleja tanto el paso de la onda, como la extrusión de bordillos y el golpeo de esquinas entre los bloques de basalto que forman la escalinata (fig. 10).

Análisis estructural geológico de EAEs

Las deformaciones producidas en un conjunto urbano van a estar condicionadas por el mecanismo disparador que las generó. El colapso de un muro puede ser generado tanto por un terremoto como por una explosión, por ejemplo, pero, ¿cómo podríamos diferenciarlas? Las deformaciones producidas por un terremoto van a estar condicionadas por la orientación de la llegada del rayo sísmico, mientras que una explosión generaría el colapso indiscriminado y radial de las estructuras que lo rodeasen. De este modo, si medimos las orientaciones de las deformaciones de la arruinada ciudad de Belchite (Zaragoza), destruida por fuertes combates durante la Guerra Civil española (septiembre de 1937), no podríamos encontrar ningún patrón de deformación que se ajustase a una orientación en concreto, sino que las deformaciones producidas no estarían orientadas. Sin embargo, la llegada de una onda sísmica sí que produce un primer impulso en una determinada orientación, la cual va a condicionar la disposición de las deformaciones. Nosotros proponemos un problema inverso, en el que mediante las deformaciones observadas se puedan calcular las orientaciones del elipsoide de deformación producido por el terremoto en la construcción antigua. La orientación de los ejes de deformación de las diferentes estructuras estudiadas debería ser similar si hubiesen estado generadas por un único efecto, en este caso la llegada de la onda sísmica. En caso contrario, encontraremos una fuerte dispersión en los ejes de los diferentes elipsoides calculados, como sería el caso de estudiar las diferentes explosiones generadas por impactos de artillería en una ciudad devastada.

Las técnicas clásicas de análisis estructural geológico se muestran como herramientas adecuadas para el cálculo de los elipsoides de deformación de origen sísmico que se extraen de las deformaciones halladas en yacimientos arqueológicos. El yacimiento arqueológico de la antigua ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz) fue el primer yacimiento arqueológico en España estudiado desde un punto de vista arqueosismológico (Silva *et al.*, 2005; 2009). La riqueza y variedad de estructuras de deformación en este yacimiento ha hecho que se haya utilizado como laboratorio para la aplicación de técnicas de análisis estructural geológico (Giner Robles *et al.*, 2009; 2011). Otro yacimiento estudiado y del que se ha determinado un fuerte terremoto en época alto imperial romana es el Tolmo de Minateda (Albacete) (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2009; 2010).

Una vez determinados los EAEs, siguiendo la clasificación propuesta, se pasa al análisis estructural geológico de las deformaciones. Un tensor es un vector orientado en el espacio, por lo que con estos análisis conseguiremos calcular los tensores de deformación que sintetizan



Figura 9. Caída de claves de arco: A) en arcos de sillería de la colegiata de San Patricio Lorca (terremoto del 11 de mayo de 2011); B) en arcos de ladrillo en una casa de la Emilia Romagna (Italia) (terremoto del 20 de mayo de 2012).



Figura 10. Escalinata de la pirámide de Quetzalcóatl en la Ciudadela de Teotihuacán (México), deformada por efecto de un terremoto. Nótese la extrusión de peldaños y los pliegues horizontales de las hiladas de bloques en cada escalón.

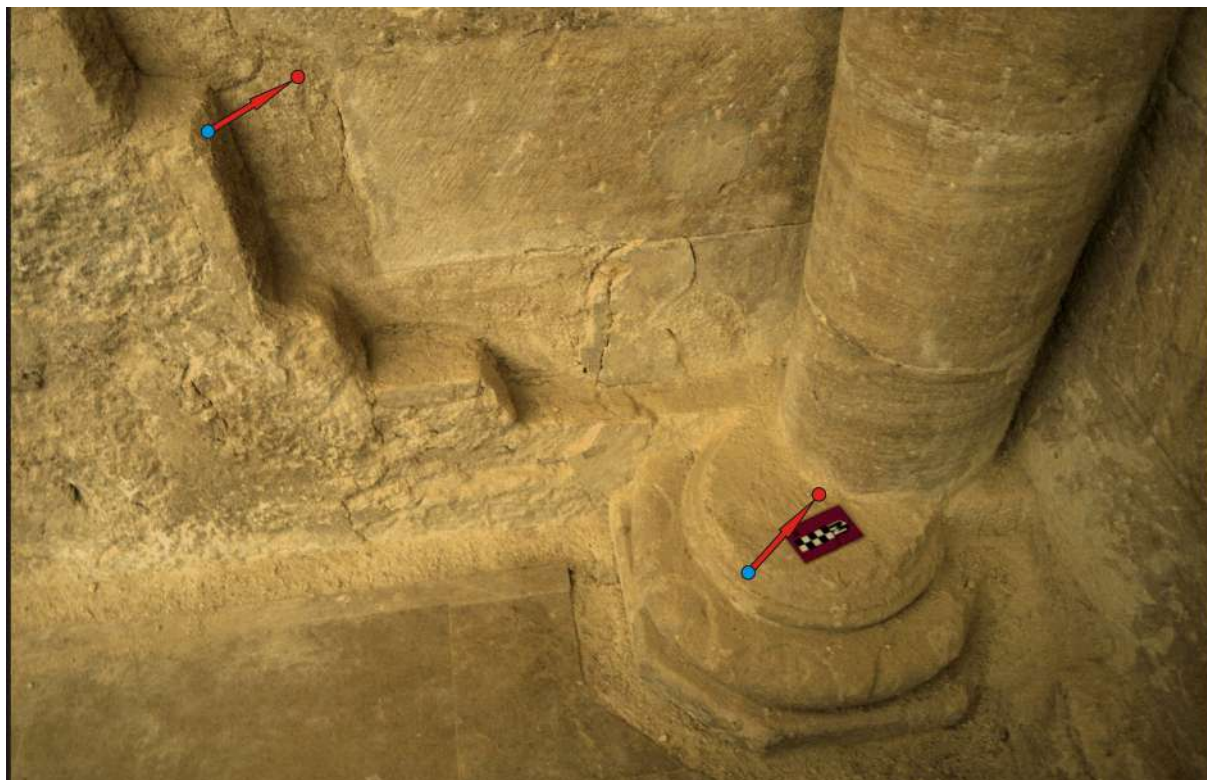


Figura 11. Vector de desplazamiento de la esquina NO de la Torre del Espolón en el castillo de Lorca, como consecuencia del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011.

las características de las deformaciones en construcciones patrimoniales. Un ejemplo de obtención directa de un vector orientado es cuando tenemos un punto que podemos identificar en el estado no deformado y en el deformado, como un bloque de sillería desplazado, en el que podríamos identificar un punto en un bloque inferior y su homólogo en el superior, pudiendo trazar un vector que los una. Este vector va a tener una orientación, que es una dirección en el espacio, con un sentido de movimiento y una magnitud, que corresponde al desplazamiento medido (fig. 11). Este es uno de los casos más evidentes, en otras situaciones tendremos que recurrir al análisis de la fracturación, que siguen unos patrones de deformación determinados, en los cuales se pueden desarrollar fracturas conjugadas. Las fracturas en aspa generadas en muros de ladrillo se ajustan a estos modelos y el análisis de los mismos nos llevará al cálculo de

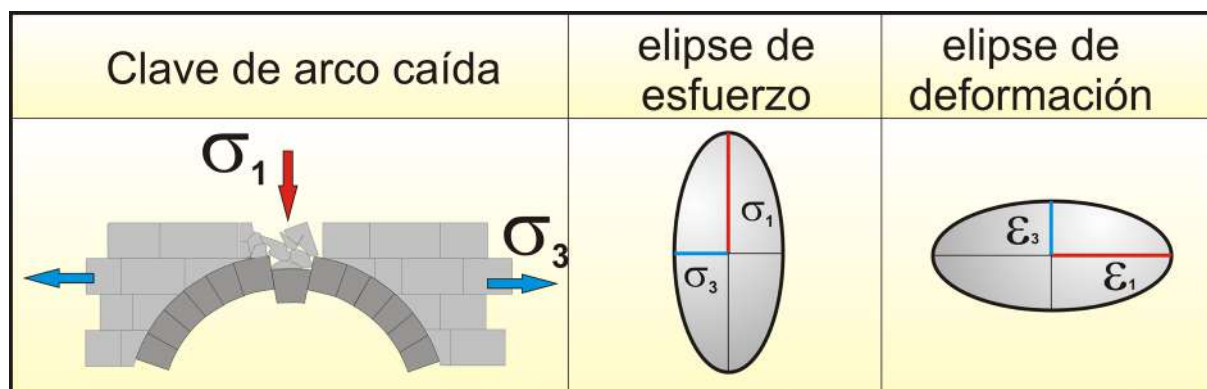


Figura 12. Concepto de esfuerzo/deformación asociado a la caída de la clave de un arco como consecuencia de un terremoto y la representación de las elipses de esfuerzo y deformación responsables de dicho efecto.

dicho tensor. En el caso de contar con varias orientaciones en el espacio, en un mismo edificio, se puede llegar a calcular el elipsoide de deformación, que será compatible con los tensores calculados de forma local (fig. 12). Si proyectamos sobre la horizontal los ejes principales de la deformación podremos calcular las trayectorias de deformación que afectaron a un edificio en concreto o a una ciudad o conjunto de ciudades. Esto hace que podamos comparar estas trayectorias con las principales fallas activas de la zona y ayudarán a corroborar o descartar los posibles efectos sísmicos sobre las edificaciones. El caso del terremoto de Lorca de 2011 es un excelente ejemplo de aplicación de estas metodologías, pudiendo calcularse estas trayectorias para edificaciones tan importantes como la colegiata de San Patricio, ya afectada por terremotos anteriores (fig. 13).

Aplicaciones de los EAEs a la conservación del patrimonio cultural

Como se ha expuesto en el apartado anterior, los EAEs no se forman de manera aleatoria, sino que siguen patrones de deformación condicionados por la llegada de las ondas sísmicas. Esto hace que, si conocemos la presencia de fallas activas en las proximidades de una localidad, podamos llegar a crear un modelo de deformación teórico que podría generar un hipotético terremoto. Además, la geología, mediante la paleosismología, será capaz de saber cuál será el terremoto máximo esperado de dicha falla, por lo que podremos conocer de antemano cual será la energía máxima que podría liberar. La arqueosismología también puede diferenciarnos distintos terremotos acaecidos en el pasado, ya que si la misma falla ha generado diferentes terremotos, las deformaciones que generó serán las mismas y un mismo EAE se habrá movido varias veces. Esto es lo que se conoce como reactivación de EAEs (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2012) y nos permite determinar una sucesión sísmica mediante la arqueosismología, y asignar los terremotos deducidos a una o varias fallas, dependiendo de sus características.

Todos estos datos, cruzados con la paleosismología, nos da la posibilidad de crear modelos predictivos de deformación en el patrimonio. Así pues, si suponemos una construcción

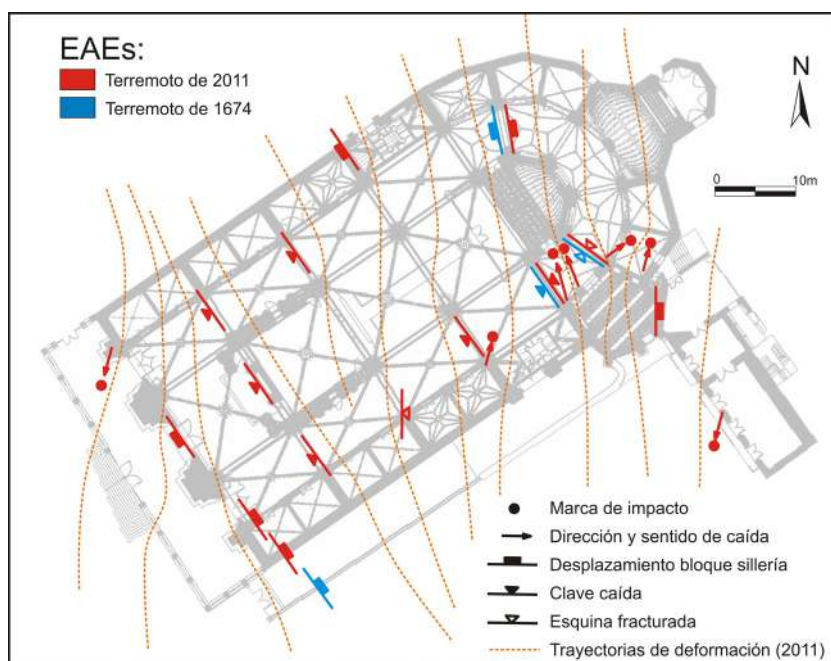


Figura 13. Trayectorias de deformación calculadas para los EAEs generados en la colegiata de San Patricio (Lorca) como consecuencia del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011.

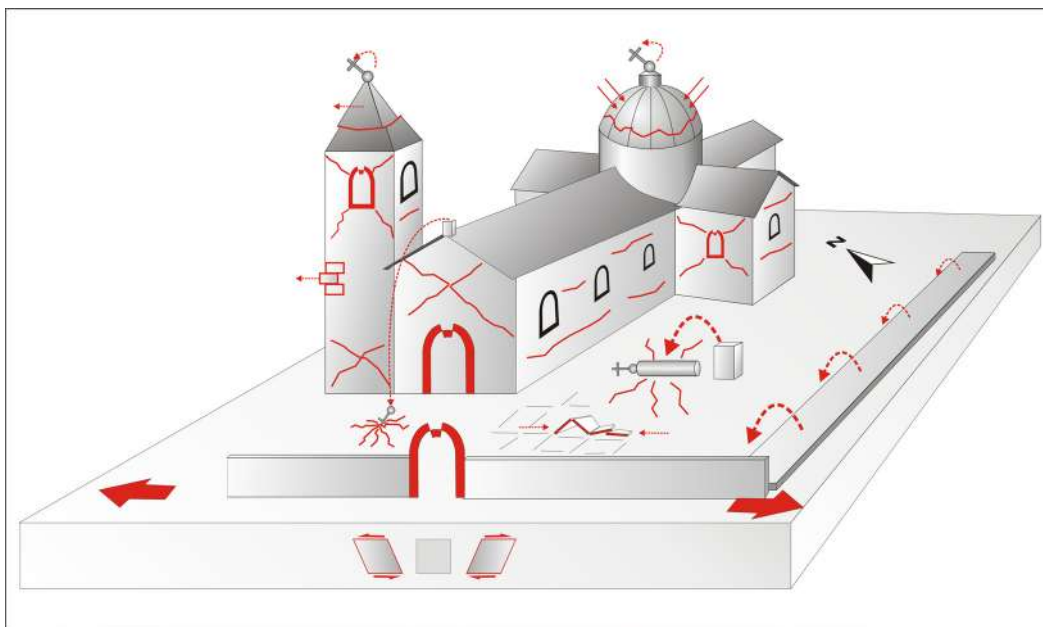


Figura 14. Construcción idealizada con los Efectos Arquitectónicos de Terremotos (EAEs) teóricos que generaría un movimiento sísmico con un desplazamiento del sustrato en dirección NO-SE.

hipotética (fig. 14) que fuese sometida a las deformaciones producidas por un terremoto generado por una falla conocida, estas deformaciones estarían condicionadas por la orientación de la construcción. Así pues, si esta construcción sufre un movimiento del terreno perpendicular al eje central de la nave, aparecerán caídas de claves de arco en la fachada principal, pero no en las ventanas de la pared perpendicular. También se desarrollarán fracturas conjugadas en esta fachada, mientras que en los muros perpendiculares aparecerán fracturas horizontales. Las caídas de pináculos serán paralelas a la dirección de movimiento, así como las caídas orientadas de muros.

Por este motivo, el estudio de las fallas activas en el entorno de un conjunto patrimonial, en relación a la orientación del mismo, facilita el desarrollo de modelos predictivos de comportamiento sísmico. Estos podrán ser útiles tanto en los planes de conservación como en posibles intervenciones de restauración.

Conclusiones

La arqueosismología es una técnica multidisciplinar que permite tanto inventariar terremotos no registrados históricamente, como predecir cual será el comportamiento del patrimonio ante un terremoto. Esto es posible gracias a la clasificación de EAEs y su análisis estructural geológico, con el que obtendremos los elipsoides y trayectorias de deformación de un conjunto patrimonial. Combinando la arqueosismología con la paleosismología se pueden calcular los terremotos máximos esperados para una zona y conocer de que forma podrán afectar al patrimonio, lo cual podrá ser incluido en los planes de actuación contra el riesgo y proteger nuestro patrimonio.

Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado con los proyectos del Plan Nacional RESCATELO (CGL2011-14925-E) y FASEGEO (CGL2009-09726).

Bibliografía

- DE LA HOZ, J. D. (2012): «Terremoto en Lorca: consecuencias y actuaciones sobre el patrimonio religioso», en *Patrimonio Cultural de España*, n.º 6. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 107-122.
- GALBIS RODRÍGUEZ, J. (1932): *Catálogo Sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5° E y 20° W de Greenwich y los paralelos 45° y 25° Norte*, tomo I. Madrid: Instituto Geográfico Catastral y de Estadística, 818 p.
- (1940): *Catálogo Sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5° E y 20° W de Greenwich y los paralelos 45° y 25° Norte*, tomo II. Madrid: Instituto Geográfico Catastral y de Estadística, 280 p.
- GINER-ROBLES, J. L.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; SILVA, P. G.; BARDAJÍ, T.; GRÜTZNER, C., y REICHERTER, K. (2009): *Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain)*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 130 p.
- GINER-ROBLES, J. L.; SILVA BARROSO, P. G.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; BARDAJÍ AZCÁRATE, T.; GARDUÑO-MONROY, V. H., y LARIO GÓMEZ, J. (2011): *Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI*. Serie Investigación. Fundación MAPFRE, 96 p.
- GUIDOBONI, E. (1989): *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea: storia, archaeologia, sismologia*. Bologna. SGA-Instituto Nazionale di Geofisica.
- LANCIANI, R. (1918): «Segni di Terremoti negli edifizii di Roma Antica», en *Bulletino della Commissione Archeologica Comunale di Roma*. Roma, pp. 1-30.
- LYELL, C. (1872): *The Principles of Geology. The modern changes of the earth and its inhabitants*, vol. II. London, 456 p.
- MARTÍNEZ-DÍAZ, J. J.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ LÓPEZ, R.; GARCÍA MAYORDOMO, J.; GINER ROBLES, J. L.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F.; RODRÍGUEZ PECES, M.; ÁLVAREZ GÓMEZ, J. A., e INSUA ARÉVALO, J. M. (2011): *Informe Geológico Preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011, 5.1 Mw*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 35 p.
- MARTÍNEZ-SOLARES, J. M., y MEZCUA, J. (2002): *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1900)*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento, 756 p.
- MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, F. (1999): *El terremoto de Lisboa y la Catedral de Coria (Vicisitudes del Cabildo) 1755-1759*. Colección Temas Cauriacienses. Vol. V. Ed. Ayuntamiento de Coria. 187 pp.
- NIKONOV, A. (1988): «On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments», en *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*. Edición de G. Marinov y G. Koukis. Rotterdam: Balkema, pp. 1325-1320.
- RAPP, G. (1982): «Earthquakes in the Troad», en *Troy: The archaeological Geology*. Editores G. Rapp y J. A. Gifford. Princeton, pp. 43-58.
- RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F.; GINER-ROBLES, J. L., y SILVA, P. G. (2012): «Efectos arquitectónicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Neoformación y reactivación de efectos en su Patrimonio Cultural», en *Boletín Geológico y Minero de España*.
- RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; SILVA, P. G.; GINER-ROBLES, J. L.; GARDUÑO-MONROY, V. H., y REICHERTER, K. (2011): «A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology», en *Quaternary International*, n.º 242, pp. 20-30.
- RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; ABAD CASAL, L.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; GAMO PARRA, B.; SILVA, P. G.; GARDUÑO-MONROY, V. H.; GINER-ROBLES, J. L.; ISRADE-ALCÁNTARA, I.; BISCHOFF, J., y CALVO, J. P. (2009): «Roman, visi-

goth and islamic evidence of earthquakes recorded in the archaeological site of El Tolmo de Minateda (Prebetic Zone, Southeast of Spain)», en *1st INQUAIGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September*, pp. 110-114.

- RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; SILVA, P. G.; GARDUÑO-MONROY, V. H.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; ISRADE-ALCÁNTARA, I.; GINER-ROBLES, J. L.; BISCHOFF J., y CALVO, J. P. (2010): «Ancient earthquakes from archaeoseismic evidence during the Visigothic and Islamic periods in the archaeological site of “Tolmo de Minateda” (SE of Spain)», en *Ancient Earthquakes. Geological Society of America, Special Paper*, n.º 471. Edición de M. Sintubin; I. S. Stewart; T. M. Niemi, y E. Altunel, pp. 171-184.
- SINTUBIN, M., y STEWART, I. S. (2008): «A Logical Methodology for Archaeoseismology: A Proof of Concept at the Archaeological Site of Sagalassos, Southwest Turkey», en *Bulletin of the Seismological Society of America*, n.º 98 (5), pp. 2209-2230.
- SILVA, P. G.; BORJA, F.; ZAZO, C.; GOY, J. L.; BARDAJÍ, T.; DE LUQUE, L.; LARIO J., y DABRIO, C. J. (2005): «Archaeoseismic record at the ancient Roman City of Baelo Claudia (Cádiz, south Spain)», en *Tectonophysics*, n.º 408 (1-4), pp. 129-146.
- SILVA, P. G.; REICHERTER, K.; GRÜTZNER, CH.; BARDAJÍ, T.; LARIO, J.; GOY, J. L.; ZAZO, C., y BECKER-HEIDMANN, P. (2009): «Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolonia Bay area, Cádiz (south Spain)», en *Geological Society of London, Special Publication*, n.º 316, pp. 93-121.
- STIROS, S. (1988a): «Earthquake effects on Ancient Constructions. In: New Aspect of Archaeological Science», en Greece *British Schools at Athens, Fitch Occasional Paper*, n.º 3, pp. 1-6. Edición de R. E. Jones y H. W. Catling.
- (1988 b): «Archaeology, a tool to study active tectonics-The Aegean as a case study», en *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, n.º 13, pp. 1636-1639.
- STIROS, S., y JONES, R. E. (1996): «Archaeoseismology. Institute of Geology and Mineral Exploration», en *Fitch Laboratory Occasional Paper*. Atenas, 268 p.
- VV. AA. (2012): «Patrimonio en riesgo: seísmos y bienes culturales», en *Patrimonio Cultural de España*, n.º 6. Madrid: Ministerio de Cultura, 268 p.
- ZANG, B.; LIAO, Y.; GUO, S.; WALLACE, R.; BUCKHAM, R., y HANKS, T. (1986): «Fault scarps related to the 1739 earthquake and seismicity of the Yinchuan graben, Ningxia Zizhiqu, China», en *Bulletin of the Seismological Society of America*, n.º 76, pp. 1253-1287.

La espectrometría de masas en tándem. Aplicación a la caracterización de las tintas en manuscritos del siglo XV al siglo XIX

David Romera

Laboratorio agroalimentario. Conselleria d'Agricultura, Pesca, Alimentació i Aigua.
Generalitat Valenciana
romera_dav@gva.es

Jose Sancenón

Laboratorio agroalimentario. Conselleria d'Agricultura, Pesca, Alimentació i Aigua.
Generalitat Valenciana
sancenon_jos@gva.es

Miguel Gamón

Laboratorio agroalimentario. Conselleria d'Agricultura, Pesca, Alimentació i Aigua.
Generalitat Valenciana
gamon_mig@gva.es

Gemma Contreras

Institut Valencià de Conservació i Restauració de Bèns Culturals
contreras_gem@gva.es

David Juanes

Institut Valencià de Conservació i Restauració de Bèns Culturals
djuan@ivcr.es

Gonzalo Fernández

Enólogo
gonzalofermar@hotmail.com

Resumen: Uno de los principales retos de los estudios en conservación es intentar corroborar el uso de las técnicas de ejecución y materiales que se encuentran en recetarios y tratados antiguos en los objetos conservados actualmente. Este estudio es un ejemplo de este tipo de investigaciones, en el que se intenta comprobar la presencia del vino como vehículo en las tintas de escritura, tal y como aparecen en algunas recetas antiguas.

En este trabajo se describe la puesta a punto de un método para la determinación de la presencia de vino (a través del ácido tartárico) en tintas ferrogálicas empleando la cromatografía líquida con detección mediante espectrometría de masas acoplada en tándem. Con este método

de análisis, se han analizado un total de 37 manuscritos procedentes de archivos municipales de Requena, Vila-Real y Castellfort, datados entre los siglos xv y xix. Este ensayo constituye un punto de partida que permitirá en un futuro establecer patrones geográficos y temporales de un enorme interés histórico y tecnológico.

Palabras clave: Manuscrito, tinta, vino, ácido tartárico, espectrometría de masas.

Abstract: One of the main challenges in conservation studies is to corroborate the use of materials and making process described in old recipe books and treatises on currently works of art. This study is an example of this kind of research, which attempts to verify the presence of wine as a vehicle for writing inks, as it appears in some recipes.

This work describes the development of a method for determining the presence of wine (through tartaric acid) in iron gall inks using liquid chromatography with detection by mass spectrometry coupled in tandem. With this method of analysis, we analyzed a total of 37 manuscripts from municipal archives of Requena and Vila-Real, dating from the 15th century to the 18th. This paper is a starting point that will allow, in the future, to establish geographic and temporal patterns with enormous historical and technological interest.

Keywords: Manuscript, ink, wine, tartaric acid, mass spectrometry.

Introducción

Uno de los principales retos de los estudios en conservación es intentar corroborar el uso de las técnicas de ejecución y materiales que se encuentran en recetarios y tratados antiguos en los objetos y obras de arte que se conservan en la actualidad. Estos estudios en áreas como la pintura y la escultura policromada están más avanzados porque desde hace siglos se conocen importantes tratados de pintura como los de Cennini, Palomino, etc. y se han realizado una mayor cantidad de análisis de obras de este tipo en las últimas décadas que han permitido identificar los materiales y cómo fueron elaboradas estas obras, dando lugar a una gran cantidad de información que ha permitido contrastarla con los tratados históricos.

No sucede lo mismo en el caso de los documentos y libros manuscritos. Esto es debido, en primer lugar a que no existen una especie de tratados como tal y los hallazgos de fórmulas descriptivas de elaboración es casi siempre casual. Por otro lado, los estudios científicos de las tintas metalogálicas se han centrado principalmente en los procesos de degradación (Neevel, y Mensch, 1999; Kolar *et al.*, 2006 y Potthast *et al.*, 2008). Los estudios orientados a la composición de las tintas ofrecían la dificultad de la toma de muestra que era necesaria, por tanto, suelen ser escasos y se orientan principalmente a los estudios químico-elementales (García *et al.*, 2004 y Martín de Hijas *et al.*, 2008) y a la identificación del ácido gálico y gomas (Sistach y Espadaler, 1993 y Lee *et al.*, 2006).

En este sentido, este trabajo es pionero ya que su objetivo es detectar la presencia de vino como vehículo en las tintas ferrogálicas empleadas en documentos de la Comunidad Valenciana. Con esta idea se ha puesto a punto un método de análisis mediante la técnica de espectrometría de masas en tándem con el fin comprobar, si esta información que otorgaban las fuentes, se correspondía con los numerosos ejemplos de tinta conservada.

La espectrometría de masas

El origen de la espectrometría de masas (MS) se remonta a los experimentos realizados por Eugene Goldstein y Wilhelm Wien y J. J. Thompson, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, que establecieron los principios de la interacción entre campos eléctricos y magnéticos fuertes con corrientes de partículas cargadas, dando lugar al concepto de la relación carga/masa.

Desde entonces, su desarrollo ha sido vertiginoso gracias al trabajo de, entre otros, Hans Dehmelt y Wolfgang Paul, con el desarrollo de la técnica de trampa de iones (Premio Nobel de Física en 1989) o John Bennett Fenn por el desarrollo de la ionización por electrospray (ESI) y Koichi Tanaka por el desarrollo de la desorción suave por láser y su aplicación a la ionización de macromoléculas biológicas, especialmente proteínas (Premio Nobel de Química compartido en 2002).

Debido a su elevada sensibilidad y selectividad, es una técnica muy versátil, siendo la técnica preferida hoy en día para la detección y cuantificación de contaminantes ambientales, controles antidopaje, análisis biomédicos, investigación farmacéutica o *screening* neonatal, entre otros muchos.

Dentro de lo que es el campo del patrimonio cultural, la espectrometría de masas directa se ha aplicado al estudio de resinas, ceras, aglutinantes grasos, proteicos, etc. Más conocidas son sus aplicaciones acopladas con otras técnicas de separación previas como la cromatografía de gases (GC) o el HPLC. Los sistemas GC-MS se emplean habitualmente en la identificación de aceites secantes, barnices, aprestos, y con un sistema pirolizador previo (Py-GC-MS) al estudio de materiales sintéticos. Los sistemas HPLC-MS se utilizan en el estudio e identificación de tintes naturales empleados en las lacas utilizadas en pintura y en los tintes de los tejidos históricos (Colombini, y Modugno, 2009; García, 2008, y Sanz *et al.*, 2010). En este trabajo, se emplea la espectrometría de masas en tándem acoplada a un sistema previo de separación HPLC para la caracterización de tintas en manuscritos.

Fundamentos de la espectrometría de masas

El fundamento de la espectrometría de masas (MS) es generar iones tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos por cualquier método disponible, separar esos iones y detectarlos tanto cuantitativa como cualitativamente en función de su abundancia.

Un espectrómetro de masas consta de tres componentes fundamentales: una fuente de ionización, un analizador de masas y un detector que opera bajo condiciones de vacío. A estos componentes fundamentales, se les añade un sistema de inyección, así como un sistema de procesamiento de los datos obtenidos.

Previamente a su análisis por espectrometría de masas, la muestra a estudio se separa cromatográficamente en el sistema de inyección. Para ello se utiliza normalmente un equipo de cromatografía líquida de alta resolución (LC o HPLC), o de cromatografía de gases (GC). El objeto de esta separación previa, es realizar una separación de los distintos componentes de la muestra a estudiar y determinar el tiempo de retención del compuesto objeto de análisis (analito).

Fuente de ionización

El objetivo de la fuente de ionización en un espectrómetro de masas, es conseguir convertir la muestra que hemos inyectado, en una fase gaseosa con iones, ya que es necesario que el analito esté cargado eléctricamente positiva o negativamente (iones) para poder ser analizado.

En espectrometría de masas se utilizan distintas fuentes de ionización, siendo la energía que se transfiere durante el proceso de ionización y las propiedades químico-físicas de la especie a ionizar, los dos aspectos más importantes que deben considerarse en relación con las mismas. En la tabla 1 se indican los distintos modos de ionización química más utilizados, el tipo de ion producido y su aplicación práctica.

Tabla 1. Principales métodos de generación de iones

Nombre en inglés	Siglas	Tipo de ionización	Tipo de iones producidos	Ejemplos de aplicaciones
<i>Thermal ionization</i>	TI	Fuerte	Iones atómicos	Análisis de trazas. Proporción isotópica
<i>Spark Source</i>	SS	Fuerte	Iones atómicos	Análisis de trazas en muestras sólidas
<i>Glow Discharge</i>	GD	Fuerte	Iones atómicos	Análisis de trazas
<i>Atmospheric pressure chemical ionization</i>	APCI	Fuerte	Iones moleculares no volátiles	LC-MS
<i>Atmospheric pressure photoionization</i>	APPI	Fuerte	Iones moleculares no volátiles	LC-MS Compuestos no polares
<i>Inductively-coupled Plasma</i>	ICP	Fuerte	Iones atómicos	Análisis de trazas. Proporción isotópica.
<i>Chemical Ionization</i>	CI	Fuerte	Iones moleculares volátiles	GC-MS
<i>Electron ionization</i>	EI	Fuerte	Iones moleculares volátiles	GC-MS, moléculas pequeñas
<i>Electrospray Ionization</i>	ESI	Suave	Iones moleculares no volátiles	LC-MS
<i>Laser desorption/ionization</i>	LDI	Suave	Iones moleculares no volátiles	Análisis de trazas. Proporción isotópica
<i>Fast Atom Bombardment</i>	FAB	Suave	Iones moleculares no volátiles	Análisis de moléculas grandes
<i>Field desorption</i>	FD	Suave	Iones moleculares no volátiles	Análisis de moléculas grandes
<i>Field ionization</i>	FI	Fuerte	Iones moleculares volátiles	Compuestos moleculares
<i>Matrix-assisted Laser Desorption Ionization</i>	MALDI	Suave	Iones moleculares volátiles	Análisis de moléculas grandes

En general, se pueden dividir según su efecto sobre la muestra, en fuertes o suaves. A través de las fuentes de ionización suaves se pueden obtener iones intactos de moléculas grandes y frágiles, como proteínas o ácidos nucleicos, mientras que con la ionización fuerte se consigue la fragmentación de los iones formados. La elección de una u otra forma de ionización depende de las características de la molécula a estudio: peso molecular, polaridad y volatilidad.

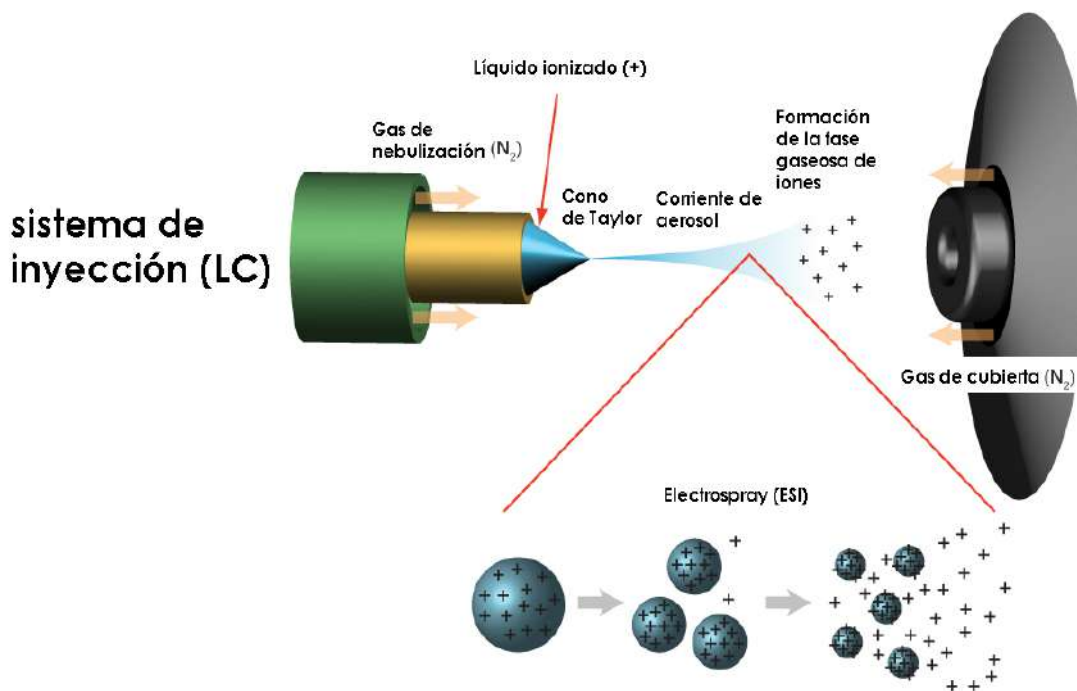


Figura 1. Esquema del funcionamiento de la fuente de ionización por electrospray. Fuente: <http://www.lamondlab.com>.

El método de ionización elegido para la caracterización de las tintas de manuscritos, fue por electronebulización, o *electrospray* (ESI), como es más conocido. Fue introducido por Dole y colaboradores en 1968, y acoplado a un detector de masas por Yamashita y Fenn en 1984. En este método, la muestra se disuelve en un disolvente polar e ionizada y la mezcla se bombea a través de un fino capilar de acero inoxidable, en cuyo extremo existe un potencial eléctrico fuerte (de 1 a 4 kV) que provoca, a través de reacciones de oxidación/reducción, la formación de una corriente de microgotas cargadas eléctricamente o *espray*. Este fenómeno físico se denomina cono de Taylor (fig. 1).

Como resultado, obtendremos iones de la molécula de interés, cargados con uno o más protones (ESI en modo positivo) o cargado negativamente por la pérdida de uno o más de ellos (ESI en modo negativo), pero sin fragmentar, ya que se considera una de las técnicas de ionización más suaves.

La preparación de la muestra requiere únicamente su disolución en una mezcla de agua y un disolvente orgánico, generalmente metanol, acetonitrilo o isopropanol. Se suele añadir una pequeña cantidad de ácido fórmico o ácido acético para facilitar la protonación de las moléculas de analito, o una pequeña cantidad de una disolución amónica o de una amina volátil si se desea facilitar la desprotonación.

Analizador de masas

Se define la relación masa/carga (m/z) como el valor adimensional obtenido del cociente entre la masa del átomo o molécula ionizada, en unidades de masa atómica, dividido por sus unidades elementales de carga, y es adimensional. También se utiliza, en lugar de m/z , la unidad Thomson (Th), en honor a J. J. Thomson, que es equivalente a m/z , pero que, aunque

habitualmente aceptada, no es una unidad del Sistema Internacional (SI). Así mismo, es usual encontrar como equivalente a la unidad de masa atómica (u), el *dalton* (Da), que tampoco está reconocido en el SI.

Los iones provenientes de la fuente de ionización pasan al analizador de masas, que tiene como función separarlos y ordenarlos de acuerdo a su relación m/z . Para ello, utiliza las fuerzas ejercidas por campos eléctricos y magnéticos para modificar la velocidad o trayectoria de la corriente de iones generada, dirigiendo los de nuestro interés, al detector.

Al igual que existe una gran variedad de fuentes de ionización, también existen analizadores de diferente tipo. Los principales analizadores de masa están a modo de resumen en la tabla 2, en función del principio físico que permite la separación iónica.

Tabla 2. Principales analizadores de masa

Tipo (inglés)	Tipo	Acrónimo	Principio
<i>Time of flight</i>	Tiempo de vuelo	TOF	Tiempo de dispersión de un haz de iones emitido. Separación por el tiempo de vuelo
<i>Magnetic sector</i>	Sector magnético	B	Desviación de un haz de iones continuo. Separación por impulso en un campo magnético (fuerza de Lorentz)
<i>Linear quadrupole</i>	Cuadripolo lineal	Q	Haz continuo de iones en el campo de radiofrecuencia de un cuadripolo lineal. Separación debido a la inestabilidad en las trayectorias de los iones
<i>Linear quadrupole ion trap</i>	Cuadripolo lineal con trampa de iones	LIT	Haz continuo de iones. Emite iones que son atrapados, almacenados y separados en el campo de radiofrecuencia de un cuadripolo lineal por excitación resonante
<i>Quadrupole ion trap</i>	Cuadripolo con trampa de iones	QIT	Iones atrapados mediante separación en un campo tridimensional de radio frecuencia de un cuadripolo por excitación resonante
<i>Fourier transform-ion cyclotron resonance</i>	Resonancia mediante ciclotron con aplicación de la transformada de Fourier en ión	FT-ICR	Iones atrapados en un campo magnético (Fuerza de Lorentz). Separación por la frecuencia del ciclotrón. Detección de la imagen en curso y aplicación de la transformada de Fourier en la señal de paso.
<i>Orbitrap</i>	<i>Orbitrap</i>	<i>Orbitrap</i>	Oscilación axial en un campo eléctrico no homogéneo. Detección de la frecuencia después de ser aplicada la transformada de Fourier en la señal de paso

El equipo empleado en este trabajo utiliza un analizador de masas lineal cuadripolo que está constituido por cuatro electrodos en forma de barra cilíndrica o hiperbólica que se extienden en la dirección z y montados en el plano x - y , tal y como se puede apreciar en la figura 2. Las varillas de un cuadripolo estandar tienen un diámetro de 10-20 mm y una longitud de 15 a 25 cm.

Cada par de cilindros opuestos tienen el mismo potencial electrostático (U), y de sentido opuesto al del otro par de cilindros. Además se aplica un potencial alterno (V) asociado a una radiofrecuencia ω . El potencial total, establecido por las ecuaciones de Mathews, sería: $\varphi = U + V \cos \omega t$

En estas condiciones los iones avanzarán a lo largo del cuadripolo, siguiendo trayectorias oscilantes, siendo repelidos y atraídos continuamente por cada par de cilindros. Para valores definidos de U y V solamente atravesarán el cuádruplo en la dirección z , los iones con

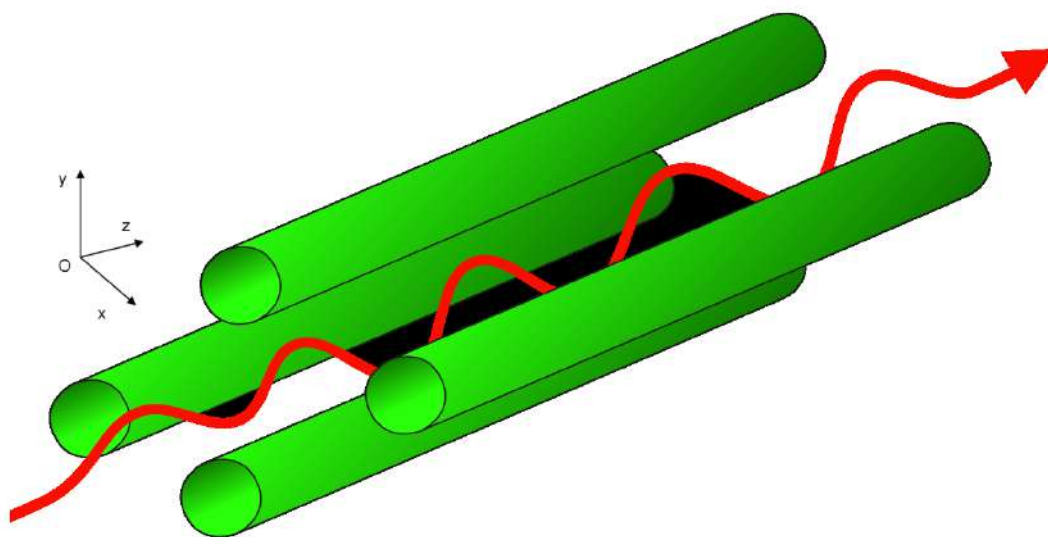


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un cuadrupolo.

determinada m/z , mientras que los demás, se desestabilizan y chocan contra las paredes. Variando la intensidad del potencial aplicado, podremos ir seleccionando iones con diferente m/z .

Detección

El detector registra y amplifica la señal proveniente del analizador de masas, enviándola al *software* de datos donde esta información se procesa en forma de espectro de masas. Su funcionamiento se basa en la emisión secundaria de electrones (efecto amplificador de la señal) que se produce al impactar en él, el ion (o iones) seleccionados en el analizador de masas.

El resultado final es un espectro de masas, que es una representación gráfica bidimensional de los iones separados por su valor de m/z (abscisas) e intensidad de señal (ordenadas). La posición de un pico indica el valor m/z de un ion que ha sido obtenido de un analito, mientras que intensidad de señal está relacionada con la abundancia de éste. A menudo, el pico del ion molecular está acompañado de varios picos con una m/z más baja, que indican fragmentaciones residuales. El pico con mayor intensidad se le denomina pico base, y en la gran mayoría de los cromatogramas, se normaliza al 100% de intensidad relativa, permitiendo comparaciones entre picos más fácilmente.

En la figura 3, podemos apreciar que a partir de una molécula de metano (CH_4) (m/z 16), obtenemos el ion molecular $m/z=15$, que ha perdido un protón, así como otros iones con una intensidad mucho más baja (m/z 12 a 14), cuyo origen podría deberse a la pérdida de protones adicionales.

Cuando se utiliza un sistema de cromatografía líquida o de gases para separar los componentes de la muestra previamente a su detección por espectrometría de masas, los distintos componentes de la mezcla son eluidos a diferentes tiempos de retención de la columna cromatográfica. Por ello, podemos representar un tipo de cromatograma, denominado *Total ion counter* (TIC), que representa la suma global de las intensidades de los iones producidos a un tiempo determinado. Si sumamos la información proporcionada por TIC, con los espectros de masas obtenidos, tendremos toda la información necesaria, pudiendo combinarla para representar cromatogramas combinados.

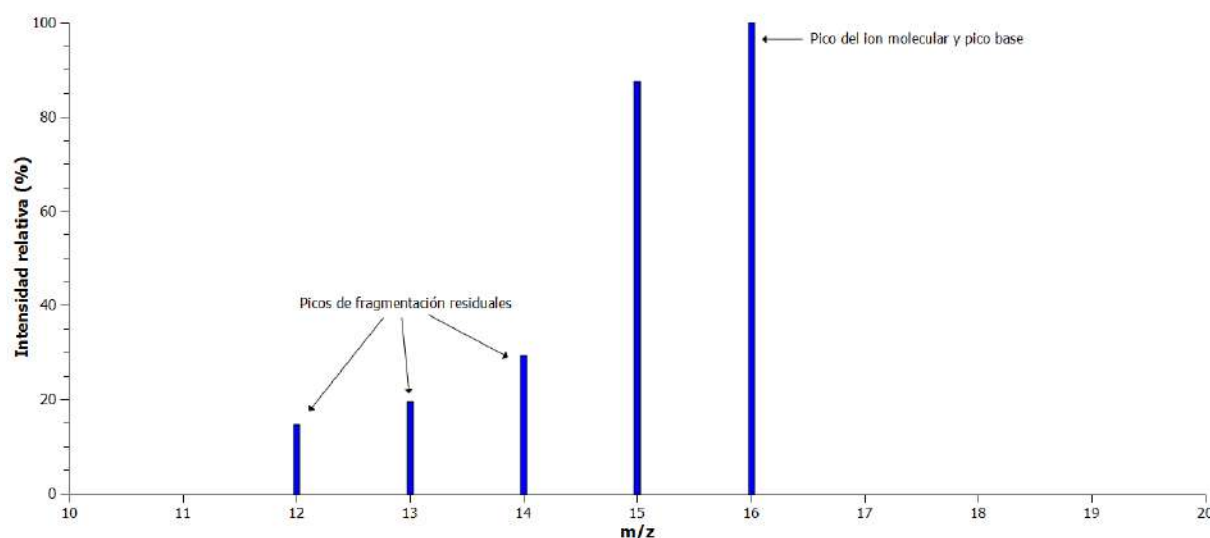


Figura 3. Espectro de masas de metano.

Espectrometría de masas en tándem

La espectrometría de masas en tándem (tándem MS, MS/MS), engloba el conjunto de técnicas que implican un segundo análisis de espectrometría de masas de iones seleccionados por su masa y denominados precursores. Para poder realizar este segundo análisis de masas, necesitaremos dos analizadores de masa acoplados, y por ello, se designa a un espectrómetro de masas en tándem, con el acrónimo (MS/MS).

Espectrómetro de masas triple cuadrupolo (QqQ)

En un espectrómetro de masas triple cuadrupolo, disponemos de tres cuadrupolos separados físicamente. De forma resumida, en el primero de ellos (Q_1), se realiza el primer análisis de espectrometría de masas (MS_1), y los iones seleccionados son acelerados a una celda de colisión mediante el segundo de los cuadrupolos (Q_2), mientras que en el tercero (Q_3) se realiza el análisis de las masas de los iones producto (MS_2). Hay que destacar que los cuadrupolos Q_1 y Q_3 , pueden trabajar de forma independiente, por lo que proporcionan distintos modos de trabajo (en inglés *scanmodes*):

1. Búsqueda del ión precursor (*Precursor ion scan*): el ion producto se selecciona en el segundo analizador de masa (Q_3), y las masas del precursor se buscan en el primero (Q_1).
2. Búsqueda del neutro (*Neutral loss scan*): en este modo, ambos analizadores de masas trabajan buscando todos los iones establecidos en un rango de trabajo, pero el segundo analizador (Q_3), actúa complementando el trabajo del primero (Q_1), a un rango de masas inferior, para la búsqueda de un neutro que es componente común a los iones precursores establecidos.
3. Búsqueda del ion producto (*Product ion scan*): se selecciona el ion precursor en el primer analizador de masa (Q_1), permitiendo que este se fraccione, y analizando sus fragmentos en el segundo analizador de masa (Q_3). Este es el modo más habitual de trabajo, y el utilizado en la caracterización de las tintas ferrogáficas.

Al evaluar el comportamiento de un espectrómetro de masas es necesario hablar de tres criterios fundamentales: sensibilidad, límite de detección y relación señal-ruido.

El término general sensibilidad hace referencia a la respuesta global del espectrómetro de masas para un analito cuando se opera en unas condiciones definidas y está directamente relacionado con el concepto de límite de detección, que es la mínima cantidad de analito necesaria para que su señal se distinga del ruido de fondo, y que es cuantificable.

La relación señal-ruido es el cociente entre la señal obtenida del analito y la procedente del ruido de fondo, y también es cuantificable.

Caracterización de las tintas en manuscritos del siglo XV al siglo XIX

Un elemento fundamental para el estudio de las tintas empleadas en los documentos manuscritos son las fuentes escritas o recetas de elaboración. Afortunadamente, algunos notarios y escribanos anotaban su receta en las páginas finales o iniciales de los manuscritos que redactaban. El hallazgo de estas fórmulas descriptivas es casi siempre casual. Gracias a la atención y generosidad de archiveros y estudiosos valencianos se han podido recopilar varias recetas desconocidas en la elaboración de estas tintas. Aunque no corresponden a los archivos estudiados, son testimonio de una tradición que se perpetúa durante siglos (fig. 4). La transcripción de la receta se indica a continuación:

«Primo, 4 liures vi blanch, o, aigua de la pluga, posar-la en una olla, o , ampolla, y picar-i 4 onses de gales romanes a troços y també 6 onses vidriol romaní y ben picat y també tant alum com una nou picat, 2 onses de goma aràbiga picad, possar-o tot dins dita olla, o ampolla y dos cullerades de mel de romer que sien fins dos onçes , y remernar-o cada dia tres voltes ab un bastonet de figuera vert p(er) temps de nou dies, y al cap dels nou dies en la mateixa olla, ab los dits materials, coure tot fins tant vulla scaltar lo bull, y après dezar-o en la mateixa olla descubert tres dies, y après colar-o ab un drap claret y serà bona tinta. Y és esta tinta de la qu.escrihu Bertomeu Maiques conforme la dita recepta».

Gracias al conocimiento de otras recetas de elaboración estudiadas, tanto de la Corona de Aragón (Mut, 1986; 1989 y 1992), como castellanas (Córdoba de la Llave, 2005: 32; 2011), se pueden establecer algunas peculiaridades de las tintas valencianas que las entronca tanto con sus vecinas peninsulares como con su pasado musulmán (Al-Abbadi, 2005), que en el caso de la Comunidad Valenciana será «presente» hasta la expulsión definitiva de éstos en 1608. Como ya apuntaba Kroustallis (2008), es muy probable que la transmisión de esta forma de hacer tinta venida de Oriente a los reinos cristianos españoles fuera el vehículo de desarrollo en el resto.

El elemento que otorga mayor peculiaridad a las recetas conocidas de tintas valencianas, es el uso de vino blanco como vehículo para hacer la tinta. En las recetas consultadas de origen musulmán, en ninguna de ellas estaba presente el vino; y en las mallorquinas, catalanas y castellanas, sólo en alguna de ellas, por lo que se puede suponer que la introducción del vino, sobre todo el blanco, fue una innovación de la población cristiana, aunque el uso del poso del vino en la preparación de las tintas se conocía desde el siglo VIII (Carvalho 2008: 43). Lo cierto es que en las recetas valencianas que conocemos es denominador común el vino blanco; en dos ocasiones propone en su ausencia agua de lluvia (más pura y refinada), y sólo en la receta conservada en el Colegio del Corpus Christie (Chiralt, 2001: 55) da la opción de cualquier tipo de vino: Registro de Libranças del Collegio, tomo I (1612-1629). «Recepta para hazer tinta fina: Tomar dos libras de vino de qualquier que sea y ponerlo en una redoma y dentro della tres

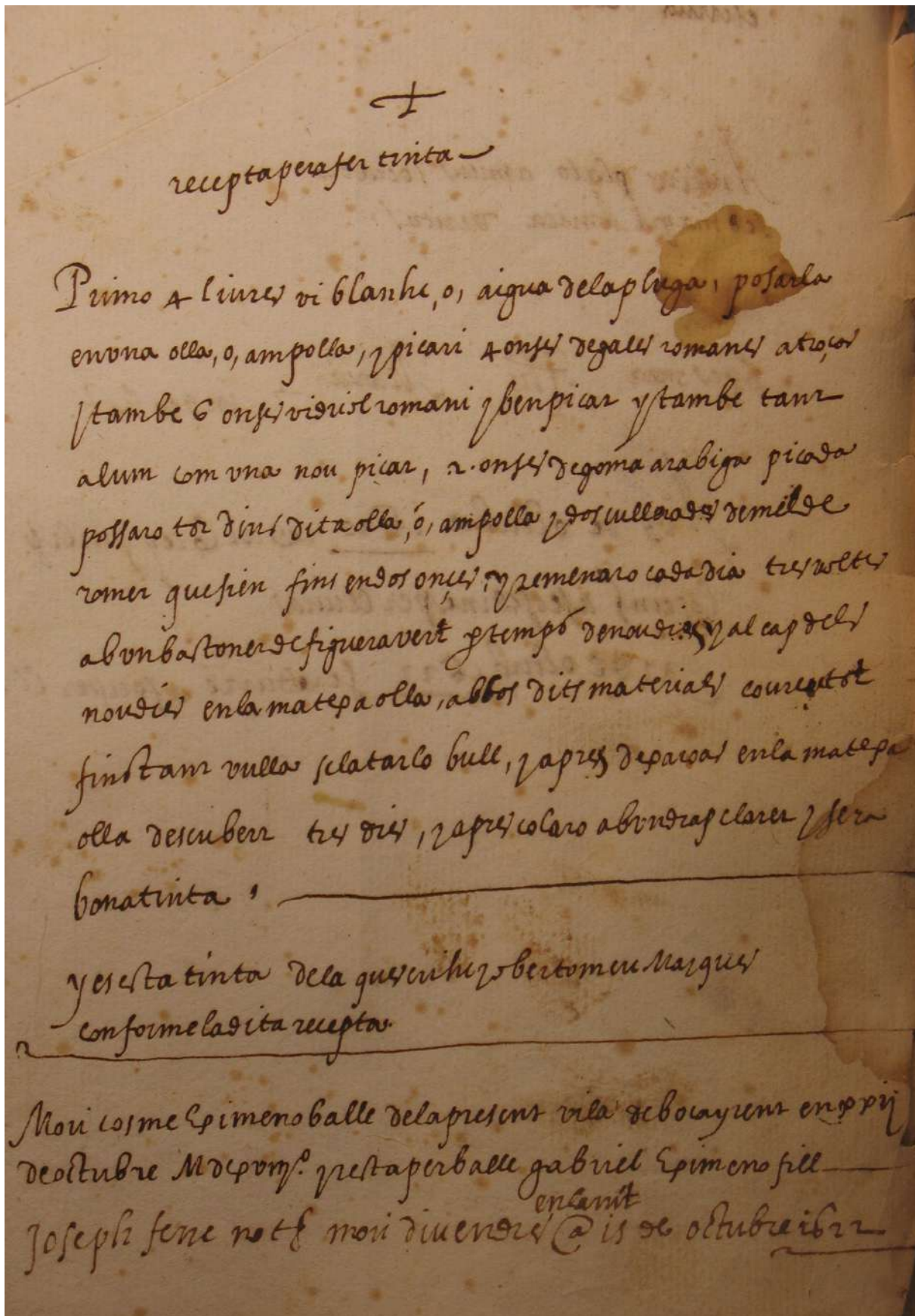


Figura 4. Receta para hacer tinta. Baldufari de Bartolomé Mayques, 1613-1648, s. f. Arxiu Municipal d'Ontinyent.

onzas de gallas de Romaní que estén rompidas cada una dellas en tres o quatro partes y tener la redoma nueve días al sol y al sereno meneándola cada día dos o tres veces y al cabo de los nueve días colar el vino que está en ella y ponerlo dentro de la dicha redoma y porná onza y media de goma arábica y tres quartos de caparros y déxela tres o quatro días al sol y será boníssima y bulirse un poco».

Además, debemos añadir a esta fuente de información, un reciente hallazgo (Contreras y Fernández, 2012) en el Archivo de la Catedral de Valencia, donde se descubrió un legajo del siglo XVIII (1701 a 1707. Legajo 2.690 Archivo de la Catedral de Valencia), compuesto por siete cuadernos en el que se relacionaban el gasto efectuado por el Archivo, en papel, plumas, tinta y otros elementos necesarios para el funcionamiento de esta dependencia, como reglas, tinteros, cuerdas, etc. Por lo que respecta a las tintas, siempre se recoge el pago de los materiales por separado: «En 28 de Juny de 1703 pagui 6L4s9 per lo recapte de la tinta, que se ha fet per alservi del Archiu, ço es: per 15LL.de Caparros a 8d.-10s=per 15LL de Gala a 3s9d=2L16s, per 3 cant. De vi a 13s, 1L19s, per altres 2 cant. De vi per a añadir a 9s=18s y per ½ quarta de Vi per a refrescar los tinters 1s9 y tot... (C3, f. 5r)», y sólo en una ocasión compran tinta elaborada, por lo que era fabricada por ellos mismos. Conviene destacar que en este caso hay un denominador común y singular, el vino. La Catedral siempre compra vino y no especifica si es blanco o tinto, pero podemos distinguir entre tres categorías o calidades de vino dependiendo del fin que este vino vaya a tener. El caldo que se adquiere para elaborar la tinta junto con las agallas y el «caparros» tiene un precio, por lo general, más elevado, excepto algunas ocasiones en que el vino que se compra para añadir a la tinta o el que se utiliza para refrescar los tinteros: «P. vi per a refrescar los tinters del archiu, 1s 11d (C1,f.5r). He pagat per micha quarta de vi per a refrescar los tinters del Archiu, 1s9d (C1,f.6r). En 25 de ditspagui per micha quarta de vi per a refrescar elstinters del Archiu, y port 1s9d (C1,f.6r). Que per una ampolla encordada per a portar vi per a refrescar ditstinters del Archiu, 2s 6d (C4, f.5v)». Esto nos da idea de cómo los escribanos de la catedral aprovechaban el material; cuando se terminaba la tinta elaborada añadían más vino al poso y se utilizaba el contenido que, como sabemos, era práctica habitual en otros archivos.

Para dar respuesta a la necesidad de estudiar la composición de las tintas y verificar lo que se dicen en los tratados y recetarios de los manuscritos que llegaban al Instituto Valenciano de Conservación y Restauración (IVC+R), (Contreras y Juanes, 2011), surge, como fruto de un trabajo conjunto interdisciplinar entre el IVC+R y el Laboratorio Agroalimentario, la idea de aplicar la técnica de espectrometría de masas en tándem a su análisis. Quisimos comprobar si esta información que otorgaban las fuentes se correspondía con los numerosos ejemplos de tinta conservada. Para ello, se tomó algunas muestras de tinta de archivos de Vila-Real, Castellfort y Requena, geográficamente muy distintos. Cabe destacar que en la zona de Requena está documentada la presencia del cultivo del vino desde el siglo V a. C.

Determinación por espectrometría de masas en tándem de ácido tartárico en tintas ferrogálicas

Elaboración de tintas patrón

Como en cualquier estudio analítico, se realizó un trabajo previo de puesta a punto de la técnica y del método de análisis. Para ello, se elaboraron tres tintas patrón, reproduciendo la receta procedente de Elche (1681).

Protocolo notarial de José Mazón. 1681-1683. Signatura SHPN 322, fol. 152 r y v de 1682. Arxiu Històric Municipal d'Elx: «Resepa para aser tinta fina Thomaras un alumbre de vino

blanco. Y pondras en una olla nueva, y luego le echaras çobre quatro onsas de agallas finas, medio quebarantadas, no echas polvos, y lo pondras todo al sol quatro dias de verano. Y si es invierno seis días. Al cabo de ellos, se le echara tres onsas de alcaparros limpio, y molido. Y estara así otros tres días. Al cabo de ellos se le echara a todo onsa y media de goma harabiga molida y limpia, y estara dos días. Y despues se colara, poniendola en la vasiya o redoma que a de estar. Si en las eses, o materiales que quedan echaren otro alumbre de vino. Y lo menearan de quando en quando, tendran tambien buena tinta. Adviertase que desde que se comienza a hazer dicha tinta se ha de menear tres, o quatro veces cada dia con un palito de Ygera. Y esta es notable sircustansia para que no se engrase y si se quisiese azer mucha tinta se doblaran las cantidades de los ingredientes. Ego Genesius Mazon, notirius publicus ville elicitana receptor sig (signo notarial) navi. Gines Monzon, notario de la villa de Elche signo suo».

A partir de la cantidad de vino aconsejada, se prepararon tres composiciones distintas empleando como vehículo, vino blanco, vino tinto (en ambos casos sin tratamiento de estabilización previo al embotellado) y agua, para poder establecer comparaciones entre los resultados. El resto de ingredientes, las agallas machacadas, la goma arábica y el sulfato ferroso, removidos con una ramita de higuera, se prepararon fielmente, tal y como señalaba el texto ilicitano (fig. 5).



Figura 5. Preparación de las agallas en el momento de añadirlas al vino. Proceso de maceración de la tinta, al sol y removida por una barita de higuera.

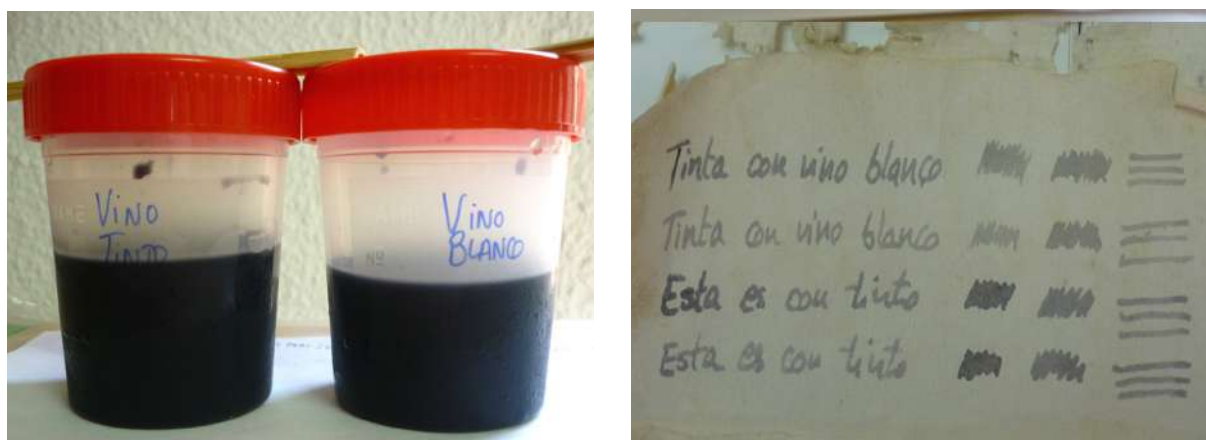


Figura 6. Tinta terminada según la receta de Elche de 1613-1348. Escritos resultantes de la tinta preparada sobre un papel del siglo XVI.

Con la tinta obtenida, se procedió a realizar pruebas de escritura utilizando papel hecho a mano del siglo XVI, del que el IVC+R disponía, gracias a la recopilación de material que podemos realizar con los restos de algunas intervenciones de restauración, sobre todo en lo que se refiere a guardas rotas y otros elementos marginales (fig. 6). Parte de estos fragmentos escritos con estas tintas fueron sometidos a ciclos de envejecimiento acelerado en el interior de una cámara climática Climacell 707 Komfort line a 80° C con un 50% de HR con el fin de conocer si se producían variaciones en los resultados debidos al proceso de envejecimiento. Los fragmentos sirvieron de probetas para la puesta a punto del método de espectrometría de masas realizado en el Laboratorio Agroalimentario.

La determinación de la presencia de vino en las tintas de manuscritos lleva implícito una serie de retos como son la cantidad de muestra con la que se puede trabajar y su estado de conservación, entre otros. Pero el primero de todos ellos es determinar qué componente del vino elegir, que sea prácticamente exclusivo de él, y cuya ausencia nos permita descartar su presencia. De entre los distintos componentes del vino, desde un punto de vista analítico, sus ácidos resultan muy interesantes. Estos se pueden clasificar en:

1. Ácidos orgánicos naturales, que son aquellos que proceden de la uva y por tanto se han formado durante el proceso madurativo natural en la planta y entre los que podemos encontrar el ácido tartárico, ácido málico y el ácido cítrico.
2. Ácidos orgánicos derivados, que son aquellos surgidos durante los procesos fermentativos a los que es sometido el mosto, y entre los que podemos incluir el ácido láctico, el ácido succínico y el ácido acético.
3. Ácidos inorgánicos, cuyo origen es mineral y entre los que destaca el ácido sulfúrico, presente en forma de sulfatos.

Se realizó una búsqueda bibliográfica centrada en los métodos de identificación de vino en restos de hallazgos arqueológicos. En la mayoría de ellos se elegía el ácido tartárico. Al igual que en un trabajo muy interesante realizado en la Universidad de Barcelona (Guasch-Jané *et al.*, 2004) se eligió el ácido tartárico como el analito objetivo debido a que es un componente característico y distintivo de la uva.

El ácido tartárico es un ácido orgánico presente en el vino (~4,5 g/L), cuya fórmula molecular es $C_4H_6O_6$, y que tiene dos grupos carboxílicos y dos grupos alcohol. Su peso molecular es de 150 g/mol, y se encuentra en el vino tanto en forma libre como combinada, en forma de tartrato ácido de potasio. El ácido tartárico procede de la excisión de las hexosas a nivel del enlace de los carbonos C_4 y C_5 . Su formación no resulta de un fenómeno respiratorio celular. Se forma, sobre todo, en los órganos en vías de crecimiento. También se sintetiza en las uvas verdes donde raramente está al servicio de las necesidades energéticas de la baya. No puede ser catabolizado a no ser que la temperatura sea superior a 35° C (Flanzy, 2002). Es el más abundante en el vino y también el más estable, pudiendo llegar a suponer más de dos tercios del total. Su aportación al vino es la de añadir características de fruta madura, sabores frescos y agradables, lo que se conoce como notas vinosas. Precipita en forma de sales (tartrato cálcico o bitartratopotásico) como consecuencia de la acción insolubilizante conjunta del frío y el alcohol.

Condiciones cromatográficas y de detección

La determinación del ácido tartárico se realizó utilizando un equipo de cromatografía líquida (Agilent 1200) con un detector de espectrometría de masas acoplada en tándem (Applied



Figura 7. Equipo utilizado: Agilen 1200 con detector 3200 QTrap.

Biosystems 3200QTrap), y una columna cromatográfica Waters Atlantis T3 2,1 × 100 mm 3 μ m, a 40° C (fig. 7).

Se empleó un patrón de ácido tartárico con una fase móvil que consiste en una mezcla de 95/5 v/v A/B, de agua (A) con una pequeña cantidad de formiato amónico (2mM) y ácido fórmico (2mM), y metanol (B), a un flujo constante isocrático de 300 μ l/min. El volumen de inyección de cada muestra utilizado fue de 5 μ L, y el tiempo de retención del ácido tartárico observado en estas condiciones fue de aproximadamente 2,4 min. Las condiciones óptimas para la detección del ácido tartárico las encontramos al trabajar en modo de ionización negativo, utilizando electrospray (ESI), donde al realizar una búsqueda del ion producto, la molécula desprotonada de ácido tartárico ($m/z=149$, $DP=-25V$), proporciona dos fragmentos de interés. El primero, $m/z=87$, utilizando una energía de colisión (CE), de 20 V, y el segundo, $m/z=73$, con CE de 25 V (fig. 8).

Para poder admitir la presencia de ácido tartárico se establecieron como criterios: que la molécula desprotonada de ácido tartárico debería aparecer en el tiempo de retención establecido, y que deberían aparecer los iones producto $m/z=87$ y $m/z=73$ con una relación señal/ruido (s/n) de al menos 3. Una vez establecidas las condiciones de trabajo, se realizaron pruebas del método con las probetas de escritura envejecidas y sin envejecer preparadas en el IVC+R.

Preparación de la muestra

La comprobación de la validez del método de extracción la realizamos utilizando los fragmentos con preparados en el IVC+R, mencionados anteriormente, cuya tinta contenía vino en su composición, siguiendo la receta ilicitana. Para cada muestra de manuscrito, se tomó una cantidad aproximada de 1 mg (fig. 9), a la que se le añadió 0,5 ml. de una mezcla de agua y metanol

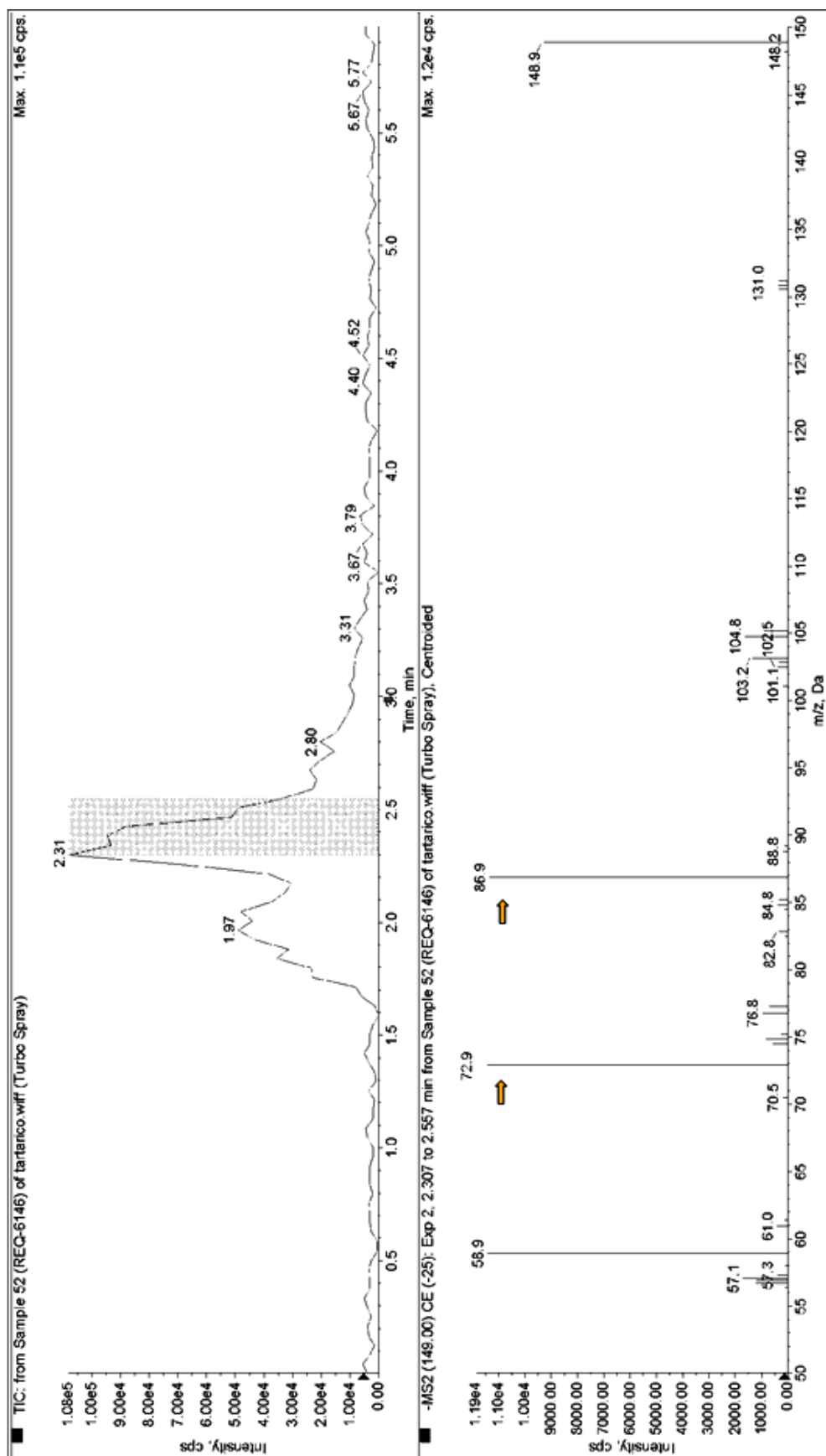


Figura 8. Espectro TIC y de masas de una muestra patrón con presencia de ácido tartárico.



Figura 9. Muestra de manuscrito para análisis.

(80/20 v/v) con un 1% de ácido fórmico, dejándola extraer durante 48 horas utilizando ultrasonidos. Posteriormente, cada una de ellas se filtró a vial utilizando filtros PTFE de 0,45 μm .

Un ejemplo de los resultados obtenidos se muestra en la figura 10. La parte de la izquierda corresponde a una muestra elaborada con vino blanco, donde se aprecia el pico a 2,32 minutos en el cromatograma TIC. En la parte inferior aparecen los picos $m/z=73$ y $m/z=87$ que confirman que se trata de ácido tartárico. El espectro TIC de la derecha corresponde a la tinta elaborada con agua, en el que no se aprecia el pico a 2,32 minutos en el cromatograma TIC, ni los picos $m/z=73$ y $m/z=87$ en los espectros de masas.

Una vez comprobado el método en las probetas realizadas en el IVC+R, se realizó un segundo test empleando una micromuestra de un manuscrito de la catedral de Valencia (Legajo 2.690). De este manuscrito se tenía la certeza que contenía vino en la composición de su tinta, lo que también nos permitió corroborar la sensibilidad del método y obtener un primer resultado positivo de una muestra real.

Análisis de tintas procedentes de documentos históricos

Una vez comprobado que el procedimiento de análisis permite detectar la presencia de vino en las tintas se empezaron a analizar un grupo de muestras para determinar la presencia de ácido tartárico. Hay que mencionar, que estos análisis son cualitativos, por lo que lo único que se persigue es la presencia de ácido tartárico en la composición de la tinta. Para ello se estableció un criterio de calidad que permitiera asegurar esta presencia. Se fijó un umbral señal/ruido de 3, a partir del cual la presencia de ácido tartárico es positiva.

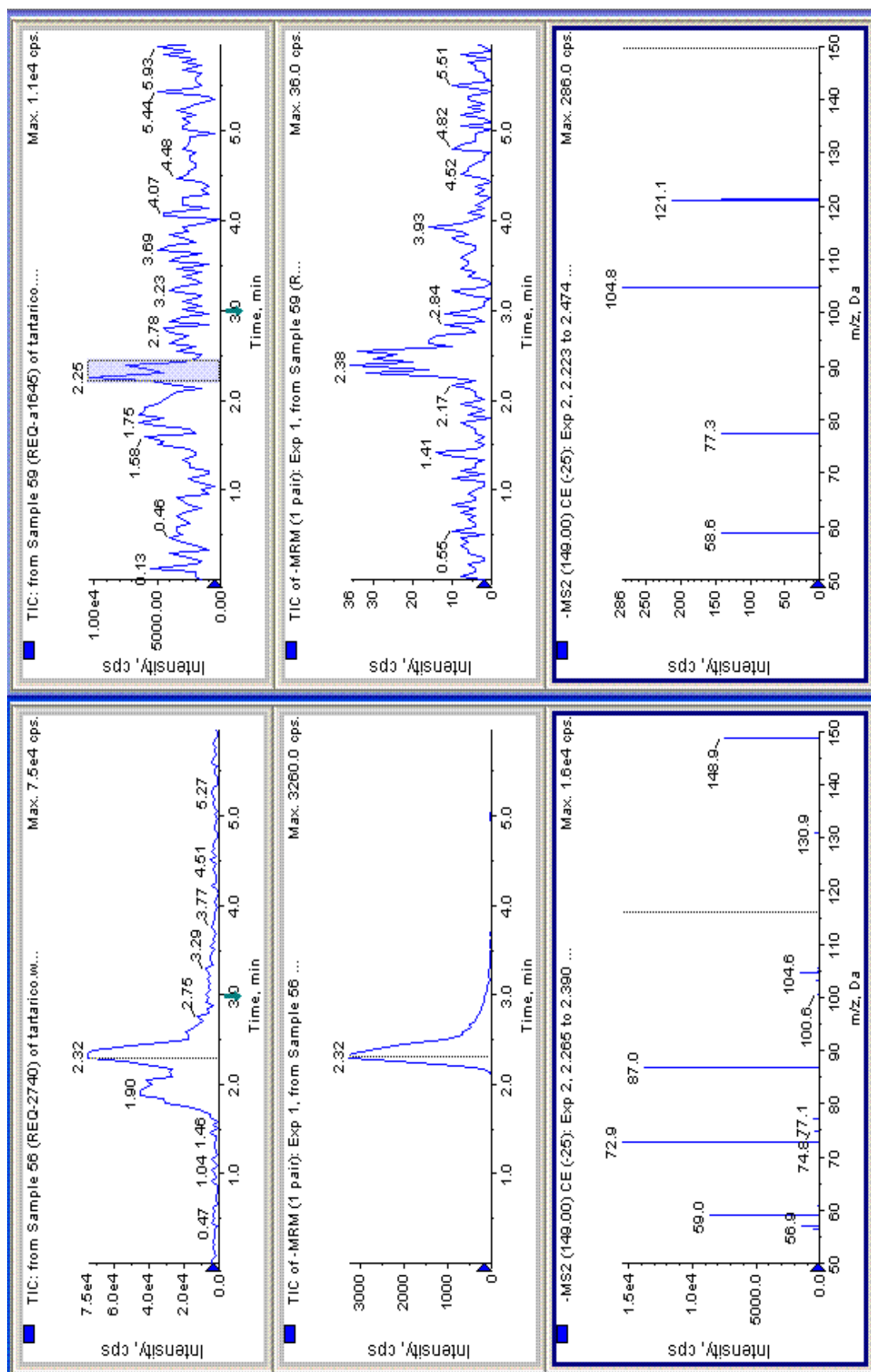


Figura 10. Comparativa de espectros de una muestra con ácido tartárico (izquierda) y sin él (derecha).

Se ha realizado una primera serie de 37 muestras procedentes de archivos de tres municipios de la Comunidad Valenciana. De Requena (Valencia) se obtuvieron 13 muestras del archivo municipal, nueve de la iglesia del Salvador y ocho de la iglesia del Carmen. Del archivo municipal de Vila-Real (Castellón) se obtuvieron otras seis muestras, por último se toma una muestra del archivo municipal de Castellfort (Castellón). Todas las micromuestras fueron obtenidas de documentos datados entre los siglos XVI y XIX. La variabilidad en el número de muestras fue debida a la disponibilidad de manuscritos en los diferentes archivos visitados, ya que el muestreo únicamente tenía como objetivo una primera aproximación al problema de la existencia de vino en tintas.

En la figura 11 se recogen algunos de los resultados obtenidos. La presencia del pico ($m/z=87$), a un tiempo de retención de 1,83 minutos, indica, junto a la presencia del segundo fragmento ($m/z=73$) propio del ácido tartárico, su presencia en la muestra de tinta y por tanto un resultado positivo en ciertas muestras y negativo en el resto. Las ligeras variaciones en los tiempos de retención son debidas a la propia naturaleza del ácido tartárico, así como a otros factores (efecto matriz, etc.).

El resultado de los análisis de las 37 muestras se recoge en la tabla 3, marcadas con (+) las muestras con resultado positivo, y con (-) las muestras con resultado negativo. Aunque el número de muestras analizadas es pequeño para obtener datos fiables de su trazabilidad geográfica y temporal, sí que se aprecian hechos relevantes que suscitan nuevas dudas e hipótesis que se deben ir verificando con futuros y más exhaustivos análisis. Así por ejemplo, en los *Manuales del Consell* del archivo de Vila-Real que abarcan desde 1469 a 1518 se empleó un tipo de tinta en la que no se detecta presencia de vino. Sin embargo, en otro documento anterior a ese intervalo temporal como es el *Papel grande (RQ-4212a)* del archivo municipal de Requena sí que se detecta vino como ingrediente de la tinta empleada.

Las muestras de los documentos del Archivo Municipal de Requena abarcan un periodo de tiempo de 192 años, de 1460 a 1652. Se observan documentos escritos con tinta con presencia de vino y documentos en los que no se ha detectado su presencia. No se observa ningún patrón evidente, por lo que el estudio debe profundizarse en este sentido.

Los resultados de las muestras de la iglesia del Salvador de Requena parecen indicar que hay un momento en el que no se detecta el vino en las tintas utilizadas en la escritura. En el caso de los libros de bautismos, se detecta en el documento RSB-1 que abarca de 1690 a 1790, aunque en el RSB-2 cuya fecha inicial es 1750 ya no se detecta, por lo que podría ser esta fecha el momento en la que se deje de emplear el vino como ingrediente. Sin embargo, esta hipótesis no es acertada ya que se detecta vino en el libro de matrimonio.

El análisis de las muestras de la iglesia del Carmen proporcionan unos resultados iniciales en los que se evidencia la necesidad de un mayor número de muestras, ya que se detecta presencia de vino en los libros de matrimonios que van desde 1564 a 1816, mientras que en los de bautismos, que se encuadran dentro de este periodo de tiempo, sólo ha dado positivo en un caso. Los resultados de ambas iglesias plantean una hipótesis aún por corroborar, ¿se utilizarían tintas distintas en función del documento?

En las figuras 12 y 13 se recogen a modo de resumen, los resultados obtenidos en función de la zona geográfica y la datación de los documentos. Un análisis profundo de los componentes de las tintas de manuscritos puede llevar como resultado final, a fijar su trazabilidad geográfica y temporal, así como profundizar en el conocimiento de los factores de deterioro que les afectan.

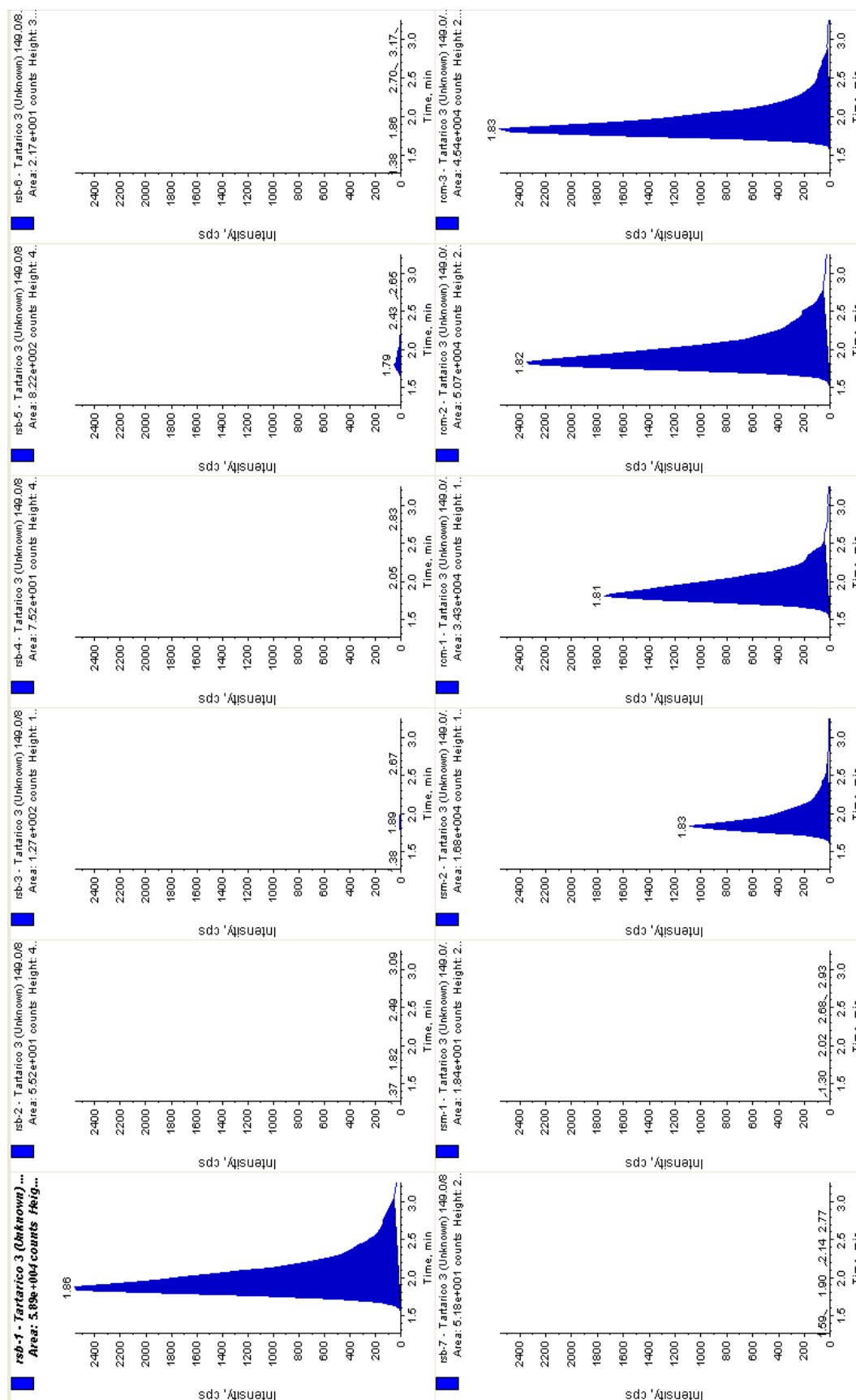


Figura 11. Conjunto de espectros de masas de varias muestras de manuscritos.

Tabla 3. Resultado de los análisis de las 37 muestras

Identificación	Procedencia	Datación	Tipo de documento	Resultado
VLR-1469	Villareal	1469	Manual consell	-
VLR-1485	Villareal	1485	Manual consell	-
VLR-1507	Villareal	1507	Manual consell	-
VLR-1509	Villareal	1509	Manual consell	-
VLR-1513	Villareal	1513	Manual consell	-
0	Villareal	1518	Manual consell	-
RQ-4121a	Requena	1460	Papel grande	+
REQ-a1523	Requena	1523	Acuerdo del concejo de Requena	+
REQ-6147	Requena	31 de octubre de 1531	Libro de cuentas propias y depósito	-
REQ-377/2a	Requena	1560	Execuciones contra el maestro Vidaña y otras escrituras	-
REQ-377/2b	Requena	7 de octubre de 1560	Acuerdo del concejo de Requena relativo al puente de Pajazo	-
REQ-6157	Requena	1561	Proceso contra el corregidor de Requena Francisco Lezcano	+
REQ-6146	Requena	1568	Juicio de residencia del corregidor doctor Aliaga	+
REQ-2898	Requena	1587-1593	Actas del concejo de Requena	+
REQ-2470	Requena	1611-1612	Libro de cuentas propias y arbitrios	+
REQ-a1638	Requena	1638	Libro de cuentas	-
REQ-a1645	Requena	1645	Traslado de cédula real	-
RQ-4721b	Requena	1650	Papel grande	+
REQ-2740	Requena	4 de enero de 1652	Actas del concejo de Requena	+
RSB-1	Requena	1690-1790		+
RSB-2	Requena	1750-1776		-
RSB-3	Requena	1771-1788		-
RSB-4	Requena	1754-1771	Bautismos	-
RSB-5	Requena	1788-1797		-
RSB-6	Requena	1797-1817		-
RSB-7	Requena	1817-1832		-
RSM-1	Requena	1730-1773		-
RSM-2	Requena	1775-1790	Matrimonios	+
RCM-2	Requena	1564-1655		+
RCM-1	Requena	1656-1769	Matrimonios	+
RCM-3	Requena	1745-1816		+
RCB-1	Requena	1665-1729		-
RCB-2	Requena	1729-1755		-
RCB-3	Requena	1753-1769	Bautismos	-
RCB-4	Requena	1769-1788		+
RCB-5	Requena	1788-1812		-
Castellfort	Castellfort	Archivo Municipal		-

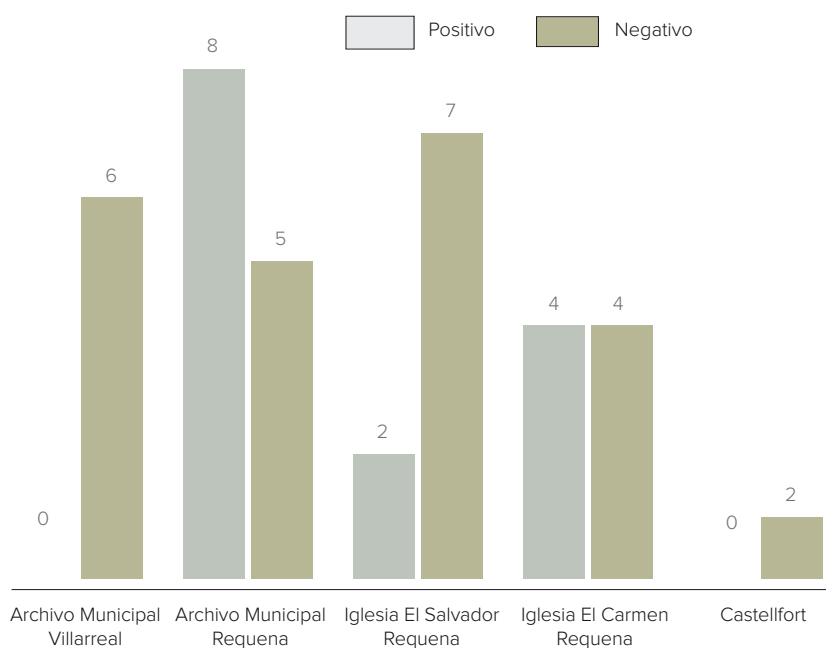


Figura 12. Distribución geográfica de los resultados obtenidos.

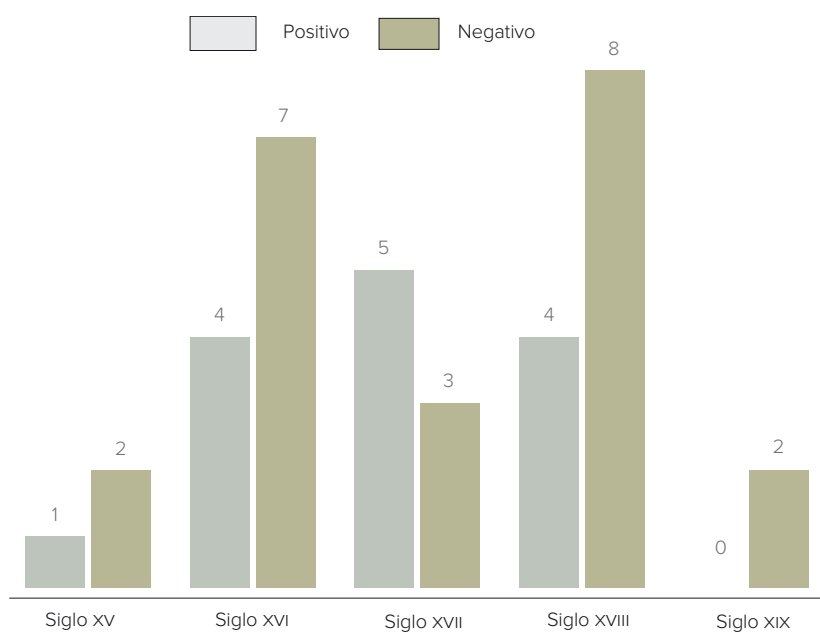


Figura 13. Distribución temporal de los resultados obtenidos.

Conclusiones

Este trabajo es un ejemplo de cómo se aúnan las áreas científica e histórica para obtener un

mejor conocimiento de la tecnología empleada en los bienes culturales. En concreto se ha corroborado la existencia de vino como ingrediente en tintas ferrogálicas en documentos del Archivo Municipal de Requena, de la iglesia del Carmen y de la iglesia del Salvador, tal y como se recoge en recetarios antiguos donde se describe cómo elaborar tinta de escritura.

La presencia de vino en las tintas de la zona de Requena era esperable ya que la comarca de Requena tiene documentada presencia del cultivo del vino desde el siglo v a. C. Sin embargo, en Vila-Real (Castellón) que era una zona de conocida producción vinícola durante el periodo comprendido entre los siglos xv-xvi, no se ha detectado vino como ingrediente de la tinta en las muestras analizadas.

Este trabajo constituye una fase inicial de un amplio proyecto en el que se intentará corroborar la existencia de correlaciones geográficas, temporales, históricas, etc. del uso y del tipo de tinta empleado en la Comunidad Valenciana, lo que es una valiosa información de tipo histórico y documental.

Bibliografía

- AL-ABBADI, Hossam Mujtâr (2005): *Las artes del libro en Al- Andalus y el Magreb*. Madrid: Ediciones el Viso.
- CÁRCEL ORTÍ, M.^a M., y TRENCH ODENA, J. (1979): «La tinta y su composición. Cuatro recetas valencianas (siglos xv-xvii)», en *Revista de Archivos, Bibliotecas y Museos LXXXII*, n.º 3, julio-septiembre, pp. 415-427.
- CARVALHO, David N. (2008): *Forty Centuries of Ink Or a Chronological Narrative Concerning Ink and Its Backgrounds*.
- CHIRALT BAILACH, Enric (2001): *El archivo del Real Colegio de Corpus Christi de Valencia: el fondo Alfara del Patriarca y Burjassot*. Tesis doctoral dirigida por Vicent Pons Alós. Valencia: Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Valencia.
- COLOMBINI, M. P., y MODUGNO, F. (2009): *Organic mass spectrometry in art and archaeology*. Chichester, West Sussex: Wiley.
- CONTRERAS ZAMORANO, G. M., y FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, G. (2012): «Papel, plumas y tinta, trabajos en el archivo de la Catedral de Valencia, 1701-1707», en *X Jornadas de Ciencias y Técnicas Históricas: Lugares de escritura: la Catedral*. Valladolid, 18 y 19 de junio de 2012.
- CONTRERAS ZAMORANO, G. M., y JUANES BARVER, D. (2011): «Las tintas valencianas en los siglos xii y xiv», en *I Congreso Internacional. El soporte escriptorio en la Edad Media. El protagonismo de la villa de Xàtiva*. Valencia, mayo de 2011.
- CÓRDOBA DE LA LLAVE, Ricardo (2005): «Un recetario técnico castellano del siglo xv: el manuscrito H490 de la Facultad de Medicina de Montpellier», en *En la España Medieval*, n.º 28, pp. 7-48.
- CÓRDOBA DE LA LLAVE, R., y CRIADO VEGA, M.^a T. (2011): «Recetas castellanas e tintas de escritura de los siglos xv-xvi», en *I Congreso Internacional. El soporte escriptorio en la Edad Media. El protagonismo de la villa de Xàtiva*. Valencia, mayo de 2011.
- EKMAN, R. (2008): *Mass spectrometry: Instrumentation, Interpretation and Applications*.
- FLANZY, C. (2002): *Enología: Fundamentos científicos y tecnológicos*, AMV Ediciones.
- GARCÍA, M. (2008): «Técnicas cromatográficas aplicadas al estudio de Bienes Muebles», en *La Ciencia y el Arte I*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 173-182.

- GARCÍA, M. A.; MARTÍN DE HIJAS, C., y JUANES, D. (2004): «Análisis de los documentos autógrafos de Isabel I pertenecientes al fondo documental del Monasterio de Nuestra Señora de Guadalupe», en *Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, pp. 81-102.
- GROSS, J. (2011): *Mass spectrometry Second Edition*.
- GUASCH-JANE, M.; IBERN-GÓMEZ, M.; ANDRÉS-LACUEVA, C.; JAUREGUI, O., y LAMUELA R. (2004): «Liquid Chromatography with Mass Spectrometry in Tandem Mode Applied for the identification of Wine Markers in Residues from Ancient Egyptian Vessels», en *Anal. Chem*, n.º 76, pp. 1672-1677.
- KOLAR, J.; ŠTOLFA, A.; STRLIČ, M.; POMPE, M.; PIHLAR, B.; BUDNAR, M.; SIMČIČ, J., y REISSLAND, B. (2006): «Historical iron gall ink containing documents-Properties affecting their condition», en *Analytica Chimica Acta*, n.º 555, pp. 167-174.
- KROUSTALLIS, Stefanos (2003): «La tinta negra ferrotánica: a propósito de las fuentes», en *Actas del V Congreso Nacional de Historia el Papel en España*, Sarrià de Ter 2-4 de octubre, pp. 579-583.
- (2008): «La escritura y sus materiales: pigmentos, tintas e instrumentos», en *El soporte de la lengua, Patronato Santa M.^a la Real de Nájera*, pp. 133-166.
-
- LEE, A. S.; MAHON, P. J., y CREAGH, D. C. (2006): «Raman analysis of iron gall inks on parchment», en *Vibrational Spectroscopy*, 41, pp. 170-175.
- MARTÍN DE HIJAS, C.; JUANES, D., y GARCÍA, M.^a A. (2004): «Análisis de los documentos autógrafos de Isabel I pertenecientes al fondo documental del Monasterio de Nuestra Señora de Guadalupe», en *Bienes Culturales. Revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, n.º 4, pp. 81-103.
- MCGOGERN, P. E.; GLUSKER D. L.; EXNER, L. J., y VOIG, M. M. (1996): «Neolithic resinated wine», en *Nature*, n.º 381, pp. 480-481.
- MUT CALAFELL, Antonio (1986): «Recetas mallorquinas de tinta y de goma glasa, de los siglos xv al xviii», en *Homenaje a don Jesús García Pastor, Bibliotecario*. Palma de Mallorca: Conselleria d'Educació i Cultura del Govern Balear. Direcció General de Cultura, pp. 11-37.
- (1989): «Nuevas aportaciones sobre la tinta en Mallorca», en *Mayurqa*. Palma de Mallorca: Universitat de les Illes Balears, n.º 22, pp. 849-863.
- (1992): *Fórmulas españolas de la tinta caligráfica negra de los siglos XIII a XIX y otras relacionadas con la tinta: para reavivar escritos, contra las manchas y para preparar la goma glasa*. Diputación Provincial de Huelva.
- (2005): «Fórmules espanyoles de tinta caligráfica de color groc (segles XVI-XIX)», en *Boletí de la Societat Arqueològica Luliana*. Palma de Mallorca, n.º 61, pp. 143-162.
- NEEVEL, J. G., y MENSCH, C. T. J. (1999): *The behaviour of iron and sulphuric acid during iron-gall ink corrosion*. James & James, pp. 528-533.
- POTTHAST, A.; HENNIGES, U., y BANIK, G. (2008): «Iron gall ink-induced corrosion of cellulose: aging, degradation and stabilization. Part 1: model paper studies», en *Cellulose*, 15, pp. 849-859.
- SANZ, E.; GARCÍA, M. A., y CHÉRCOLAS, R. (2010): «Métodos analíticos desarrollados en el IPCE para el estudio de bienes culturales basados en la Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier y Técnicas Cromatográficas», en *La Ciencia y el Arte II. Ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura.
- SISTACH, M. C., y ESPADALER, I. (1993): *Organic and inorganic components of iron gall inks*. International Council of Museums Committee for Conservation, pp. 485-490.
- ZERDOUN BAT-YEHOUDA, Monique (2003): *Les encres au Moyen Âge (jusqu'à 1600)*. Paris: CNRS Editions.

Otras referencias

D.G. Health and Consumers (DG SANCO), Comisión Europea. Documento n.º SANCO 12495/2011.

Termografía de infrarrojos aplicada a la conservación del patrimonio cultural

María Teresa Gil Muñoz

Water Wood, Agua y Madera, S. L.
m.teresa.gil@gmail.com

Juan Antonio Herráez Ferreiro

Sección de Conservación Preventiva del Área de Investigación y Formación.
Instituto del Patrimonio Cultural de España
juan.herraez@mecd.es

Resumen: La termografía de infrarrojos (TIR) aplicada al patrimonio cultural es una herramienta de inspección y diagnóstico, no destructiva¹, sin contacto físico, cuyo fundamento es el análisis del comportamiento térmico de los materiales y su relación con las características materiales y estructurales, así como con los procesos de deterioro de los bienes culturales.

La aplicación y puesta a punto de esta técnica de estudio y análisis para su uso en la conservación preventiva es una de las funciones de la Sección de Conservación Preventiva del Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

El empleo de la termografía de infrarrojos por los técnicos de la sección se remonta a 1989. Su utilización en el patrimonio inmueble se ha dirigido a la investigación de estructuras, grietas, oquedades, identificación de elementos ocultos y detección de humedades. Es precisamente en este último campo donde la sección está dando un mayor impulso para uso de la técnica como ayuda en el diagnóstico de las humedades, a raíz del proyecto de investigación «Estudios sobre diagnóstico y control de humedades en edificios declarados BIC (Bien de Interés Cultural), desde la perspectiva de la conservación preventiva», adjudicado a la empresa Water Wood, Agua y Madera, S. L. con plazo de ejecución de marzo de 2011 a marzo de 2013, realizado por María Teresa Gil Muñoz.

Destacan los trabajos realizados en el claustro del monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos), las pinturas murales de la ermita de San Antonio de la Florida en Madrid, las pinturas murales de la cúpula *Regina Martyrum* de la Basílica del Pilar de Zaragoza, la bóveda del *Cielo de Salamanca* del museo de la Universidad de Salamanca, la ermita del Santo Cristo de la Luz en Toledo, la ermita de San Baudelio de Berlanga en Casillas de Berlanga (Soria), etc.

Este artículo muestra la experiencia adquirida por los autores en el uso de la termografía de infrarrojos, como herramienta que requiere de una técnica y una metodología para la detección de humedades o patología vinculada en el patrimonio edificado.

¹ No se radia el objeto, sino que se detecta la radiación infrarroja emitida un material.

Palabras clave: Termografía de infrarrojos, inspección termográfica, detección de humedades en edificios, conservación del patrimonio cultural.

Abstract: The infrared thermography (IRT) applied to the cultural heritage is a non destructive diagnostic and inspection tool without physical contact which is based on the analysis of the thermal behavior of materials and their relation with the material properties and structural characteristics that are used to watch the deterioration processes of the cultural heritage.

Application and adjustment of this analytical technique is one of the works development by the Preventive Conservation Section in the Research and Formation Departament of the Spanish Cultural Heritage Institute.

The infrared thermography is used by technical personnel of the Section since 1989 to investigate structures, cracks, hollows and to identify secret elements and dampness in heritage buildings. It is in dampness diagnosis with IRT in which the Preventive Conservation Section is taking an extraordinary impulse thanks to a research project called “Studies for diagnosis and control of damp, in a preventive conservation view, in buildings declared BIC (Important Cultural Heritage)”, awarded to the company Water Wood, S. L. from March 2011 to March 2013.

This study are carried out some very important works in the cloister of the monastery of Santo Domingo de Silos (Burgos), in the wall paintings of the hermitage of San Antonio de la Florida in Madrid, in the wall paintings of the «Regina Martyrum» dome in the basilica of Nuestra Señora del Pilar in Zaragoza, in the «Cielo de Salamanca» of the museum of the University of Salamanca, in the hermitage of Santo Cristo de la Luz in Toledo, in the hermitage of San Baudelio de Berlanga in Casillas de Berlanga (Soria), and some many more.

This article shows the experience learned and development by the authors in the use of the infrared thermography for detecting moisture or other different pathologies linked with heritage buildings.

Keywords: Infrared thermography, infrared thermography inspection, detection of moisture in buildings, conservation of cultural heritage.

Introducción

La termografía de infrarrojos es una técnica para el diagnóstico, cuyo fundamento físico consiste en captar la emisión de energía electromagnética de los objetos en el infrarrojo medio² o térmico (6-15 μm).

Se utiliza como técnica complementaria para el diagnóstico del estado de conservación de los bienes culturales. Su aplicación se ha dirigido al estudio del diferente comportamiento térmico de los materiales y los cerramientos y su relación con procesos de deterioro que afectan a su conservación; la investigación de estructuras o identificación de elementos ocultos; la investigación de grietas, desprendimientos y oquedades y la detección de filtraciones, escorrentías y acumulación de agua en superficie.

² El infrarrojo medio es el rango del espectro electromagnético en el que se produce la radiación térmica de los materiales con una temperatura superior a 0° K.

Está condicionada por la orientación geográfica del edificio y el entorno urbano; en zonas de insolación se va a producir un calentamiento por radiación de la superficie y en zonas de umbría el calentamiento de la superficie va a ser por convección.

Puede ser pasiva, lo que permite realizar un análisis cualitativo o cuantitativo, o activa, con estimulación térmica externa –elevación de la temperatura ambiente unas décimas de grado– para mejorar el contraste térmico.

Medios y método

Existen distintos instrumentos o técnicas termométricas para la captación de valores de temperatura en la superficie de los materiales. Los hay por contacto físico, como el termopar o la termorresistencia, o sin contacto físico, como el termómetro por infrarrojos o la cámara termográfica de infrarrojos.

De todos los citados, este trabajo se centra exclusivamente en los que no requieren de contacto físico con la superficie de los bienes culturales. En el caso del termómetro por infrarrojos, éste permite realizar un análisis puntual en la superficie de los cerramientos. Así se puede evaluar el riesgo de condensación superficial de los muros o estudiar el gradiente térmico superficial de los mismos. Por otra parte, la cámara termográfica de infrarrojos permite llevar a cabo un análisis global de los cerramientos tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, siendo posible estudiar la distribución de intensidad de la radiación térmica la envolvente del edificio. En el caso de un análisis cuantitativo, es necesario conocer la emisividad³ de los materiales a medir.

En los casos en que el estudio se centra en ambientes interiores de edificios históricos, para complementar el estudio, se recurre a la monitorización o medición en continuo de humedad relativa, temperatura ambiente y temperatura de contacto mediante el uso de *data loggers*. La duración de este tipo de estudios suele extenderse a un ciclo anual. Con ellos, no sólo pueden evaluarse las condiciones ambientales, sino la estratificación del aire, sus movimientos de convección, los focos de evaporación de los muros, etc. (fig. 1). Según el tipo de estudio, los datos registrados con estos equipos no pueden analizarse de manera aislada; normalmente deben complementarse con parámetros de humedad y temperatura del ambiente exterior, para lo que en ocasiones es fácil recurrir a los registros proporcionados vía web por alguna estación meteorológica con una ubicación próxima.

El uso de la termografía de infrarrojos en la Sección de Conservación Preventiva siempre se ha enfocado a un análisis cualitativo, para evaluación de las anomalías térmicas de los cerramientos de los inmuebles –diferente comportamiento térmico de los materiales, irregularidades del paramento, falta de aislamiento, falta de estanqueidad al agua y al aire–, anomalías mecánicas de los materiales y sistemas constructivos –grietas, oquedades– e identificación de estructuras y elementos ocultos. Su empleo por los técnicos de la sección se remonta a 1989, por lo que la evolución de los equipos de termografía en cuanto a portabilidad, peso, calidad de la imagen, superposición de imágenes, *software*, etc. ha sido considerable desde los inicios hasta el día de hoy.

El método de estudio para la inspección y detección de humedades mediante cámara térmica de infrarrojos contempla los siguientes puntos:

³La emisividad es la capacidad de un material para radiar energía infrarroja.



Figura 1. Instrumentos de diagnóstico. Vaisala y Testo.

1. Identificación del problema.
2. Datos previos del entorno, clima y edificio.
3. Definición del objetivo a estudiar mediante termografía de infrarrojos.
4. Puesta a punto del método de análisis con la cámara térmica.
5. Obtención de imágenes térmicas (termogramas o imágenes radiométricas. Formato estándar JPEG radiométrico) y visibles.
6. Análisis e interpretación de las imágenes térmicas.

En la figura 2 se representa este esquema de trabajo.

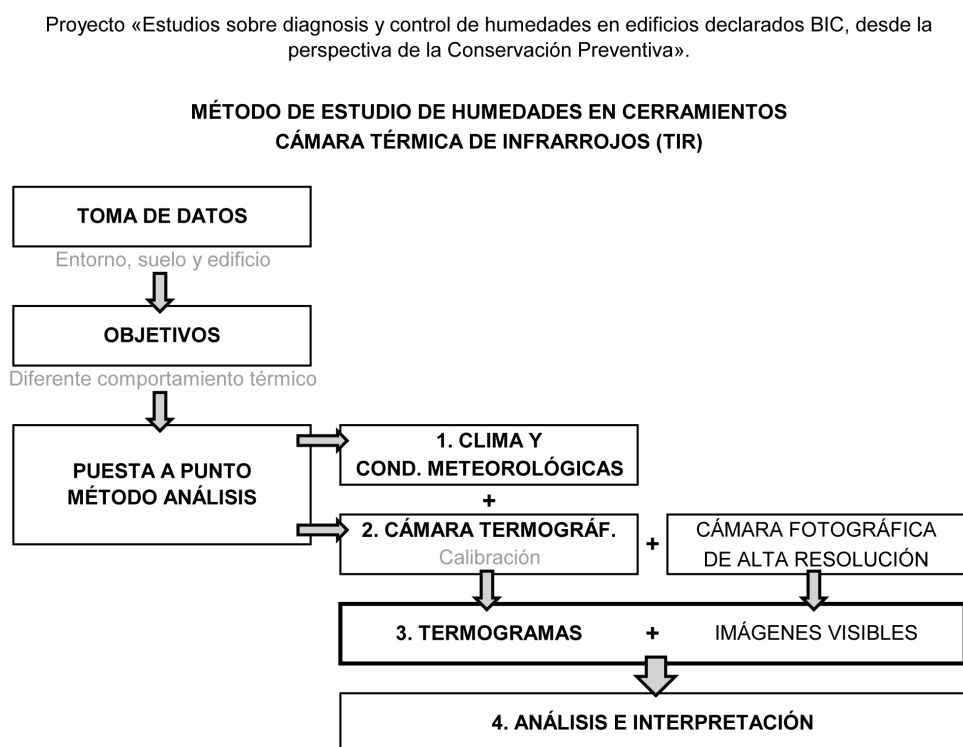


Figura 2. Método de estudio de humedades en cerramientos con cámara térmica de infrarrojos (TIR).

Identificación del problema

El punto de partida para la realización de un estudio de termografía se encuentra en la identificación del problema.

En la inspección y detección de humedades se aprecian diferencias de temperatura asociadas a la presencia de agua. Este elemento tiene una banda de absorción en el infrarrojo; no solamente la superficie del material cambia de temperatura al evaporarse, sino que si se recoge la respuesta espectral de la superficie se puede ver la presencia o ausencia de agua.

Algunos de los aspectos a estudiar en edificios con patología de humedad, son los que se detallan a continuación:

- Zonas de filtración/infiltración, en donde tiene lugar un enfriamiento producido por acumulación de agua.
- Zonas de evaporación. La superficie se enfría ya que la evaporación del agua es un proceso endotérmico en el que se utiliza el calor del material.
- Zonas de concentración de sales. La acumulación de sales en zonas de eflorescencias superficiales aumenta la higroscopicidad de los materiales.
- Zonas de condensación en cerramientos o superficies susceptibles de alcanzar la temperatura de rocío. Las humedades de condensación superficial aparecen cuando los materiales tienen un nivel térmico bajo y entran en contacto con masas de aire más calientes y húmedas, en zonas frías o con gran inercia térmica, mal ventiladas.
- Zonas poco ventiladas, más o menos frías o cálidas según orientación y ubicación en muros o bóvedas.
- Zonas de infiltración de aire, producidas fundamentalmente por falta de estanqueidad de las carpinterías.

Datos previos

Esta técnica requiere de unos datos previos del entorno geográfico físico del edificio, así como del clima, dado que forman parte del análisis. Así mismo, es fundamental disponer de documentación métrica y gráfica del entorno, edificio e instalaciones. También se ha de conocer la historia material del edificio, las intervenciones realizadas y todo lo referente al momento de aparición de los procesos de deterioro vinculados con la patología objeto de estudio.

Otros aspectos reseñables que se han de estudiar son los sistemas constructivos del edificio (estructura, materiales, espesores, disposición, aislamiento) y los sistemas de recogida y evacuación del agua de lluvia del entorno y edificio. El uso, gestión y mantenimiento del entorno y del edificio, pueden aportar igualmente datos de interés para un mejor entendimiento del problema.

Definición del objetivo a estudiar mediante termografía de infrarrojos

Existen diferentes objetivos por los cuales es interesante realizar un estudio termográfico parcial o general de los edificios, teniendo en cuenta que este tipo de estudios deben complementarse con información adicional aportada por otras técnicas.

Un hipotético caso de estudio puede ser, identificar el diferente comportamiento térmico de los materiales en superficie o la distribución superficial de la intensidad de la radiación térmica, según características constructivas y orientación geográfica de los cerramientos. O puede ser de interés conocer el comportamiento térmico de determinados sistemas constructivos según el grado de insolación a que estén sometidos; las variaciones de la temperatura superficial

van a estar en función del tiempo de ganancia y/o pérdida de los materiales y su grado de aislamiento con respecto a los contiguos.

Otro caso de análisis es detectar manchas de humedad activas en la envolvente interior o exterior del edificio. El agua tiene una importante respuesta espectral, y el enfriamiento producido por su evaporación hace que un material húmedo se enfríe más que un material seco, acentuando las diferencias térmicas.

También esta técnica permite identificar la estructura subyacente de determinados sistemas constructivos, así como elementos ocultos y oquedades. Del mismo modo, ayuda a observar la entidad de las grietas y desprendimientos presentes en las fábricas de muros y bóvedas.

Puesta a punto del método de análisis: clima y cámara térmica de infrarrojos

- **Clima:** Para una correcta inspección y análisis, desde el punto de vista metodológico, se necesita conocer algunos aspectos del clima. Datos históricos de humedad, temperatura y otras referencias meteorológicas, al menos de un ciclo anual, registrados por la estación meteorológica más cercana al edificio, son importantes para evaluar las condiciones ambientales a las que está sometido el bien. Estas referencias, independientemente del organismo gestor de la estación, deben ofrecer cierta garantía. Una vez recopilados, han de establecerse las condiciones meteorológicas y climáticas más idóneas para el estudio tanto de los días previos como durante el tiempo de captación de imágenes.

Durante el tiempo de captación de las imágenes térmicas hay que dejar constancia de las condiciones ambientales y atmosféricas en las que se está trabajando; por ejemplo, se han de medir las condiciones ambientales de humedad y temperatura mediante termohigrómetro en el momento de inicio y al finalizar la captación. También se pueden registrar los datos climáticos en el lugar de ubicación de la cámara programando *data loggers* de humedad y temperatura. Todos estos instrumentos han de estar convenientemente calibrados en el momento de su uso.

En el estudio termográfico de cada superficie, según orientación o condiciones de contorno, conviene realizar un barrido para conocer cuáles son los valores extremos de la temperatura en superficie mediante un termómetro por infrarrojos sin contacto. Esta labor permite acotar el rango de medición de la cámara para visualizar los contrastes térmicos *in situ* con mayor precisión.

- **Condiciones de contorno del edificio:** A la hora de realizar la termografía de la envolvente del edificio hay que considerar las amplitudes térmica y de humedad del ambiente de los días previos y durante la captación de termogramas. Asimismo, la orientación geográfica de los elementos de fachada objeto de estudio, y la consecuente incidencia de factores meteorológicos, precipitación y vientos dominantes, niebla, etc. en los mismos. Por ejemplo, es importante tener en cuenta el aporte de calor, por insolación, en las fachadas con orientación sur, este y oeste, en función de la geometría del edificio objeto de estudio y de los edificios colindantes y la orientación geográfica del entorno urbano.

Por todo ello es fundamental, si es posible, la previsión del estudio *in situ* conociendo cuáles son las condiciones más ventajosas, buscando el máximo contraste térmico entre ambiente y superficie. En este sentido, aunque resulte obvio, se ha de evitar la captación de imágenes térmicas en condiciones de lluvia, niebla o viento.

No sólo debe elegirse el momento más adecuado del día en que la imagen por TIR va a presentar mayor contraste, sino que debe considerarse a lo largo del día la diferente radiación emitida por las distintas fábricas, la orientación concreta de cada fachada según cambia la situación atmosférica del entorno del edificio. Los materiales absorben o ceden calor depen-

diendo las condiciones térmicas del entorno y su propio estado. En los momentos y épocas en las que emiten (ceden) calor de forma más intensa es cuando la TIR obtiene mayor contraste.

Según lo comentado, se podría establecer una hipótesis de trabajo para estudiar el comportamiento térmico de los cerramientos tras un periodo copioso en lluvia o tras un periodo frío seco. La primera situación podría evidenciar la presencia de vías de entrada de agua y la segunda podría advertir del riesgo de condensación en la superficie de los cerramientos.

- Atenuación atmosférica: La captación de la radiación térmica se va a ver afectada y atenuada por la temperatura atmosférica existente entre la cámara y el edificio, la distancia de medición y la humedad ambiente.
- Parámetros del objeto: Los parámetros que definen el bien cultural, objeto de un análisis cuantitativo a la hora de captar las imágenes son:

La emisividad del material. Ésta está en función de las características del material y su superficie y la temperatura del objeto, y representa la capacidad de irradiar calor del propio material.

La temperatura ambiente reflejada. Para obtener esta última, se necesita conocer tanto el valor de la emisividad y el de la temperatura ambiente reflejada por la superficie del objeto, como determinados valores de las condiciones de contorno.

- Características del sistema de termografía: La cámara termográfica que en la actualidad se utiliza en la Sección de Conservación Preventiva es un modelo no refrigerado (Peltier), con un detector de radiación térmica o microbolómetro, con rango espectral 7,5-13 μm y sensibilidad térmica 0,045° C a 30° C. Trabaja en un rango de temperatura de -40° C a 120° C.

El detector capta la radiación térmica –emitida y reflejada por la superficie de los materiales–, afectada por los fenómenos de atenuación atmosféricos. La electrónica asociada procesa la señal eléctrica generada para convertirla en medida de temperatura.

Los rangos de medición de temperaturas se acotan para obtener precisión, en función de si el trabajo se desarrolla en el interior o en el exterior del edificio.

En cuanto a la cámara termográfica de infrarrojos, se ha de controlar:

- La distancia de la cámara a la superficie a mapear, medida con cinta métrica o medidor de distancias electrónico.
- La calibración del equipo una vez al año, si el uso es habitual, por laboratorio acreditado.
- La calibración *in situ*, en modo manual para un análisis cuantitativo (fig. 3). Ello implica:
 - Medir la temperatura reflejada de un punto de la superficie a mapear.
 - Disponer de una cinta aislante negra mate, de emisividad conocida, sobre la superficie a mapear, introducir su valor de emisividad en la cámara térmica y medir su temperatura ambiente reflejada.
 - Situar de nuevo el punto de medición sobre la superficie a mapear y modificar el valor de emisividad hasta obtener la temperatura reflejada de la cinta.

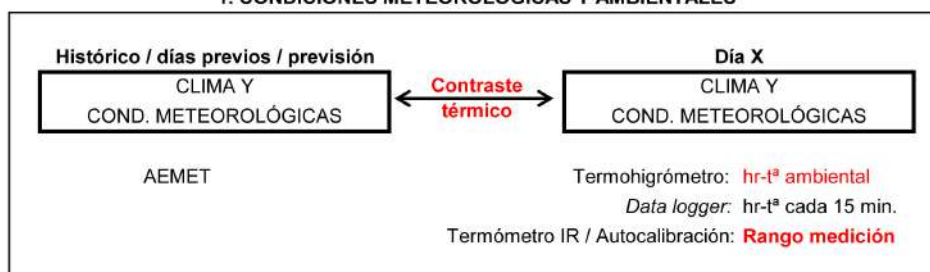
Las distintas superficies de los materiales van a tener distintos valores de emisividad⁴.

⁴ La emisividad está en función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de incidencia o de observación de la radiación. Existen distintos valores de emisividad de los materiales recogidos en tablas, en función de la longitud de onda y la temperatura ambiente. Hay diferentes métodos para estimar la emisividad de otros materiales *in situ*. En materiales no metálicos a mayor temperatura menor emisividad.

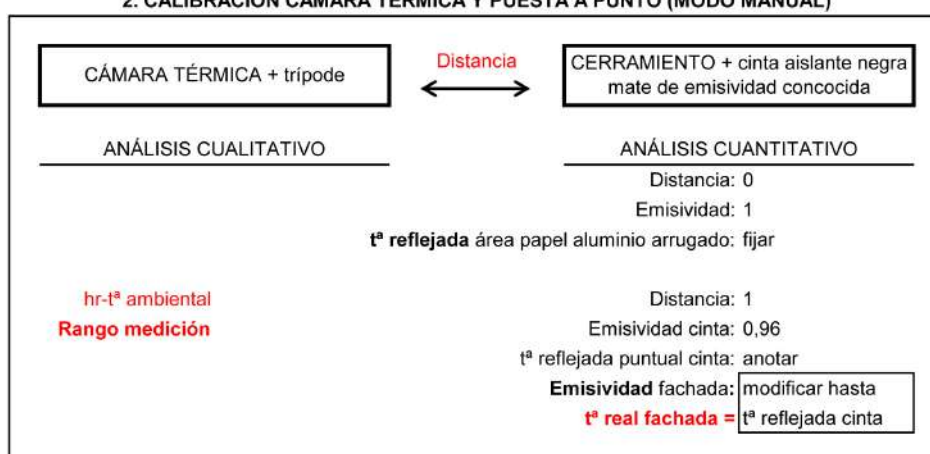
Proyecto «Estudios sobre diagnosis y control de humedades en edificios declarados BIC, desde la perspectiva de la Conservación Preventiva».

MÉTODO DE CALIBRACIÓN CÁMARA TÉRMICA DE INFRARROJOS (TIR)

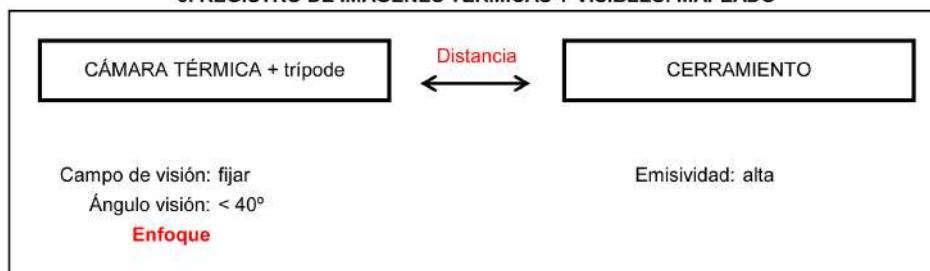
1. CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y AMBIENTALES



2. CALIBRACIÓN CÁMARA TÉRMICA Y PUESTA A PUNTO (MODO MANUAL)



3. REGISTRO DE IMÁGENES TÉRMICAS Y VISIBLES: MAPEADO



4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS IMÁGENES TÉRMICAS

Figura 3. Esquema. Método de calibración de la cámara térmica de infrarrojos (TIR).

Obtención de imágenes térmicas y visibles

Las opciones de imagen que ofrece la cámara térmica para el análisis termográfico son:

- Imagen térmica, en formato JPEG radiométrico. La cámara tiene un sensor de infrarrojos cuya respuesta es convertida electrónicamente en una escala de temperaturas asociada a una imagen visible.
- Imagen visible para identificar el objeto radiado. La imagen visual se asocia automáticamente con la imagen infrarroja correspondiente.

- Imagen de fusión térmica.
- Vídeo termográfico.

Los factores que influyen en la captación de imágenes son:

- Emisividad de los materiales. Cada material tiene una emisividad.
- Distancia de medición. La atmósfera afecta a la transmisión de la radiación. A menor distancia menos atenuación de la radiación percibida por la cámara.
- Ángulo de visión menor de 40 grados.
- Reflexión. Evitar las fuentes que la producen.
- Ajuste del rango de medida. Fijar el intervalo de temperaturas que permita un adecuado contraste térmico. Un campo amplio va a dar menos precisión en la medida.
- Enfoque.

La elección por parte del personal técnico del control de rango y el enfoque –parámetros que no se pueden manipular con el *software*– permite obtener una medida correcta.

Por otra parte, para conseguir un contraste térmico óptimo, es importante conocer tanto las condiciones meteorológicas y ambientales como la elección del campo de visión.

Como ejemplo ilustrativo, a primera hora del día el muro puede estar frío y su exposición a la radiación solar va a dar un contraste térmico, óptimo para la obtención de datos. Por el contrario, al atardecer el muro caliente se enfría, e igualmente ofrece dicho contraste.

Otro ejemplo puede darse cuando en los días previos a la toma de imágenes termográficas se han producido precipitaciones importantes.

En estos casos los materiales húmedos tendrán distinta temperatura en relación a los materiales secos y la radiación de calor será diferente en las zonas secas que en las húmedas.

En la utilización de la técnica el procedimiento a seguir busca:

- Primero disponer de una imagen real.
- Segundo contar con un mapa de daños.
- Y por último se hace uso de la termografía para identificar anomalías. No siempre se pueden detectar los daños visualmente.

Si se quiere realizar un análisis cuantitativo se ha de disponer de los datos meteorológicos del momento de la toma de imágenes térmicas y se tendrá que configurar en la cámara la temperatura ambiente reflejada y la emisividad del material o superficie a medir. Seguidamente se capturarán los termogramas o imágenes radiométricas (con formato estándar JPEG radiométrico) para su análisis e interpretación.

En resumen, un análisis cuantitativo requiere configurar los siguientes parámetros de contorno:

- Temperatura ambiente reflejada de la superficie. Es la radiación incidente en la cámara. Para ello hay que calcular la temperatura media sobre papel aluminio arrugado, considerando distancia 0 y emisividad 1.
- Emisividad de la superficie de los materiales. Se calcula fijando la distancia de 1 m y la emisividad de la cinta aislante mate de color negro 0,96, se anota la temperatura reflejada puntual de la cinta y se modifica la emisividad de la superficie hasta llegar al valor de la temperatura anotada.

- Distancia al objeto. Se mide con el instrumento adecuado, cinta métrica o medidor de distancias electrónico.
- Temperatura y humedad relativa ambiente. Se miden con un termohigrómetro o *data logger* y se completan con los datos registrados por la estación meteorológica más cercana.

La imagen radiométrica es la que va a permitir hacer un análisis cuantitativo, ya que cada pixel contiene valores de medida.

Análisis e interpretación de las imágenes térmicas

Los buenos resultados del análisis concluyen cuando se es capaz de interpretar y discernir todos aquellos factores que pueden llevar a confusión. De ahí la pericia y el buen hacer del operario, además de una buena formación en el uso de la cámara térmica.

Casos de estudio mediante termografía de infrarrojos

La experiencia adquirida por los técnicos de la Sección de Conservación Preventiva en el IPCE es de amplio recorrido. Se trata de análisis cualitativos, que en ocasiones puntuales se apoyan en la termografía activa, haciendo uso de ventilosconectores para elevar ligeramente la temperatura ambiente y obtener mejores resultados.

El procedimiento de inspección y detección descrito anteriormente para uso de la termografía infrarroja se encamina al estudio del comportamiento térmico de los materiales y los cerramientos, la investigación de elementos subsuperficiales y discontinuidades y la detección de humedades, en relación a los procesos de alteración sufridos por el bien cultural.

En el año 1989 se encargó el primer estudio de termografía en la ermita de San Antonio de la Florida en Madrid. Se pretendía evaluar el estado de conservación de la cúpula y las pinturas murales, las cuales sufrieron con la contienda de la Guerra Civil. La inspección se realizó en el intradós de la cúpula con intención de estimar la incidencia de la insolación en el bajo cubierta y detectar elementos estructurales –de mayor masa que los plementos–, grietas, oquedades, humedades, etc.

Otro ejemplo es la cúpula *Regina Martyrum* en la Basílica del Pilar de Zaragoza, en donde algunas zonas de las pinturas murales mostraban un estado de conservación precario fundamentalmente debido a las humedades de filtración acaecidas con el transcurso del tiempo al rebosar el agua de lluvia en las canales de evacuación de las cubiertas por falta de mantenimiento. El esquema de trabajo seguido en 2003 se apoyó en la cartografía del mapa de daños, la imagen visible, los termogramas y la superposición de imagen visible y termograma para ubicar los daños o anomalías detectadas (fig. 4).

Estos estudios siempre parten de una visión de conjunto del monumento, en donde se engloba el análisis del clima, entorno, edificio, cubiertas, cúpula, detalles, etc.

Sin embargo, otro trabajo de interés que se inició en 1989 para estudiar el comportamiento térmico de los capiteles del claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos), no permitió obtener datos relevantes mediante el uso de la termografía de infrarrojos. Se quería estudiar las diferencias térmicas de los capiteles de cada galería según las cuatro orientaciones para valorar el estrés térmico a que estaba sometida la piedra. La complejidad del estudio radicaba en la geometría de los capiteles, la orientación de las distintas superficies y el relieve de las mismas.

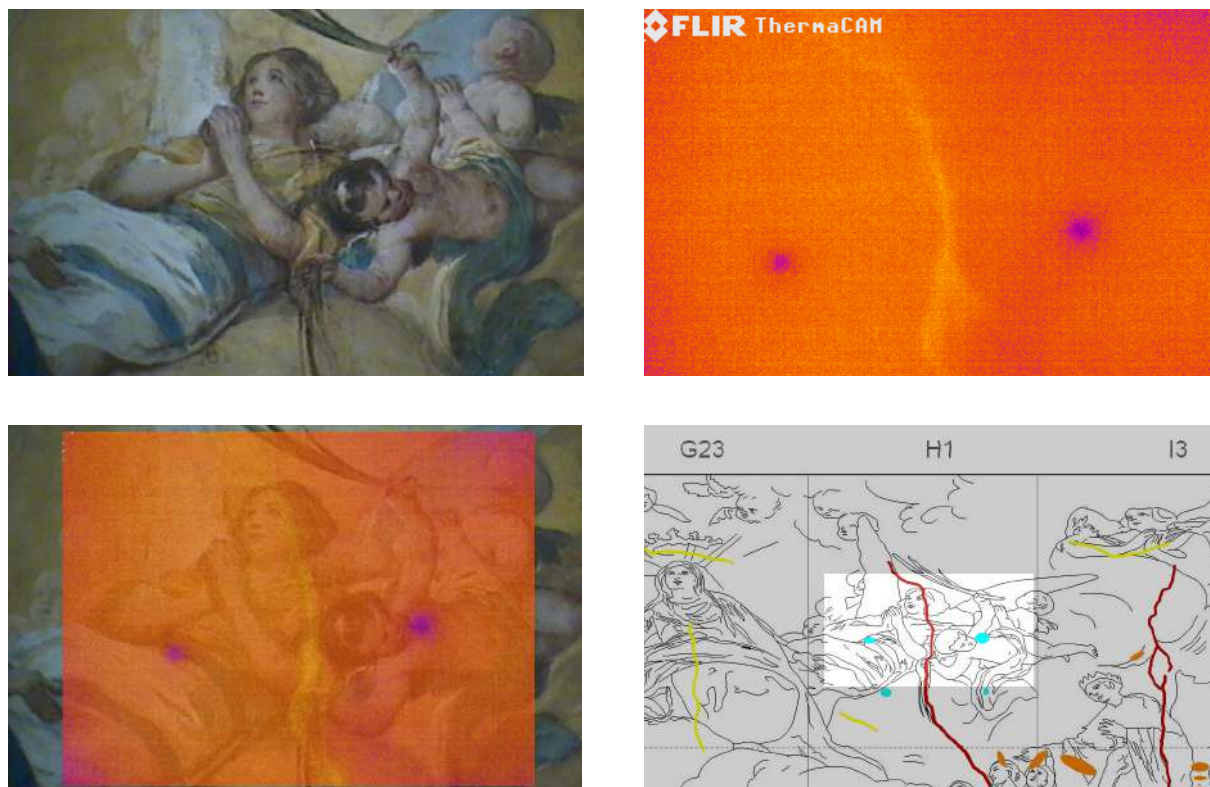


Figura 4. Imagen visible, termograma, superposición de imagen visible y termograma y cartografía de daños de un detalle de pintura mural de la cúpula *Regina Martyrum* en la Basílica del Pilar de Zaragoza. La imagen termográfica permite apreciar la entidad de la grieta y la presencia de elementos metálicos que cosen la grieta en el trasdós de la cúpula. Imágenes: David Juanes y Pedro Pablo Pérez.

Como se ha expuesto, el uso de la termografía de infrarrojos para el estudio de la conservación de las pinturas murales siempre ha aportado información de interés. A los trabajos ya mencionados hay que añadir el estudio de las pinturas murales denominadas el *Cielo de Salamanca* del museo de la Universidad de Salamanca en las Escuelas Menores, realizado en 2006. Estas pinturas murales, procedentes de otra ubicación en la misma universidad, fueron arrancadas y repuestas sobre un nuevo soporte en los años cincuenta. En su intervención se aplicaron determinados productos que para su conservación requieren de un control de las condiciones climáticas y en concreto de la temperatura. Con el estudio termográfico se pudo conocer la estructura ortogonal de listones de madera que soporta los paneles de las pinturas arrancadas y la incidencia del comportamiento térmico de la cubierta (fig. 5). En el emplazamiento original de las pinturas murales, en donde quedan improntas de las mismas, también se captaron imágenes que hablan de la importancia de realizar una buena lectura termográfica de los paramentos, evitando el enmascaramiento de telas de araña o los reflejos de zonas doradas.

En la ermita de San Baudelio de Berlanga en Casillas de Berlanga (Soria), en donde también existen pinturas de reposición en el intradós de las bóvedas, se hizo un estudio de termografía con el que se comprobó el diferente comportamiento térmico de los materiales: mortero nuevo de reposición en muro de mampostería y plemento de bóveda, impronta de pinturas arrancadas, pinturas *in situ* y despiece de pinturas reubicadas sobre soporte flexible, de poliéster no tejido, adherido con resina epoxídica (figs. 6 y 7).

En 2010 se llevó a cabo un estudio de termografía de las fachadas suroeste y sureste de la Casa de las Conchas en Salamanca, ya que en la zona próxima a la arista de la torre de la fachada suroeste la piedra mostraba cierta alteración por evacuación del agua de lluvia a través de la gárgola

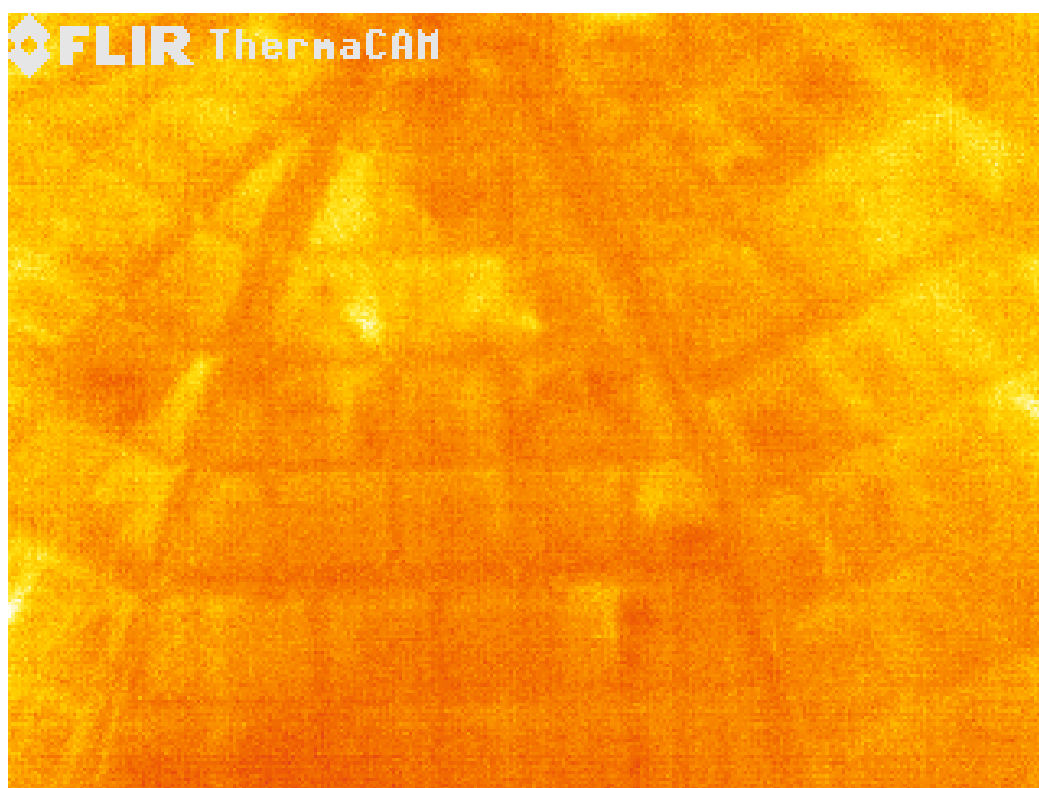
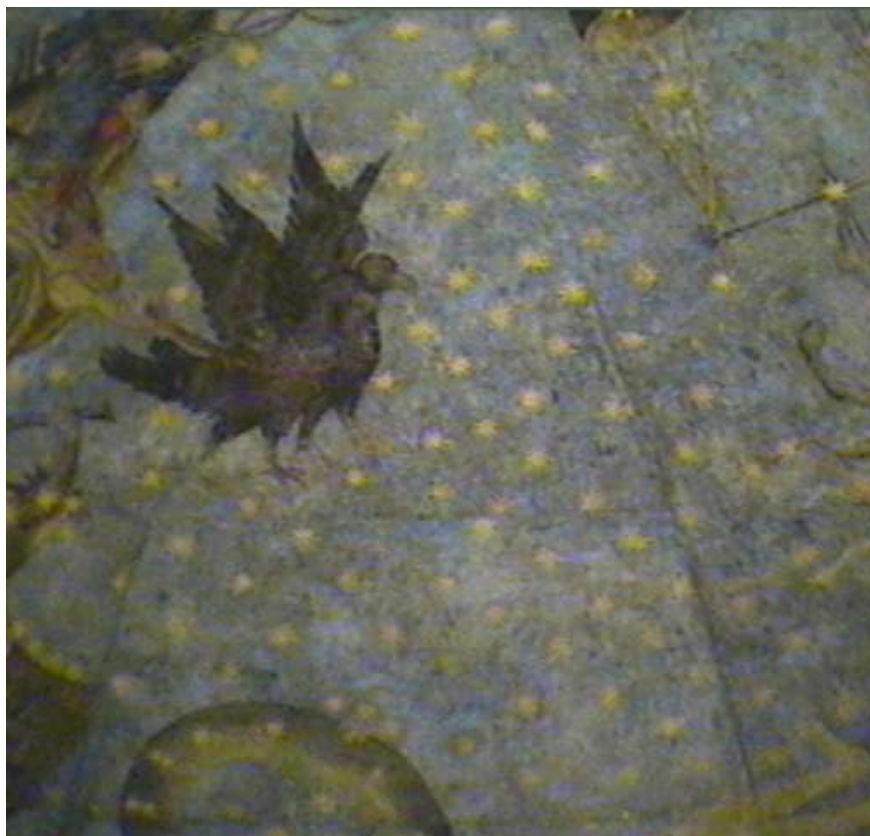


Figura 5. Imagen visible y termograma de una parte de las pinturas murales del *Cielo de Salamanca* en el museo de la Universidad de Salamanca en las Escuelas Menores. Estructura ortogonal de listones de madera, que soporta los paneles de la pintura arrancada. Imágenes: David Juanes y Pedro Pablo Pérez.

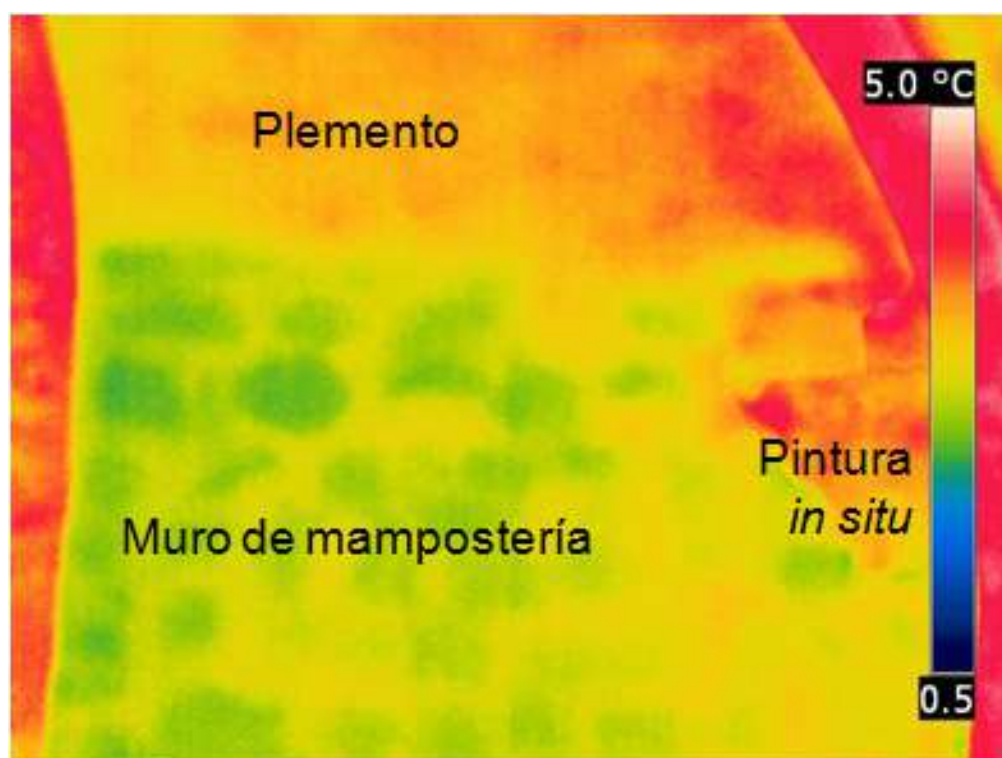
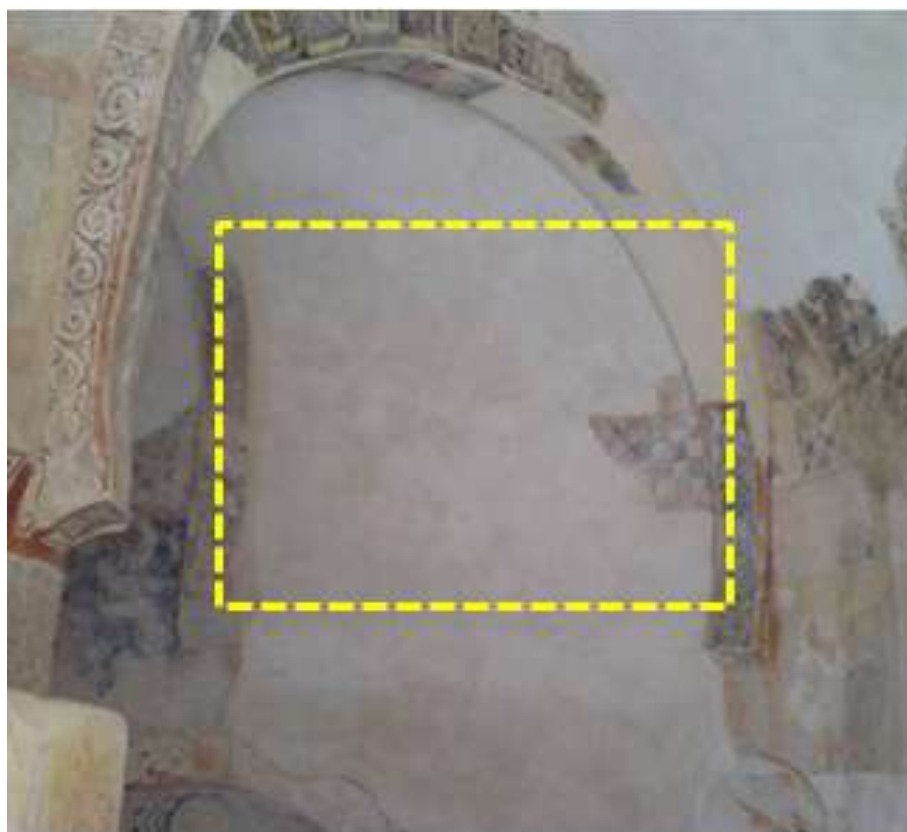


Figura 6. Imagen visible y termograma del muro noreste del cuerpo principal de la ermita de San Baudelio de Berlanga en Casillas de Berlanga (Soria) (15 de febrero de 2012, 15:05 horas). Transición del muro de mampostería a la bóveda. Se distingue el sistema constructivo del muro de mampostería. Tanto muro como plemento tienen una temperatura más cálida que en la orientación noroeste. Imágenes: María Teresa Gil y Juan Antonio Herráez.

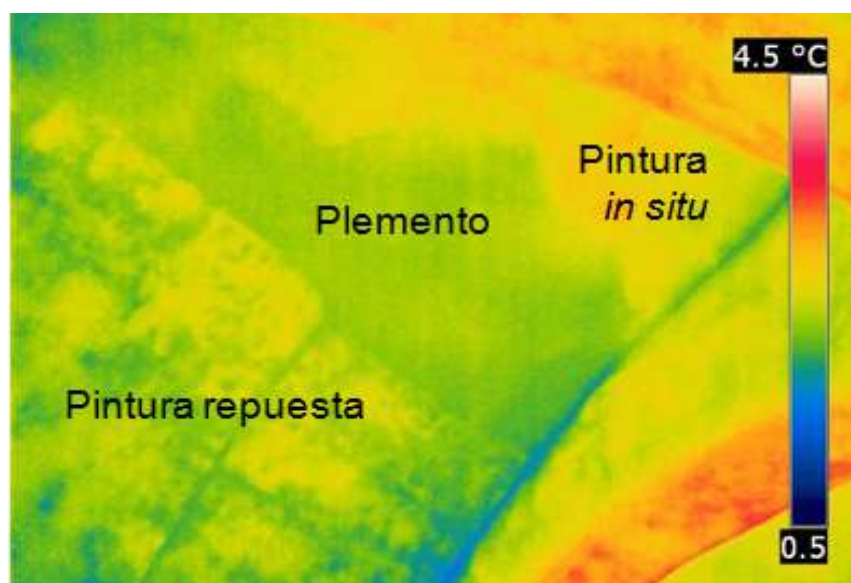


Figura 7. Imagen visible y termograma del muro noroeste, zona del coro de la ermita de San Baudelio de Berlanga en Casillas de Berlanga (Soria) (15 de febrero de 2012, 14:55 horas). Bóveda. Se ve el despiece del soporte de la pintura repuesta (esquina inferior izquierda de la imagen IR) en el plemento de la bóveda. El plemento de la bóveda tiene una temperatura más fría que en la orientación noreste. Imágenes: María Teresa Gil y Juan Antonio Herráez.

o por desbordamiento de la misma. Para el estudio del deterioro en fachada se consideraron diversos factores: dimensionado del sistema de recogida y evacuación del agua de lluvia a través de las gárgolas, escaso vuelo del alero de cubierta, altura de fachada, ubicación del edificio en la trama urbana y exposición a vientos dominantes en la arista de la torre. En la imagen termográfica se pudo identificar la zona expuesta a la incidencia del agua y a los vientos dominantes en forma de mancha de escorrentía, ya que el comportamiento térmico de la piedra alterada es diferente al resto (fig. 8).

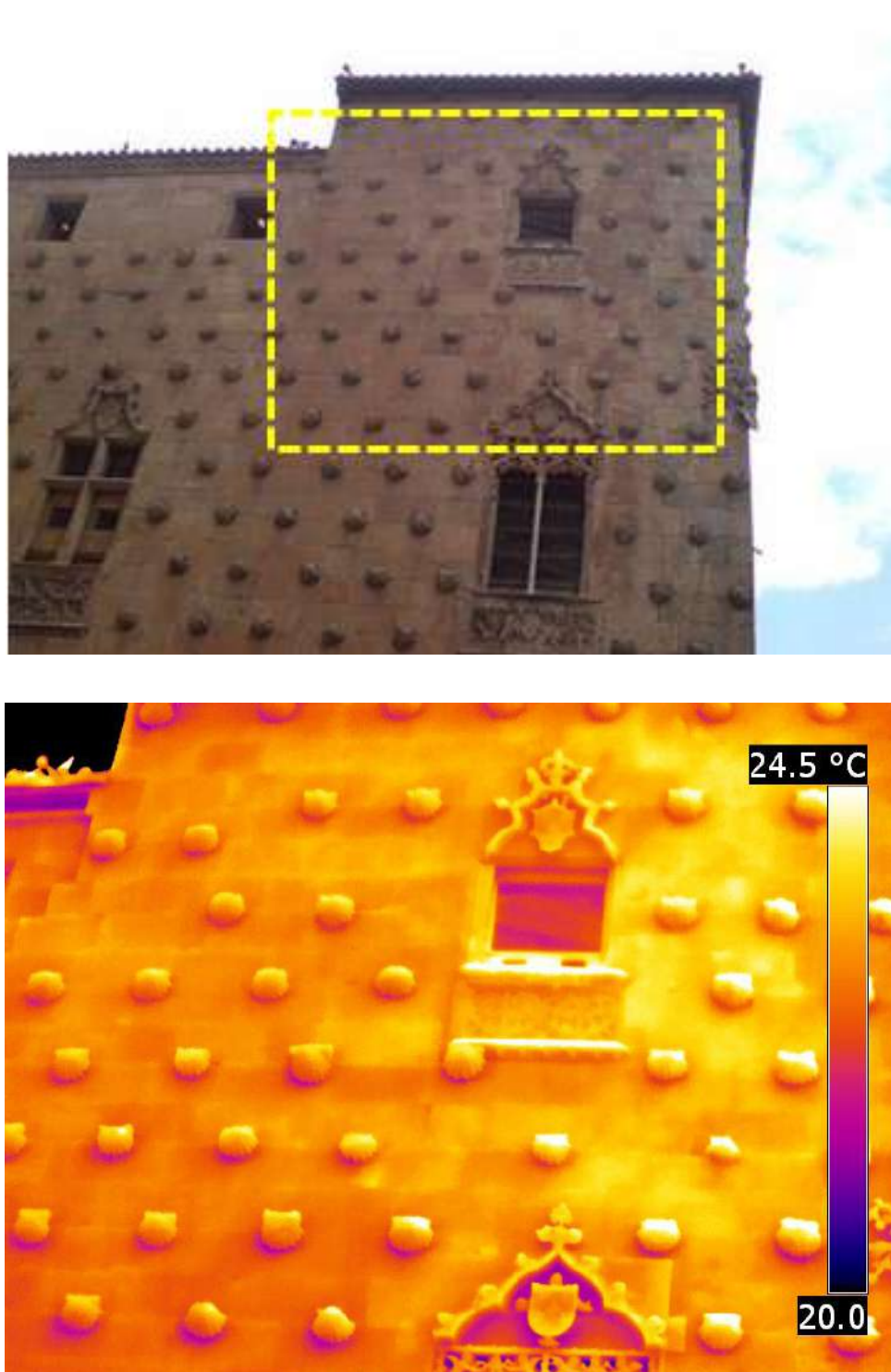


Figura 8. Imagen visible y termograma de la fachada suroeste de la Casa de las Conchas en Salamanca (18 de junio de 2010, 14:30 horas). Alteración de la piedra en forma de mancha de escorrentía de agua en fachada, provocada por la evacuación de la gárgola (hoy cegada) o por desbordamiento del canalón. Imágenes: Guillermo Enríquez de Salamanca y Fernando Palacios.

La iglesia de San Julián de los Prados en Oviedo es un ejemplo de cómo el agua de lluvia en su evacuación incide en el borde del alero de la estructura de madera de la cubierta (fig. 9). La madera húmeda se enfría más rápido que la madera seca por la evaporación del agua, acentuando las diferencias térmicas.

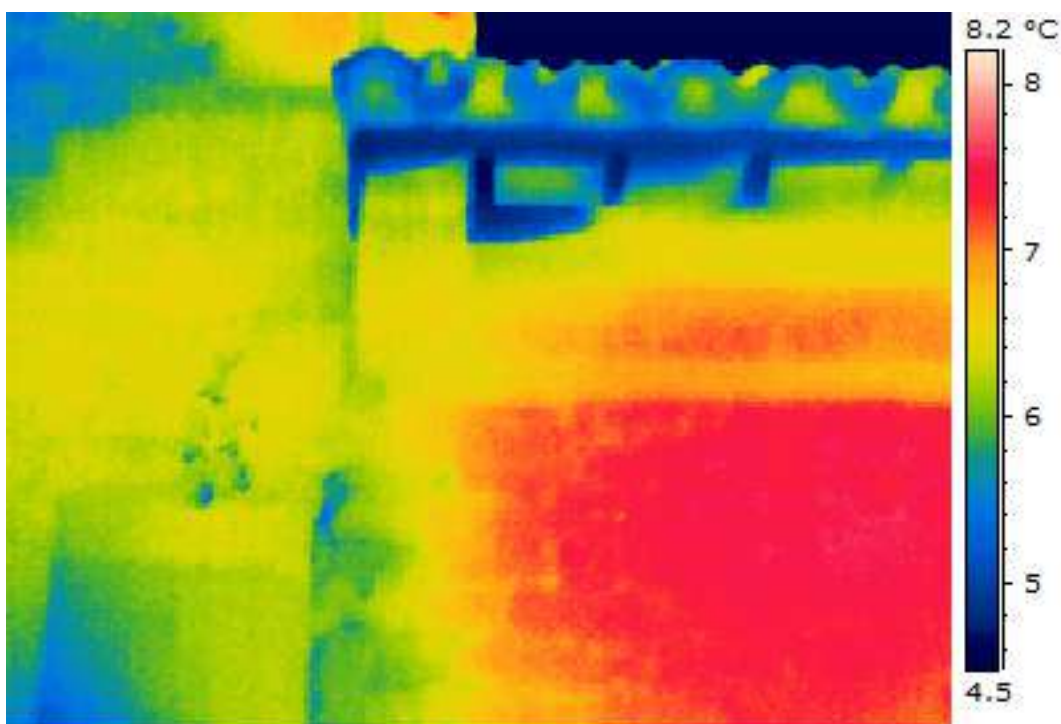
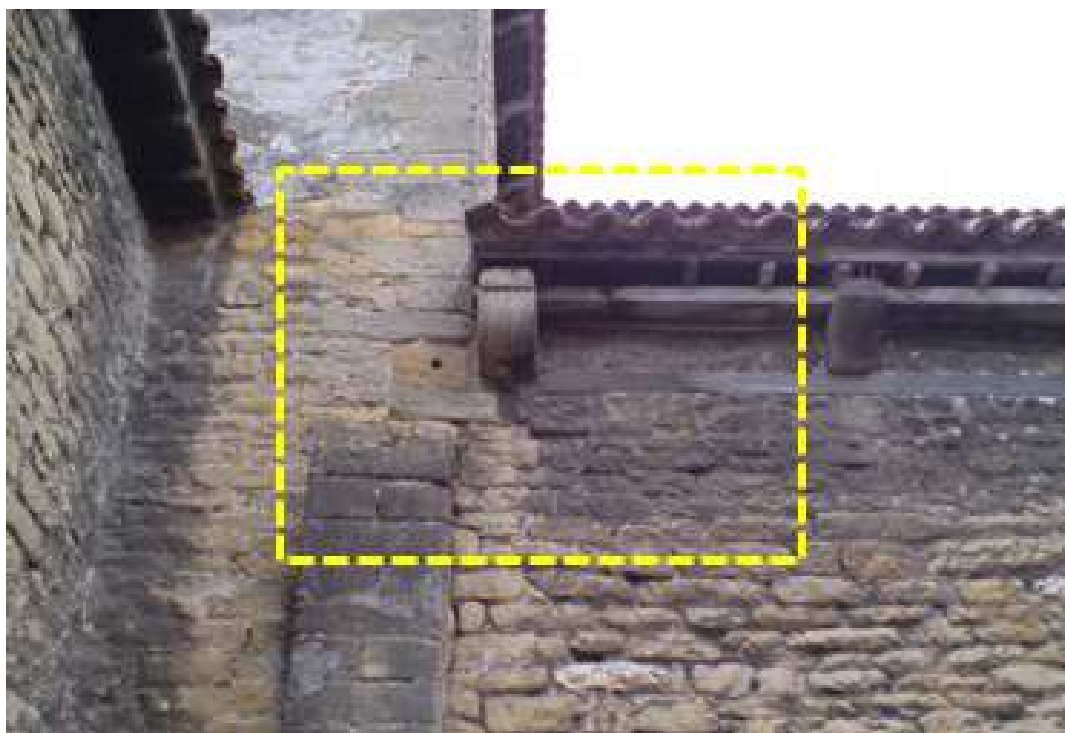


Figura 9. Imagen visible y termograma de la fachada norte de la iglesia de San Julián de los Prados en Oviedo (9 de febrero de 2012, 17:50 horas). Madera húmeda en el extremo del durmiente y en el enrastrelado de cubierta. Imagen: María Teresa Gil.

Otro caso de estudio es la ermita del Santo Cristo de la Luz en Toledo en donde, a través de la termografía junto con otras técnicas complementarias, se evaluó el origen de unas manchas aparecidas en los aleros de fachada del edificio islámico, tras un periodo de fuertes lluvias en enero de 2010 y con una máxima extensión de la mancha en agosto del mismo año (fig. 10).

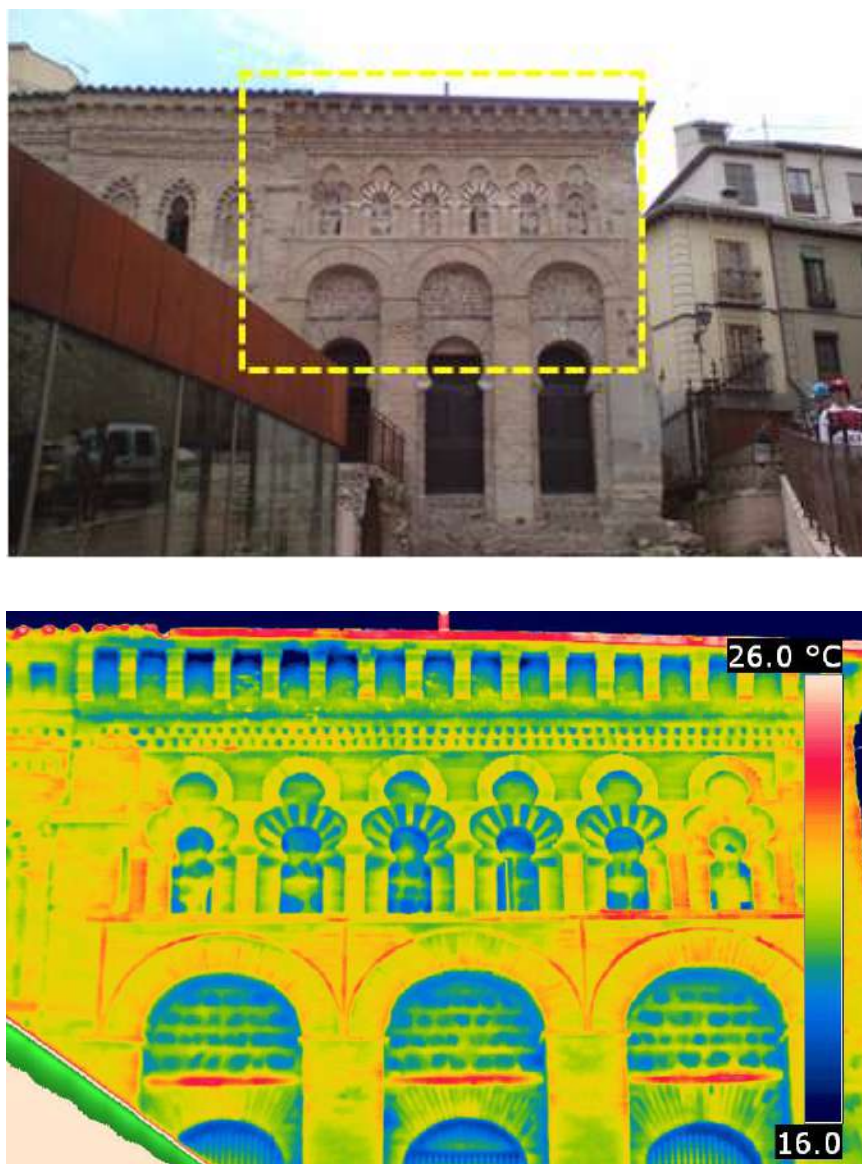


Figura 10. Imagen visible y termograma de la ermita del Santo Cristo de la Luz en Toledo (7 de mayo de 2012, 13:40 horas). Se observa un comportamiento térmico diferente de los materiales de cerramiento, ladrillo y mortero, original y reconstruido en torno a 1910. Hay una gradación de la temperatura de más frío a más cálido desde la zona que se supone de máxima evacuación de agua de lluvia, junto al edificio cristiano, hasta el extremo de la fachada oeste. Imagen: María Teresa Gil.

El uso de esta técnica además sirve para analizar armaduras de madera o valorar el estado de las yeserías, como es el caso de la Capilla Real de la Mezquita-Catedral de Córdoba. En este recinto se pudo comprobar que el uso de la técnica también permite detectar la falta de cristales en las vidrieras emplomadas, así como la falta de estanqueidad al aire en el encuentro entre los paneles de las vidrieras.

También en el caso de vidrios laminados es fácil detectar si estos tienen fisuras. En el IPCE se ha utilizado la termografía para evaluar el estado de los vidrios del lucernario del *ball*.

O en el caso de bienes muebles, vinculados al inmueble, esta técnica ha servido para identificar una anomalía en uno de los marcos de los lienzos de Zurbarán de la sacristía del monasterio de Guadalupe (Cáceres), en donde posteriormente se pudo comprobar visualmente que esta se debía a un ataque incipiente de termitas.

Conclusiones

La termografía de infrarrojos es una técnica de ayuda, complementaria en el proceso de diagnóstico, no destructiva, de tal modo que una vez identificado el problema y definido el objetivo de estudio es cuando se va a realizar el análisis de inspección y detección.

Cada superficie, en función de los materiales, acabado y geometría, tiene una respuesta térmica diferente. Si se trata de una superficie con relieve la dificultad para la lectura de termogramas es alta.

Aún así no sólo la superficie es determinante para el análisis, sino que hay que considerar los datos meteorológicos y climáticos más favorables, previo y durante la captación de imágenes termográficas. En ciertas ocasiones es necesario recurrir a la termografía activa para potenciar la respuesta térmica de los materiales y obtener mayor contraste termográfico.

Finalmente, en la captación, análisis e interpretación de los termogramas se ha de tener en cuenta la presencia de reflejos, anomalías, perturbaciones, enmascaramientos, etc. para que no impidan hacer un diagnóstico correcto.

Bibliografía

- ÁLAVA INGENIEROS (2003): *Termografía infrarroja. Principios básicos*.
- GIRÓ, S. (2010): «Sistemas digitales de adquisición de imágenes visibles, infrarrojo e hiperespectrales», en *La Ciencia y el Arte II*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 205-214.
- MELGOSA REVILLAS, S. (2011): *Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Referencia normativa

- EN 13187:1999, *Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781:1983, modified)*.
- ISO/FDIS 10878, *Non-destructive testing. Infrared thermography. Vocabulary*.
- ISO 18434-1:2008, *Condition monitoring and diagnostics of machines. Thermography. Part 1: General procedures*.
- Real Decreto 2429/79, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios (BOE n.º 253 del 22 de octubre de 1979)*.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (BOE n.º 74 del 28 de marzo de 2006)*.
- UNE-EN 473: 2009, *Ensayos no destructivos. Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos. Principios generales*.
- UNE-EN 15331: 2012, *Criterios para el diseño, la gestión y el control de servicios de mantenimiento de edificios*.
- UNE-EN ISO 13788: 2002, *Características biotérmicas de los elementos y componentes de la edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo (ISO 13788: 2001)*.

Páginas web

Asociación Española de Termografía Infrarroja (AETIR), <http://www.aetir.com>

Asociación Española de Ensayos no destructivos (AEND), <http://www.aend.org>

Database of Nondestructive Testing (NDT). Conference Proceedings, Articles, News, Exhibition and a Professional Network Forum, <http://www.ndt.net>

II. Casos de aplicación

Últimas aportaciones de los láseres para la restauración de metales arqueológicos

Joaquín Barrio

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR). Facultad Filosofía y Letras. Departamento de Prehistoria y Arqueología.
Universidad Autónoma de Madrid
joaquin.barrio@uam.es

M.ª Cruz Medina

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR). Facultad Filosofía y Letras. Departamento de Prehistoria y Arqueología.
Universidad Autónoma de Madrid

Juan P. Cid

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR). Facultad Filosofía y Letras. Departamento de Prehistoria y Arqueología.
Universidad Autónoma de Madrid

A. I. Pardo

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR). Facultad Filosofía y Letras. Departamento de Prehistoria y Arqueología.
Universidad Autónoma de Madrid

C. Escudero

Centro de Conservación Restauración de Bienes Culturales de Castilla y León

E. Catalán

Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico (SECYR). Facultad Filosofía y Letras. Departamento de Prehistoria y Arqueología.
Universidad Autónoma de Madrid

Resumen: El objetivo de este trabajo es presentar los resultados recientes de la aplicación LA-SER en la restauración de metales arqueológicos, obtenidos por el grupo del SECYR, en el curso de los proyectos I+D llevados a cabo en este servicio. Y de manera concreta la intervención de un conjunto de piezas de composición variada: hierro, aleaciones de base cobre, plomo, aleaciones de base plata y dorados. Su tipología y cronología son también diversas: armas y útiles de hierro prerromanos, esculturas y plomos romanos, monedas islámicas, placas medievales. Los metales arqueológicos tratados presentaban un estado de deterioro avanzado debido a un tipo de corrosión peculiar originada por su enterramiento prolongado en suelos agresivos, pudiendo llegar a perder por completo su núcleo metálico. En estos casos es necesario realizar un proceso exhaustivo de restauración, generalmente llevado a cabo con métodos tradicionales, que

aun siendo válidos, no han resultado efectivos en muchos casos para preservar las superficies originales. Las técnicas LASER, complementadas con análisis científicos apropiados, pueden ser hoy una alternativa innovadora para estos problemas de conservación y restauración de metales de procedencia arqueológica.

Palabras clave: Láser, patrimonio arqueológico, metales, limpieza, conservación-restauración.

Abstract: The purpose of this paper is presenting the results of our research in conservation of archaeological metal objects with LASER Technology, developed as part of the activities of our R&D Project and coordinated in the SECYR. The study involved pieces of various compositions, such as iron, lead, copper-base and silver-base alloys, as well as objects from different typology and chronology. Metal objects from archaeological context usually have a deficient state of conservation, produced by long-term burials in aggressive environments, causing numerous corrosion products in the surface of the metal objects and changing their internal structure. Conventional cleaning techniques haven't always been effective enough to preserve original surfaces. Laser technology used in the treatment of metal heritage, combined with proper scientific analysis, is today an interesting alternative to conventional techniques; not trying to replace them, but completing and improving them.

Keywords: Laser, archaeological heritage, metals, cleaning, conservation.

Introducción

Los elementos metálicos recuperados en contextos arqueológicos tienen un gran valor arqueológico y patrimonial, pero su estudio suele estar condicionado por el deficiente estado de conservación en que se recuperan en las excavaciones arqueológicas. Sólo una restauración eficaz hace que puedan ser no sólo estudiados en detalle, sino también expuestos con garantías en museos y colecciones.

Las técnicas láser, utilizadas con éxito desde hace casi 20 años en la restauración de obras en piedra en edificios históricos o arqueológicos (Asmus, 1978: 14-18, y Siano, 2007), parecen ser una alternativa en metales arqueológicos a los métodos más tradicionales de limpieza, como los mecánicos o químicos, que vienen a complementar, y no a suplantar, estos procedimientos. Se ha constatado que la técnica de limpieza con láser ofrece soluciones para resolver los graves problemas de deterioro de estas piezas metálicas.

El Laboratorio SECYR desde hace más de ocho años está investigando la aplicación de esta técnica en bienes del patrimonio arqueológico con una perspectiva multidisciplinar, y desarrollando su aplicación siempre sobre metales arqueológicos en primera intervención, llegados directamente de la excavación¹.

Para ello se ha promovido el diseño de un protocolo de trabajo donde se combinan los estudios científicos y la restauración de los objetos metálicos. Durante la etapa de diagnóstico las distintas técnicas de análisis (RX, SEM con EDAX, DRX, FRX, IBA, LIBS) permiten no sólo

¹ Este trabajo se ha desarrollado dentro de los proyectos i+D «Aplicación de las tecnologías láser en la conservación y restauración de los metales arqueológicos» (HAR2008-05175/HIST. MICINN) y «El Láser como herramienta tecnológica en conservación-restauración del patrimonio arqueológico» (CEMU 003. UAM 2012).

conocer con minuciosidad el estado previo de conservación de estos bienes arqueológicos a intervenir y testar cada paso dado en la restauración de la obra, sino, lo que es más importante, comprobar y validar los resultados obtenidos mediante la limpieza con láser.

Uno de los problemas que se plantean a la hora de trabajar con láser sobre metales arqueológicos, materiales muy conductores, es el calentamiento de la superficie ya que se pueden producir microfusiones, por lo que uno de los aspectos que se ha investigado recientemente es la utilización de películas «refrigerantes», para reducir estos problemas.

Características y rasgos generales del láser en restauración de patrimonio metálico

Es habitual hacer una mínima indicación de las características de esta técnica, recordando que se trata de una radiación luminosa, láser: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Los rasgos que se desprenden de esta descripción de su propio nombre son:

- Monocromaticidad (una longitud de onda).
- Coherencia especial.
- Emisión de alta potencia.
- Luz fácilmente focalizable.
- Capacidad de generar procesos de transformación.

Su utilidad en restauración de obras arqueológicas de metal deriva de estas propiedades, especialmente de la última (Chamón; Barrio, y Criado 2008). La ablación o fotoablación es el principal fenómeno por el cual limpia el láser. Por tanto, los productos de corrosión que se presentan sobre las piezas metálicas arqueológicas, se van a poder eliminar al generarse durante la ablación tres procesos diferentes:

- Vaporización rápida e ionización.
- *Spallation*.
- Tensiones de dilatación y contracción, que pueden ser potenciadas por cavitación.

Estos fenómenos no se suelen dar de forma aislada, sino que en muchos casos se producen cooperativamente, aunque la ablación no implica necesariamente que se deban dar todos a la vez. En definitiva, la aplicación de un haz láser genera un proceso fotomecánico o fototérmico que permite eliminar los estratos formados por productos de deterioro en la superficie del metal arqueológico corroído.

En trabajos anteriores hemos destacado tanto las ventajas como los inconvenientes que se encuentran en la aplicación de estas técnicas y en el tipo de bienes culturales arqueológicos que nos ocupan. De manera sucinta, las ventajas serían:

- Baja o mínima invasividad en la superficie del objeto. La ausencia de contacto físico con la materia sobre la cual interviene, elimina las vibraciones y presiones físicas que generan los procedimientos mecánicos o manuales. Lo mismo puede decirse al evitar el uso de abrasivos o productos químicos remanentes que pueden ser nocivos en el futuro.
- Elevado grado de control; la intervención se efectúa de modo muy progresivo con unos pocos micrones por pulso, lo que hace posible que el restaurador controle al máximo la retirada microestratigráfica de las capas de corrosión. Este es un rasgo importante para mantener la integridad de las pátinas y la superficie original en los metales (Chitty *et al.*, 2005: 1555-1581).

- Selectividad en la eliminación de productos de deterioro, determinada por la distinta absorción óptica en los diversos materiales y sustratos. El láser aprovecha el principio físico de los diferentes coeficientes de absorción de la luz por parte de los diferentes materiales, en función de su color e intensidad. Esta selectividad también tiene que ver en cierta medida con la naturaleza del material, como sucede con la diferencia compositiva de los estratos de corrosión formados sobre el metal arqueológico. En este proceso selectivo y discriminatorio de las capas de alteración también cuentan la reflectancia de la superficie y la cohesión del material.
- Elevada precisión, en razón del uso de fibras ópticas para transmitir el haz de luz, lo que hace posible actuar en objetos con topografías o áreas muy irregulares, caso habitual de los metales arqueológicos. Los equipos actuales, con parámetros regulables bajo control, son capaces de delimitar un área de acción sin que el haz afecte a las inmediatas, y evitando así una limpieza no requerida en ese punto por el restaurador.
- Sistema seguro e inócuo para el restaurador y para el objeto, siempre que se establezcan y respeten protocolos de empleo seguros.

Pero no hay que dejar de manifestar también las desventajas que puede llevar aparejadas la utilización de esta técnica láser:

1. Sistema menos rápido que otros métodos de limpieza como los químicos, pero puede ser más ágil cuando los estratos son de gran dureza.
2. Requiere una excelente formación del restaurador en el manejo del equipo concreto que desee utilizar, puesto que ya contamos con una oferta de mercado diversa.
3. Necesita protocolos de trabajo claros para su uso en cada uno de los tipos de metales y con cada una de las capas de alteración que puedan llevar esto. Aquí sólo la investigación y la experimentación pueden ser el camino adecuado.
4. Al igual que en el resto de tratamientos mecánicos y químicos, supone riesgos serios para la pieza por uso inadecuados, especialmente en los metales como el plomo. Por ello, hay que redundar en el respeto preciso y al máximo de la integridad de la pieza.
5. Puede suponer riesgos graves para el operador, si bien son fácilmente salvables con un buen equipo e instalaciones de protección reglamentados.

Equipamiento y protocolo de trabajo

El desarrollo de nuestro trabajo se ha llevado a cabo con dos equipos:

1. El equipo Láser del SECYR, que responde a esta configuración: láser de Nd:YAG SFR; λ : 1064 nm; duración del pulso: 60-120 ms; energía por pulso: 50-1000 mJ; frecuencia: 1-20 Hz; *spot*: 1,5-6 mm; y salida: fibra óptica.
2. El equipo láser del Centro de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Castilla y León: láser de Nd:YAG LQS λ : 1064 nm; duración del pulso: 120/300ns; energía por pulso: 50-1000 mJ; frecuencia: 1-20 Hz; *spot*: 1,5-6 mm; y salida: fibra óptica.

Nuestros trabajos se han desarrollado de acuerdo al «Protocolo de Trabajo 520», correspondiente a nuestro sistema de gestión de calidad, certificado ISO9001 que describe el procedimiento básico de restauración de metales con láser de ablación.

Objetivos y criterios en la limpieza láser

Desde un primer momento fue intención del grupo no sólo aplicar la técnica láser con las condiciones conocidas y derivadas de la dilatada experiencia en otros campos de los bienes patrimoniales, como en los materiales pétreos, sino también evaluar el método sobre los distintos materiales metálicos que se documentan en los registros arqueológicos: hierro y aplicaciones de otros metales sobre éste (nielados, remaches, damasquinados, etc.), plomo, cobre y sus aleaciones, metales nobles como el oro y la plata, y en el caso de ésta sus aleaciones. Para ello nos marcamos unos objetivos muy claros de la aplicación del láser en nuestros objetos metálicos: la eliminación progresiva de las capas de corrosión; la comprobación de resultados estéticos en comparación con otras técnicas; la incidencia sobre la estructura externa de la materia por comprobación en secuencia metalográfica, y la caracterización y evaluación analítica sobre los cambios de la estructura mineralógica (especies minerales generadas, fusiones, microfusiones, etc.).

A través de nuestros primeros trabajos (Barrio *et al.*, 2006 y Chamón *et al.*, 2007) y de manera progresiva hemos ido dando cuerpo a estos objetivos mediante unos resultados aceptables en unos casos y muy positivos en otras experiencias; tampoco han faltado errores que hemos debido corregir en la aplicación de esta técnica láser. La investigación constante es, por tanto, la única garantía de mejora.

En la última etapa del trabajo del grupo hemos querido añadir nuevos materiales con problemáticas singulares, que vienen a detallar más aquellos objetivos iniciales. En este trabajo expondremos algunos de los resultados sobre objetos de hierro profundamente mineralizados, cloruros y pátinas de aleaciones de bronce, metales blandos como la plata y el plomo en los cuales las películas de intervención han sido un elemento determinante en la aplicación de la limpieza con láser.

Dentro de la mejora del protocolo de análisis hemos procedido a incorporar de manera habitual la técnica LIBS en la caracterización cualitativa de los productos de corrosión antes y después de la aplicación láser para determinar la efectividad de la limpieza y los posibles cambios materiales en las pátinas restantes.

LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) es una técnica de análisis de emisión. El mecanismo de funcionamiento está muy extendido y no es de interés su explicación en este texto. El láser genera la ablación y formación de una pluma de plasma², cuya emisión es detectada y, posteriormente, analizada. Antes, los emisores son arrancados de la estructura y, muchas veces, también ionizados. La energía del láser sólo actúa en una región superficial del material, repartiéndose entre los distintos átomos/iones de acuerdo a las ecuaciones químico-físicas. Esto

² El plasma se generó usando un laser Nano S 130-10 de Q-Switch, con una matriz de Nd:YAG en la línea de excitación de 1064 nm, con un doblador de frecuencia para generar el segundo armónico en polarización horizontal. El ancho temporal a mitad de pico del pulso láser es de 7 ns. La frecuencia de repetición del pulso laser más usada fue de 1 Hz. La divergencia del haz emitido es de 2,5 mrad. El haz es focalizado, con una lente de vidrio, a un área circular de 50 µm de diámetro. La densidad de potencia o fluencia en el volumen focal fue de 4,62 GW/cm². Las medidas se realizan al aire. La emisión se recoge por una lente colectora de vidrio, situada a 5 cm, con un ángulo de $\pi/4$ radianes respecto al haz incidente. La lente colectora se encuentra acoplada una fibra óptica que lleva a la rendija de entrada del monocromador. El espectrómetro empleado fue un Andor SR-163 (de rendija ajustable y una red holográfica de 1200 estrías por milímetro) con una cámara ICCD AndorStar DH720 (una matriz de 1024 x 1024 de 26 x 26 µm por pixel).

se traduce en que, *a priori*, todo elemento, independiente de su estado en el material, realiza una emisión espectroscópica. Gracias a estas consideraciones se puede afirmar que el espectro atómico/iónico de emisión del plasma de la ablación proviene de los constituyentes de la pieza estudiada y del ambiente en que se encuentra (Singh, y Thakur, 2007: 1-134).

Se trata de un análisis elemental de bajo coste, sin necesidad de preparación de muestra, de rápida interpretación por el analista y que puede ser realizado bajo cualquier tipo de condiciones. Cuando se realiza un estudio espectroscópico se puede asignar, de forma unívoca, la correspondencia entre un elemento y su longitud de onda.

Todo esto hace que la técnica LIBS sea de gran utilidad para poder conocer la composición, de forma cualitativa, de una muestra. Se sitúa al alcance el conocimiento simultáneo de la naturaleza elemental de los productos superficiales, las corrosiones y la muestra original. De este modo el restaurador puede conocer, sin la necesidad de destruir la pieza, el estado de limpieza realizado. Por otra parte, queremos señalar los criterios de intervención sobre los que hemos sustentado nuestro trabajo: mantenimiento de la autenticidad, respeto de la pátina y superficie original, mínima intervención ajustada a las necesidades de la pieza, interdisciplinariedad en la investigación exhaustiva de los problemas y causas de deterioro, conservación preventiva que garantice su seguridad física y evaluación constante de las técnicas de vanguardia usadas en su restauración.

Casos de intervención y resultados³

Objetos de hierro

La restauración del conjunto metálico localizado en la tumba 185 de la necrópolis de las Ruedas, perteneciente a la ciudad vaccea de Pintia ha puesto en evidencia la importancia que tiene la colaboración entre arqueólogos y restauradores con el objetivo común de recuperar, intervenir y conservar en las mejores condiciones los objetos integrantes del patrimonio metálico (Barrio *et al.*, 2012: 70-74).

Interesa en este caso destacar el estado de conservación de la panoplia, para poder valorar con mayor garantía la utilidad e importancia de la técnica de limpieza láser en el proceso de restauración de unos elementos de hierro tan corroídos. Fue extraída en la excavación formando un bloque único, en la posición original que tuvo en la tumba (fig.1).

Como criterio básico de intervención, hemos querido mantener durante la restauración esta conexión original de los distintos elementos, para que de ese modo fuese posible entender mejor su valor como ajuar funerario. La pieza estaba muy frágil a causa del alto grado de mineralización del hierro; en la práctica ya no queda núcleo metálico, sino un conjunto de productos de corrosión del hierro con la forma del objeto original. Cuando hemos podido observar con detalle esta estructura hemos visto que conserva en la línea más externa una capa de magnetita, rasgo evidente de la pátina que se ha constituido en la superficie original. Planteando para mejor comprensión un símil, se podría decir que la hoja del puñal es como una nuez, con la cáscara más dura (magnetita) y el interior más blando (óxidos e hidróxidos

³ Agradecemos a los profesores J. Blázquez, A. Fuentes, C. Sanz, A. Uscatescu y M. Retuerce, directores respectivamente de los proyectos arqueológicos de El Salobral, Valeria, Pintia, ermita Virgen de la Torre y Calatrava la Vieja, yacimientos de donde proceden las piezas estudiadas en el SECYR con financiación de proyecto I+D.



Figura 1. Estado inicial y radiografía de la panoplia. Imagen: SECYR-IPCE.

de hierro). Sobre estas hojas de hierro ya corroídas se habrían cementado junto a los óxidos gran cantidad de restos de tierras, carbonatos, silicatos, granos de cuarzo y gravas presentes en el suelo donde se asienta la necrópolis vaccea, dando lugar a un paquete de gran dureza que impedía una lectura mínima de esta pieza.

Aunque no había recibido ninguna acción de consolidación previa en el yacimiento durante su extracción, la dureza del paquete de corrosión hacía de protección; de no ser así, sus condiciones de integridad hubieran empeorado mucho.

Para conocer mejor el estado de conservación de este conjunto de elementos metálicos se realizó una radiografía. El estudio de su imagen hizo posible no sólo registrar la ubicación concreta de cada parte del puñal, sino valorar con acierto la situación de deterioro de su estructura interna a causa de la intensa corrosión sufrida, reconociendo las zonas de mayor debilidad con signos de fisuras. Además, la radiografía obtenida fue una ayuda y guía imprescindible a la hora de abordar la limpieza del puñal.

Como se observa en la imagen inicial de este puñal (*vid* fig. 1), la restauración no podía ser mínima, pues estaba cubierto por un gran paquete geológico. Para tomar una decisión sobre la técnica a utilizar se realizaron diferentes catas de limpieza con varios procedimientos: mecánica con bisturí, espátula ultrasónica, láser, cepillo, etc. Este trabajo previo siempre se hizo controlando con binocular la evolución de la limpieza y que ésta no dañase la pátina original del puñal. Después de comprobar la efectividad de cada herramienta se llevó a cabo la intervención de acuerdo al protocolo propio establecido en nuestro Sistema de Calidad y adecuado para este caso concreto a varias etapas de trabajo.

La primera limpieza tuvo como objetivo la retirada de los cantos de río de diversa granulometría fuertemente adheridos con los óxidos. Para ello la técnica inicialmente elegida fue la espátula ultrasónica, pero sólo se consiguieron eliminar las piedras menos cementadas. La aplicación del microabrasímetro y especialmente del láser pudo debilitar la amalgama de óxidos en torno a cada piedra, para posteriormente intentar desprenderlas con ayuda mecánica. La extrema fragilidad de la pieza hizo muy dificultosa, incompleta y lenta esta primera limpieza de los productos más resistentes. A pesar del extremo cuidado, no pudieron evitarse algunas fracturas en las zonas de máxima debilidad ya visibles en la radiografía.

En una segunda etapa, para rebajar la corrosión y las piedras de las zonas más compactas fue necesario utilizar el microtorno, combinándolo también con el microabrasímetro con microesfera de vidrio. La aplicación cuidadosa y la alternancia precisa de ambas técnicas dieron un buen resultado, haciendo posible acercarnos a la superficie original del puñal.

La tercera fase de limpieza se realizó enteramente con técnica láser, en concreto con el equipo SFR del SECYR. Los parámetros de trabajo precisos ya habían sido probados con buenos resultados en otras piezas de hierro también muy mineralizadas, por lo que se optó por mantenerlos: energía 0,35/0,60 J; *spot* 2,5/4 mm; fluencia 3,6/7,1 J/cm². De este modo, se pudo realizar una restauración muy precisa de la superficie original consistente en una pátina negra de magnetita, en la que incluso se pudieron recuperar las acanaladuras de la hoja y otros detalles de interés tecnológico (fig. 2).

Durante el proceso de restauración de la pieza se tomaron diferentes puntos de análisis (LIBS), y en ellos se comprobó cómo iban disminuyendo los productos de corrosión a medida que avanzaba la limpieza láser, tal y como se observa en el espectro comentado en la figura 2.

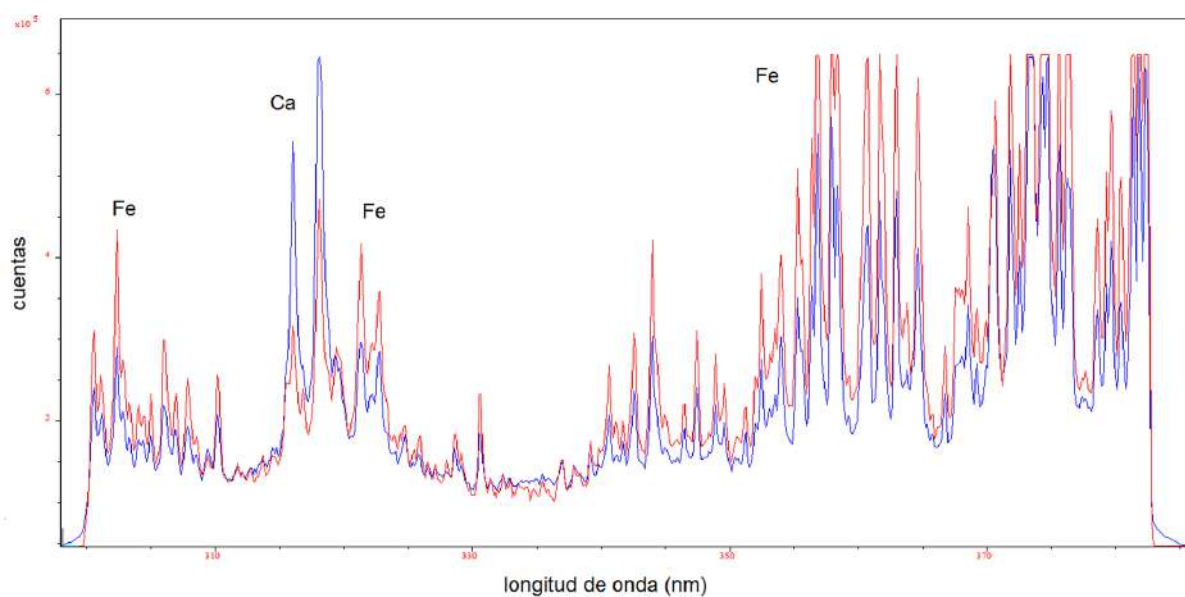


Figura 2. Arriba: proceso de recuperación de la pátina del puñal con láser SFR; abajo: espectros LIB en azul predomina la emisión de calcio correspondiente a la medición antes de la limpieza, y la línea roja correspondiente a la medición tras el tratamiento refleja una mayor emisión de hierro y menor emisión de calcio. Imagen: SECYR.

Los fragmentos desprendidos se han ido pegando con resinas epoxídicas (Araldit®) de forma paralela a la tarea de limpieza, consiguiendo que la pieza mantuviese siempre cierta solidez. Incluso ha sido preciso colocar un refuerzo de fibra de vidrio en el interior de la vaina, a modo de consolidación estructural, adherido con resina acrílica Paraloid B72®. Como protección final se han aplicado dos capas, siguiendo un protocolo habitual en piezas metálicas de estas características. Una primera capa de la misma resina acrílica al 3% en acetona/xileno (50:50) y una segunda capa de cera microcristalina Cosmoloid H-80® al 10% en White Spirit.

Podemos decir que la restauración del conjunto metálico de la tumba 158 de la necrópolis vaccea de Pintia ha tenido como base la combinación eficaz y la complementariedad acertada de técnicas tradicionales junto a otras de vanguardia; siendo en última instancia la aplicación de las técnicas láser las que han hecho posible la recuperación de la pátina de la superficie original de este puñal tipo Villanueva de Teba (fig. 3).

Es necesario concluir que la mejor garantía de futuro es un buen programa de conservación preventiva, ya sea en almacén o en exposición de estos elementos metálicos, fundamentada en unas condiciones medioambientales adecuadas, en especial una HR baja, así como un cuidado esmerado en su manejo y transporte; la extrema fragilidad a que ha conducido su completa mineralización necesita unas condiciones propias de seguridad física.

El láser también ha tenido buenos resultados sobre piezas compuestas por dos o más materiales, dada su flexibilidad en cuanto a parámetros y focalización. Por ejemplo, en el caso de la punta de lanza de hierro con decoración nielada de la necrópolis ibérica de El Salobral (Albacete, siglos v-iv a. C.) con un estado de conservación muy pobre, derivado de la cremación y del enterramiento (Blánquez, 1994: 199-208). El hierro había perdido por completo su núcleo metálico, transformado en hidróxidos de hierro que mantenían la forma original de la punta de lanza. Por su parte, los hilos de plata estaban separados de la superficie de hierro (en algunos casos por elementos vegetales), frágiles y corroídos; habían perdido su color y brillo característicos (figs. 4 y 5).



Figura 3. Estado final del puñal. Imagen: SECYR.



Figura 4. Fotomicrografía del estado inicial de los hilos de plata. Imagen: SECYR.

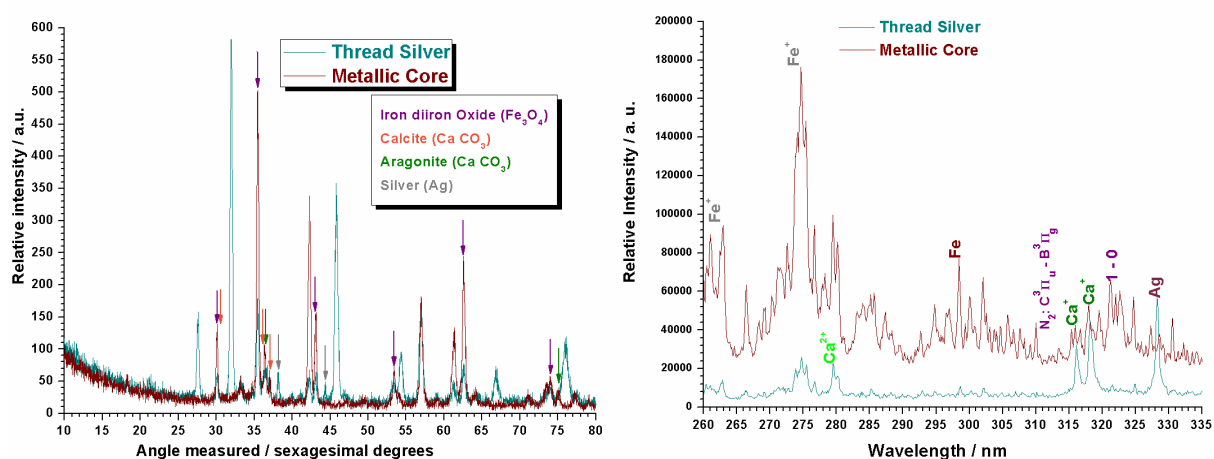


Figura 5. Estudio, mediante dos técnicas distintas, de la punta de lanza en la que se caracteriza la presencia de plata en una filigrana. En el lado izquierdo, se presenta el difractograma de incidencia rasante de DRXP, se realizó sobre dos superficies claramente diferenciadas que, tras interpretación, indica la diferencia de ambos en la composición. En el lado derecho, se presenta el espectro LIBS, realizado sobre las mismas dos superficies, confirmando las composiciones elementales. Imagen: SECYR.

Tras realizar diferentes pruebas de limpieza, concluimos que la degradación no era superficial, sino completa, de manera que era imposible recuperar su aspecto original. El tratamiento láser se llevó a cabo en dos fases: la superficie de hidróxidos de hierro se neutralizó con los siguientes parámetros: energía: 100 mJ, *spot*: 3 mm, fluencia: 1,4 J/cm² y frecuencia: 2 Hz. El resultado fue muy positivo, ya que se creaba una capa oscura muy homogénea estéticamente aceptable. Dado que los hilos de plata no se pudieron limpiar, la segunda fase consistió en el tratamiento de la superficie de hierro ubicada entre estos hilos, protegiéndolos con un gel electroconductor neutro. De esta manera nos asegurábamos que la decoración no sufría daños si el haz láser los alcanzaba. El acceso a estas zonas no hubiera sido posible sin el láser, debido sus reducidas dimensiones y la fragilidad y cercanía de los hilos, por tanto no se hubiera podido tratar con otro sistema (no se trataba de eliminar los hidróxidos, porque debajo había más, sino de sellarlos) (fig. 6).



Figura 6. Estado final de la punta de lanza nielada. Imagen: SECYR.

Objetos de base cobre

El efecto del láser SFR sobre los productos de corrosión de las aleaciones de cobre, fundamentalmente el óxido y el cloruro de cobre, está todavía en investigación. Presentamos dos ejemplos: en primer lugar, un fragmento de bronce de una escultura romana de la ciudad de Valeria (Cuenca, siglo I d. C.), que conservaba un buen núcleo metálico, pero tenía un fuerte ataque de cloruros activos, con numerosos depósitos superficiales adheridos a la pieza por la corrosión, entre ellos: carbonatos, tierras, granos de cuarzo y carbón del proceso de fabricación de la escultura (fig. 7).



Figura 7. Estado inicial del fragmento de escultura romana de Valeria. Imagen: SECYR.



Figura 8. Transformación de la superficie clorurada. Imagen: SECYR.

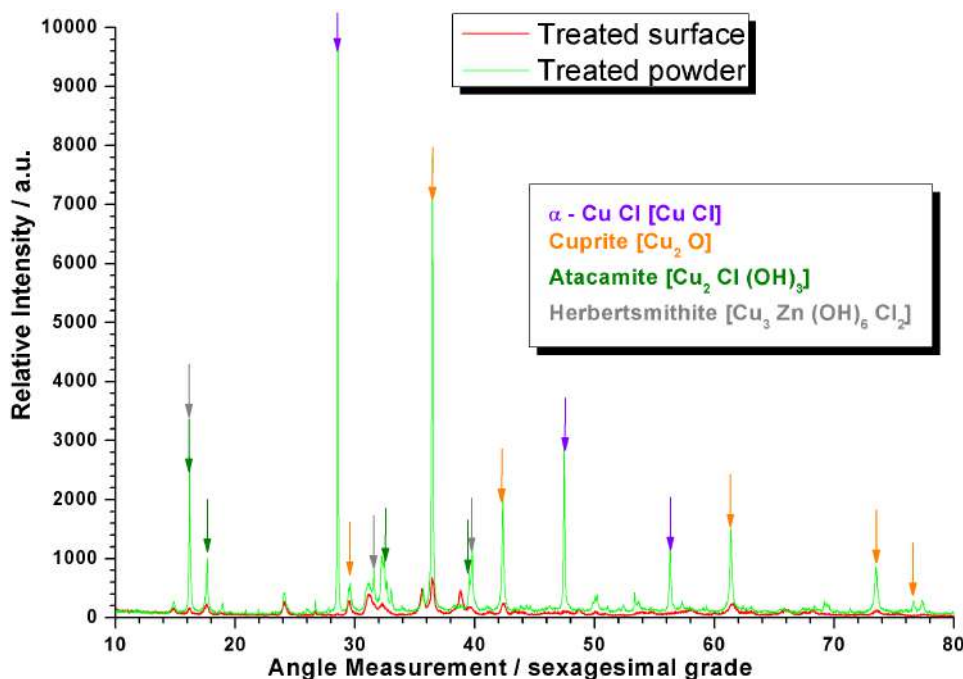


Figura 9. Resultado de DRX: la línea verde del espectro muestra el polvo de cloruro que no se ha transformado por el láser, la línea roja muestra la superficie transformada por el láser, con una pérdida del alfa-cloruro de cobre. Imagen: SECYR.

Tras estudiar el estado de conservación, documentar los diferentes depósitos y realizar radiografía y analítica LIBS de la pieza, que confirmó la composición de bronce binario (cobre-estaño), eliminamos los depósitos superficiales con limpieza mecánica manual (brocha, bisturí, palitos de bambú) y asistida con microtorno. La ablación láser fue utilizada para neutralizar los focos de cloruro. Los parámetros del láser SFR fueron: energía: 150 mJ, *spot*: 3 mm, fluencia: 2,1 J/cm² y frecuencia: 2 Hz. El impacto del láser vaporizó los depósitos de cloruros, creando una superficie homogénea, más densa y menos porosa, dificultando así la interacción con el medio. Además, la capa creada es de color negro, muy similar a la pátina de tenorita y, por tanto, estéticamente aceptable (fig. 8). No obstante, se obtiene un mejor resultado con esta técnica si el foco de cloruros tiene muy poco espesor y está justo sobre el metal (si la capa es muy espesa se reduce previamente por medios mecánicos), ya que el efecto del láser es superficial; sólo transforma la primera capa. Por ello, si existe un foco de cloruro profundo, permanecerá intacto bajo la superficie. Tras analizar por DRX un cobre clorurado tratado con láser y un cobre clorurado sin tratar se confirmó un gran descenso de los cloruros activos en la superficie (fig. 9).

En cualquier caso, este tratamiento no funciona como una estabilización global. La pieza, como en todos los tratamientos, debe ser almacenada con unas condiciones de humedad y temperatura controladas, para evitar la reactivación de los cloruros (fig. 10).

El segundo ejemplo que presentamos es una delgada plaquita de latón del yacimiento Ermita Virgen de la Torre (Madrid, siglos XI y XII). Durante su tratamiento pudimos comprobar que el láser LQS responde de manera más adecuada para las aleaciones de cobre. La pieza conservaba abundante núcleo metálico, una capa homogénea de óxido de cobre (cuprita) oculta bajo un estrato de carbonatos y tierras⁴. La radiografía permitió identificar la superficie con

⁴ SEM+EDAX: La analítica revela la presencia de $\pm 74\%$ Cu, $\pm 14\%$ Zn, $\pm 2\%$ As, junto con Si –tierras– y O de los óxidos, tras la limpieza por cualquiera de los métodos se constata la eliminación del Si y la disminución del O en mayor o menor grado según queden restos rojizos –cuprita– en la superficie.

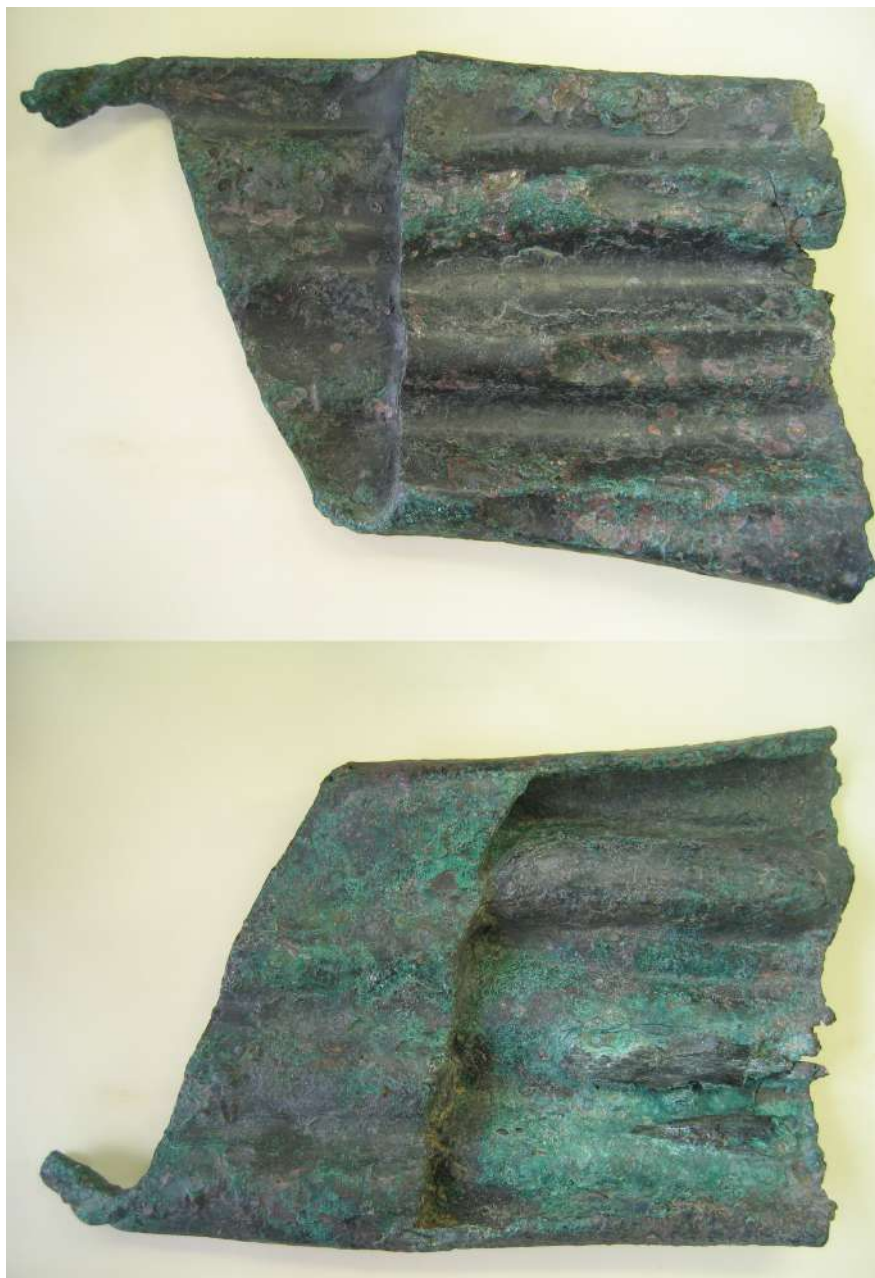


Figura 10. Estado final del fragmento de escultura de Valeria. Imagen: SECYR.

decoración troquelada y ver que la pieza estaba surcada por pequeñas grietas, por tanto, debíamos tener cuidado con la presión que ejerciéramos sobre ella (fig. 11).

La operación de limpieza se enfocó como un pequeño testado comparativo de diversas técnicas –aplicadas bajo lupa binocular–, cuyos resultados eran perceptibles a simple vista:

- Limpieza mecánica a punta de bisturí: operación lenta y con bruñido de la superficie metálica.
- Limpieza mediante espátula de ultrasonidos en seco: resultados insatisfactorios, operación sumamente lenta para sacar a la luz la superficie metálica e importante modificación de la misma.



Figura 11. Arriba: fotografía inicial en la que destacan los depósitos superficiales; abajo: radiografía que permite identificar la decoración de la placa. Imagen: SECYR-IPCE.

- Limpieza láser en seco: parámetros empleados: spot 2 mm, fluencia 2,5 J/cm² y frecuencia 5 Hz. Resultados: eliminación de tierras y carbonatos manteniendo un heterogéneo estrato de óxido de cobre con las modificaciones ya observadas en el transcurso de este proyecto: cambio de tono, endurecimiento y compactación.
- Limpieza láser con la pieza en inmersión –la que finalmente se llevó a cabo– parámetros empleados: *spot* 2 mm, fluencia 2,5 J/cm² y frecuencia 5 Hz, solución agua-alcohol (60:40) con la hebilla a 15 mm de profundidad. Resultados: limpieza más rápida, efectiva y homogénea, en el reverso quedó al descubierto la superficie metálica del latón y en el anverso, dado el mayor grosor de las concreciones se dejó un estrato de cuprita, sobre el que no se quiso insistir para evitar introducir daños mecánicos por la cavitación generada, ya que la radiografía inicial había puesto en evidencia diversas grietas y fisuras. El análisis de la superficie mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDAX) revela la inocuidad del procedimiento sobre el latón y sus efectos sobre los restos de cuprita, generando formaciones globulares sobre las que seguimos investigando para determinar si es el resultado de erosión por cavitación (fig. 12).

Metales blandos

El caso del tratamiento de piezas arqueológicas compuestas por «metales blandos» tiene importantes diferencias respecto a los hierros y cobres. Hasta ahora, se han caracterizado por ser mé-



Figura 12. Proceso de limpieza de la plaquita de latón con láser. Imagen: A. Plaza (CCRBC Castilla y León).

todos de limpieza química, dado que las herramientas mecánicas (bisturí, microtorno y microabrasímetro) provocan el rayado de la superficie de estos metales. En nuestro proyecto estábamos interesados en comprobar la efectividad de la tecnología láser para eliminar los productos de corrosión de estos metales y, en el caso de obtener buenos resultados, utilizarla como alternativa a la limpieza química.

No obstante, partíamos de una dificultad que era necesario subsanar: cuando el haz del láser alcanza la superficie, la temperatura de esta asciende rápidamente, pudiendo producir fusiones o microfusiones en el metal. La solución adoptada ha sido utilizar una capa intermedia que absorba parte de la energía y modere el ascenso de temperatura. Este «refrigerante» puede ser bien una disolución de agua-alcohol (60:40), en la que se introduce la pieza, dejando por encima una capa de 10 mm de disolución, o bien un gel electroconductor neutro aplicado sobre la superficie de la pieza, fundamentalmente cuando la pieza es demasiado frágil y no conviene sumergirla. Posteriormente debe eliminarse por completo la humedad o los restos de esta capa intermedia: en el caso de sumergir la pieza en agua-alcohol, tras el tratamiento debe secarse en el horno y, en el caso del gel, los restos pueden eliminarse con una torunda impregnada en agua-alcohol.

Una de las experimentaciones que hicimos con metales blandos fue la limpieza que realizamos sobre fragmentos de monedas de plata islámicas de un tesorillo Omeya Hispanomusulmán (siglo VIII-IX). En principio el objetivo fue comparar los resultados de la limpieza química tradicional con ácido fórmico con los resultados de la limpieza láser de dos equipos; SFR y LQS. Establecimos un esquema de trabajo basado en la elección de 6 fragmentos similares tanto en cronología como en aleación, de forma que sin variar apenas los parámetros de los láseres y jugando con la presencia o no de refrigerante (agua-alcohol 40:60) obtuvimos resultados muy distintos dependiendo del láser utilizado en cada caso.

Las conclusiones del trabajo (Pardo *et al.*, 2011: 54-57 y Buccolieri *et al.*, 2010: 205-214) teniendo en cuenta que las técnicas LÁSER de limpieza por ablación tienen un gran campo de investigación abierto y que las múltiples combinaciones de parámetros pueden ser determinantes y con resultados muy distintos, se pueden resumir en que, según esta primera experimentación, el equipo LQS es mucho más indicado para los objetos de plata que el SFR, si bien con este último se pueden obtener buenos resultados en piezas de muy buena calidad y pureza, y siempre en modo inmersión con el uso de agua-alcohol (fig. 13).

El láser aplicado a objetos numismáticos es una alternativa eficaz frente a las limpiezas mecánicas pues se evitan todos los rayados, marcas, etc., tan negativos para el estudio correcto de las monedas antiguas.

También podemos defender como un método adecuado para plata arqueológica el tradicional uso de limpieza química mediante disoluciones bajas de ácido fórmico, especialmente para monedas y objetos que permitan la inmersión por su buena conservación del núcleo metálico.

Finalmente, nos parece muy interesante la técnica láser en objetos de plata que por su composición mixta (por ejemplo un anillo con una gema) o su mala conservación (débil núcleo metálico) no permiten una inmersión en sustancias ácidas que pueden afectar a su integridad.

El caso de la limpieza de objetos de plomo arqueológico es similar a la limpieza de la plata ya que, hasta ahora estaba limitado a las limpiezas químicas, salvo excepciones. En el SECYR buscamos una alternativa para el caso de un *pondus* romano del yacimiento de Verdolay (Murcia, siglos I-II d. C.), que presentaba un núcleo metálico estable, pero cubierto por una costra de carbonatos y cloruros de plomo gruesa y de gran dureza. Realizamos diversas pruebas



Figura 13. Fragmento de moneda de plata con una zona limpiada con láser LQS. Imagen: SECYR.



Figura 14. Proceso de limpieza láser del *pondus*. Imagen: SECYR.

para estudiar los efectos del láser y escoger el mejor método de limpieza: en primer lugar enfocamos el haz directamente sobre la costra de carbonatos y comprobamos que la ablación eliminaba parte de la costra, pero producía microfusiones superficiales, apreciables a simple vista, por tanto no era una limpieza aceptable. En segundo lugar, sumergimos el *pondus* en una disolución de agua-alcohol (60:40) obteniendo así dos beneficios: por una parte funcionaba como refrigerante, evitando o disminuyendo en gran medida las microfusiones, y por otra favorecía la limpieza por cavitación, es decir por choque mecánico, dando lugar a una mayor efectividad (fig. 14).

El tercer método consistió en combinar la limpieza química (ácido nítrico al 10% y posterior neutralización) con la limpieza láser por inmersión. De este modo obtuvimos los mejores resultados, ya que parte de la costra se había ablandado y disuelto con el ácido, consiguiendo así una mayor efectividad de la ablación y cavitación (Martí-López *et al.*, 2009: 3671-3680) (fig. 15).

Los parámetros utilizados fueron:

- Capa más externa: energía: 400 mJ, *spot*: 3 mm, fluencia: 5,7 J/cm² y frecuencia: 2 Hz.
- Capa interna: energía: 300 mJ, *spot*: 3 mm, fluencia: 4,2 J/cm² y frecuencia: 2 Hz.

Conclusiones

A partir de nuestra investigación podemos determinar que cada material y capa de corrosión requiere un rango determinado de parámetros, con resultados diferentes en cada uno de ellos. El tratamiento de piezas de hierro mostró la gran eficacia de la tecnología láser para eliminar

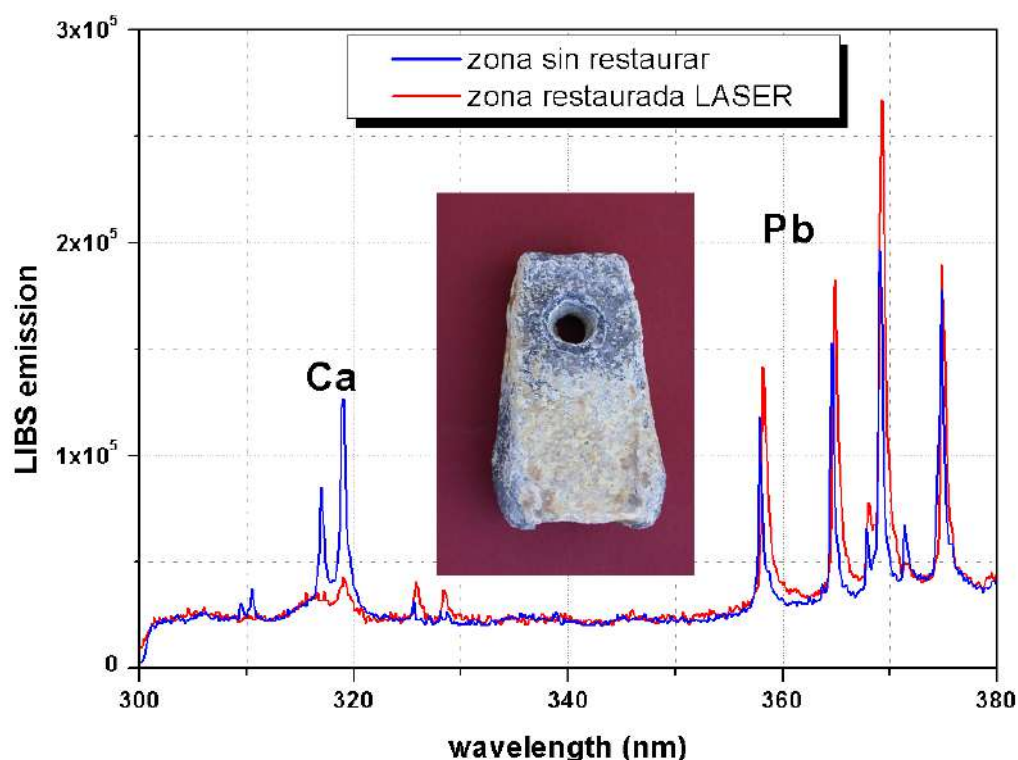


Figura 15. Espectros LIBS del *pondus* romano: la línea azul muestra la mayor emisión de calcio antes de la limpieza y la línea roja muestra la reducción del calcio y una mayor emisión del plomo. Imagen: SECYR.

los productos de corrosión, más efectivo y seguro para la pieza y su pátina que los métodos tradicionales de limpieza. Desde un punto de vista estético, que no debe ser olvidado en conservación-restauración, la superficie tratada había adquirido más calidad y fidelidad a la superficie original.

Por otro lado, el láser no eliminaba tan fácilmente los óxidos de cobre, más bien al contrario, la capa de corrosión se endurece y su color oscurece. Así pues, de momento y mientras continúa la investigación, restringimos el uso del láser sobre aleaciones de cobre a la neutralización de cloruros.

En el caso de objetos de «metales blandos», el láser es una alternativa eficaz para las piezas complicadas, como por ejemplo las fabricadas con dos o más materiales, las que tienen una superficie muy irregular o aquéllas que por su estado de conservación no pueden ser sometidas a limpieza química.

En conclusión podemos afirmar que la aplicación de la tecnología láser en conservación-restauración de metales arqueológicos es una excelente herramienta, si bien todavía requiere de mayor investigación, para determinar las posibilidades y beneficios que ofrece. Lejos de restar importancia a los métodos tradicionales, el láser debe ser entendido como una herramienta más, que puede y debe ser utilizada en relación con aquéllos. De cualquier forma, es importante resaltar que la eficacia de los tratamientos láser depende del equipo utilizado, de la naturaleza del objeto, su tecnología, su estado de conservación y la topografía de su superficie.

Bibliografía

- ASMUS, John F. (1978): «Light cleaning: laser technology for surface preparation in the arts», en *Technological conservation*, n.º 3, pp. 14-18.
- BARRIO, J.; ARROYO, M.; CHAMÓN, J.; PARDO, A. I., y CRIADO, A. (2006): «Laser cleaning of archaeological metal objects» en *Heritage, Weathering and Conservation*, vol. II. London: Ed. Taylor y Francis Group, pp. 699-707.
- BARRIO, J.; CATALÁN, E.; GUTIÉRREZ, P. C.; MEDINA, M.^a C., y SANZ, C. (2012): «Reexcavar la tumba 158 de la necrópolis vaccea de Las Ruedas de Pintia (Peñafiel, VA): Aplicaciones de técnicas láser en la restauración de la panoplia», en *Vaccea Anuario*, n.º 5, pp. 70-74.
- BLÁNQUEZ, Juan (1994): «La necrópolis tumular ibérica de El Salobral (Albacete)», en *Verdolay*, n.º 6, pp. 199-208.
- BUCCOLIERI, G.; ADDUCI, F.; BUCCOLIERI, A.; CASTELLANO, A., y NASSISI VI VONA, F. (2010): «Effetti fotochimici nell'UV laser cleaning di manufatti in argento e sue leghe. Applicazioni laser nel restauro», en *Aplar 3*. Edición de A. Brunnetto. Bari, pp. 205-214.
- CHAMÓN, J.; BARRIO, J.; ARROYO, M.; PARDO, A. I., y CATALÁN, E. (2007): «Nd:YAG laser cleaning of heavily corroded archaeological iron objects and evaluation of its effects», en *Congreso LACONA VII*. Madrid, pp. 297-302.
- CHAMÓN, J.; BARRIO, J., y CRIADO, A. (2008): «El láser de ablación como herramienta de limpieza en el Patrimonio Arqueológico», en *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, n.º 4, pp. 265-269.
- CHITTY, W. J.; DILLMANN, P.; L'HOSTIS, V., y LOMBARD, C. (2005): «Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete. A study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts», en *Corrosion Science*, n.º 47, pp. 1555-1581.

- MARTÍ-LÓPEZ, L.; OCAÑA, R.; PORRO, J. A.; MORALES, M., y OCAÑA, J. L. (2009): «Optical observation of shock waves and cavitation bubbles in high intensity laser-induced shock processes», en *Applied Optics*, vol. 48, n.º 19, pp. 3671-3680.
- PARDO, A. I.; BARRIO, J.; GUTIÉRREZ, P. C.; CANTO, A., y ESCUDERO, C. (2011): «Aplicación de la tecnología láser a un conjunto de monedas de plata de procedencia andalusí», en Medina, V. *et al.* (eds.) *Actas del 18th International Meeting on Heritage Conservation*. Granada, pp. 54-57.
- SIANO, Salvatore (2007): «Principles of Laser Cleaning in Conservation», en *Handbook on The Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*. Edición de M. Schreiner y M. Strli. COST G7.
- SINGH, J. P., y THAKUR, S. N.(eds.) (2007): *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Amsterdam: Elsevier.

Limpieza de pintura mural con bacterias

Pilar Bosch Roig

Universitat Politècnica de València
pboschroig@gmail.com

José Luis Regidor Ros

Universitat Politècnica de València

Rosa M.^a Montes Estellés

Universitat Politècnica de València

Resumen: Algunos microorganismos son importantes agentes causantes de biodeterioro de obras de arte, sin embargo, la mayor parte son responsables de procesos positivos en la naturaleza y pueden ser utilizados positivamente para la limpieza del patrimonio. Nuestro grupo de investigación está desarrollando nuevas metodologías que permiten mediante la utilización de microorganismos vivos, limpiar sustancias difíciles de eliminar por los métodos tradicionales de restauración. Mediante los estudios previos de puesta a punto de esta tecnología se han conseguido limpiar con éxito costras blancas y restos de cola de arranque presentes en las pinturas murales de Antonio Palomino en la bóveda de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. Así mismo, se ha introducido un nuevo soporte de aplicación de las bacterias que nos permite obtener resultados muy ventajosos, mostrando una limpieza más homogénea y controlada de las pinturas murales en comparación con los medios convencionales de aplicación. Esta tecnología permite una limpieza de pintura mural de una manera específica, homogénea y respetuosa, tanto con la obra de arte, como con las personas y el medio ambiente al no utilizar sustancias tóxicas.

Palabras clave: Biolimpieza, *Pseudomonas stutzeri*, bacterias, pinturas murales, iglesia de los Santos Juanes de Valencia.

Abstract: Some microorganisms are important agents of biodeterioration of works of art, however, most are responsible for positive processes in nature and can be used positively for cleaning the Cultural Heritage. Our research group is developing new methodologies that using live microorganisms are able to clean substances difficult to remove by traditional restoration methods. By previous studies of development of this technology we have been able to successfully clean white crusts and animal glue residue present in the mural paintings of Antonio Palomino in the vault of the Santos Juanes Church in Valencia. Our research have also introduced a new application support for the bacteria that allows us to obtain very favorable results, showing a more homogeneous and controlled cleaning of wall paintings compared to conventional bio-cleaning application supports. This technology makes a wall painting cleaning specific, uniform and respectful to the work of art, the people and the environment because toxic substances are not used.

Keywords: Biocleaning, *Pseudomonas stutzeri*, bacteria, mural painting, Santos Juanes church in Valencia.

Introducción

El patrimonio cultural está continuamente sometido a daños físicos, químicos y biológicos. El aumento en los niveles de contaminantes atmosféricos que se están registrando en las últimas décadas produce una aceleración de la degradación y la corrosión de los materiales artísticos, especialmente aquellos expuestos a la intemperie. En particular, en entornos urbanos, las patologías más frecuentes en los materiales pétreos son las costras blanco-grises y negras (en su mayoría compuestas por sulfatos, nitratos y residuos carbonosos) (Ranalli *et al.*, 1996: 1415-1420). También genera deterioros la presencia de sustancias orgánicas, sobre las superficies artísticas, procedentes del depósito de sustancias contaminantes de la atmósfera, de la acumulación de compuestos que se derivan de la lisis de los microorganismos, y de sustancias orgánicas aportadas durante tratamientos de restauración anteriores. Estas sustancias orgánicas incluyen compuestos naturales, tales como colas animales y vegetales, huevo, caseína, nuez y aceite de linaza; así como polímeros sintéticos tales como resinas utilizadas como materiales de protección, consolidantes e hidro-repelentes. La acumulación de materia orgánica sobre las superficies artísticas puede producir importantes daños en las obras así como servir de sustrato para el crecimiento de microorganismos (Ranalli *et al.*, 2003: 243-246).

Estas frecuentes patologías que nos encontramos sobre el patrimonio cultural son corrientemente tratadas mediante métodos físico-químicos, que en el caso de patologías difíciles de eliminar éstos pueden ser agresivos, invasivos, poco selectivos, requiriendo tiempos largos de aplicación. Estas técnicas tradicionales son por tanto, en ocasiones, inadecuadas para las obras tratadas pudiendo causar cambios de color, movimientos de sales en el interior del material artístico, eliminación excesiva de material original, etc. Por otro lado, estos métodos tradicionales suelen emplear sustancias tóxicas, exponiendo a los operarios a un riesgo durante el tratamiento a la vez que introduciendo en el medioambiente sustancias tóxicas indeseadas (Cappitelli *et al.*, 2007: 5671-5675).

Debido a todos estos inconvenientes de los métodos tradicionales de restauración, hace unos años surge la idea de buscar métodos biológicos y sostenibles de limpieza del patrimonio. Así surge la biolimpieza que consiste en la utilización de microorganismos vivos para la conservación y restauración del patrimonio.

Los microorganismos son considerados generalmente como agentes biodeteriorantes del patrimonio ya que algunos son responsables de la alteración de obras de arte, sin embargo sólo una minoría tienen un papel negativo. La gran mayoría de los microorganismos son responsables de procesos positivos, y debido a ello llevan muchos años siendo utilizados para nuestro beneficio. Los microorganismos son utilizados para la limpieza de aguas residuales (comúnmente llamado bioremediación), para el control biológico de plagas (por ejemplo: *Bacillus turingensis* para el control de insectos en cultivos ecológicos); para la producción de alimentos (el yogur, la cerveza, el vino y el pan se obtienen gracias a la fermentación de las bacterias y levaduras); incluso su utilización se está aplicando para la producción biológica de hielo y agua (utilizando bacterias aéreas) y para la producción biológica de electricidad (biopilas), etc. Por todo esto se decidió investigar si los microorganismos también podían tener efectos positivos al ser utilizados para la conservación y restauración del patrimonio y a lo largo de este trabajo veremos que así es.

Los microorganismos seleccionados para los procesos de biolimpieza, deben ser siempre no patógenos y no esporulantes, de manera que no creen un riesgo para los trabajadores y tras su aplicación mueran, al no ser capaces de producir formas de resistencia (esporas). Los microorganismos no sólo exhiben ventajas sobre los métodos físico-químicos tradicionales de restauración, sino también sobre las enzimas, sobre todo cuando la sustancia a eliminar es par-

ticularmente compleja e incrustada. En estos casos, las enzimas (que están programadas para actuar sobre unos enlaces químicos específicos), se encuentran con dificultades para degradar moléculas complejas que requieren un conjunto de diferentes enzimas. En estos casos, las diversas enzimas necesarias pueden no encontrarse disponibles comercialmente o encontrarse disponibles pero con condiciones de aplicación muy diferentes (temperatura, pH, etc.) y por tanto no siendo posible su aplicación de forma conjunta. Sin embargo, las bacterias son capaces de sintetizar las enzimas específicas necesarias para eliminar las moléculas complejas deseadas (Ranalli *et al.*, 2000: 231-245).

Diversos estudios científicos y casos de aplicación real sobre el patrimonio han mostrado que la biolimpieza puede ser utilizada para la eliminación de costras negras (mediante la utilización de bacterias reductoras de sulfatos como *Desulfovibrio desulfuricans* (Gauri y Chowdhury, 1988: 545-550, y Ranalli *et al.*, 2000: 231-245); para la eliminación de eflorescencias salinas o costras blancas (mediante bacterias reductoras de nitratos como *Pseudomonas* sp. o *Paracoccus denitrificans*) (Ranalli *et al.*, 2000: 231-245; Ranalli y Sorlini, 2003: 2-4; Cappitelli *et al.*, 2006: 3733-3737; Bosch *et al.*, 2010: 115-122; 2011a:19-24, y Bosch; Regidor y Montes 2011b: 19-24; 2012); para la eliminación de restos de materia orgánica (Antonioli *et al.*, 2005: 2453-2459; Sorlini y Cappitelli, 2008: 15, y Bosch *et al.*, 2010: 115-122); y para procesos de biomineralización o bioconsolidación de materiales pétreos (mediante bacterias que producen neo-formación de calcita) (Gauri y Chowdhury, 1988: 545-550; Bang; Galinat y Ramakrishnan: 404-409; Perito y Mastromei, 2003: 113-114, y Rodríguez-Navarro *et al.*, 2003: 2182-2193).

Estas bacterias actúan mediante unos mecanismos de acción en los que se produce la degradación de la sustancia deseada (cola, nitratos, sulfatos, etc.) y como resultado se obtiene una sustancia gaseosa (encontrada habitualmente en el aire) que se incorpora a la atmósfera. En el caso de las bacterias reductoras de nitratos, se obtiene nitrógeno (N_2), en el caso de las bacterias reductoras de sulfatos se obtiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) y en el caso de las bacterias degradadoras de materia orgánica se obtiene dióxido de carbono (CO_2) (fig. 1) (Sorlini y Capitelli, 2008: 15, y Ranalli y Sorlini, 2003: 2-4).

Materiales y métodos

El proceso de biolimpieza comienza con la toma de micro-muestras para determinar la naturaleza de la sustancia que se desea limpiar. Las micro-muestras se analizan en el laboratorio me-

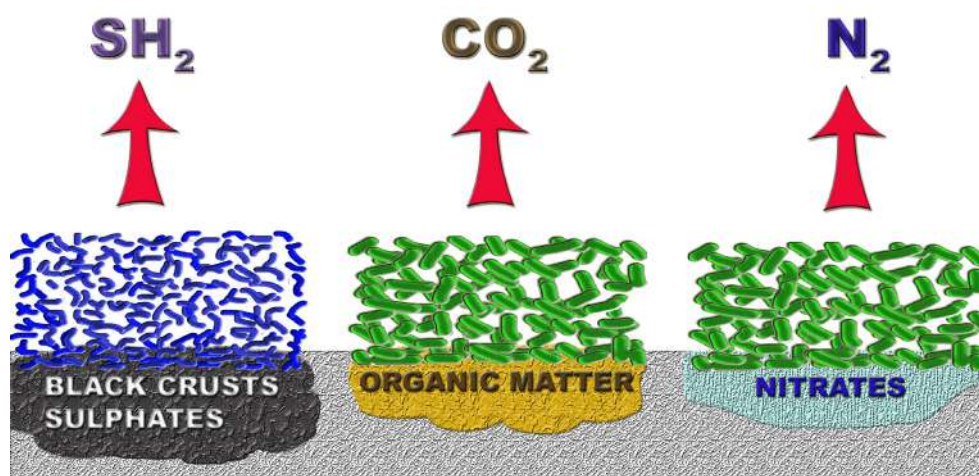


Figura 1. Esquema de los mecanismos de acción de las bacterias utilizadas en los procesos de biolimpieza del patrimonio.

diante cromatografía iónica, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), por cromatografía de gases –espectrometría de masas, etc.

Una vez determinada la naturaleza de la sustancia que deseamos eliminar se llevan a cabo pruebas de laboratorio para la selección e identificación de microorganismos capaces de eliminar la sustancia determinada (cola, sulfatos, nitratos, etc.).

Tras la selección de las bacterias, éstas crecen en el laboratorio en medios de cultivo específicos enriquecidos con las sustancia a limpiar. Se realizan, en probetas de laboratorio, diversas pruebas de biolimpieza para confirmar su eficacia y determinar las condiciones adecuadas de actuación y aplicación.

Para la aplicación de las bacterias sobre las superficies a limpiar se requiere de un soporte de aplicación que además de retener las bacterias en superficie les aporte el agua que necesitan para actuar.

El procedimiento de aplicación de las bacterias consiste en las siguientes cuatro fases:

1. Las bacterias se aplican directamente sobre la superficie artística con un pincel (se puede proteger la superficie pictórica con papel japonés en los casos en que la capa de pintura es frágil y hay riesgo de pérdidas) (fig. 2).
2. Añadimos el soporte de aplicación a la zona tratada y mantenemos la temperatura (25° C) y la humedad constante.
3. Transcurrido el tiempo de tratamiento, se retira el soporte de aplicación y se limpia delicadamente la superficie con agua estéril para eliminar las bacterias y evitar así procesos metabólicos no deseados (fig. 3).
4. Se deja secar la superficie tratada y hacemos controles microbiológicos (para confirmar que no quedan bacterias vivas en la superficie tratada) y químicos (para confirmar y cuantificar la limpieza).



Figura 2. Proceso de aplicación a pincel, sobre papel japonés protector, de la solución bacteriana para la biolimpieza de un fragmento de las pinturas murales de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.

Los procesos de control (fase 4) de la biolimpieza son un aspecto muy importante de la metodología. Para el control microbiológico se utilizan tanto técnicas microbiológicas tradicionales de recuento de colonias en placas de contacto, como mediante avanzadas y rápidas técnicas bioquímicas de medición del contenido de ATP utilizando bioluminiscencia (fig. 4). El ATP es una molécula energética que es común a todos los organismos, por lo que puede ser utilizado como un bio-indicador de los niveles de la actividad microbiana (Ranalli *et al.*, 2006: 98-104).

Resultados y discusión

La primera biolimpieza de pintura mural realizada se llevó a cabo en las pinturas murales del Camposanto Monumental de Pisa (fig. 5) gracias a las investigaciones realizadas por el equipo liderado por el profesor Giancarlo Ranalli (Ranalli *et al.*, 2005: 73-83). Estas investigaciones per-



Figura 3. Proceso de limpieza con agua destilada estéril, aplicada con pincel y esponja, sobre las pinturas murales tras el tratamiento con bacterias.



Figura 4. Proceso de control microbiológico, mediante técnicas bioquímicas de medición del contenido de ATP utilizando bioluminiscencia.



Figura 5. Pinturas murales del interior del Camposanto Monumentale de Pisa, Italia.

mitieron la bio-eliminación de una gruesa capa de cola animal alterada sobre los frescos (3,5 m × 7,8 m) de Spinello Aretino y Andrea Bonaiuti (siglo XIV) y la consiguiente liberación del tejido de arranque adherido al fresco. La utilización de bacterias para la limpieza de estos frescos se debió a la dificultad de la misma mediante métodos tradicionales. Esta biolimpieza se realizó mediante la utilización de bacterias seleccionadas de la especie *Pseudomonas stutzeri*A29, previamente adaptadas para degradar la cola animal alterada. El proceso de limpieza requirió de una última fase final mediante enzimas proteolíticas (proteasa de tipo XIX a partir de *Aspergillus sojae*) (Antonioli *et al.*, 2005: 2453-2459).

Estas colas presentes en los frescos del Camposanto de Pisa fueron aplicadas en el pasado con el fin de arrancarlos de la pared mediante la técnica del *strappo*.

Las bacterias, *Pseudomonas stutzeri*A29, seleccionadas y crecidas en el laboratorio, fueron aplicadas en suspensión acuosa directamente sobre el fresco utilizando algodón como soporte de aplicación y aporte de humedad. Se obtuvieron resultados satisfactorios, después de 12 horas de tratamiento eliminándose el 95% de la cola alterada.

Los autores llevaron a cabo un seguimiento de los frescos durante los cuatro años siguientes a la biolimpieza, no observando ningún riesgo de crecimiento microbiano, con valores muy bajos de ATP y ausencia de cambios de color.

La primera biolimpieza de pintura mural llevada a cabo en España, tuvo lugar en los frescos de Antonio Palomino de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia (fig. 6) y fue realizada por nuestro equipo multidisciplinar de la Universitat Politècnica de València.

Estas pinturas murales poseían dos problemas difíciles de abordar mediante los métodos tradicionales de restauración. Por un lado restos de cola animal alterada procedente de restauraciones anteriores en las que se arrancaron de la bóveda central de la iglesia (tal y como sucedió en Pisa). Y por otro lado presencia de costras blancas sobre la capa pictórica de las pinturas murales no arrancadas situadas en los lunetos de la bóveda. La presencia de costras blancas, formadas



Figura 6. Fachada de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.

principalmente por nitratos, sobre estos frescos se debe a la existencia de un espacio de inter-bóveda en la parte posterior donde múltiples aves habitan y anidan generando una gran acumulación de detritus. La materia orgánica nitrogenada durante su descomposición produce nitratos y nitritos que con ayuda del agua de lluvia (que también filtra a ese espacio) atraviesan el muro y aparecen en forma de eflorescencias blanquecinas o costras blancas sobre la pintura mural (fig. 7).

Al igual que sucedía en Pisa, los métodos de limpieza tradicionales no podían limpiar la cola alterada de manera satisfactoria, ni las costras blancas insolubles (formadas principalmente por nitratos), por lo que pensamos en la biolimpieza como método alternativo. Seleccionamos y crecimos en medios específicos (con cola o con nitratos) en el laboratorio bacterias de la especie *Pseudomonas stutzeri* (fig. 8). Se aplicó una solución acuosa de bacterias directamente sobre la superficie pictórica protegida con papel japonés con un pincel. Después del tratamiento, unas tres horas, los restos de cola animal se limpiaron correctamente (70% de eliminación de cola) y las costras blancas se eliminaron por primera vez sobre pintura mural mediante bacterias (84% de eliminación de nitratos). El control de la biolimpieza se realizó inmediatamente después del tratamiento, y mensualmente para confirmar que no había restos de bacterias en la superficie pictórica mediante placas de contacto; por otro lado los bajos valores obtenidos en los análisis mensuales de ATP mostraron la ausencia de riesgo de crecimiento microbiano (Bosch *et al.*, 2010: 115-122; Bosch; Regidor y Montes, 2011b: 19-24; 2012: 266-274).

Este estudio de biolimpieza de pintura mural llevado a cabo en Valencia, alcanza relevancia por dos motivos principales. El primero se debe a que por primera vez se han podido limpiar eficientemente con bacterias costras blancas insolubles sobre pintura mural sin alterar la capa pictórica subyacente. Las costras blancas causan graves problemas de deterioro en las pinturas murales, ya que durante los procesos de crecimiento y precipitación de los cristales de las sales, se pueden producir fácilmente microfracturas en el muro y en la capa de pintura, degradándola.

El segundo motivo que da valor añadido a esta investigación es el haber puesto a punto un material idóneo para la aplicación de las bacterias: el agar. Para que el proceso de biolimpie-

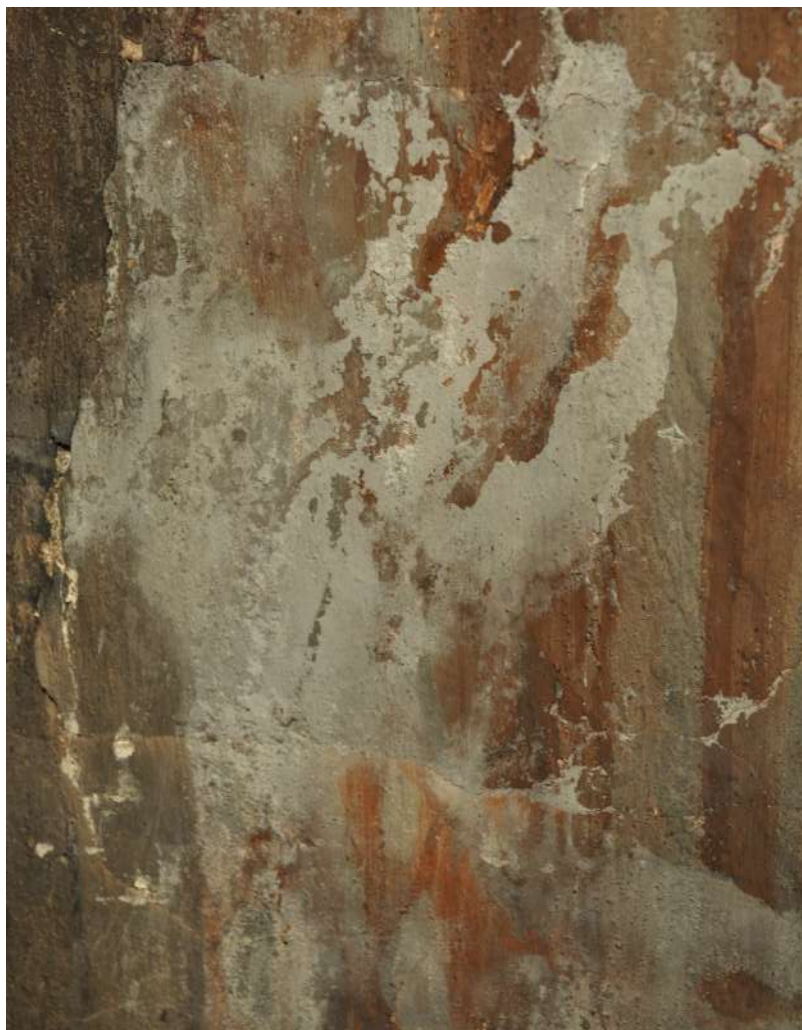


Figura 7. Costras blancas presentes en las pinturas murales de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.

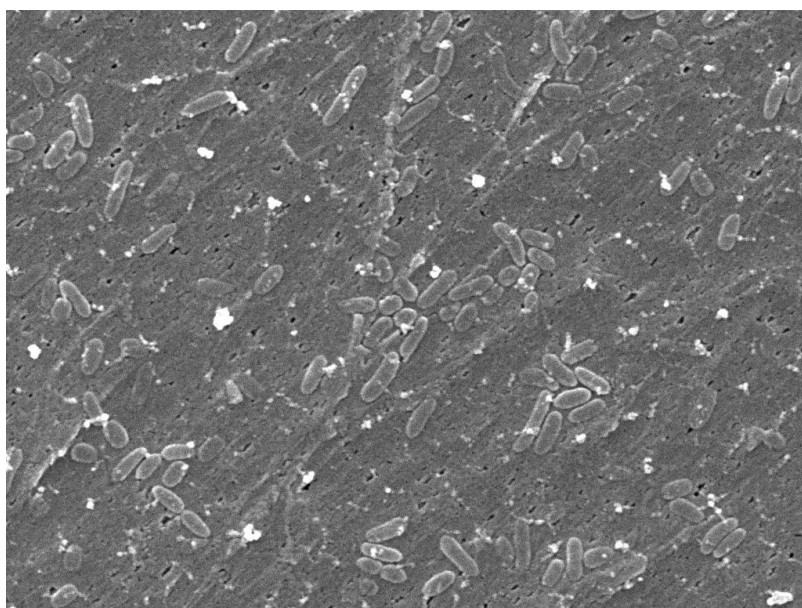


Figura 8. Imagen de microscopía electrónica de la bacteria *Pseudomonas stutzeri*.

za se realice con éxito, las bacterias deben estar durante el tratamiento, en un soporte de aplicación que las retenga y les aporte el agua que necesitan para realizar su metabolismo. Se han utilizado para este fin diversos materiales inorgánicos (minerales de arcilla, sepiolita) sobre los que las bacterias se adhieren formando una biopelícula (Ranalli *et al.*, 1997: 255-261); materiales orgánicos como el algodón (Ranalli *et al.*, 2005: 73-83); o materiales gelificados (como el Carbo-gel) (Lustrato *et al.*, 2012: 51-61). El agar es un complejo polisacárido (D-Galactosa y 3-6-Anhidro-L-galactosa) de la pared celular de unas algas marinas rojas. Este polisacárido ha sido ampliamente utilizado en la industria alimentaria como gelificante y espesante; en microbiología y botánica como soporte para crecimiento de microorganismos, y desde hace unos pocos años se está utilizando en restauración para la limpieza de obras de arte. El agar tiene ventajas, respecto al resto de soportes de aplicación utilizados en biolimpieza, debido a que produce un gel denso con elevadísima retención de agua que libera de forma lenta, superficial, uniforme y controlada. Además es reversible y no mancha ni deja residuos sobre la superficie. Sin embargo, los otros soportes de aplicación pueden producir una liberación de agua descontrolada, pudiendo dejar cercos, manchas y residuos. Respecto a la retención de las bacterias en los soportes habituales se produce en todo el soporte, mientras que en el agar es en superficie, por lo que se requiere menor cantidad de bacterias. Además el agar permite su aplicación en cualquier tipo de superficie artística ya sea oblicua, horizontal y vertical, produciendo limpiezas homogéneas en todos los casos (fig. 9), mientras que muchos de los soportes ya utilizados no permiten tanta elasticidad de aplicación pudiendo producir limpiezas heterogéneas en superficies no horizontales como se puede ver en la figura 10 (Bosch; Regidor y Montes, 2013: 266-274).



Figura 9. Proceso de biolimpieza de una pintura mural vertical utilizando agar como soporte de aplicación de las bacterias.

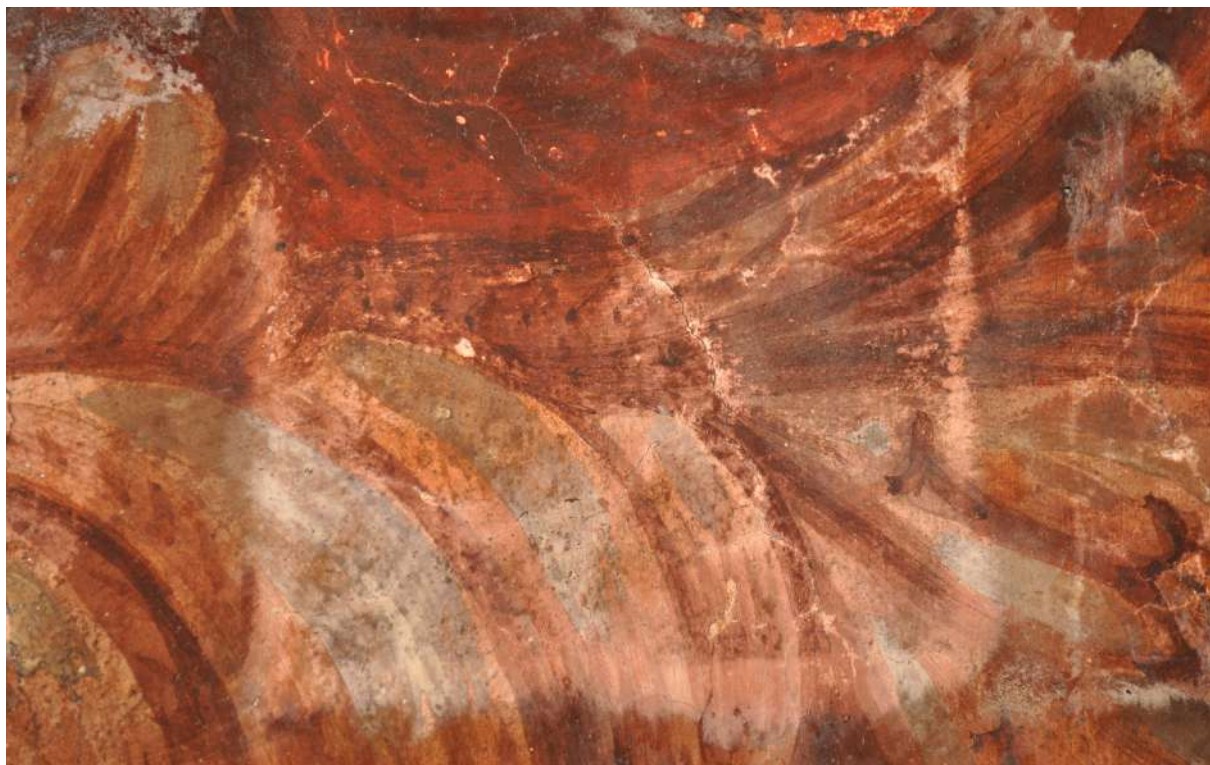


Figura 10. Resultado de una limpieza heterogénea (limpieza excesiva en los laterales y en la parte inferior) en una superficie horizontal, debido a la utilización de un soporte de aplicación inadecuado.

Conclusiones

Este trabajo muestra cómo las bacterias *Pseudomonas stutzeri* son capaces de eliminar satisfactoriamente, mediante tiempos de tratamiento cortos, colas y costras blancas sobre pinturas murales utilizando el agar como soporte idóneo de aplicación.

Estos procesos de biolimpieza basados en el uso de microorganismos no son operaciones de riesgo, siempre y cuando se lleven a cabo con el debido cuidado y atención, por lo que es importante que en los procesos esté involucrado personal especializado y cualificado. Por ello las investigaciones aquí presentadas tienen un carácter interdisciplinar, ya que han participado equipos integrados por microbiólogos, restauradores, historiadores del arte, químicos, arquitectos, etc.

Esta novedosa metodología de biolimpieza es de gran importancia ya que permite una eliminación eficaz, específica, no tóxica y respetuosa de restos de cola animal y costras blancas sobre pintura mural, mostrándose como una alternativa a los tratamientos físico-químicos tradicionales de restauración.

Esta novedosa metodología ha suscitado interés entre las empresas, por lo que su futuro pasa por la transferencia de conocimiento universidad-empresa, lo que ofrecerá nuevas oportunidades de empleo tanto para microbiólogos, como restauradores. Por otro lado es necesaria la continuación de las investigaciones para: comparar resultados entre los grupos de investigación; validar y estandarizar los procedimientos y criterios; reducir los riesgos y los costes; simplificar los métodos de aplicación; ampliarla a otros materiales artísticos, y obtener la aceptación y la aprobación de los restauradores, historiadores del arte y arquitectos así como de las organizaciones responsables de las intervenciones en el patrimonio cultural.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de la Universitat Politècnica de València (PAID-05-09: biotecnología microbiana aplicada a la limpieza y restauración de superficies de obras de arte), proyecto dirigido por Rosa María Montes Estellés, y gracias a la beca FPI obtenida por Pilar Bosch Roig (BES-2006-12110) y financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecen a los miembros del equipo que han hecho posible esta investigación; a los párrocos de la Real Parroquia de los Santos Juanes de Valencia y a la Dirección General de Patrimonio por apoyar el estudio y restauración de las pinturas; a Gianluigi Colalucci, Donatella Zari, Carlo Giantomasi y a la Primaziale Pisana por permitirnos visitar el Camposanto de Pisa y aprender de las novedosas técnicas de restauración con bacterias que allí están aplicando con gran éxito y en particular al profesor Giancarlo Ranalli pionero en biolimpieza en Italia, por su inestimable ayuda; a los restauradores de la iglesia de los Santos Juanes, en particular a José Juan Baldo e Irene Carpio por ayudarnos con los procesos de *biolimpieza*; al Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio y al departamento de Biotecnología de la Universitat Politècnica de València donde se han realizado las presentes investigaciones; a Restaura BioTech S.L por su valioso apoyo; y a los catedráticos Pilar Roig Picazo e Ignacio Bosch Reig por su incansable respaldo y sustento.

Bibliografía

- ANTONIOLI, P.; ZAPPAROLI, G.; ABBRUSCATO, P.; SORLINI, C.; RANALLI, G., y RIGHETTI, P. G. (2005): «Art-loving bugs: the resurrection of Spinello Aretino from Pisa's cemetery», en *Proteomics*, pp. 2453-2459.
- BANG, S. S.; GALINAT, J. K., y RAMAKRISHNAN, V. (2001): «Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*», en *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 28, pp. 404-409.
- BOSCH-ROIG, P.; REGIDOR-ROS, J. L.; SORIANO SANCHO P.; DOMÉNECH CARBÓ M. T., y MONTES-ESTELLÉS, R. M.^a (2010): «Ensayos de biolimpieza con bacterias en pinturas murales», en *Arché*, vol. 4-5, pp. 115-122.
- BOSCH-ROIG, P.; MONTES-ESTELLÉS, R. M.^a; REGIDOR-ROS, J. L.; SORIANO SANCHO, P., y DOMÉNECH CARBÓ M.^a T. (2011a): «Biocleaning of wall paintings with bacteria», en *Actas del 15th International Bio-deterioration & Biodegradation Symposium en Viena*. Austria.
- BOSCH-ROIG, P.; REGIDOR-ROS, J. L., y MONTES-ESTELLÉS R. M.^a (2011b): «Biolimpieza de pintura mural con bacterias», en *Actas del XVIII Congreso Internacional Conservación y Restauración de Bienes Culturales en Granada*. España.
- (2013): «Biocleaning of nitrate alterations on wall paintings by *Pseudomonas stutzeri*», en *International Biodegradation and Biodeterioration*, vol. 84, pp. 266-274.
- CAPPITELLI, F.; ZANARDINI, E.; RANALLI, G.; MELLO, E.; DAFFONCHIO, D., y SORLINI C. (2006): «Improved Methodology for bioremoval of Black Crusts on Historical Stone Artworks by Use of Sulfate-Reducing Bacteria», en *Applied and Environmental Microbiology*, pp. 3733-3737.
- CAPPITELLI, F.; TONIOLO, L.; SANSONETTI, A.; GULOTTA, D.; RANALLI, G.; ZANARDINI, E., y SORLINI, C. (2007): «Advantages of using Microbial Technology over traditional Chemical Technology in Removal of Black Crusts from Stone Surfaces of Historical Monuments», en *Applied and Environmental Microbiology*, pp. 5671-5675.
- GAURI, K. L., y CHOWDHURY, A. N. (1988): «Experimental studies on conversion of gypsum to calcite by microbes», en *Actas del 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone en Toruń*. Poland, pp. 545-550.

- LISTRATO, G.; ALFANO, G.; ANDREOTTI, A.; COLOMBINI, M. P., y RANALLI, G. (2012): «Fast biocleaning of mediaeval frescoes using viable bacterial cells», en *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 69, pp. 51-61.
- PERITO, B., y MASTROMEI, G. (2003): «Conservation of monumental stones by bacterial biomineralization», en *MicrobiolToday*, vol. 30, pp.113-114
- RANALLI, G.; CHIAVARINI, M.; GUIDETTI, V.; MARSALA, F.; MATTEINI, M.; ZANARDINI, E., y SORLINI, C. (1996): «The use of microorganisms for the removal of nitrate and organic substances on artistic stoneworks», en *Actas del 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone en Berlin*. Alemania, pp. 1415-1420.
- (1997): «The use of microorganisms for the removal of sulphates on artistic stoneworks», en *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 40, pp. 255-261.
- RANALLI, G.; MATTEINI, M.; TOSINI, I.; ZABARDINI, E., y SORLINI, C. (2000): «Bioremediation of Cultural Heritage: removal of sulphates, nitrates and organic substances», en *Of Microbes and Art*. Edición de O. Ciferri, P. Tiano, G. Mastromei. New York: Kluwer Academic, pp. 231-245.
- RANALLI, G.; BELLI, C.; BARACHINI, C.; CAPONI, G.; PACINI, P.; ZANARDINI, E., y SORLINI, C. (2003): «Deterioration and bioremediation of frescoes: A case-study» en *Molecular Biology and Cultural Heritage*. Edición de C. Sáiz-Jiménez. Lisse, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers, pp. 243-246.
- RANALLI, G., y SORLINI, C. (2003): «Application of microorganisms for the deteriorated surfaces recovery», en *Coalition*, vol. 6, n.º 2, pp. 2-4.
- RANALLI, G.; ALFANO, G.; BELLI, C.; LISTRATO, G.; COLOMBINI, M.^a P.; BONADUCE, I.; ZANARDINI, E.; ABBRUSCATO, P.; CAPPITELLI, F., y SORLINI, C. (2005): «Biotechnology applied to cultural heritage: biorestitution of frescoes using viable bacterial cells and enzymes», en *Journal of Applied Microbiology*, vol. 96, pp. 73-83.
- RANALLI, G.; BELLI, C.; LISTRATO, G.; MELOSCIA, A., y ORSINI, M. (2006): «Efficient DNA extraction and amplification of samples from archeological site of Pompei», en *Macromolecular Symposia*, vol. 236, n.º 1, pp. 98-104.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; RODRÍGUEZ-GALLEGO, M.; CHEKROUN KOUTAR, B., y GONZÁLEZ-MUÑOZ, M.^a T. (2003): «Conservation of Ornamental Stone by Myxococcus xanthus-Induced Carbonate Biomineralization», en *Applied and Environmental Microbiology*, pp. 2182-2193.
- SORLINI, C., y CAPPITELLI, F. (2008): «The application of viable bacteria for the biocleaning of Cultural Heritage surfaces», en *Coalition*, vol. 15.

Extractos naturales para la desinfección y desinsectación de bienes culturales.

Las plantas medicinales y el patrimonio histórico

Ramón Morales

Real Jardín Botánico (RJB-CSIC)
morales@rjb.csic.es

Paloma Blanco

Real Jardín Botánico (RJB-CSIC)
paloma@rjb.csic.es

Paloma Lalana

Real Jardín Botánico (RJB-CSIC)
plalonso@hotmail.com

Manuel Pardo de Santayana

Universidad Autónoma de Madrid (UAM)
manuel.pardo@uam.es

Nieves Valentín

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
nieves.valentin@meacd.es

Resumen: Se trata de la primera fase del proyecto que lleva por título «Extractos naturales para la conservación de los bienes culturales en soporte orgánico. Alternativa a los microbicidas e insecticidas convencionales». Su objetivo principal ha sido recopilar información sobre especies vegetales utilizadas tradicional o popularmente como insecticidas, repelentes de insectos, nematocidas, fungicidas y microbicidas en general. Para ello se ha elaborado una base de datos en el programa Access, de la que se incluye un modelo de ficha (fig. 6). Toda la información se ha obtenido de bibliografía seleccionada, tanto de libros como de artículos de revistas científicas. Analizando los datos obtenidos, se han elegido las especies que se consideran más adecuadas para proceder con ellas a ensayos experimentales. Estas son: como insecticida *Mintbostachys mollis* (muña-muña), especie ampliamente difundida en América que pertenece a la familia de las labiadas; como fungicida *Equisetum arvense* (cola de caballo), relativamente frecuente en la Península Ibérica; y como microbicida *Origanum vulgare* (orégano).

Palabras clave: Extractos naturales, fungicida, insecticida, desinfección, objetos históricos.

Abstract: This article summarizes the first phase of the project entitled: «Natural extracts for the conservation of Cultural Heritage in organic materials. An alternative to common insecticides

and microbiocides». The objective has been focused on the selection of plant species traditionally or popularly used as insecticides, repellents for insects, nematocides, fungicides and bactericides. In this work we have developed a database in Access that includes a model of card-tab for each species. The information has been retrieved from selected bibliography including both; books and scientific journal articles. The database shows species that are considered to be appropriate to carry out experimental trials allowing the evaluation of insecticidal and microbicidal activities. We have included: *Mintbostachys mollis* (muña-muña) with potential insecticide effects, it is a plant widespread in America that belongs to the *Lipped Family*; *Equisetum arvense* (horsetail), various *Artemisia* species, both genus with fungicide properties are relatively frequent in the Iberian Peninsula and *Origanum vulgare* with fungicide and bactericide activities as well.

Experimental work to evaluate the effect of these natural extracts on insects and microorganisms involved in the deterioration of historic materials is in progress.

Keywords: Natural extracts, fungicide, insecticide, disinfection, historic objects.

Antecedentes

Los bienes culturales de naturaleza orgánica son particularmente vulnerables a las oscilaciones de los parámetros ambientales y al desarrollo de agentes biológicos, los cuales alcanzan una particular relevancia en países de clima húmedo y templado. Los microorganismos y los insectos



Figura 1. Alteraciones por impacto de la humedad y contaminación microbiológica. Fotografía: Fernando Suárez. IPCE.

son los agentes que afectan con mayor frecuencia a las colecciones históricas. Su erradicación y prevención debe abordarse desde un punto de vista global que incluya tanto a los objetos, de tipología muy diversa, como al edificio y mobiliario que los alberga. Las características arquitectónicas de los inmuebles, las condiciones ambientales y en especial su mantenimiento, determinan el riesgo de infección/infestación en los bienes culturales.

El control del biodeterioro debe realizarse de forma específica, en función de un diagnóstico previo de las alteraciones. A ser posible se reducirá al mínimo la manipulación de los objetos y el uso de productos tóxicos para la salud humana, y nocivos para el medio ambiente.

En el caso de obras afectadas por microorganismos (figs. 1 y 2), en general, se utilizan biocidas derivados de las sales de amonio, antibióticos y el etanol que por su menor toxicidad, coste reducido y accesibilidad es ampliamente utilizado. En objetos con insectos activos y edificios con plagas (figs. 3 y 4), las permetrinas, combinadas con otros productos sinergizantes como el butóxido de piperonilo, son los tratamientos más comunes, los cuales pueden ser aplicados por imprimación, inyección o micronebulización. Cuando estos productos se aplican en numerosos objetos de un archivo o museo y en el ambiente de grandes espacios, su toxicidad representa un riesgo y su eficacia se reduce; todo ello constituye un problema que es preciso subsanar.

Los procedimientos de erradicación de insectos más seguros para los objetos y para la salud, son los que emplean gases inertes con bajo contenido en oxígeno. Se conocen como tratamientos de anoxia. Se utilizan especialmente para materiales muy delicados. No obstante, una vez desinsectados las obras quedan expuestas nuevamente a un riesgo de infestación que debe prevenirse. Para ello, el control de los parámetros ambientales y la limpieza son siempre imprescindibles pero no suficientes. Por lo tanto, sería adecuado recurrir al uso de productos que repelan la colonización de insectos, inhiban el desarrollo de microorganismos y, a ser posible, reduzcan el impacto de la humedad relativa ambiental.



Figura 2. *Mucor sp.* y *Cladosporium sp.*, aislados de material celulósico. Fotografía: Nieves Valentín, IPCE.



Figura 3. Alteraciones por insectos anóbidos. Fotografía: Nieves Valentín. IPCE.



Figura 4. *Lyctus bruneus* en reverso de marco. Fotografía: Nieves Valentín. IPCE.

Otras alternativas. El uso tradicional de las plantas aplicadas a la conservación de los bienes culturales. Investigaciones en curso

Desde 1990 en el Instituto del Patrimonio Cultural de España, se han venido realizando algunos ensayos preliminares con extractos naturales empleados para la desinfección de materiales históricos de archivos y bibliotecas. El producto que se seleccionó inicialmente fue propóleo aplicado a papel con desarrollo de colonias fúngicas y bacterianas. Su eficacia fue positiva frente a ciertas bacterias. Sin embargo, no fue eficaz para la eliminación de muchas especies de hongos que comúnmente se desarrollan en materiales celulósicos o proteicos. En esta línea, también se realizaron análisis de papel infectado y tratado con productos comerciales que tienen como base la citronella (*Cymbopogon citratus*), especie de origen asiático frecuentemente empleada como repelente de insectos. El resultado en este caso fue satisfactorio para la eliminación de varios hongos y bacterias seleccionados, aunque se observó que los productos comerciales empleados, que usaban el aceite esencial de la planta y eran aplicados por pulverización o micro-nebulización, depositaban una fina película de naturaleza oleosa sobre el soporte tratado.

En el año 2011, el Instituto del Patrimonio Cultural de España en colaboración con el Consejo Superior de investigaciones Científicas (CSIC), comenzó a desarrollar un proyecto de investigación que versaba sobre «Extractos naturales para la conservación de los bienes culturales en soporte orgánico. Alternativa a los microbicidas e insecticidas convencionales». Con él se pretende investigar sobre productos naturales que sean eficaces en objetos sometidos a biodeterioro. Asimismo, se considera necesario que los productos utilizados sean obtenidos de recursos renovables y, por lo tanto, sostenibles, apropiados a la realidad de instituciones con escasos recursos y fáciles de aplicar tanto en las obras como en el ambiente.

El proyecto global que se ha puesto en marcha, consta de seis etapas cuyos contenidos se pueden sintetizar:

1. Investigación histórica: se centra en la revisión y puesta en valor del uso y conocimiento tradicional de las plantas, tanto en el área de la medicina, agricultura, ritos ceremoniales. Estos aspectos forman parte un valioso patrimonio inmaterial que debe preservarse.
2. Elaboración de una base de datos: comprende la información esencial sobre aquellas plantas que teniendo un uso medicinal pueden ser aplicadas para evitar o eliminar deterioros por infección/infestación en materiales históricos.

El objetivo es disponer de una herramienta imprescindible para diseñar los protocolos de ensayos experimentales con extractos específicos, y constituir una red de intercambio de datos sobre plantas, a ser posible autóctonas o disponibles en cada país.

3. Análisis biológicos: ensayos sobre dianas específicas. Los bioensayos son imprescindibles en la evaluación de la actividad insecticida, microbiocida o microbiostática de los extractos seleccionados para eliminar y/o repeler insectos, y eliminar y/o inhibir microorganismos celulolíticos y proteolíticos. Con ello sería posible seleccionar tratamientos «verdes», respetuosos con la integridad de los materiales, la salud de las personas y el medio ambiente.
4. Análisis químicos y físicos. Esta etapa comprende la caracterización y preparación de los extractos cuya actividad, insecticida/microbicida ha resultado positiva. El análisis químico de los extractos con eficacia contrastada permitiría elaborar una librería de patrones útil para su estudio a nivel internacional.

En esta etapa también se diseñarán ensayos de envejecimiento de materiales (sin valor cultural) tratados con los extractos y se determinará su estabilidad y las posibles alteraciones que puedan ocasionar tanto a los materiales históricos (cambios de pH, alteraciones cromáticas y otras propiedades físico-químicas), como a la salud y al ambiente.

El método de aplicación es un aspecto fundamental que se tendrá en cuenta para determinar la viabilidad de los tratamientos.

5. Desarrollo de un proyecto piloto. Se pondrá en marcha un plan de tratamientos en un edificio de interés cultural con problemas de biodeterioro: archivo-biblioteca-museo-herbario. El objetivo consiste en evaluar la eficacia y la viabilidad en casos reales.
6. Desarrollo de un proyecto en red con América Latina. La base de datos obtenida en la etapa 2, se ampliará a nivel internacional. A ella se incorporará el estudio de las plantas autóctonas, aprovechando la biodiversidad del patrimonio natural de cada país para proteger sus bienes culturales.

Las plantas medicinales y el patrimonio histórico

En esta primera fase del proyecto que se ha puesto en marcha, se ha elaborado una base de datos en el programa Access, de la que se incluye un modelo de ficha (fig. 6). En ella se recopila



Figura 5. Selección de plantas de uso medicinal potencialmente aptas para control de biodeterioro. Fotografía: Nieves Valentín. IPCE.

información sobre especies vegetales utilizadas tradicional y popularmente como insecticidas, repelentes de insectos, bactericidas, fungicidas y microbicidas en general. Toda la información se ha obtenido de bibliografía seleccionada, tanto de libros como de artículos de revistas científicas. Analizando los datos obtenidos se han elegido las especies que se consideran más adecuadas para proceder con ellas a ensayos experimentales.

Como se ha indicado, este trabajo surgió de la necesidad de obtener productos alternativos a los insecticidas y microbicidas utilizados en la conservación de bienes culturales de naturaleza orgánica, que presentan riesgo para la salud y el medio ambiente. Las plantas producen en su metabolismo secundario algunos compuestos que parecen ser eficaces contra insectos o microbios. Dichos compuestos, sintetizados por seres vivos en la naturaleza, son los llamados productos naturales. Muchos de ellos son conocidos y utilizados popularmente desde antiguo. Ciertos productos naturales se han empleado para la conservación de alimentos o como medicinas. Por ello, se ha acudido principalmente a los saberes populares y tradicionales, conocimientos empíricos muchas veces muy eficaces que se han mantenido vivos a lo largo del tiempo. Basándose en estudios históricos y etnobotánicos se ha elaborado un fichero de datos informático con una serie de información complementaria sobre plantas o productos vegetales utilizados. También se han incluido algunas sustancias no vegetales que se han encontrado en las fuentes bibliográficas trabajadas. En una segunda fase se trataría de experimentar ciertos productos naturales obtenidos de las especies vegetales seleccionadas, que fueran eficaces en conservación, pero que no presentasen efectos indeseables.

Metodología

Se ha partido de una base de datos (fig. 6) ya elaborada por uno de los autores, Manuel Pardo de Santayana, sobre plantas medicinales de uso popular y tradicional en la Península Ibérica. Hay que hacer constar que dicha base de datos no es completa, ni exhaustiva; con ella se había comenzado la recopilación de todas las plantas medicinales de uso popular en España. Consta de 4.070 registros, 567 especies y 264 usos medicinales diferentes reunidos en 24 categorías. Ha sido una ventaja sustancial haber podido disponer de dicha base de datos, ya que en ella hay mucha información sobre especies vegetales que podían ser utilizadas sobre todo como

The screenshot shows a database application window titled "Informaciones". It contains several sections for data entry and viewing:

- ID Información:** 8494
- Id Especie:** *Laurus nobilis* L.
- Nombre vulgar:** laurel
- ID Otros:**
- Origen:**
- Bibliografía:** Fernández Álvarez, M.D. & Brezina, J. (1998) Medicina popular, magia y religión en El Bierzo. Folk Medicine, Magic and Religion in El Bierzo
- Procedencia:**
- Distribución:** CAL - L (El Bierzo); España
- Reservas:**
- Usos:**
 - Repelente de insectos/insecticida
 - insecticida-Repelente de insectos
- Modo de empleo:** Externo-Combustión (humo)
- Preparación:** quemar
- Parte utilizada:**
- Información uso general:**

Il la purificación se conseguía al quemar ciertas plantas porque se pensaba que su aroma eliminaba la amenaza. La flora llamada a filas para este fin incluía el laurel, enebro, orégano, ajeno, ruda, clavo, romero, abrotoño y espiago. Se puede argumentar que el humo, aparte de disipar el hedor del ambiente, era repelente de las ratas y de las pulgas portadoras de la enfermedad que albergan. Era un temprano ejemplo de la "fumigación". En El Bierzo la persistencia del laurel en ciertos rituales de "purificación" y prácticas de la medicina popular no es una mera coincidencia. Aparte de las connotaciones espirituales del humo, claramente anteriores a las teorías medievales de la peste, los atributos químicos de ciertas plantas aromáticas están directamente implicados en la profilaxis (actúan como fumigantes). En lo referente al laurel, el mismo está asociado con una larga historia de similitudes y usos rituales. La etnobotánica, siempre de vuelta y vuelta con
- Tipo de información:**
 - ☐ Etnológica
 - ☐ Generalista
 - ☒ Histórica
 - ☐ Científ. testado
- Ritual:** si
- Química:**
- Otros usos:**
- Registro:** 2149 de 2673

Figura 6. Base de datos.

antiparásitos o antimicrobianas. En esta base de datos inicial se han modificado los campos, adaptándolos a las necesidades del trabajo y se han filtrado los registros, eliminando usos medicinales no relacionados con la finalidad de este proyecto.

Los participantes en el proyecto, además de los arriba firmantes, son Rocío Bruquetas (IPCE), Adolfo García (IPCE), Jesús Sanz (IQO-CSIC) y Azucena González (ICA-CSIC).

Todos los investigadores del proyecto han ido seleccionando trabajos históricos y etnobotánicos (Font Quer, 1962; Mulet, 1991, y Villar, 1987) susceptibles de contener datos sobre usos de plantas como insecticidas, fungicidas o antimicrobianas. En total han sido 189 trabajos entre libros y artículos científicos. Para ello se han utilizado sobre todo tesis doctorales que versaban sobre etnobotánica, o bien estudios etnobotánicos ibéricos y americanos. Pero también se han fichado trabajos sobre etnología, o algunos de carácter histórico, o incluso de temas diversos, pero de interés para nuestro fin (de tipo generalista). De ellos se han revisado:

1. Datos referentes a plantas insecticidas y repelentes.
2. Los datos de plantas medicinales usadas para enfermedades infecciosas con probables propiedades antimicrobianas y antifúngicas.

El trabajo de manejo de la base de datos, modificación de campos, filtrado de la base de datos antigua e introducción de nuevos datos ha sido realizado por Paloma Lalana, asesorada por Manuel Pardo de Santayana, Ramón Morales y Paloma Blanco.

Resultados

Se dispone en la actualidad de una base de datos con 2.646 registros, 863 especies y 104 usos que se reúnen en 20 categorías.

Para la denominación de especies vegetales se ha seguido la nomenclatura científica botánica al uso. También se incluyen los nombres vulgares más utilizados.

La mayor parte son especies que viven en la Península Ibérica, pero también se han incluido especies americanas, dado el interés que se muestra en todas las colecciones museísticas americanas, y algunas de otros continentes.

Hay que tener en cuenta la disponibilidad del material vegetal para la fase de experimentación, y posteriormente para obtención de sus extractos, en el caso de que por fin sean utilizadas dichas plantas. Algunas de ellas son plantas cultivadas, otras veces son silvestres y, de momento, la única posibilidad de obtención es mediante recolección de poblaciones silvestres. En ese caso habrá que ver la posibilidad de poner en cultivo dichas especies.

Las categorías de uso más importantes son insecticidas, microbicidas y fungicidas. Además se mantienen una serie de ellas de la base de datos anterior por su muy probable función biocida-antiséptica.

Por fin se ha realizado una selección de especies de las contenidas en la base de datos y se han obtenido con ellas unos listados más o menos numerosos. Para dicha selección se han seguido los siguientes criterios: 1) número de estudios, 2) valoración científica. Hay que puntualizar que las listas de especies agrupadas por usos son tentativas, pues no se trata de un trabajo exhaustivo. Si se dispusiera de mayor volumen de información, quizás aparecería alguna

otra especie como más interesante para los fines del proyecto. Sin embargo, atendiendo a la experiencia y a los conocimientos que se disponen sobre este tema, parece adecuado haber tenido en cuenta para las especies seleccionadas el número de veces que aparecen citadas en la bibliografía.

Tabla 1. Especies más frecuentemente utilizadas como insecticidas (insecticidas propiamente dichos, larvicidas, repelentes de insectos, plaguicidas). Tipo de información: 1. Etnológica; 2. Generalista; 3. Histórica; 4. Científicamente testado

Especie	Tipo de información	N.º de veces citadas
<i>Agave americana</i>	1-2	5
<i>Allium cepa</i>	1-2	9
<i>Allium sativum</i>	1-2	17
<i>Annona muricata</i>	1-2-3	4
<i>Annona squamosa</i>	1-2-3	4
<i>Artemisia absinthium</i>	1-2-3	9
<i>Artemisia barrelieri</i>	1	4
<i>Asparagus acutifolius</i>	1-2	5
<i>Azadirachta indica</i>	2	10
<i>Cistus ladanifer</i>	1-2	5
<i>Daphne gnidium</i>	1-2	17
<i>Datura stramonium</i>	1-2	4
<i>Derris sp.</i>	2-3	4
<i>Dictamnus hispanicus</i>	1-2	6
<i>Dittrichia viscosa</i>	1	7
<i>Eryngium campestre</i>	1	4
<i>Hura crepitans</i>	1-2-4	4
<i>Juglans regia</i>	1-2	17
<i>Juniperus oxycedrus</i>	1	5
<i>Juniperus phoenicea</i>	1	4
<i>Juniperus thurifera</i>	1	7
<i>Laurus nobilis</i>	1-2-3	16
<i>Lavandula angustifolia</i>	1-2-4	3
<i>Lavandula latifolia</i>	1-2	12
<i>Mammea americana</i>	2-4	4
<i>Marrubium vulgare</i>	1-2	9
<i>Matricaria chamomilla</i>	1-2	3
<i>Melia azedarach</i>	1-2	10
<i>Mentha piperita</i>	1-2	8
<i>Mentha pulegium</i>	1-2	20
<i>Mentha suaveolens</i>	1	16
<i>Mintbostachys mollis</i>	1-2-4	3
<i>Nerium oleander</i>	1-2	12
<i>Nicotiana rustica</i>	1-2	6
<i>Nicotiana tabacum</i>	1-2	18
<i>Ocimum basilicum</i>	1-2	20
<i>Ocimum minimum</i>	1-2	10
<i>Origanum vulgare</i>	1-2-3	5
<i>Pistacia terebinthus</i>	1-2	4
<i>Plumbago europaea</i>	1	9
<i>Pteridium aquilinum</i>	1-2	6
<i>Quasia amara</i>	1-2	4
<i>Retama sphaerocarpa</i>	1	6
<i>Rosmarinus officinalis</i>	1-2-3	18
<i>Ruta angustifolia</i>	1-2	7
<i>Ruta graveolens</i>	1-2-3	6
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	1-2-3	3
<i>Schinus molle</i>	1-2	4
<i>Schoenocaulum officinale</i>	1-2-3	5
<i>Silene muscipula</i>	1-2	6
<i>Solanum mammosum</i>	1-2-4	6
<i>Tanacetum cinerariifolium</i>	1-2	11
<i>Tanacetum vulgare</i>	1-2	6
<i>Thymus mastichina</i>	1-2	14
<i>Urginea maritima</i>	1-2	10
<i>Urtica dioica</i>	1-2	10

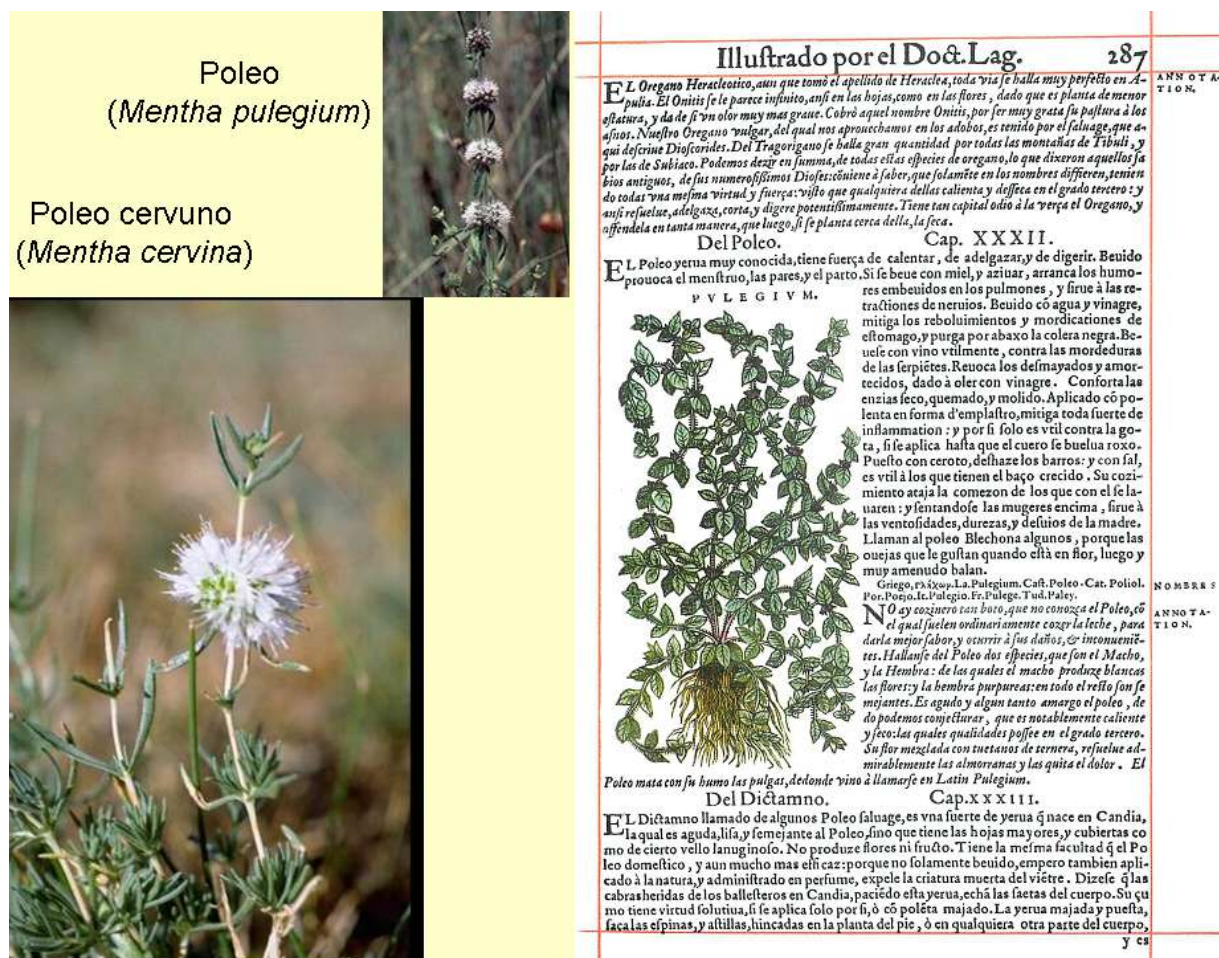


Figura 7. El poleo (*Mentha pulegium*) se ha utilizado desde antiguo como repelente de insectos. A la derecha, reproducción del capítulo referente al poleo del Dioscórides traducido por el doctor Laguna (1991 [1555]). Fotografías: Ramón Morales.



Figura 8. El ajo común (*Allium sativum*) puede resultar un buen fungicida, además de insecticida. Fotografía: Ramón Morales.

Conclusiones

A la vista de las especies de la lista anterior, y teniendo en cuenta la base de datos, después de una valoración según la experiencia acumulada, se concluye lo siguiente.

Tabla 2. Especies insecticidas más interesantes

Nombre científico	Nombre común
<i>Allium cepa</i>	cebolla
<i>Allium sativum</i>	ajo
<i>Artemisia absinthium</i>	ajenjo
<i>Azadirachta indica</i>	neem
<i>Daphne gnidium</i>	torvisco
<i>Juglans regia</i>	nogal
<i>Laurus nobilis</i>	laurel
<i>Lavandula latifolia</i>	espliego
<i>Marrubium vulgare</i>	marrubio
<i>Melia azedarach</i>	cinamomo
<i>Mentha pulegium</i>	poleo
<i>Mentha suaveolens</i>	mentastro
<i>Nerium oleander</i>	adelfa
<i>Nicotiana tabacum</i>	tabaco
<i>Ocimum basilicum</i>	albahaca
<i>Ocimum minimum</i>	albahaca
<i>Plumbago europaea</i>	belesa
<i>Rosmarinus officinalis</i>	romero
<i>Tanacetum cinerariifolium</i>	pelitre
<i>Thymus mastichina</i>	mejorana silvestre
<i>Urginea maritima</i>	cebolla albarrana
<i>Urtica dioica</i>	ortiga

Tabla 3. Especies fungicidas más interesantes

Nombre científico	Nombre común
<i>Achillea millefolium</i>	milennrama
<i>Beta vulgaris</i>	acelga
<i>Chamaemelum nobile</i>	manzanilla amarga
<i>Cinnamomum cassia</i>	canela
<i>Cupressus sempervirens</i>	ciprés
<i>Equisetum arvense</i>	cola de caballo
<i>Eucalyptus globulus</i>	eucalipto
<i>Lavandula angustifolia</i>	espliego
<i>Lonchocarpus sp.</i>	barbasco
<i>Salvia verbenaca</i>	gallocresta
<i>Thymus zygis</i>	tomillo salsero

Tabla 4. Especies microbicidas más interesantes ¹

Nombre científico	Nombre común
<i>Althaea officinalis</i>	malvavisco
<i>Apium graveolens</i>	apio
<i>Chelidonium majus</i>	hierba de la golondrina
<i>Citrus limon</i>	limón
<i>Foeniculum vulgare</i>	hinojo
<i>Hypericum perforatum</i>	hierba de San Juan
<i>Lycopersicon esculentum</i>	tomate
<i>Malva sylvestris</i>	malva
<i>Olea europaea</i>	olivo
<i>Ruta chalepensis</i>	ruda
<i>Sambucus nigra</i>	sauco
<i>Salvia lavandulifolia</i>	salvia española
<i>Salvia officinalis</i>	salvia
<i>Thymbra capitata</i>	tomillo andaluz
<i>Vitis vinifera</i>	vid
<i>Zea mays</i>	maíz

Tabla 5. Especies que reúnen todas las categorías de uso, a tener en cuenta para los ensayos de la segunda fase del proyecto

Nombre científico	Nombre común
<i>Allium cepa</i>	cebolla
<i>Allium sativum</i>	ajo
<i>Juniperus oxycedrus</i>	enebro de la miera
<i>Lavandula angustifolia</i>	espliego
<i>Minthostachys mollis</i>	muña-muña
<i>Origanum vulgare</i>	orégano
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	santolina
<i>Spigelia anthelmia</i>	lombricera
<i>Urginea maritima</i>	cebolla albarrana
<i>Urtica dioica</i>	ortiga

Dentro de las anteriores especies señaladas, destacan por ser bien conocidas y además de fácil obtención, las ibéricas: cebolla, ajo, enebro de la miera, orégano, santolina, cebolla albarrana y ortiga. De las especies americanas, destacamos, *Minthostachys mollis* (Labiatae) y *Spigelia anthelmia* (Loganiaceae), ambas de uso muy común en América. Para experimentos y como igual puede llegar a demostrarse, especies de los géneros *Mentha* o *Micromeria* podrían sustituir a *Minthostachys mollis*. Además hay que considerar la especie arbórea de amplio uso, *Azadirachta indica* o *neem*, de procedencia asiática, cultivada en todo el trópico, y cuyos extractos pueden ser

¹ Dado el gran número registrado en la base de datos, se citan aquí las más importantes; otras están en las tablas anteriores.



Figura 9. Salvia española (*Salvia lavandulifolia*), especie muy abundante en la mitad este de España, que además se cultiva muy bien. Tiene principios muy activos contra microbios. Fotografía: Ramón Morales.



Figura 10. Orégano (*Origanum vulgare*), planta con múltiples usos, debido a su aceite esencial que contiene compuestos con un amplio espectro bactericida. Fotografía Javier Tardío.

de suma utilidad. También hay que reseñar que, según los ensayos en curso, puede ser promotor el uso de *Artemisia absinthium* como especie insecticida e inhibidora de microorganismos.

No ha de perderse de vista que este informe está fundamentado en la base de datos disponible, y es sostenido por ésta. En cualquier caso de duda se debe consultar dicha base de datos.

Por fin, y como conclusión, se recomienda continuar el proyecto realizando estudios experimentales de las siguientes tres especies: *Minthostachys mollis* (muña-muña) como insecticida, *Equisetum arvense* (cola de caballo) como fungicida y *Origanum vulgare* (orégano) como microbicida.

Bibliografía

FONT QUER, P. (1962): *Plantas medicinales. El Dioscórides renovado*. Barcelona: Editorial Labor.

LAGUNA, A. (1991 [1555]): *Pedacio Dioscorides Anazarbeo, Acerca de la materia medicinal y de los venenos mortíferos*. Madrid: traducido del griego e ilustrado por el doctor Andrés de Laguna, edición facsímil de la Consejería de Agricultura y Cooperación de la Comunidad de Madrid.

MULET, L. (1991): *Estudio etnobotánico de la provincia de Castellón*. Diputación de Castellón.

VILLAR, L.; PALACÍN, J. M.; CALVO, C.; GÓMEZ, D., y MONTSERRAT, G. (1987): *Plantas medicinales del Pirineo Aragonés y demás tierras oscenses*. Huesca: Diputación de Huesca y CSIC.

Anexo. Especies científicamente testadas

Acalypha adenostachya
Allium sativum
Ambrosia ambrosioides
Ambrosia confertiflora
Baccharis glutinosa
Brassica juncea
Caesalpinia sepiaria
Capsicum frutescens
Carica papaya
Cedrela fissilis
Centaurea cyanus
Chrysanthemum coronarium
Chrysanthemum macrophyllum
Cymbopogon citratus
Datura discolor
Enterolobium cyclocarpum
Eucalyptus citriodora
Eucalyptus globulus
Hevea nitida
Hura crepitans
Jatropha cinerea
Karwinskia humboldtiana
Lantana camara
Larrea tridentata

Lavandula angustifolia
Luffa cylindrica
Mammea americana
Mangifera indica
Melia azedarach
Mintbostachys mollis
Nicotiana glauca
Petiveria alliacea
Phthirusa sp.
Pinus caribaea
Piper auritum
Plantago australis
Plumeria alba
Proboscidea parviflora
Psidium guineense
Ranunculus praemorsus
Ricinus communis
Salpianthus macrodontus
Sarcostemma cynanchoides
Solanum mammosum
Solanum nigrum
Solanum rostratum
Trichilia pallida
Trixis angustifolia
Verbascum thapsus

La reflectografía infrarroja y la historia del arte

Ana González Mozo

Museo Nacional del Prado

ana.gonzalez@museodelprado.es

Resumen: Desde que Van Asperen de Boer, en los años setenta del pasado siglo, pusiera a punto la reflectografía infrarroja para el estudio del dibujo subyacente, esta técnica se ha incorporado a los protocolos de análisis de las obras de arte. En los últimos veinte años los equipos de detección se han perfeccionado, facilitando la captura y el ensamblaje de los reflectogramas. Ahora obtenemos imágenes de alta definición que permiten interpretar con mayor precisión los procesos creativos. Impulsados por estos avances, en el Museo del Prado se han revisado los antiguos exámenes efectuados en pintores como Rafael y, junto a instituciones internacionales, hemos abordado el análisis de la técnica de artistas poco estudiados, como Jacopo Tintoretto y Leonardo da Vinci. Sin embargo, no podemos olvidar que la tecnología no es un fin en sí misma y que la interpretación de los procesos creativos depende tanto del factor humano como del estudio de la superficie pictórica y su interpretación en el contexto de la historia del arte.

Palabras clave: Reflectografía infrarroja, dibujo subyacente, análisis, pintura.

Abstract: Since Van Asperen de Boer, in the 70s of last century developed the infrared reflectography to study the underdrawing in painting, this technique has been incorporated into the analysis protocols of the artworks. In the last 20 years the systems of detection have been improved, facilitating both capture and assembly of reflectograms. Now we get high definition images that allow a more accurate interpretation of the creative processes. Prompted by the developments, at the Museo del Prado has been revised ancient examinations made in painters like Raphael and, together with international institutions, we have addressed the technical analysis of understudied artists as Jacopo Tintoretto and Leonardo da Vinci. However, we cannot forget that explaining creative processes depends on both the human factor as the study of the pictorial surface and its interpretation in the context of art history.

Keywords: Infrared reflectography, underdrawing, analysis, painting.

Hasta principios del pasado siglo, el historiador del arte se enfrentaba al estudio de la pintura con su ojo, una lupa de aumento y, en ocasiones, buenas reproducciones de las obras en blanco y negro. En los primeros años del siglo xx, la investigación en historia del arte comenzó a enriquecerse con las nuevas lecturas que permitían hacer de las obras incipientes exámenes llevados a cabo con fuentes de radiación más energéticas que la visible –rayos X, rayos infrarrojos y ultravioletas– que revelaban aquello que no podía captar la visión humana. Fueron experiencias

muy concretas que quedaron frenadas por las dos Guerras Mundiales¹ (Bart, 1896), hasta que en los años setenta, en el ámbito de los museos, e impulsados por los ensayos de Van Asperen de Boer con cámaras médicas, cobraron un nuevo interés (Van Asperen de Boer, 1970).

La reflectografía infrarroja se ha limitado tradicionalmente al estudio del dibujo subyacente², pero también aporta datos de las capas internas de la pintura y las intervenciones de restauración. Es una técnica relativamente sencilla: la superficie pictórica se ilumina con una fuente rica en infrarrojo (lámparas de tungsteno por ejemplo)³, los materiales absorben y reflejan esta radiación con distinta intensidad, según su composición y espesor⁴, y esta emisión se registra con diferentes dispositivos: en el pasado cámaras Vidicon y, actualmente, sistemas digitales. Los diferentes grados de absorción y transparencia de los materiales se traducen en la imagen reflectográfica como zonas que van desde el negro al blanco pasando por diversos tonos de gris. Para una fuente emisora dada la respuesta de los materiales siempre es la misma, aunque los datos obtenidos varían dependiendo de la longitud de onda de la banda infrarroja del espectro que sean capaces de captar los sistemas utilizados⁵. El método de interpretación –en términos de física óptica– de la reflectografía infrarroja se basa en la teoría de Kubelka-Munk, que describe las características ópticas de las capas pictóricas y relaciona la capacidad que tiene cada estrato para reflejar la radiación con relación al fondo sobre el que está aplicado, determinando su poder cubriente⁶: según el espesor de la capa, las características del fondo y la longitud de onda empleada⁷. En la práctica, la buena legibilidad de los estratos subyacentes y del dibujo preparatorio en un reflectograma depende de la transparencia de las capas superpuestas a éstos, pero también del contraste existente entre el dibujo y el fondo, por lo que la situación ideal para obtener una buena imagen es aquella en la que el fondo es totalmente reflectante y el material utilizado para hacer el dibujo absorbe el infrarrojo, como sucede, por ejemplo, en obras en las que el diseño preparatorio está realizado con carboncillo o piedra negra sobre un fondo blanco de yeso o blanco de plomo.

¹ Las primeras radiografías en pintura se hicieron en la última década del siglo XIX.

² Dibujo preparatorio que los artistas realizan antes de empezar a pintar, y cuya detección sólo es posible si los materiales con los que está ejecutado llevan negro o cobre en su composición.

³ Como fuente de iluminación se utilizan lámparas incandescentes de tungsteno de 24 voltios con filtro difusor, que tienen una alta emisión de radiación infrarroja. Uno de los factores determinantes en la homogeneidad de la intensidad general de cada reflectograma y de estos con los demás del conjunto, es la estabilidad de la fuente.

⁴ En la respuesta de los materiales no parece ser determinante ni el envejecimiento ni, excepto algún pigmento como el verde esmeralda, la sustancia con la que están aglutinados (si bien la transparencia es mayor para los aglutinantes acuosos como la goma arábica o semi-acuosos, como la yema de huevo). Respecto a los pigmentos, por ejemplo, los constituidos por plomo, como el blanco de plomo, el minio o el amarillo de Nápoles, o los compuestos de mercurio (como el bermellón), cinabrio, cadmio, zinc, silicatos y esmaltes, son generalmente –dependiendo del espesor de la capa– transparentes al infrarrojo, mientras que los negros, o los compuestos por cobre, como la azurita y la malaquita, presentan una mayor opacidad, apareciendo grises en la imagen.

⁵ Los estudios efectuados y la bibliografía consultada concluyen que las radiaciones IR cuya longitud de onda está comprendida entre los 1.800-2.000 nm son las adecuadas para este tipo de exámenes, ya que la mayor parte de los estratos pictóricos utilizados en la pintura antigua se hacen transparentes ante ellas. Actualmente se ha desarrollado un nuevo prototipo que registra el infrarrojo comprendido en el intervalo de lo 0,8 a los 2,5 micrones. La sensibilidad de los fotodiodos, en el caso del sistema CCD que utilizamos en el Museo del Prado está limitada a los niveles que llegan a los 1,7 micrones. La sensibilidad de las telecámaras Vidicon llega hasta los 2,1 micrones, lo que permite trabajar en regiones del infrarrojo donde un mayor número de pigmentos se hacen transparentes. Sin embargo, la calidad de las imágenes registradas es menor, debido a que pierden contraste y resolución en el monitor de televisión y a que en éste se producen distorsiones ópticas y geométricas, planteándose además problemas de persistencia de la imagen. La menor sensibilidad a ciertas regiones del infrarrojo de los CCD se compensa con una serie de ventajas: no introducen distorsiones geométricas (son planos), y la resolución espacial es mucho mayor, por lo que las imágenes obtenidas son más nítidas y homogéneas, mejorándose el resultado en el ensamblaje de los fotogramas.

⁶ En un estrato pictórico, constituido por la mezcla de pigmentos y aglutinante, existe un índice de refracción para cada uno de los dos componentes; la relación entre los dos índices define el poder cubriente de una pintura.

⁷ Al aumentar la longitud de onda de la luz incidente disminuye la difusión de la luz y con ella el poder cubriente de los materiales.

En los años noventa del pasado siglo, los esfuerzos en el campo de la reflectografía se dirigieron a desarrollar instrumentos de alta definición, que registrasen con nitidez desde los pequeños detalles hasta la amplia gama de tonos de grises presentes en la materia y en los diseños subyacentes⁸. En los últimos años el objetivo ha sido fabricar equipos más compactos, rápidos y manejables. La reducción del tiempo en las capturas y la portabilidad han supuesto una pérdida de definición en las imágenes obtenidas, que se compensa –a diferencia de lo que ocurría con las imágenes generadas por los primeros equipos CCD– con la menor necesidad de procesarlas para corregir defectos como ruido, uniones muy perceptibles entre los reflectogramas o el efecto de una iluminación poco uniforme, a lo que se añade la posibilidad de ver los resultados en tiempo real y de repetir las capturas inmediatamente si no son adecuadas.

Los estudios con reflectografía infrarroja se han centrado, quizás por influencia de los métodos científico-analíticos, en la descripción de los distintos tipos, técnicas y materiales utilizados en el dibujo subyacente⁹. Estos «inventarios» han sido un importante punto de partida, pero el sistema de trabajo con el que se han desarrollado –distinción exhaustiva de los elementos del dibujo para después revisar ordenadamente cada uno de ellos por separado– ha provocado cierto distanciamiento con las disciplinas artísticas a las que se pretendía complementar. En los últimos años, las posturas se han acercado y, en pintura italiana, se ha establecido un método de análisis de las obras consensuado con los conservadores del museo: el conocimiento de la pintura se está perfeccionando con la ayuda de instrumentos físicos, no sólo porque permiten acceder a las partes ocultas de la génesis de los cuadros, sino también, y lo que es más interesante, por el reto que supone interpretar la información que aportan en el contexto de la historia del arte. Los nuevos datos y las imágenes técnicas están cambiando la manera de entender los procesos creativos y, sobre todo, el concepto de dibujo preparatorio y, es a través del examen de los diseños y estratos subyacentes como se están obteniendo, en el Museo del Prado, datos muy valiosos sobre los pintores italianos del Renacimiento, el funcionamiento y la organización de sus talleres. La definición alcanzada en los documentos técnicos, junto a buenas imágenes de superficie y a la radiografía, ha hecho posible profundizar en artistas tan complejos y distintos como Andrea del Sarto, Tiziano, Rafael o Tintoretto y descubrir el gran valor para la historia del arte que tienen obras como la *Gioconda* del Museo del Prado. Ahora sabemos que los procedimientos de trabajo en estos talleres no eran ni lineales ni sencillos, que los artistas –salvo excepciones– no trabajaban solos y estas *botteghe* no estaban aisladas, que las influencias de unas en otras fueron mayores de lo que se pensaba.

El estudio del dibujo subyacente –que el autor nunca pensó que fuera descubierto– desvela su manera más personal de preparar las composiciones: desde trabajos rigurosos y concienzudos, a otros llenos de dudas (incluso partiendo de diseños muy exactos), espontáneos, delegados o hechos con falta de tiempo o incluso a veces comenzados y abandonados para ser retomados después. Los trazados internos muestran el estilo gráfico de los pintores en el soporte y las primeras etapas de la gestación de los cuadros, su relación con esbozos y modelos en papel y revelan si se han producido transformaciones formales entre estos pasos. Podría ocupar páginas registrando todas las variables que hemos encontrado estos últimos años estudiando pintura italiana, pero no es suficiente describirlas, nuestro objetivo es dar sentido a esta información, explicar qué representa en el conjunto de la ejecución de una obra y qué relación tiene con la imagen pintada. Lo habitual es que los trazados preparatorios estuvieran condicionados por las dimensiones, el tiempo disponible para entregar la obra, el tipo de soporte y la materia a los que debían enfrentarse los pintores, aunque en estudios más amplios –de producciones

⁸ En muchas ocasiones no se trata sólo de trazados lineales, sino también de planteamientos iniciales de las sombras en las primeras etapas de la ejecución.

⁹ Método o procedimiento que ha caracterizado a la ciencia natural desde el siglo XVII que consiste en la observación sistemática, medición y experimentación, y la formulación, análisis y modificación de las hipótesis.



Figura 1. *La Virgen con el Niño, entre san Mateo y un ángel (Madonna della Scala)* de Andrea del Sarto, 1522. Fotografía: Museo Nacional del Prado.

completas de un artista— se puede llegar a saber si experimentó una evolución técnica, o la influencia de otros maestros, o si confiaba a sus ayudantes la tarea de trasladar las escenas a partir de un cartón original que, con frecuencia, él corregía después. Intercaladas en el contexto histórico y analizadas a la luz de las fuentes documentales, estas imágenes ayudan a corroborar o refutar lo que se sabía hasta el momento acerca de cómo afrontaban los artistas los encargos, incluso cómo fueron las relaciones entre el maestro y el taller, el grado de implicación que cada



Figura 2. *La Virgen con el Niño, entre san Mateo y un ángel (Madonna della Scala)*, de Andrea del Sarto, 1522. Detalle de la reflectografía infrarroja. Imagen: Museo Nacional del Prado.

pintor dejó que tuvieran sus colaboradores y la manera en que éstos asimilaron o no sus procedimientos. En el caso de Tintoretto, por ejemplo, vemos cómo en las obras de gran formato la *bottega* reproducía sus métodos de dibujo sobre el lienzo (Syre, 2000) mientras que, tras la muerte de Rafael, su taller no fue capaz de repetir la gran labor de preparación de las composiciones que acostumbraba a hacer Sanzio.

Uno de los temas abordados a través del análisis del dibujo subyacente es el de los métodos de réplica, de copia y de reutilización de modelos en las obras y de cómo los pintores consiguieron o no enmascararlos. En el Museo del Prado esta investigación se inició con algunos cuadros de Tiziano (Falomir, 2003) y ha continuado con obras como la *Gioconda* o *La Madonna della Scala* de Andrea del Sarto. El estudio de la pala de Sarto también ayudó a poner orden en la cronología de algunos cuadros del pintor y a sostener la hipótesis planteada por John Shearman sobre el empleo de los mismos dibujos en varias tablas y la concepción simultánea –al menos en idea– de ciertas palas de altar (Shearman, 1965; Natali, 1999). Las reflectografías revelaron que Sarto reutilizó para distintos cuadros los cartones de las mismas figuras y la presencia de elementos de algunas composiciones en las capas subyacentes de otras, como si estuviera ensayando las mejores soluciones en obras que había comenzado al mismo tiempo, algo muy evidente en *La Madonna della Scala* y la *Assunta Panciatichi* (Galleria Palatina, Firenze) (González Mozo, 2006: 158-173). El estudio mostró procesos de ideación y ejecución complejos y llenos de dudas bajo pinturas cuya construcción en superficie es perfecta –invalidando así la definición de Vasari de Andrea del Sarto como el pintor «senza errore»– y permitió establecer paralelismos más exactos entre los dibujos autógrafos en papel conservados para la obra del Prado y las etapas intermedias de la ejecución pictórica (figs. 1 y 2). Esto significaba que

algunos dibujos¹⁰ no estaban hechos para la primera composición, sino que fueron realizados para resolver los problemas que se le plantearon a Sarto a medida que trabajaba y, en *la Virgen de la Scala*, le obligaron a redibujar varias veces las figuras sobre una primera escena que ya había comenzado a pintar, a pesar de que inicialmente fue trasladada dos veces con calco. El estudio de ésta –y otras obras– confirma que las grandes correcciones en una composición no significan siempre que los pintores la improvisaran sobre el lienzo y que no hicieran un análisis previo y simultáneo sobre papel. Y, por otra parte, demuestra que el traslado del dibujo con métodos mecánicos desde un cartón al soporte pictórico no es incompatible con un posterior proceso de dibujo y corrección a mano alzada. Que los artistas siguieran dibujando sobre la pintura, en diferentes momentos y con materiales diversos se ha constatado estos últimos años no sólo en pintores de tradición florentina, como Andrea del Sarto y Rafael, sino también en venecianos como Tiziano y Tintoretto o flamencos, como Rogier van der Weyden. Estos trazados han dejado de pertenecer sólo al ámbito de las primeras etapas del planteamiento de las composiciones en el soporte y obligan, por tanto, a buscar su rastro también entre las capas de pintura. En muchos casos se puede desechar la tradicional visión del pintor dibujando en papel, trasladando su escena a la preparación blanca y pintando sobre ella y, en otros tantos, descartar la idea de los trabajos ejecutados «alla prima», como sucede en las obras de Jacopo Tintoretto. En 2007, el examen reflectográfico de los cuadros del artista veneciano conservados en el Museo del Prado¹¹ reveló datos muy significativos de la técnica de un pintor que, de modo muy puntual hasta ese momento, sólo se había explicado a través de la radiografía. Se obtuvo una visión nueva y bastante sorprendente de cómo actuaba Robusti desde que concebía hasta que finalizaba sus obras, al tiempo que se confirmó lo que describiera su biógrafo Carlo Ridolfi (Ridolfi, 1642) sobre su método de trabajo mediante el ensayo de las escenas en teatrinos poblados con pequeños modelos de cera o arcilla y maniqués articulados, percibiéndose además la importancia que Tintoretto daba al diseño y de cómo su especial manera de construir la pintura condiciona la captación de sus cuadros (González Mozo, 2007). Los nuevos estudios obligaron a cambiar las ideas establecidas sobre sus procedimientos de diseño: no sólo se encontró dibujo en todas las figuras, comprobándose que están desnudas bajo la superficie –con las anatomías perfectamente caracterizadas–, sino que también en las radiografías se hallaron representados maniqués que «sustentan» los cuerpos pintados y en las reflectografías, cuadrículas que sirven de guía para ubicar algunos personajes (figs. 3 y 4). A pesar de que en muchos de sus grandes cuadros el ejercicio de dibujo es enérgico y da la impresión de estar hecho de un modo caótico y espontáneo, en obras como el *Lavatorio*, los reflectogramas manifiestan que realizó detallados análisis de perspectiva en varios momentos de la ejecución (fig. 5) y para ello tomó como referencia los tratados sobre geometría y las teorías escenográficas de la época, hasta el punto que están reproducidos, bajo las capas de pintura, alguno de los principios geométricos desarrollados por Sebastiano Serlio. Las radiografías y las reflectografías infrarrojas revelaron que el dibujo subyacente –en todos sus cuadros– no sólo está realizado sobre las capas de preparación o imprimación, sino que Jacopo seguía trazando, analizando y reflexionando concienzudamente la colocación de las formas y su interrelación con el espacio y con los elementos circundantes a medida que pintaba, dejando en muchos casos que este dibujo formase parte de la superficie (Tardito, 1990)¹². Su gran dominio del dibujo y su extraordinaria visión en el espacio le permitieron trabajar muy deprisa y esta rapidez se ve reflejada desde las capas más internas. Una facilidad semejante y un constante ejerci-

¹⁰ La mayor parte se conserva en el gabinete de dibujos de los Uffizi.

¹¹ El estudio se realizó con motivo de la Exposición «Tintoretto» que se celebró en 2007 en el Museo del Prado.

¹² En algunos cuadros estudiados, generalmente existe un diseño, visible en la radiografía y confirmado por las estratigrafías, hecho con albayalde sobre el fondo oscuro, pero en pinturas como el *Hallazgo del cuerpo de San Marcos* se ha detectado la presencia de algún tipo de pigmento negro utilizado para dibujar en fases intermedias, pigmento que a veces aparece cubierto y muy mezclado con laca roja, como en el caso del *Moisés sacado de las aguas del Nilo*, del Museo del Prado. En la obra *El hallazgo del cuerpo de San Marcos* (Milán, Pinacoteca de Brera), se ha encontrado dibujo subyacente, en capas intermedias, realizado con laca roja (Tardito, 1990).



Figura 3. Jacopo Tintoretto. *Ester ante Asuero*, hacia 1555. Detalle de la radiografía. Imagen: Museo Nacional del Prado.



Figura 4. Jacopo Tintoretto. *Ester ante Asuero*, hacia 1555. Detalle de la reflectografía infrarroja. Imagen: Museo Nacional del Prado.



Figura 5. Jacopo Tintoretto, *El Lavatorio*, hacia 1547-1548. Detalle de la reflectografía infrarroja. Imagen: Museo Nacional del Prado.

cio de dibujo favorecieron también, en un artista tan diferente como Rafael, la celeridad al pintar, pero así como el florentino hacía estos estudios inicialmente sobre papel y sólo traspasaba las composiciones cuando las tenía completamente precisadas (salvo raras excepciones como la *Perla*) y apenas las corregía en el lienzo, da la impresión de que Tintoretto hacía estos cambios moviendo las figuras de los mencionados teatrillos y los trasladaba al lienzo en «tiempo real».

En otro orden de cosas, el estudio paralelo de la *Gioconda* del Prado y la *Santa Ana* y sus copias (Delieuvin, 2012), en colaboración con el Museo del Louvre, ha brindado la oportunidad de tener un conocimiento más preciso del taller de Leonardo, y saber que en él se realizaron copias y versiones simultáneas de las escasas obras del maestro, ayudando, por otra parte, a entender procesos pictóricos largos y lentos. Ambas investigaciones, junto a la documentación de la época¹³ y los análisis técnicos realizados en otras instituciones en gran parte de la producción de da Vinci y sus colaboradores, han permitido ahondar en los procedimientos de trabajo de esta *bottega* y que se replanteen las cronologías de algunos cuadros. La *Gioconda* del Museo del Prado, que ha colgado en sus muros desde su fundación en 1819, estuvo atribuida hasta su revisión en 1999 a pintores españoles y flamencos¹⁴, por lo que nunca había sido estudiada en el contexto de los talleres italianos. Tras la restauración y el estudio técnico preliminar realizado entre 2010 y 2011 se recuperó su imagen original (figs. 6 y 7), se atribuyó al taller de Leonardo y se convirtió en la versión más importante del cuadro conocida hasta el momento, así como en uno de los testimonios más interesantes de los métodos de trabajo en el taller vinciano. A partir de las primeras imágenes del infrarrojo y su análisis cruzado con la reflectografía del original, se concluyó que no era una copia tradicional y la caracterización de los materiales la situó en el entorno milanés de Leonardo¹⁵. En las semanas previas a la restauración, en un estudio hecho con luz rasante, se detectó la existencia de un paisaje bajo el fondo oscuro¹⁶ que tras un exhaustivo análisis y la constatación de que era un repinte añadido en el siglo XVIII, decidió eliminarse. Más allá del estudio material, el interés de esta obra reside en que, desde el dibujo preparatorio y hasta un momento muy concreto de la ejecución, transcribe el proceso creativo de la *Gioconda* original, sin pretender, curiosamente, hacerse pasar por ella. Las copias que se conocen hasta el momento, intentan imitar la superficie del cuadro, sin embargo, en la *Gioconda* del Prado se reproducen las etapas «invisibles» del original, mientras que

¹³ Tras visitar el estudio del maestro, Fray Pietro de Novellara explicaba a Isabella d'Este «() dos de sus aprendices hacen copias y él mismo interviene, de vez en cuando, en una de ellas. Y es que se encuentra muy atareado con sus trabajos de geometría y casi no tiene tiempo para el pincel».

¹⁴ Se desconoce su procedencia. La primera noticia que se tiene en España de esta obra se remonta a 1636, donde aparece en los *Inventarios Reales*, situada en la Galería del Mediodía del Alcázar de Madrid. Durante décadas sus atribuciones oscilaron entre pintores españoles, como Yáñez de la Almedina y anónimos flamencos, al creerse –hasta la revisión de la tabla en 1999– que la madera del soporte era roble.

¹⁵ El soporte es de nogal y carece de la tradicional preparación de yeso y cola. En su lugar hay una doble preparación de tono claro compuesta por blanco de plomo y una pequeña cantidad de carbonato cálcico, común también en las obras que Leonardo y sus discípulos hicieron sobre esta madera. Los análisis hechos a la *Dama del armiño* y, más recientemente, a *La Belle Ferronnière*, al *Salvator Mundi* de Leonardo y al *Retrato Archinto* de Marco d'Oggiono, confirman que este tipo de preparación, aunque inusual, era utilizada con cierta frecuencia en la bottega del maestro cuando se trabajaba sobre nogal, que es el soporte habitual en las obras de tamaño reducido de Leonardo y de su círculo tras su primera estancia en Milán (1481): *La Dama del Armiño*, *Belle Ferroniere*, *San Juan Bautista Salvator Mundi* y *San Juan Bautista como Baco*. Ver *National Gallery Technical Bulletin*, n.º 32, pp. 78-112. Leonardo utilizó habitualmente el chopo para obras de gran tamaño como la *Virgen de las Rocas* o la *Santa Ana* del Louvre. En parte porque del nogal no se pueden extraer paneles de gran tamaño y, en parte, porque en una obra de grandes dimensiones se encarecería mucho la comisión.

¹⁶ Que el paisaje estuviera oculto no es extraño. Son muchos los ejemplos de obras modificadas mediante la adición o supresión de elementos en algún momento de su historia como se ha constatado, por ejemplo, en la *Dama del armiño* del propio Leonardo o la *Madonna del Granduca*, de Rafael, ambas transformadas en el siglo XIX (Bull, 1992: 67-83). Según los datos aportados por el Laboratorio de Análisis del Museo del Prado, que el aglutinante del repinte sea aceite de lino poco envejecido sugiere una aplicación notablemente posterior a la ejecución del pintor, al menos 200-250 años. La sustancia orgánica, posiblemente un barniz, interpuesta entre el paisaje y el repinte, impidió que éste impregnase la pintura original, facilitando relativamente su eliminación. La existencia de esta capa orgánica y el buen estado de conservación de la pintura subyacente, permitieron concluir que la transformación obedeció a criterios estéticos.



Figura 6. Taller de Leonardo da Vinci. *La Gioconda o Mona Lisa*, hacia 1503-1516. Imagen de la obra antes de la restauración de 2011. Imagen: Museo Nacional del Prado.



Figura 7. Taller de Leonardo da Vinci. *La Gioconda o Mona Lisa*, hacia 1503-1516. Imagen de la obra después de la restauración de 2011. Imagen: Museo Nacional del Prado.



Figura 8. Leonardo da Vinci. *La Gioconda* o *Mona Lisa*, hacia 1503-1519. Reflectografía infrarroja. Imagen: Musée du Louvre. @ copyright C2RMF, Elsa LAMBERT.

la imagen pintada es muy diferente. El análisis comparado de las reflectografías reveló detalles subyacentes que ilustraron un interesante proceso de elaboración casi paralelo y cómo el pintor parecía imitar los pasos de Leonardo cuando éste trabajaba en el original, lo que situó su ejecución en el taller y en un momento muy cercano (figs. 8 y 9). Por otra parte, las notorias analogías que existen entre las dos imágenes reflectográficas y formalmente en la superficie, han permitido completar la sucesión de las etapas de construcción del original, puesto que lo que en Leonardo es reflejo de una detenida experimentación, en la copia es manifiesto¹⁷. Cada uno de los arrepentimientos ocultos bajo la superficie del original se repite bajo la superficie

¹⁷ Aunque en la reflectografía del original es difícil percibir el dibujo preparatorio, se distinguen las líneas esenciales de la composición, además de algunas etapas de elaboración intermedias que se repiten en la copia, cuyo dibujo subyacente es definido y complicado.

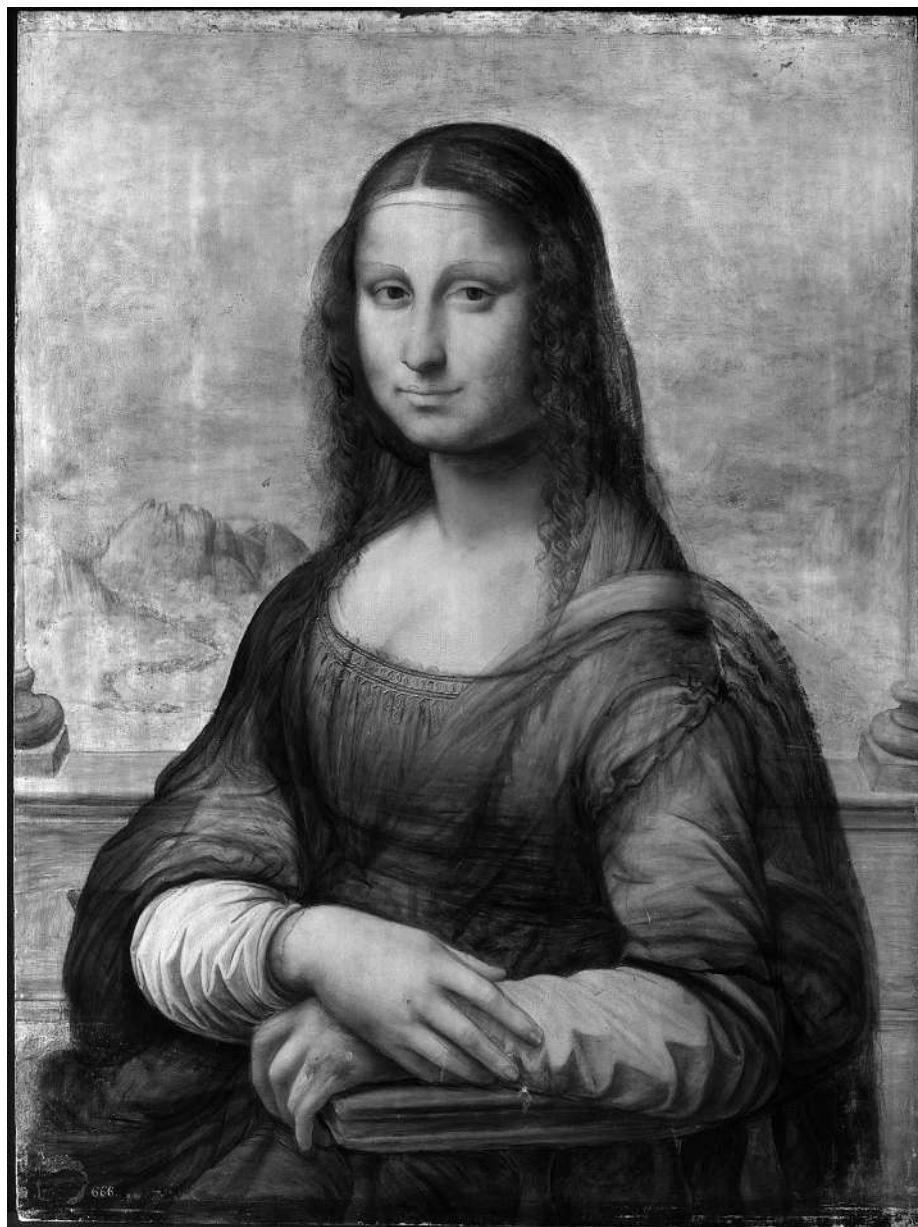


Figura 9. Taller de Leonardo da Vinci. *La Gioconda* o *Mona Lisa*, hacia 1503-1516. Reflectografía Infrarroja. Imagen: Museo Nacional del Prado.

de la obra del Prado, algunos muy llamativos, como el del contorno de ambas cabezas, que es exactamente igual (figs. 10 y 11). También el paisaje recobrado aporta datos muy importantes que han servido para cambiar la datación del cuadro del Louvre: sin ser exactamente igual al de la *Gioconda*, en él están representadas formaciones rocosas que el maestro dibujó sobre papel y que podrían estar presentes en capas inferiores del original. A la derecha de la figura están pintadas las montañas del dibujo *Los Alpes vistos desde Milán* (hacia 1508-1511) y los estratos del folio *Masa rocosa* (hacia 1508-1511) ambos autógrafos (Delieuvin, 2012: 155 y 160-161)¹⁸, lo que retrasa la ejecución, al menos del fondo, en casi cinco años respecto a lo que se pensaba hasta el reciente estudio. Su ligero grado de abocetamiento a la izquierda coincide con las etapas intermedias reveladas por la reflectografía del original, lo que ha permitido concluir que la tabla

¹⁸ Windsor, Royal Collection.

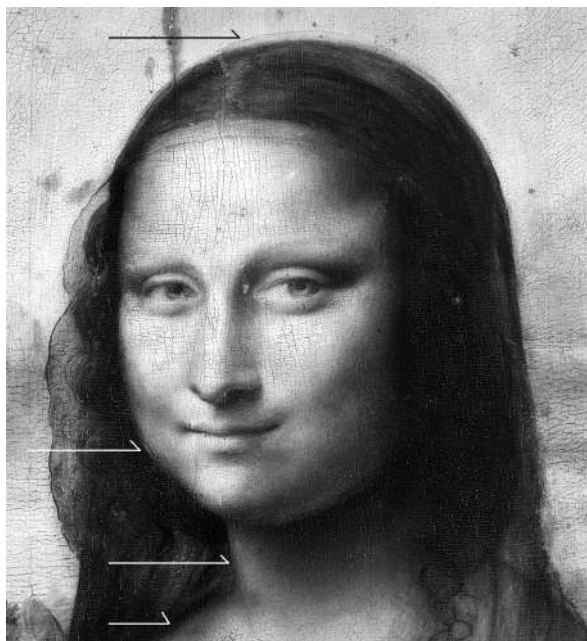


Figura 10. Leonardo da Vinci. *La Gioconda o Mona Lisa*, hacia 1503-1519. Reflectografía infrarroja. Detalle del contorno de la cabeza. Fotografía: Musée du Louvre. @copyright C2RMF, Elsa LAMBERT.

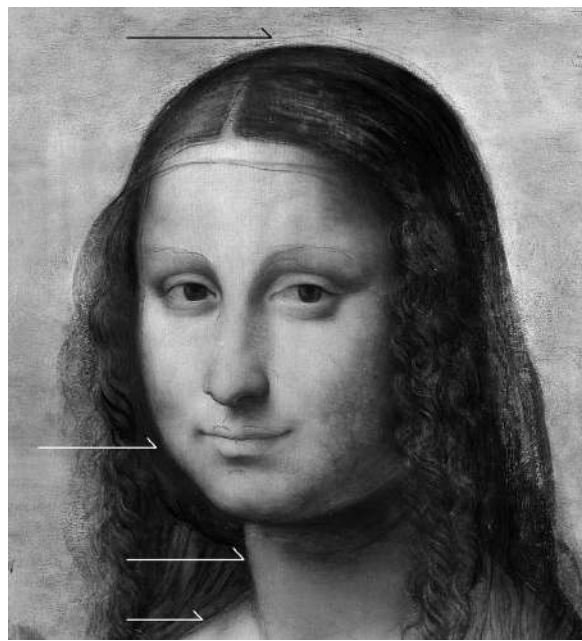


Figura 11. Taller de Leonardo da Vinci. *La Gioconda o Mona Lisa*, hacia 1503-1516. Reflectografía Infrarroja. Detalle del contorno de la cabeza. Imagen: Museo Nacional del Prado.

del Prado quedó inacabada en el taller antes de que se terminara la *Gioconda* y representa, por tanto, un momento previo a su finalización, a modo de registro de la imagen de la obra antes de la partida de Leonardo de Milán o de Roma. La revisión de los datos aparecidos tras la restauración y la última reflectografía¹⁹, junto con el estudio llevado a cabo en la *Santa Ana* del Louvre y su copias –que apoya la hipótesis sobre la *Mona Lisa* del Prado–, ha abierto otras vías de investigación e invita a hacer una nueva lectura de los testimonios de Fray Pietro Novellara, Agostino Vespucci y Antonio De Beatis (Delieuvin, 2012: 77-78; 117-121 y 198-199), escritos durante la vida de Leonardo tras visitarle en el taller. La lectura conjunta de estos textos sugiere que la ejecución de la *Mona Lisa* y la de *Santa Ana* se prolongó durante años y, al menos ésta última, fue interrumpida durante largos periodos de tiempo. Las copias se comenzarían cuando el maestro iniciaba sus obras, pero también, en el caso de la *Santa Ana*, la obra inacabada se copió en el taller durante las pausas de inactividad. En el curso de esta elaboración, las modificaciones introducidas por Leonardo en las tablas se reflejan en las versiones realizadas por sus ayudantes. Esto explica la similitud de la imagen pintada en los duplicados con momentos intermedios de la creación, ocultos bajo la superficie de las pinturas originales. En definitiva, el estudio de esta obra ha cambiado su clasificación en las colecciones del museo y ayuda a comprender a uno de los maestros sobre los que más se ha escrito durante siglos, cuya técnica pictórica, paradójicamente, era casi desconocida.

Es necesario, como conclusión, reflexionar sobre la importancia que supone tener acceso a las primeras ideas de los artistas y a su desarrollo en el proceso pictórico a través de los documentos técnicos, tanto como la necesidad de hacer una correcta lectura de estas imágenes, que son indisolubles de las superficies, de la historia material y documental de los cuadros. Historiadores, estudiosos de las técnicas pictóricas y restauradores tenemos formas diferentes de

¹⁹ Se han realizado cinco reflectografías de la obra, antes de la restauración, durante el proceso y una vez finalizada la intervención.

analizar, e incluso de ver la pintura, pero el propósito común de entenderla. Cada manera de aproximarse a los cuadros aporta diferente información, pero también deja algo inexplicado. La exégesis se encuentra en el conjunto de la historia del arte, en la de los pintores, en la evolución de las técnicas artísticas, en los métodos de trabajo y en las circunstancias que rodearon la ejecución de esas obras. Es cierto que el ojo humano experimentado no puede ser sustituido por los aparatos científicos: el objetivo es incorporar otro tipo de datos en el discurso de la interpretación de las obras, en la medida en que estos instrumentos revelan particulares que no tienen respuesta a la luz visible, aumentan nuestra percepción y permiten hacer interpretaciones más concretas, lo que no siempre significa que desvelen todos los secretos de la pintura; también generan dudas y, con frecuencia, más preguntas. La reflectografía infrarroja es un valioso medio de trabajo, pero no un fin en sí misma. Los resultados obtenidos dependen del correcto planteamiento de las hipótesis que se quieren demostrar, de los problemas preliminares que deben resolverse, así como de la adecuada captura, procesamiento e interpretación de la información obtenida, y, lo que no es menos importante, del conocimiento de los límites de la tecnología utilizada. Un exceso de tecnicismo, análisis milimétricos llevados al extremo, igual que un excesivo formalismo, pueden convertir los cuadros en auténticos puzzles, en compendios de formas comunes y materiales que, inevitablemente, están en multitud de obras y autores, distrayendo nuestra atención de la percepción global de la pintura y, en definitiva, de ver las obras.

Bibliografía

- BART, S. A. (ed.) (1896): *14 Photographien mit Röntgen-Strahlen von Prof W. König*, Leipzig.
- BOMFORD, David (ed.) (1999): *Art in the making. Underdrawings in Renaissance Paintings*. Londres National Gallery.
- BERTANI, Duilio et al. (2001): *Oltre il visibile. Indagini riflettografiche*. Milán: Università degli Studi di Milano.
- BULL, David (1992): «Two portraits by Leonardo: Ginevra de Benci and the Lady with an Ermine», en *Artibus et Historiae*, vol. 13, n.º 25.
- CARDINALI, M.; DE RUGGIERI, M. B. y FALCUCCHI, C. (2002): *Diagnostica artistica*. Roma : Palombi Editori.
- DELIEUVIN, Vincent (2012): *La Sainte Anne, l'ultime chef d'œuvre de Leonardo da Vinci*. Catálogo de exposición, Louvre.
- FALOMIR, Miguel (2003): «Tiziano. Réplicas en Tiziano», en *Catálogo de la exposición*. Madrid: Museo del Prado, pp. 77-93.
- FINALDI, G., y GARRIDO, C. (2006): *El Trazo Oculto. Dibujos subyacentes en pinturas de los siglos XV y XVI*. Madrid: Museo Nacional del Prado.
- GONZÁLEZ MOZO, Ana (2003): «El Lavatorio de Jacopo Tintoretto, nuevos datos obtenidos a través de la digitalización de la radiografía», en *Actas del X Congreso del A.E.N.D. (Asociación Española de Ensayos No Destructivos)*. Cartagena (Murcia).
- (2006): «Aportaciones de los sistemas de tratamiento digital de imagen en el estudio de obras de arte», en *Innovación tecnológica en conservación y restauración del Patrimonio*. Edición de Joaquín Barrio. Madrid: Dpto. de Historia y Arqueología de la Universidad Autónoma de Madrid, pp. 52-63.
- (2006): «La Virgen con el Niño, entre san Mateo y un ángel (Madonna della Scala) en El Trazo Oculto», en *Catálogo Exposición*. Madrid: Museo del Prado, pp. 158-173.
- (2007): «El concepto de dibujo en Jacopo Tintoretto. Análisis de los recursos técnicos utilizados en algunos cuadros del Museo nacional del Prado», en *Actas del Convenio Internacional*, 26-27 febrero 2007. Madrid: Museo Nacional del Prado, pp. 165-177.

- (2012): «The new IRRs of the Descent of the Cross in the Prado», en *Rogier Van der Weyden in Context*. Edición de Lorne Campbell, Jan Van der Stock, Catherine Reynolds y Lieve Watteeuw. Leuven: Peeters, pp. 229-236.
- (2012): «La Joconde, Atelier de Léonard da Vinci», en *La Sainte Anne, l'ultime chef d'œuvre de Leonardo da Vinci*. Catálogo exposición, Louvre. Paris: Ed. Vincent Delieuvin. pp. 234-235.
- (2012): *La técnica pictórica de Rafael en Roma*. Catálogo exposición. Madrid: Museo nacional del Prado, pp. 318-349.

MATTEINI, M., y MOLES, A. (1984): *Scienza e Restauro. Metodi di indagine*. Florencia: Nardini Editore.

NATALI, Antonio (1999): *Andrea del Sarto*, Nueva York.

RIDOLFI, Carlo (1642): *The Life of Tintoretto and of His Children Domenico and Marietta*. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1984.

SHEARMAN, John (1965): *Andrea del Sarto*, 2 vols. Oxford.

SYRE, Cornelia (ed.) (2000): «Tintoretto. The Gonzaga Cycle», en *Catálogo de exposición Munich 2000*. Alte Pinakothek.

TARDITO, R. (1990): *Il Ritrovamento del Corpo Di San Marco del Tintoretto: Vicende e Restauri*. Pinacoteca di Brera, Milano-Firenze, Cantina.

VAN ASPEREN DE BOER, Jan R. J. (1970): *Infrared Reflectography. A Contribution to the Examination of Earlier European Paintings*. Tesis Doctoral. Amsterdam: University of Amsterdam.

VV. AA. (1999): *Una obra maestra restaurada, El Lavatorio de Jacopo Tintoretto*. Catálogo exposición. Madrid: Museo del Prado.

Estrategias aplicadas en el estudio del estado de conservación de la obra *Guernica* de Picasso

Jorge García Gómez-Tejedor

Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía
jorge.garcia@museoreinasofia.es

Resumen: El estado de conservación del *Guernica* de Picasso ha sido siempre una de las principales preocupaciones del Departamento de Conservación-Restauración del Museo Reina Sofía. Es por esto que, desde que la obra entró a formar parte de la colección del museo, se han desarrollado diversas líneas de actuación y de investigación encaminadas a mejorar el conocimiento de los materiales que la conforman, su estado de conservación y la interacción de los agentes medioambientales. En 1998 se publicó un estudio muy exhaustivo sobre el estado de conservación de la obra y, desde entonces, se han venido realizando investigaciones importantes. En 2006 surgió la oportunidad de trabajar con el reverso de la obra, lo que permitió la realización de múltiples análisis. Por ejemplo, se hicieron estudios reflectográficos y de luz ultravioleta en el reverso, se tomaron muestras para analizar los materiales del soporte. No obstante, lo más reseñable fue la radiografía completa que se pudo realizar al lienzo. Hay que destacar la colaboración del Instituto del Patrimonio Cultural de España en estos trabajos.

En 2009 se concibió un nuevo proyecto, que se firmó en 2010 bajo el patrocinio de la Fundación Telefónica: se trata de «Viaje al interior del Guernica», un trabajo que propone realizar un estudio pormenorizado de toda la superficie del cuadro. Se plantearon dos líneas de actuación: la primera se centra en el desarrollo de un automatismo robotizado de precisión que cumpla con todas las expectativas de calidad, que sea compatible con la exposición del cuadro y que, una vez acabado el estudio, se pueda trasladar fácilmente. La segunda línea de actuación se basa en la interpretación de las imágenes y en la aplicación de los avances necesarios para procesar toda la información con la máxima calidad posible.

A comienzos de 2012 y después de un año de trabajo, se pudo instalar el automatismo y se iniciaron las tomas fotográficas en alta resolución. Esta primera fase concluyó a finales de 2012; de la segunda fase, que ha comenzado a principios del 2013, se espera tener resultados antes de que finalice el 2014.

Con motivo de este trabajo se ha emprendido una labor de recuperación de información, para la que se han digitalizado todos los estudios realizados hasta la fecha en formato analógico. De este modo, se asegura la perdurabilidad de los datos, evitando así las modificaciones provocadas por envejecimiento de los materiales. Entre los aspectos más reseñables de todo este trabajo está la intención de crear una base de información continua que nos permita ir valorando la evolución material de la obra.

Abstract: The condition of Picasso's *Guernica* has always been a matter of great concern for the Conservation and Restoration Department at the Museo Reina Sofía. As soon as the work entered the museum's collection, a specific action and research plan was drawn up to gain a better understanding of the materials used, their present condition, and their interaction with environmental agents. A detailed study on the condition of the work was published in 1998 and a number of in-depth studies have been conducted at regular intervals since then. In 2006 we were able to work on the reverse side of the piece and took the opportunity to carry out numerous studies, including the use of infrared reflectography and ultraviolet light to examine this side of the work. We also took samples of the materials used in the support. However, perhaps most important of all on this occasion was the chance to take an X-ray of the entire canvas. We are grateful for the assistance received from the Spanish Cultural Heritage Institute on all these processes.

In 2009 we designed a new project entitled «Journey to the Inside of Guernica», which was formalised the following year when Fundación Telefónica pledged to sponsor the initiative. The cornerstone of this project consists in carrying out a detailed study of the entire surface of the work, to be conducted in two phases. The first phase entails the development of an extremely precise, state-of-the-art Cartesian robot and made cultures to examine the activity of fungi and bacteria without interfering with its public display and could be easily removed on completion of the study. The second phase will involve interpreting the images and implementing the necessary mechanisms for processing all the data collected to the highest possible standard.

At the beginning of 2012, after a full year of work, we were able to install the robot and start taking high-resolution photographs of the canvas. This phase concluded in late 2012; the second phase has started in early 2013 and is expected to have results by the end of 2014.

As part of this new project, we have retrieved all the analogue information collected to date in previous studies and converted it into digital format to prevent any loss or modification of the data as a result of the ageing of the materials. Another important aspect of this project is our plan to create a live database so that we can continually evaluate the material evolution of the work over time.

Introducción histórica

La obra *Guernica* de Picasso, icono de la colección del Museo Reina Sofía (MNCARS), es, por su tamaño y estado de conservación, una pieza de gran complejidad que requiere de especial atención y cuidado para su correcta conservación. Es necesario contar con un profundo conocimiento de los materiales que la componen, y saber con todo detalle el estado en el que estos se encuentran, para poder valorar con suficiente conocimiento los factores que van a incidir de forma significativa sobre el estado general de la obra. Así pues, unas de las prioridades del Departamento de Conservación-Restauración del Museo Reina Sofía ha sido siempre el cuidado de esta obra icónica, con la clara idea de hacer que perdure en el mejor estado posible, aplicando las medidas de conservación necesarias para disfrutar de su contemplación con el menor deterioro. En este sentido, desde que el *Guernica* forma parte de las colecciones del museo, se ha abierto una línea de investigación y conocimiento del cuadro, con la intención de poder evaluar desde un punto de vista científico su evolución material.

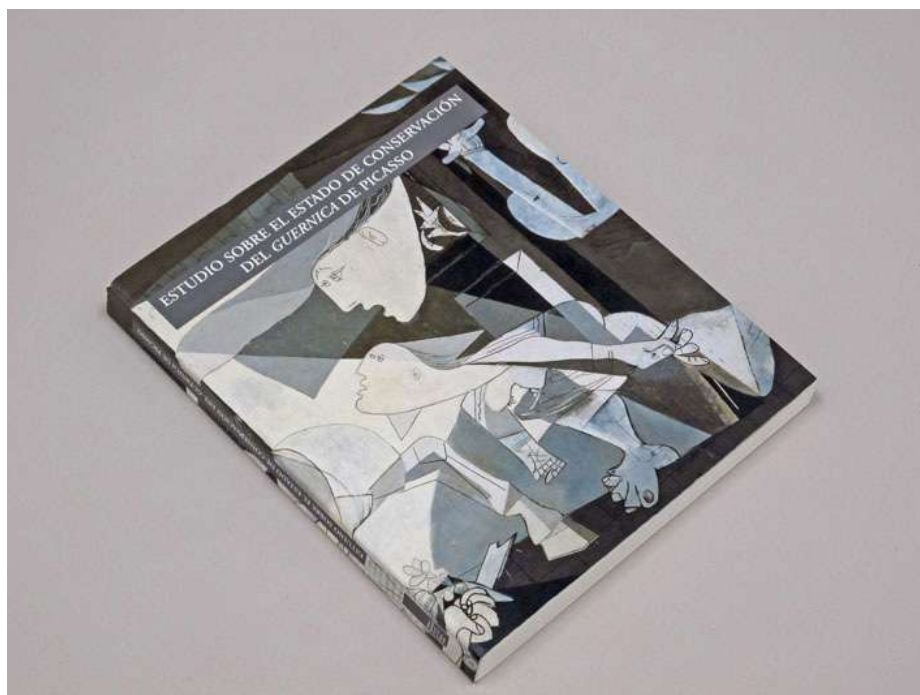


Figura 1. Portada de la publicación *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso*.

El *Guernica* en el MNCARS

El primer fruto del trabajo realizado por el Departamento de Conservación-Restauración que vio la luz fue el libro *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso* (Esteba *et al.*, 1998), publicado por el museo en 1998, bajo la dirección de José Guirao. Este estudio contenía todos los datos recopilados en el informe oficial que el Departamento de Conservación-Restauración realizó en 1997 bajo la dirección de Pilar Sedano, informe presentado ante la Dirección del Museo a requerimiento de esta, a raíz de la demanda de préstamo temporal del lienzo que presentó el Gobierno Vasco. El trabajo recogía análisis químicos de los materiales constitutivos, estudios técnicos y un detallado informe que incluía un mapa de alteraciones y un reportaje fotográfico. En esta extensa publicación se reflejaban y detallaban las alteraciones sufridas por el cuadro y su delicado estado de conservación.

Ese mismo año, entre el 15 y el 16 de enero de 1998, se celebró el simposio «*Guernica*. Problemas éticos y técnicos en la manipulación de la obra de arte». Dicho simposio ponía sobre la mesa los aspectos más relevantes de la conservación de obras de arte ante la perspectiva de préstamos o traslados, e incluía además información acerca de los estudios realizados sobre la obra. Cuatro años después, en 2002, se editó *El Guernica y los problemas éticos y técnicos de la manipulación de obras de arte* (VV. AA., 2002), publicación que recogía las actas del simposio y que aportaba información sobre el estado de conservación del *Guernica*.

En 2006, con motivo de la exposición *Picasso tradición y vanguardia*, se planteó la necesidad de descolgar la obra para adecuar la sala. Desde 1993, la obra solo se había movido una vez, en 1996, cuando se tomó la decisión de exponer la pintura sin el cristal de protección, ya que al llegar a España, en el montaje realizado en el Casón del Buen Retiro, la obra se había blindado con una urna por razones políticas. Esta protección se mantuvo en la primera instalación en el Reina por esos mismos motivos. En la reubicación de 1996, se decide colocar la obra en las galerías frente a la habitación, blindada con cristal, donde se había instalado al llegar desde el Casón del Buen Retiro. Es a partir de entonces, con la democracia española ya

consolidada, cuando el cuadro se puede contemplar sin interferencias de blindajes. Aunque en 1996 la obra queda libre para su exposición, este movimiento se proyectó como una intervención muy breve. No se quería cerrar al público la sala de su nueva ubicación, por lo que los trabajos se tuvieron que realizar el día en el que el museo cerraba al público. Es por esta razón que la acción se limitó al cambio de ubicación; únicamente se llevó a cabo una limpieza nocturna del reverso y algún estudio puntual, y se mantuvo el mismo sistema de montaje diseñado para el Casón. Así, la obra no se colgó paralela al muro, sino que presentaba una inclinación ya expuesta en el Casón, donde la obra se ubicaba sobre una base y dentro de una urna, con un cristal que mantenía una inclinación de abajo hacia arriba y hacia el frente.

Dada la intención expuesta en el año 2006, por Ana Martínez de Aguilar –la entonces directora del museo– de adecuar las salas del entorno a la obra *Guernica* –lo que conllevaría el acondicionamiento de las infraestructuras de las salas (una necesidad patente e imperiosa)– se plantearon varias alternativas. Se estudiaron todas las posibilidades como, por ejemplo, la de no mover la obra y mantenerla en una caja climática para poder ejecutar las labores de mantenimiento de la sala. No obstante, desde el Departamento de Conservación-Restauración este planteamiento presentaba varios aspectos dudosos y consideramos que la mejor solución era retirarla, algo que, además, ofrecería la oportunidad de hacer una revisión a fondo de la obra. Si procedíamos así podríamos actuar sobre aspectos pendientes que demandaban un tratamiento a fondo, como la modificación del sistema de anclaje al muro y la limpieza del reverso del cuadro. Por otro lado, eso nos permitiría realizar estudios sobre el soporte y el reverso de la obra. Descolgar el cuadro nos daría la opción de trabajar sobre el reverso durante varios días. Esta sería la primera vez que trabajaríamos en la parte del soporte del cuadro; contábamos con un periodo de tiempo de unos cuatro días, suficiente para hacer labores de mantenimiento que fueran más allá de la retirada de polvo en superficie. Además, se proyectaron nuevos estudios y mejoras en el montaje.

Para la planificación de estos cuatro días se analizaron todas las necesidades y mejoras posibles. Además de la limpieza de salidas de conductos de aire y los cambios en los carriles de iluminación, se planificó sustituir las sondas de medición de HR y temperatura alojadas en el muro en la zona que cubre la obra. Se añadieron dos nuevas sondas en los laterales a las dos ya existentes.

El montaje antiguo consistía en hacer reposar la obra sobre una pletina metálica en «L» a la que iba atornillado el bastidor. En la parte superior, otra pletina con unas prolongaciones metálicas, atornillada también al bastidor, fijaba el cuadro. Una vez fijada la obra, la pletina inferior se encastraba con una base, por lo que el cuadro quedaba visualmente apoyado en este saliente, con una inclinación de entre 10-15° gracias a las prolongaciones de la pletina superior, que separaban la obra unos 20 cm de la pared por la parte de arriba. Este sistema obligaba a hacer perforaciones en los bordes del cuadro para los tornillos y, por otro lado, el ángulo de inclinación incrementaba la tensión del cuadro sobre el bastidor, provocando un pandeo en la zona central. Además, complicaba en exceso la manipulación del cuadro, al ser un montaje muy impreciso que exigía a los operarios trabajar en posturas muy forzadas.

Después de haber estudiado todos los pormenores, se decidió retirar la obra de esta sala para trasladarla al espacio de enfrente, donde había estado durante tres años cuando tenía el cristal de protección. Este ámbito contaba con un sistema de climatización independiente que nos iba a permitir mantenerlo estanco de las otras salas. Se adecuaron las condiciones previamente, teniendo en cuenta que se iba a trabajar con el reverso de la obra. Los 15 m del trayecto eran bien conocidos, dado que ya se habían recorrido en 1993. El traslado se realizaría pues con un respaldo móvil especial que redujese al mínimo las vibraciones. Pero además –y aprovechando esta revisión– se planificó un enorme desafío: la realización de una placa radiográfica



Figura 2. Respaldo articulado en el momento del montaje de la placa de rayos X. Fotografía: José Loren.

de toda la obra. El respaldo tenía un papel muy importante en este cometido, ya que alojaría la placa de RX antes de colocar en él la obra. Por otro lado, se planificaron también con antelación los movimientos que se iban a realizar para hacer la placa radiográfica en una parte del trayecto.

Este proyecto suponía un gran reto para todas las partes implicadas: sería la primera vez que nos enfrentaríamos a una radiografía de 27 m² realizada de un solo disparo. Como complicación añadida, no se podrían hacer disparos de prueba, ya que la placa iba a estar alojada en el respaldo móvil que trasladaría la obra y era del todo inviable sustituirla o cambiarla, puesto que eso implicaría una manipulación que se descartó desde el primer momento. Esta aventura sólo fue posible gracias a la dirección de la Sección de Estudios Físicos del Instituto del Patrimonio Cultural de España, capitaneado por Araceli Gabaldón y su equipo constituido entonces por Tomás Antelo, Maca Vega y Miriam Bueso.

«La actuación diseñada desde este laboratorio contemplaba la toma radiográfica completa en un solo disparo, algo que, dadas las dimensiones (3,50 metros por 7,76 metros), requería una distancia entre el foco y la película de 13 metros».

«Una operación de este tipo entraña un gran compromiso, ya que un cálculo erróneo de la exposición o del posicionamiento del tubo emisor pueden arruinar el resultado o, cuando

menos, generar una imagen defectuosa. Por tanto, para determinar la exposición, se tuvo en cuenta la existencia de radiografías previas de varios fragmentos de la obra realizadas tras su instalación en el Casón del Buen Retiro, su primera ubicación tras llegar a España. El estudio de estas radiografías, así como los datos relativos a los materiales constitutivos, la preparación o los pigmentos, entre otros aspectos, que facilitaron los análisis ya efectuados (Cabrera, y Garrido, 1981) fueron de gran ayuda para determinar la exposición. Estas informaciones aportaron un margen realmente crítico, en vista del bajo contraste radiográfico que la composición y el empaste de los pigmentos auguraban. Al mismo tiempo, la preparación, que presentaba una considerable absorción radiográfica en relación con la capa pictórica, restaría aún más contraste, debido a su conocido efecto de apantallamiento general» (Gabaldón y Antelo, 2009).

En primer lugar, se montó la placa radiográfica en el respaldo articulado que iba a alojar el cuadro. La placa estaba compuesta por 26 tiras de 3.750 mm de rollo continuo, con 30 cm de ancho y unidas entre sí en sentido vertical, de tal forma que cubrían toda la superficie del cuadro.

Para lograr reducir al mínimo las vibraciones en el lienzo se planeó que todos los movimientos se hicieran con este respaldo móvil, al que se había dotado de articulación para poder modificar el plano de inclinación del cuadro una vez instalado. El sistema tenía que permitir descolgar el cuadro, trasladarlo, hacer la placa radiográfica, intervenir en el reverso y volver a colgar el cuadro, manteniéndose siempre unido al lienzo y de forma que lo preservase en todo momento de las vibraciones.



Figura 3. Instalación de la obra *Guernica* con el respaldo articulado. Fotografía: José Loren.

A tal efecto, el respaldo móvil contaba con una posición completamente vertical que podía inclinarse mediante un sistema hidráulico. Este desplazamiento nos permitiría colocar la placa una vez ensamblada en el suelo y posicionarla frente al cuadro, dándole la misma inclinación que tenía la obra colgada. También se estudió cómo debía distribuirse el equipo humano, para lo que se diseñaron diferentes plataformas integradas en el conjunto del sistema destinadas a cada momento del proceso.

Una vez situado el cuadro en la sala de enfrente, esta quedó sellada para que el equipo de restauración trabajara como estaba previsto: en el reverso de la obra. Se limpió el bastidor, se midió la tensión de todos los ángulos, se eliminó una cinta adhesiva en mal estado que unía la tela al bastidor y se limpió además el soporte de la obra. Se identificaron todas las alteraciones que presentaba el soporte por el reverso y se tomaron muestras de los materiales aplicados en anteriores restauraciones.

Una vez terminados los trabajos, se realizaron estudios con diferentes tipos de iluminación (luz ultravioleta, infrarroja y visible). Se utilizaron cámaras Canon D1 con sensor CMOS de 10,1 megapíxeles efectivos para la luz visible y ultravioleta, además de una cámara FinePix S3 Pro UVIR con un sensor SuperCCD. Esta cámara sustituye de fábrica los filtros anti UV e IR de la versión normal por un cristal que favorece estas longitudes de onda. La secuencia de las imágenes realizadas de forma manual se captó buscando la repetición de las condiciones en cada una de las tomas, sin variar el ángulo con respecto a la obra, con el objetivo de facilitar el montaje posterior sin necesitar correcciones de *software*, de manera que todo el reverso del cuadro quedase fotografiado. Las imágenes obtenidas, se montaron digitalmente. El resultado nos permitió hacer una reconstrucción del estado del soporte sin dejar partes sin registrar.

Tras procesar los nuevos resultados sobre el soporte y el reverso volvimos sobre la información que teníamos acerca del anverso. Dado que el estudio realizado en el año 1997 se hizo con tecnología analógica, decidimos escanear las casi 300 imágenes que en su día se tomaron del cuadro. Esta labor se llevó a cabo con el escáner de Nikon Coolscan 5000 con una resolución óptica de 4.000 ppp y una conversión de 16 bits.

Aunque las diapositivas se habían conservado en unas condiciones estables durante los 10 años transcurridos desde que se captaron, se podían apreciar ligeras modificaciones respecto al color original. Esto se añadía al hecho de que, al trasladar la información desde los estudios originales, se produjo una pérdida y distorsión de los datos, modificación que era difícil de parametrizar. De ahí que se plantease la necesidad de realizar un nuevo estudio, más minucioso, aplicando la nueva tecnología digital existente. Se puso de manifiesto asimismo la conveniencia de crear un procedimiento que utilizase los nuevos sistemas de automatización para efectuar un barrido sistemático y preciso de toda la superficie pictórica.

Gestión del proyecto

Con la perspectiva de poder hacer un estudio minucioso a través de la tecnología digital surge el embrión de este ambicioso proyecto. Queríamos hacer un barrido sistemático de la superficie pictórica de todo el cuadro, utilizando los equipos digitales con los que en ese momento realizábamos los estudios técnicos dentro del Departamento de Conservación-Restauración como, por ejemplo, los estudios en luz visible, luz ultravioleta, luz infrarroja y multispectral. Pero, además, pretendíamos aplicar nuevos estudios, como el escaneado en 3D de alta resolución, para obtener información precisa sobre la orografía de la obra. También se consideró muy interesante hacer medidas de reflectancia espectral, con el objetivo de recopilar información precisa sobre el color actual del cuadro, así como realizar termofotografías en diferentes estados de

iluminación, o profundizar, en la medida de lo posible, en el estudio hiperespectral de algunas zonas concretas.

El primer reto que se nos planteó fue desarrollar un sistema que nos permitiera realizar todos estos estudios de una forma compatible con la exposición del cuadro. El sistema tendría que funcionar *in situ*, delante del cuadro, en los periodos en que el museo se encontrase cerrado al público y fuese posible replegarlo, de manera que cuando el museo estuviese abierto no interfiriese en la contemplación del cuadro. Además se pretendía aprovechar al máximo el funcionamiento del sistema ya que no se disponía de mucho tiempo para estar delante de la obra, y nos dimos cuenta que la resolución a la que queríamos hacer los estudios requería de un periodo muy prolongado, por lo que había que conseguir que el sistema funcionase el máximo de horas posible al día.

Esto no fue una tarea fácil: suponía tener en cuenta dos aspectos fundamentales para un aprovechamiento máximo. Por un lado, el automatismo del sistema tenía que ser capaz de trabajar solo y con garantías de total seguridad, sin poner en riesgo la obra. Por otra parte, había que atender a las compatibilidades de horarios y servicios programados en las horas de cierre del museo, como la limpieza de salas, los controles de seguridad, las visitas fuera de horas o las revisiones de infraestructuras, por ejemplo. En este sentido, se estableció un calendario que permitía coordinar los trabajos ordinarios y unos protocolos de actuación ante situaciones espe-

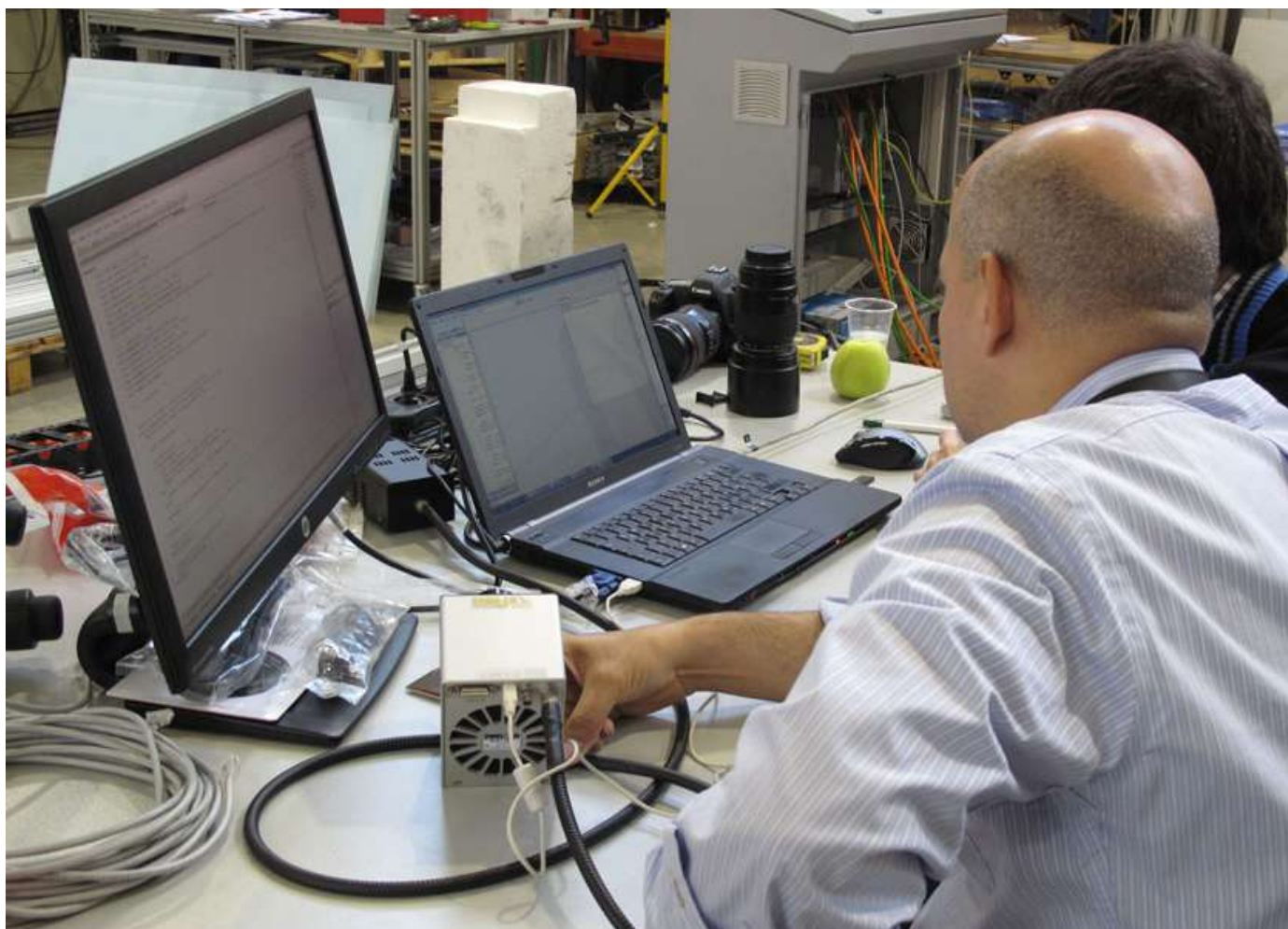


Figura 4. Proceso del diseño del sistema. Fotografía: José Loren.

ciales y concretas, de tal forma que se pudieran abordar tales casos con suficiente antelación. Según el estudio en el que estuviésemos involucrados, se necesitarían unas condiciones más estrictas y diferentes a las de otros momentos. Por ejemplo, el periodo de estudio en el rango de UV iba a exigir un control máximo de la luz procedente de otras salas y, en el caso del escaneado en 3D, las vibraciones de cualquier sistema mecanizado circundante, e incluso el paso de personas cerca de la obra, serían de enorme importancia.

En el origen del proyecto se planteó la idea de que el automatismo trabajase de forma autónoma. Se idearon por tanto los sistemas de control necesarios para ello, algo que, en principio, parecía muy difícil. Aunque lo incluyésemos entre los requisitos del sistema, dejar elementos mecanizados en funcionamiento delante del cuadro sin nadie presente sólo podría permitirse si las garantías eran absolutas. Partiendo de la premisa de la seguridad, se inició el diseño del automatismo. La intención era que físicamente fuera imposible el contacto y que la estabilidad del aparato impidiera el desplome sobre el cuadro, por lo que se desestimaron sistemas que, pese a contar con los mecanismos de seguridad más avanzados, no permitían descartar la posibilidad de contacto, como era el caso de los brazos articulados. Por ello determinamos que el mecanismo debía moverse en paralelo al cuadro, manteniendo una distancia de seguridad de contacto infranqueable. El movimiento de la cabeza donde se albergarían los diferentes sensores debía desplazarse en paralelo, sin cambios de giro, y a una distancia de entre 200 y 1.000 mm. Con estas características podríamos hacer todos los estudios, a excepción del escáner de 3D, que probablemente requeriría algún cambio en las distancias y los ángulos de escaneado.

Una vez establecidos los diferentes estudios que íbamos a hacer –esto es, luz visible, luz ultravioleta, reflectografía infrarroja, reflectancia multispectral, visión hiperespectral en luz visible y escaneado en 3D en alta resolución– se plantearon todos los complementos que se tendrían que adosar al sistema (como las fuentes lumínicas o el láser de medida y posicionamiento), para ir adaptando las estructuras necesarias que alojarían estos complementos, y poder prever también los cableados y conectores necesarios.

Entre los requisitos iniciales se marcó la necesidad de que se pudiese trabajar con este sistema no solo en sala, sobre una obra de gran formato, sino también dentro del Departamento de Conservación-Restauración, en un formato reducido.

Como se ha comentado con anterioridad, otro factor importante a la hora de concebir el sistema era la compatibilidad con la exposición de la obra: se hacía necesario que, una vez recogido, en su posición de reposo, el sistema no impidiera la normal contemplación del cuadro, y que no proyectara sombras ni interfiriese en la iluminación de la sala.

El desarrollo del proyecto se basó en dos planes de actuación bien definidos. Por un lado, la elaboración del sistema que nos permitiría realizar todos los estudios en las condiciones de exposición del cuadro y, por otro, los desarrollos necesarios para trabajar y procesar las imágenes resultantes con la máxima resolución.

Lo que en un principio se planteó como un solo proyecto terminó revelándose como un trabajo que necesitaba dividirse en dos: una primera fase se centraría en la recopilación de información y la segunda estaría enfocada al procesamiento de las imágenes y a los desarrollos informáticos necesarios para interpretar esa información recopilada.

En 2009 se iniciaron las primeras conversaciones entre el Departamento de Patrocinio del Museo y la Fundación Telefónica. En 2010 se firmó el convenio entre los directores de ambas instituciones y se cerró un presupuesto de 200.000 € (más IVA) exclusivamente para la realización de la primera fase del proyecto. Esta fase consistiría en la captura de imágenes e in-



Figura 5. Vista general del automatismo. Fotografía: José Loren.

cluiría además el desarrollo del automatismo. La segunda fase correspondería al procesamiento, interpretación y divulgación (esta última, planteada sobre tres escenarios) y su negociación se pospuso hasta la finalización de la primera parte.

En abril de 2011, tras casi un año de propuestas y desarrollos conjuntos entre el equipo técnico encargado del Departamento de Conservación-Restauración y diferentes proveedores, se adjudicó la fabricación del automatismo a la empresa Robolán por un importe de 100.000 €. Esta empresa entregó el sistema en diciembre de ese mismo año. En aquel momento se instaló en una sala especial para realizar las pruebas de resistencia necesarias para confirmar la idoneidad de su funcionamiento. Después de un mes de pruebas, en enero de 2012, el automatismo se instaló delante de la obra *Guernica* y comenzaron los estudios sobre el cuadro.

Automatismo de ejes cartesianos

En vista de todos los aspectos descritos en el apartado «Gestión del proyecto», el resultado del diseño del automatismo fue un sistema de ejes cartesianos estructurado, compuesto por un raíl base paralelo al sentido del cuadro, a una distancia de 1 m. Por ese raíl se desplaza en sentido horizontal el eje «X», esto es, la torre vertical, que a su vez cuenta con un eje vertical, el eje «Y», encargado de mover el brazo que contiene el cabezal donde se alojan los diferentes sensores. Dicho brazo se desplaza además en profundidad, lo que sería el eje «Z». Los tres desplazamientos se realizan mediante un motor lineal de inducción (sistema derivado del motor de inducción normal, pero dispuesto longitudinalmente). Si imaginamos una representación gráfica, es como hacer un corte axial tomando como base un sector plano del estator y del rotor, con lo que quedaría un motor asincrónico con un rotor de radio infinito. De esta forma, el movimiento del campo magnético rotante se transforma en desplazamiento lineal de translación y, en vez de tener un par rotante, se transforma en un campo magnético de traslación con una fuerza de empuje electromagnético. El desplazamiento va controlado en velocidad y longitud en tres ejes, lo que permite desplazar en el cabezal un sensor o cámara con un peso máximo de 25 kg, sin contar las fuentes de luz.

Descripción del automatismo:

- El eje «Z» o de aproximación a la obra cuenta con un sistema automático de control mediante un sensor láser de precisión OD de la marca SICK, que permite mantener la misma distancia con respecto a la superficie del cuadro con independencia de las ondulaciones que este pueda presentar.
- El eje «X» de desplazamiento horizontal está compuesto por dos tramos iguales, de 4.500 mm cada uno; pueden utilizarse indistintamente, uno o los dos, según el tamaño de la obra que se pretenda analizar.
- El eje «Y» de desplazamiento vertical del sistema se mueve también mediante un eje desmontable, con el fin de poder llegar a las cotas requeridas (desde 200 hasta 4.000 mm) y trabajar tanto en salas como en el taller de restauración, a una altura menor.
- El sistema es desmontable, lo que permite su traslado a salas del museo o donde sea necesario; para instalarlo se requiere tan solo un día.

Características de los ejes:

- Eje «X»:
Módulo lineal MLE 51000NS-9000, con motor lineal integrado $F = 500/1.000$ N, $i = 5/10$ A, 560 VDC, y sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recircula-

ción de bolas con 4 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 8.578 mm, L = 9.000 mm

- Carrera 8.300 mm (2 tramos de longitud 4.500 mm)

– Eje «Y»:

Módulo lineal MLE 51000NS-9000, con motor lineal integrado $F = 500/1.000$ N, $i = 5/10$ A, 560 VDC, y sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recirculación de bolas con 4 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 8.578 mm, L = 9.000 mm

Código: MLE51000NS-0-0-1-000-0-ST-00-09000

- Carrera 3.700 mm (2 tramos de 2.745 mm y 1.400 mm)
- Repetitividad del eje: $\pm 0,01$ mm

– Eje «Z»:

Módulo lineal MLE 30210HS-0800, con motor lineal integrado $F = 105/210$ N, $i = 3,1/6$ A, 560 VDC, con sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recirculación de bolas con 3 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 536 mm, L = 800 mm

- Repetitividad del eje: $\pm 0,01$ mm



Figura 6. Vista general del sistema delante de la obra *Guernica*. Fotografía: José Loren.



Figura 7. Imagen del monitor mostrando la interface del *software* de gestión. Fotografía: José Loren.

El cabezal donde se alojan los sensores cuenta con un sistema de sujeción de las cámaras (mano del robot) que está preparado para albergar el sistema de escáner y los sistemas de alumbrado necesarios.

Además, el sistema cuenta con un cuadro eléctrico de gestión, con pantalla de control y pantalla táctil, que incluye los diferentes botones de encendido y apagado, donde quedan alojados el magneto térmico, los diferenciales, la fuente de alimentación y los controladores de los motores lineales. El PLC de control dispone de los elementos necesarios para interactuar con el *software* de captación de imágenes de que dispone el centro. Esta conexión se realizará por la vía que resulte más conveniente (Ethernet, RS232, USB, etc.).

Se ha incorporado asimismo un sistema de montaje y desmontaje del bastidor en el eje vertical con un cabrestante eléctrico para facilitar la maniobra de montaje de la torre, haciendo dicha maniobra más segura para los operarios que la realicen y para el entorno donde se lleve a cabo. Esto nos permite garantizar la máxima seguridad durante el proceso de montaje y desmontaje.

Software de gestión

Junto al diseño del automatismo, desde el inicio del proyecto se consideró necesario crear un *software* de gestión que permitiera interconectar todas las funciones del sistema con los con-

troladores de los diferentes sensores. Dado que se trataría de estudios prolongados, queríamos automatizar al máximo los diferentes sistemas sin tener que renunciar a los recursos que nos proporcionaban los fabricantes de los sensores y cámaras. Esto suponía contar con los distintos códigos fuentes, de tal manera que el nuevo *software* fuera capaz de trabajar automáticamente sin descartar ninguno de estos menús ni parámetros.

Se plantearon los distintos escenarios de trabajo para cada estudio y las necesidades de gestión del trabajo, teniendo en cuenta los posibles errores o fallos. Junto a los elementos descritos del automatismo y la mesa de control, el sistema cuenta con una mesa móvil que incorpora un PC, facilitando así el *hardware* necesario. Este PC nos permite trabajar en sala y distribuir la información a los diferentes sistemas que se quieran utilizar. Durante el proceso de estudio se habilitó la posibilidad de realizar los trabajos de forma remota mediante *wifi*, de tal forma que, pese a no estar en la sala, los participantes pudiéramos seguir en directo los trabajos y modificar cualquiera de las opciones del programa como, por ejemplo, detener el sistema en caso de ser necesario.

El programa está estructurado en la pantalla del ordenador en dos áreas principales: en la parte superior se puede ver el proceso del trabajo en desarrollo y en la inferior, las diferentes opciones y posibilidades de trabajo, como la elección de la cámara, el tipo de luz, el espacio de movimiento, el tiempo de espera o la distancia del cuadro.

En la zona dedicada al proceso de trabajo, en el lateral izquierdo, se muestran las imágenes en tiempo real, incluida secuencia de las sucesivas capturas que se están haciendo. La secuencia del trabajo se ve en un total de cinco pantallas, una superior, más grande, y cuatro inferiores, más pequeñas. La última toma es la que aparece en la imagen más grande; la secuencia de las cuatro imágenes anteriores se expone, de derecha a izquierda, en las cuatro pantallas inferiores. De esta forma, es posible seguir la evolución de las imágenes y se facilita la localización exacta, además de poder seguir el desarrollo del proyecto. Hay que tener en cuenta que el trabajo sobre el *Guernica* se está haciendo con imágenes que abarcan muy poco campo visual (alrededor de 4 x 6 cm) y los planos de color en el cuadro son muy grandes, por lo que las imágenes resultantes en tomas distintas pueden terminar siendo muy similares. En el lateral derecho se muestra el proyecto cargado: en un gráfico se representan, en rojo, todas las tomas de las que se compone el trabajo, antes de iniciarse. Según se van realizando las tomas, el color cambia a verde. Así, es posible saber con solo un golpe de vista por dónde va el proceso y cuánto queda de trabajo. Además, se muestra en formato numérico, en la parte inferior, la cantidad de imágenes captadas, la posición de la última toma y las imágenes que faltan por obtener.

En la sección inferior hay tres rectángulos que delimitan los menús para –de izquierda a derecha– (1) realizar las configuraciones generales, (2) seleccionar el sensor o cámara e interactuar con él, e (3) introducir los parámetros para el autómatas y el láser.

Menú (1): en la parte superior cuenta con dos pestañas, «General» y «Configuración». Desde la pestaña «Configuración» se puede definir el tamaño de los píxeles y la ruta. En «General» se puede dar nombre al proyecto y definir los parámetros. Más abajo, hay otras dos pestañas para definir los parámetros de un proyecto general de trabajo y seleccionar imágenes concretas que queramos repetir. Sobre la captura completa de un trabajo podemos definir la ruta de destino, las pausas, el área de actuación, las dimensiones de las áreas de captura, la profundidad del eje «Z», o bien bloquear la medición del láser e iniciar o detener un trabajo. Con este menú se establece la configuración de las áreas de captura, que incluye los ejes «X» e «Y», el tamaño del encuadre, el porcentaje de superposición de las teselas, la distancia focal del láser, así como todas las opciones de dirección de captura; además cuenta con una ventana desde donde controlar la iluminación y el posicionamiento de los tres ejes de forma manual. También hay controles para

configurar la velocidad de los tiempos de pausa entre las tomas de forma diferenciada entre los ejes «X» e «Y».

Menú (2): en las dos primeras pestañas podemos elegir entre el uso de una cámara o la realización de una simulación. En la pestaña de la cámara encontramos tres nuevas pestañas en la parte inferior, correspondientes a las tres cámaras predefinidas, disponibles en el Museo, y que son las que suelen utilizarse como herramientas de trabajo. Según se trabaje con una u otra se tendrán nuevas opciones, como los encuadres, el enfoque o el tamaño de superposición. También se incorpora en este apartado la posibilidad de usar «Live View», para obtener vistas en tiempo real, el enfoque automático prescindiendo del láser del automatismo o la captura manual.

Menú (3): se divide asimismo en dos pestañas, la del «Autómata» y la del «Láser», que ofrecen los controladores para la conexión y desconexión de dichos sistemas. En la pestaña «Autómata» se controla el posicionamiento automático y la conexión o desconexión de las cámaras y las fuentes de luz; además permite resetear el equipo en caso de fallo e incluye una «seta» de apagado de emergencia ante cualquier incidencia.

Estudios técnicos

En un primer momento, los estudios que se plantearon realizar sobre la obra fueron estudios ampliamente conocidos por el equipo técnico del museo y utilizados habitualmente para analizar las obras de arte. Partiendo de la luz visible en alta resolución, nos propusimos continuar trabajando con la luz ultravioleta, también a alta resolución, para conocer y evaluar en profundidad el estado de la superficie del cuadro. En la reflectografía infrarroja que realizamos en el reverso se ven con claridad las primeras composiciones del cuadro. La evolución de la pintura en su proceso de realización se recoge muy bien en las series de fotografías que tomó Dora Maar mientras Picasso pintaba el cuadro. En estas series se aprecian claramente los cambios de composición. De cualquier forma, consideramos que sería muy interesante poder profundizar en el rango del infrarrojo para recoger con mucha más precisión estos cambios y capas de los que consta la obra. Para este cometido, decidimos realizar dos estudios en este rango de luz: uno en el infrarrojo visible, en torno a los 900 nm, y otro en el infrarrojo no visible, sobre los 1.700 nm.

Previamente, estuvimos valorando con diferentes empresas y equipos una novedad: veíamos de gran utilidad incorporar un estudio en 3D de la orografía de la superficie pictórica del cuadro. Nos planteamos delimitar y profundizar en el conocimiento de los craqueados y las diferentes alteraciones que presenta la obra mediante esta técnica. Pretendíamos además contrastar los diferentes trabajos que fuésemos haciendo, una comparación y estudio contrastado que serían posibles gracias a las herramientas de ayuda digitales y a la representación tridimensional, que nos permitirían trabajar con los diferentes estudios aplicándolos como capas sobre el 3D.

Gracias a la colaboración de instituciones como la del Departamento de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid y de varias empresas privadas se han podido añadir estudios de gran valía. Es el caso de un barrido de alta precisión con reflectancia multiespectral, o la realización de un estudio hiperspectral en luz visible en varias zonas concretas, seleccionadas por su especial interés.

A los trabajos ya comentados y realizados por el departamento, este estudio incorporaría el escaneado en 3D con un escáner de luz blanca de la empresa Breuckmann.

Se describe brevemente a continuación los equipos y condiciones de trabajo utilizados en los diferentes técnicas de examen de la obra:



Figura 8. Estudio en luz visible. Fotografía: José Loren.

Luz visible

Este estudio lo realiza íntegramente el equipo del departamento de Conservación-Restauración del museo. Humberto Durán y José Loren dirigen este primer trabajo, que marcará los parámetros que se intentarán seguir en los siguientes estudios.

- Cámara: Canon EOS 5D Mark II con sensor CMOS de formato completo
 - Formato 3:2-36 mm × 24 mm
 - Píxeles efectivos : 5.616 × 3.744 (21,1 MP) 48 bips
 - Objetivo: Canon macro EF 100 mm 1:2,8 L IS USM
 - Iluminación: Lámpara de tubo fluorescente de alta prestación KinoFlo 40W. Diseñada para responder a la sensibilidad espectral de imágenes digitales
 - 2ft Kino 800 ma KF55 SFC F40/T12/HO Lumens 1610
 - Temperatura de color: 5.500° K
- Luz recibida en superficie
 - Lux: 742 lx
 - Lumen: 6 μ W/Lumen

- UV: 4,7 mW/m²
- Imagen: Apertura f 16,0 - Velocidad 1/4 s - ISO 320
- 20.241 imágenes en formato RAW. 31 mb y JPEG. 9 mb en disco
- Dirección de los trabajos: Humberto Durán y José Loren

Luz ultravioleta

En el caso de la luz ultravioleta propusimos un trabajo en condiciones críticas. El rendimiento del sistema exigía unas prestaciones máximas, pero no queríamos exponer innecesariamente el cuadro a radiaciones ultravioletas, por lo que elegimos una velocidad de obturación muy lenta con una apertura de diafragma amplia. Esto nos limitó la profundidad de campo a unos 3-5 mm. Por otro lado, alargamos considerablemente el tiempo de exposición para conseguir una buena toma a poca luz, lo que hacía las medidas sensible al más mínimo movimiento o vibración.

- Cámara: Canon EOS 5D Mark II con Sensor CMOS de formato completo
- Formato 3:2-36 mm × 24 mm
- Píxeles efectivos: 5.616 × 3.744 (21,1 MP) 48 bips
- Objetivo: Canon macro EF 100 mm 1:2.8 L IS USM
- Iluminación: Lámpara de tubo fluorescente, luz negra 18W. Color del cristal, azul-negro, UV de onda larga.
- Dimensiones: 590 mm × 26 mm
- Pérdida de rendimiento después 2.000 h: 15%
- Espectro: 300/400 nm
- Radiación UVA: 3,7 W

Ultravioleta en superficie

- Lux: 0,8 lx
- Lumen: 744868 μW/Lumen
- UV: 6963 mW/m²
- Imagen: Apertura f 5,6-Velocidad 1/2 s-ISO 640
- 20.241 imágenes en formato RAW. 31mb y JPEG. 9 mb en disco
- Dirección de los trabajos: Humberto Durán y José Loren

Reflectografías infrarrojas

Se planteó realizar la reflectografía infrarroja en dos rangos del espectro de luz, partiendo de un sensor con un índice de penetración bajo, pero con buena resolución como primer estudio. A continuación, pasaríamos al infrarrojo en rango no visible, con un incremento del índice de penetración alto, aunque con una definición de imagen mermada.

1. Reflectografía Infrarroja a 900 nm en rango visible/invisible

- Cámara: Fujifilm IS PRO con sensor de medio formato
- Formato: 23 mm × 15,5 mm
- Píxeles efectivos: 1.440 × 960 (12,9 MP) 24 bits

- Rango espectral: 380 nm-1.000 nm
- Objetivo: Nikon AF Micro Nikkor 105 mm 1:2.8 D
- Filtro B+W 093 IR
- Iluminación: Antorcha de flash ELINCHROM con lámpara halógena, 300 W Osram 9.600 lm, a la mínima potencia.
- Temperatura de color: 3.290° K
- Luz infrarroja en superficie de la obra
 - Lux: 486 lx
 - Lumen: 40 μ W/Lumen
 - UV: 18,9 mW/m²
 - Imagen: Apertura f 9,0-Velocidad 1/13 s-ISO 200
 - 20.241 imágenes en formato RAW. 24 mb y JPEG. 5,5 mb en disco.
 - Como resultado del *stitching* de las teselas, la resolución estimada por m² es de 20.000 millones de píxeles
 - Dirección de los trabajos: Humberto Durán

2. Reflectografía infrarroja a 1.700 nm, rango no visible

- Cámara: Xeva-1.7-640 con sensor Ingaes
- 640 × 512 píxeles por calidad de cada imagen
- Dirección de los trabajos: Humberto Durán
- Luz infrarroja en superficie de la obra
 - Lux: 486 lx
 - Lumen: 40 μ W/Lumen
 - UV: 18,9 mW/m²

Reflectancia multiespectral

- Tipo de fuente: anular que combina tecnología LED e incandescencia, que ilumina con 8500 lux (aprox.) el plano de medida, con un espectro de emisión de entre 380 y 780 nm.
- Cámara: espectrorradiómetro de la empresa Photoresearch, modelo PR655
- Objetivo: MS75 con montura C con un aumento de 2,5×. El campo de vista (FOV) del objetivo es de unos 6 mm a la distancia de trabajo.
- Detector: espectrorradiómetro «Array lineal de 128 elementos». Acoplada al ocular del espectrorradiómetro va una cámara CCD de la empresa The Imaging Source, modelo TIS DFK-41BU02, con un objetivo de 1» de diámetro y 25 mm de focal.
- Almacenamiento: 560 × 480 píxeles, con 230 KB cada foto.
- Realizado por: Escuela de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid.
- Dirección de los trabajos: Daniel Vázquez.

Visión multispectral con luz visible

Se definen áreas de captura de 26×24 cm y el sistema se comporta de forma lineal, de tal manera que cada línea que se captura genera una imagen de 1.312×800 píxeles. La captura del área completa implica la necesidad de un barrido, que se lleva a cabo mediante el automatismo. Para cada área se capturan 1.200 imágenes, correspondientes a las 1.200 líneas.

- Tipo de fuente: Halógena DCR III con fibra lineal y luz fría
- Tipo de cámara: Spectral cámara PFD
- Banda espectral: 400-1.000 nm
- Resolución espectral: 2,8 nm
- Resolución de cada imagen: 1.312 (espacial) $\times$ 800 (espectral)
- Óptica: de alta calidad optimizada para producir imágenes de alta calidad. Distancia focal de 23 mm OLE 23
- Realizado por: INFAIMON
- Dirección de los trabajos: Carolina López

Escáner 3D

Se plantean tres escaneados, el de máxima resolución estará en torno a las $30\mu\text{m}$ de distancia entre los puntos y el tipo de fuente es de haz de luz blanca. En el escaneado de menor resolución se trabaja la información de color en RGB y una ampliación de la distancia de escaneado.

- Escáner: Breuckmann Smartscan 3D-HE 2146
- Resolución: 5,0 mega píxel
- Resolución: (x,y): $42 \times 96 \mu\text{m}$
- Tamaño de píxel: $0,042 \times 0,096$ mm
- Iluminación: 250 w halógena
- Dirección de los trabajos: Fundación ITMA y la empresa Breuckmann bajo la dirección del doctor Breuckmann

El martes 28 de agosto de 2012 se dio por finalizada la fase de recogida de datos con el automatismo por lo que se procedió a desmontarlo de la sala Guernica. En total se ha estado trabajando casi 7 meses intentando aprovechar al máximo este recurso sin que esto haya supuesto la privación de esta obra al público que incluso ha tenido la oportunidad de vernos trabajar en momentos determinados o a museo cerrado creando una gran expectación. Es importante llamar la atención en este punto ya que las diferentes campañas de información que se han llevado a cabo durante el proyecto han permitido difundir y mostrar aspectos desconocidos al público en general, como es la labor del Departamento de Conservación-Restauración centrado en el cuidado de nuestro patrimonio.

El automatismo ha sido instalado en las dependencias del Departamento de Conservación-Restauración en su formato pequeño.

Bibliografía

- CABRERA, J. M., y GARRIDO, M. C. (1981): «Estudio técnico del Guernica», en *Boletín del Museo del Prado* 1, tomo 2, n.º 6. Madrid: Museo del Prado.
- ESTEBA, P.; SEDANO, P.; LOSADA, A.; CALOPA, P.; IRURETAGOYENA, A.; GARCÍA, J.; RUBIO, R.; SÁNCHEZ, J.; ROCHA, A., y MURO, C. (1998): *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso*. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.
- GABALDÓN, A., y ANTELO, A. (2009): «Radiografía de gran formato», en *Patrimonio Cultural de España*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 203-213.
- VV. AA. (2002): *El Guernica y los problemas éticos y técnicos de la manipulación de obras de arte*. Simposio. Madrid: Fundación Marcelino Botín, Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.
- VV. AA. (2006): *Picasso. Tradición y vanguardia*. Catálogo de la exposición. Madrid: Museo Nacional del Prado y Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.

Análisis de la microrugosidad mediante técnicas portátiles: aplicaciones y casos de estudio en patrimonio

Rafael Fort

Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
rafort@ucm.es

Mónica Álvarez de Buergo

Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
monica.alvarez@csic.es

Carmen Vázquez-Calvo

Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
carmenvazquez@ucm.es

Luz S. Gómez-Villalba

Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
luzgomez@ucm.es

Resumen: La superficie de los materiales constituye la interfase entre los agentes de deterioro y el elemento patrimonial. La determinación de la rugosidad tiene una amplia aplicación en el campo de las ciencias del patrimonio, desde cómo inciden los procesos de deterioro en la superficie de los materiales, hasta poder establecer la idoneidad de tratamientos de conservación, tanto en los tratamientos de limpieza del bien cultural como en las técnicas de consolidación y protección de sus superficies. Existen diferentes técnicas para determinar la rugosidad de los materiales, pero muchas de ellas se realizan en el laboratorio y por tanto es necesario trasladar el bien patrimonial, lo cual no siempre es posible. El rugosímetro portátil es una técnica no destructiva que permite determinar las características de la superficie de un objeto a escala micrométrica y con representación tridimensional. Se van a mostrar diferentes aplicaciones de esta técnica en el campo de la caracterización y conservación de materiales patrimoniales.

Palabras clave: Rugosidad, piedra, metal, textil, pintura, vidrio.

Abstract: The materials surface is the interface between the decay agents and the heritage element. The determination of roughness can have a wide variety of applications in the field of heritage science, from how the deterioration processes affect the materials surface, to the determination of the suitability of conservation treatments, both considering cleaning methods applied to the heritage asset, as well as consolidation and protection techniques of their surfaces. There are several techniques to determine materials roughness, but many of them must be performed in the laboratory and therefore it is necessary to move the heritage element to there, which it is not always possible. The portable roughness meter is a non destructive technique

that allows the determination of the surface characteristics of an object at a micrometric scale and with a three-dimensional representation. Different applications of this technique in the field of heritage materials characterization and conservation are shown.

Keywords: Roughness, stone, metal, textile, paint, glass.

Introducción

El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de las superficies de los bienes culturales es de gran interés para establecer las pautas más adecuadas para su conservación. El aspecto y apariencia de la superficie exterior de un objeto es la primera impresión que capta el observador, proporcionando información sobre su color, brillo, textura, etc., aspectos que también contribuyen a aportar datos sobre su estado de conservación. La superficie del objeto es la línea de separación o interfase entre él y las condiciones medioambientales en las que se encuentra, permitiendo que se moje, que se adhieran partículas, que se transforme generando pátinas naturales, etc. La presencia de depósitos de alteración en la superficie es indicativo de los agentes de deterioro que actúan sobre ésta, como puede ser la formación de costras negras, eflorescencias, depósitos de óxidos, colonización de microorganismos, etc., que finalmente llevan a que se acentúen e intensifiquen los procesos de alteración del material tanto en la superficie externa, como en la interna. Las superficies que no muestran una dirección de rugosidad preferente, debido a su proceso de formación y origen o a su fabricación, se conocen como aleatorias y suelen ser las que presentan los materiales pétreos naturales o los que se obtienen en la superficie de rotura del objeto.

La resistencia de un material ante el deterioro producido por efecto de los diferentes agentes con el paso del tiempo (durabilidad) está relacionada con la superficie de los materiales, la cual a su vez está controlada por su rugosidad. La rugosidad se puede definir como la irregularidad que presenta una superficie a intervalos pequeños y que es la base sensorial para reconocer la diferencia entre algo «liso» o «rugoso». La rugosidad, por lo tanto, puede apreciarse de forma táctil y/o visual. La rugosidad original de la superficie de un material de una obra de arte forma parte de la expresividad que el autor ha querido transmitir al espectador; en otros casos es debido a las propias características del material utilizado, y en otras al efecto que generan las herramientas y utensilios empleados para la realización de la obra (pinceles, gubias, abrasivos, cinceles, etc.), sobre todo en su acabado final, sin olvidar la alteración que sufren los materiales con el paso del tiempo. La rugosidad es diferente para cada tipo de material: metal, papel, vidrio, cerámica, etc. A su vez es diferente para cada variedad dentro de un mismo tipo de material. Así, un pergamino no tendrá la misma textura o rugosidad que un papel cuché. La rugosidad de un material condiciona su resistencia a los procesos de deterioro.

La influencia de la rugosidad en la durabilidad del material estará definida por su escala, pudiendo ésta ser macro, micro e incluso nanométrica. La macrorugosidad es aquella que presenta unas irregularidades en la superficie con alturas de varios centímetros/milímetros, mientras que la microrugosidad se diferencia porque tiene unas irregularidades de varios micrómetros; al igual que la nanorugosidad, lo es a escala nanométrica.

Las superficies más lisas o de menor rugosidad, a escalas micro y macro, son las que mejor comportamiento tienen ante el proceso de deterioro, sobre todo en ambientes externos en donde no hay control preventivo, lo que sí ocurre en museos, archivos, etc. La microrugosidad y la nanorugosidad son las que controlan en mayor medida estos procesos de deterioro, al aumentar la superficie específica expuesta a estos agentes de deterioro (condiciones microclimáti-

cas y medioambientales). Además esta rugosidad es la que favorece en mayor medida el grado de hidrofobicidad y mojabilidad del material (la nanorugosidad es la base de los compuestos super-hidrófobos). La rugosidad también influye en la eficacia de los tratamientos de conservación, en la mencionada superhidrofobicidad, en la adherencia, en la respuesta fotoluminiscente, etc. La modificación de la superficie para tales efectos ha cobrado últimamente un gran auge en el entorno de la nanotecnología y nanomateriales aplicados a la conservación del patrimonio (Gómez-Villalba *et al.*, 2011a). La macrorugosidad es más valorable por órganos sensoriales táctiles y visuales, aspecto más difícil de determinar para los otros tipos de rugosidades, lo que hace necesario instrumentos específicos para su medida y cuantificación.

Instrumentos de medida de la microrugosidad

La rugosidad de una superficie se determina por medio de técnicas que exploran la superficie del objeto y obtienen un perfil 2D (perfilómetros), o una representación 3D. La forma más sencilla, pero que aporta una información subjetiva, es la inspección visual y táctil. También el uso de lupas binoculares o del microscopio óptico de polarización con la preparación de láminas delgadas que, confeccionadas perpendicularmente a la superficie, permiten determinar la rugosidad superficial del material (Pérez-Monserrat, 2012), pudiendo, junto con los perfilómetros, tener representaciones en 2D de la rugosidad.

Los rugosímetros pueden clasificarse en aquellos de contacto (perfilómetros), y de no contacto (rugosímetros ópticos) (Poon y Bhushan, 1995; Grissom *et al.*, 2000, y Vickerman y Gilmore, 2009). Por medio de técnicas microscópicas de alta resolución se puede medir la rugosidad de la superficie de los materiales como son la microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de fuerza atómica (AFM) y de efecto túnel (STM). Los perfilómetros y los rugosímetros ópticos miden la rugosidad a escala micrométrica, presentando la ventaja de ser técnicas no destructivas y portátiles, mientras que las técnicas como el AFM, SEM y STM tienen una resolución mayor y ofrecen datos a escala nanométrica; como desventaja, que las medidas deben realizarse en laboratorio con equipamientos algo más sofisticados y de un coste mucho más elevado (fig. 1).

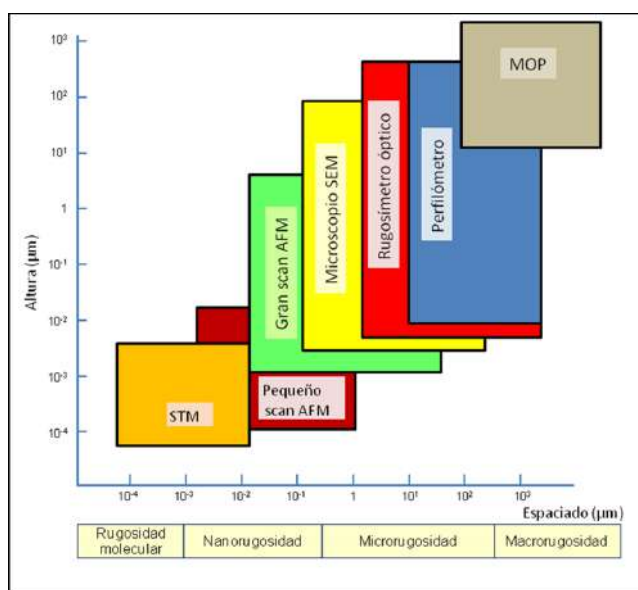


Figura 1. Esquema de la resolución vertical y horizontal de los diferentes métodos de medición de la rugosidad: MOP: microscopía óptica de polarización; SEM: microscopio electrónico de barrido; AFM: microscopio de fuerzas atómicas, y STM: microscopio de barrido de efecto túnel. Fuente: Modificado de Myshkin *et al.* (2003).

Perfilómetros

Dentro de los rugosímetros de contacto se encuentran los perfilómetros; en ellos, una fina punta recorre la superficie del objeto controlando la velocidad de desplazamiento y transformando las variaciones de altura en impulsos eléctricos que son registrados gráficamente, dando lugar al perfil de la rugosidad (fig. 2). Según cómo se obtenga la señal eléctrica procedente del movimiento de la punta (palpador), este tipo de equipos pueden ser:

- Perfilómetros inductivos: el movimiento vertical de la punta generado por la rugosidad modifica la longitud del circuito magnético, y con ello el flujo de campo magnético que lo atraviesa, generando una señal eléctrica.
- Perfilómetros capacitivos: el desplazamiento vertical une las dos láminas de un condensador, modificando su capacidad y con ella la señal eléctrica.
- Perfilómetros piezoeléctricos: el desplazamiento del palpador deforma una lámina piezoeléctrica generando una señal eléctrica.

El diámetro de la punta o palpador es el que determina la sensibilidad de las medidas, no pudiendo medir rugosidades de dimensión inferior a la de la punta utilizada. Este diámetro suele ser de 2,5 ó 10 μm , recorriendo una longitud de muestreo entre 0,08, 0,25, 0,8, 8 y 25 mm. En general la longitud de muestreo suele ser suficiente para obtener resultados representativos de la rugosidad del material (Thomas, 1999). El perfil obtenido (perfil denominado P) se filtra (perfil R) para eliminar las ondulaciones y defectos que no sean los propios de la rugosidad.

Un aspecto importante es también la carga o presión del palpador sobre la superficie del objeto, ya que se puede inducir cierta deformación plástica en la superficie si se aplica una carga superior a la que soporta el material. Esto es un aspecto a considerar en materiales como barnices, celulosas, etc. Sin embargo, los valores pueden ser considerados como válidos ya que la deformación plástica se produce por igual en todo el perfil reproduciendo el perfil original (Thomas, 1999). Otro problema que puede generarse es la pérdida de contacto de la punta con la superficie durante su desplazamiento sobre la superficie.

Estos rugosímetros únicamente pueden realizar mediciones en 2 dimensiones (2D). Esto es debido a que el palpador se puede mover verticalmente y horizontalmente según una línea.

Estos equipos son de laboratorio pero existen modelos más pequeños que son portátiles. Tienen como inconveniente que sólo pueden ser utilizados en superficies horizontales.



Figura 2. Perfilómetro (verde) midiendo una probeta de mármol. El equipo auxiliar (azul) se utiliza de sujeción y nivelación.

Rugosímetros ópticos

Los rugosímetros ópticos se caracterizan por no requerir contacto directo con la superficie a medir, únicamente hay que apoyar sobre la superficie el dispositivo de medida (Ezrati, 2008). Esta técnica utiliza haces de luz para caracterizar la superficie (fig. 3). Esto permite realizar medidas en superficies horizontales, verticales o en cualquier otro ángulo. Su funcionamiento es similar al del telémetro común que emite un rayo de luz y mide el tiempo que lleva la vuelta. Uno de los métodos empleados, la fotogrametría de corto alcance (el término fotogrametría deriva de «phos», «photós», luz, y «gramma», trazado, dibujo), consiste en proyectar una malla de líneas de luz sobre la superficie en un ángulo de 45°. Si la superficie es lisa, la imagen obtenida será recta, pero si hay alguna irregularidad en la superficie será resaltada marcando su ondulación. Esto se debe a que las líneas se desplazan en función de los salientes y muescas en la superficie. El rango de medición es de 40 a 500 μm lateralmente, y alturas de 0,5 a 1 mm (Aires-Barros; Maurizio y Figueredo, 1994).

El micropesfilómetro láser o interferómetro láser es un instrumento que mide la distancia entre un cabezal óptico y la superficie de los objetos con alta precisión. Los primeros en proponer este método para realizar el seguimiento de la pérdida superficial en materiales pétreos fueron Asmund y colaboradores en 1973 (Price, 1996). La técnica se ha perfeccionado de tal modo que se pueden detectar deformaciones de hasta 0,5 micrómetros con resolución de 0,025 nm. Actualmente existen sistemas portátiles. Otros métodos interferométricos que se utilizan para medir la rugosidad son la interferometría Speckle o de moteado (ESPIC, Electronic Speckle Patron Interferometry) y la interferometría holográfica.

El escáner láser 3D puede utilizarse para calcular la rugosidad superficial y la pérdida de material con medidas de gran exactitud (Trinks *et al.*, 2005). La técnica, aunque útil, es laboriosa y necesita personal muy cualificado (Moropoulou *et al.*, 2003), ya que el procesado posterior de los datos es largo y trabajoso. Estos equipos capturan imágenes de detalle de la superficie de los objetos con una precisión de milímetros, constituyendo una herramienta cada vez más utilizada para la documentación de objetos patrimoniales (Nothegger y Dorninger, 2009).

La elipsometría es otra técnica que se ha utilizado para la caracterización de la superficie (Thomas, 1999). Se mide el cambio en la polarización después de que un haz de luz se refleje desde una superficie. El uso de la elipsometría para medir la rugosidad está todavía en proceso de investigación, ya que la rotación del haz también se ve afectada por factores tales como la superficie, composición, temperatura, etc.

Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (MEB, o el término internacional SEM, de *Scanning Electron Microscopy*), aunque no constituye una técnica exclusivamente de medida de la rugosidad, se puede utilizar para ello. Podemos observar imágenes de la superficie de los materiales que nos ofrezcan una visión morfológica de la misma (la topografía y el «relieve» de la superficie). Sin embargo, lo ideal es observar secciones del material, cortes perpendiculares a la superficie externa, en los que se observe el perfil de una sección. En el caso del microscopio electrónico de barrido convencional (en condiciones de alto vacío), las muestras que no sean conductoras deben metalizarse previamente para posibilitar la conducción de la radiación de electrones, lo cual significa que es una técnica destructiva, ya que la muestra queda recubierta por un metal (suele ser grafito, oro o platino). Sin embargo, existe la microscopía electrónica de barrido de

operación ambiental (ESEM, Environmental Scanning Electron Microscopy), la cual no necesita preparación de la muestra, es técnica no destructiva, y permite por tanto observar la misma muestra en diferentes situaciones (procesos de deterioro, tratamientos de consolidación, sistemas de limpieza, muestras húmedas o secas).

En ambos casos se pueden utilizar programas de adquisición y procesamiento de imágenes (tipo Digital Micrograph®) que realizan perfiles, mediciones y cálculos de rugosidad. La interpretación se basa en la medida de la intensidad de la escala de tonos de grises utilizando como base las imágenes de microscopía electrónica de barrido, previamente calibradas y configuradas para su tratamiento. Es conveniente utilizar las imágenes obtenidas mediante el detector de electrones secundarios; no obstante, si las imágenes de electrones retrodispersados muestran un contraste relacionado con fracturas o porosidad puede utilizarse para estimar cualquier modificación. Lo aconsejable es utilizar imágenes capturadas en donde se han combinado señales de electrones secundarios y retrodispersados. De esta manera, la rugosidad va a ser medida a partir de un perfil de tonos de grises integrado. La ventaja de las imágenes SEM es que se puede observar y medir la rugosidad a distintas escalas (micrométrica hasta nanométrica), dependiendo del poder de resolución del microscopio. Hoy en día, la microscopía de barrido ha evolucionado con la nueva generación de microscopios electrónicos de emisión de campo (FESEM), consiguiendo detalles topográficos y/o morfológicos de la superficie de los materiales hasta visualizar objetos a distancias superiores a los 1,5 nm.

Microscopio de fuerzas atómicas (AFM)

La técnica puede ser utilizada en forma de contacto o no contacto. Utiliza una punta de un par de micrómetros de largo y menos de 100 Å de diámetro que detecta las fuerzas atómicas sobre un espécimen, los movimientos de exploración a lo largo de la dirección XY, y las fuerzas de repulsión de la sonda y la superficie de la muestra. La punta se mueve verticalmente siguiendo la forma de la superficie, pudiendo el sistema detectar movimientos inferiores a los 10^{-2} nm (Ros-Yáñez; Houbaert y Mertens, 2001).

En forma de contacto la punta mantiene un contacto físico suave con la muestra. La magnitud de la fuerza total que se ejerce sobre la muestra varía entre 10^{-8} y 10^{-6} N. La desventaja de esta técnica es que la punta puede modificar la superficie con arrastre de material. Para evitar este inconveniente se pueden realizar medidas de contacto intermitente (*Tapping Mode*). La variación de la amplitud de oscilación de la punta, debida a la amortiguación sobre la superficie, es lo que se utiliza como señal de control. La otra posibilidad es utilizar la técnica AFM de no contacto, en la cual se mide la vibración por resonancia, con frecuencias de 100 a 400 kHz, haciéndose muy cerca de la superficie, entre 10 y 100 Å. De esta manera, coincide con la amplitud de la vibración, por lo que la punta prácticamente no realiza presión en la superficie del material a medir ($< 10^{-12}$ N).

En este sentido, la microscopía de fuerzas atómicas (AFM) se perfila como una técnica relativamente fiable para la determinación de cierto tipo de rugosidades a escala nanométrica.

Microscopía de efecto túnel (STM. *Scanning Tunnel Microscopy*)

La microscopía de barrido de efecto túnel (STM) se basa en el «efecto túnel»: una punta conductora se coloca muy cerca de la superficie de un material (10^{-8} a 10^{-7} mm), y se aplica un voltaje

entre la punta y la muestra, estableciéndose una corriente eléctrica débil entre ambos materiales (punta y superficie) que puede permitir a los electrones pasar al otro lado mediante dicho efecto túnel a través del vacío. La imagen resultante que se obtiene corresponde a la densidad electrónica de los estados de la superficie.

En 1983, Binnig y Rohrer publicaban la novedad de la técnica STM para obtener perfiles a escala atómica de la superficie de los materiales, con una resolución en profundidad $< 1 \text{ \AA}$, y una resolución lateral de unos pocos $\text{\AA}$; De esta manera se permite un desplazamiento lateral de hasta $150 \text{ }\mu\text{m}$, y de $10\text{-}15 \text{ }\mu\text{m}$ en altura (Bai, 1999). Cuando los materiales que se quieran analizar no sean conductores, al igual que se ha comentado para la técnica de microscopía electrónica de barrido convencional, se necesitará la deposición de una capa más o menos gruesa de un material conductor en la superficie de la muestra a analizar. Existen microscopios en los que se combinan el efecto túnel y la fuerza atómica (STM-AFM).

Algunos autores (Arranz *et al.*, 2004) han realizado comparaciones entre ambas técnicas para medir rugosidad superficial (en materiales poliméricos) y obtienen que ambas microscopías AFM y STM conducen a resultados muy similares entre sí. También estos mismos autores indican que la metalización de la superficie de estos materiales implica una ligera disminución de la rugosidad inicial.

Por último, señalar la sencillez del equipo y su reducido tamaño, lo que hace que pueda incorporarse a otros equipamientos, como por ejemplo un SEM.

Parámetros de rugosidad

El tratamiento estadístico de los perfiles resultantes en las diferentes técnicas de rugosimetría permite determinar los parámetros de rugosidad.

Existe una gran variedad de parámetros que cuantifica la rugosidad de una superficie o de sus perfiles de rugosidad. En la figura 3 se muestra un perfil en donde se han señalado los parámetros más importantes.

- R_a es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones desde la línea media del perfil (Y_i):

$$R_a = \frac{1}{N} \sum Y_i$$

- R_q es la raíz cuadrada de la media aritmética al cuadrado de las desviaciones de la línea base del perfil (Y_i):

$$R_q = \left(\frac{1}{N} \sum Y_i^2 \right)^{1/2}$$

- R_t o R_y es la suma de altura Y_p de la cresta más alta y del valle más profundo Y_v del perfil:

$$R_y = Y_p + Y_v$$

- R_z es la suma de los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos del perfil:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum Y_{pi} + \frac{1}{5} \sum Y_{vi}$$

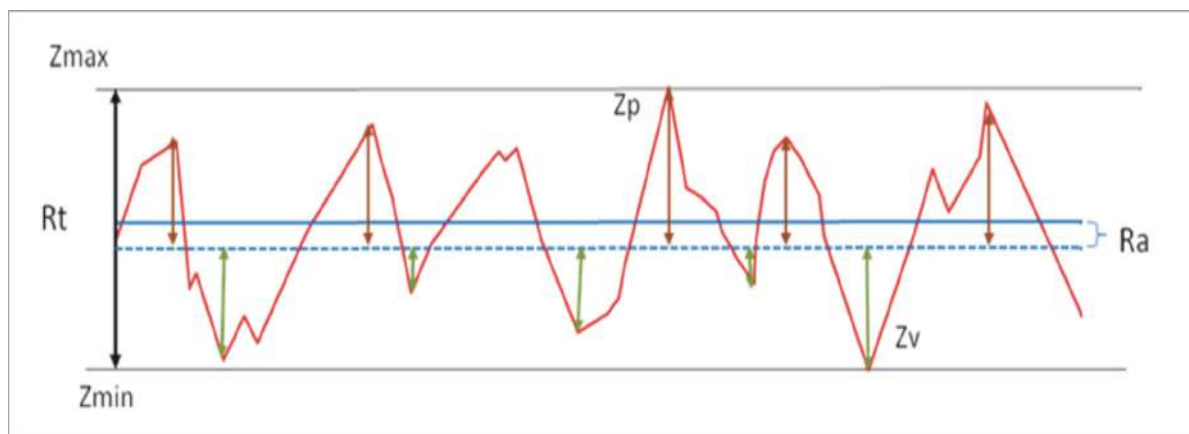


Figura 3. Parámetros R_a y R_t de rugosidad: Línea azul: línea base del perfil; Z_p : altura del pico más alto; Z_v : valle de mayor profundidad; Z_{max} : línea paralela de la línea base que marca; Z_p . Z_{min} : línea paralela a la línea base que marca el valle más profundo; flechas marrones: los cinco picos más altos; flechas verdes: los cinco valles más profundos.

Equipo microrugosímetro 3D portátil [TRACEit(R)]

Uno de los microrugosímetros ópticos (OSR) comerciales es el TRACEit(R). Es portátil y de no contacto (establece contacto con la zona externa al área de medida sin producir ninguna alteración o cambio al material). Este equipo consta de un cabezal que está conectado a un ordenador portátil que recoge los datos necesarios y los procesa a través de un programa específico (fig. 4). Este equipo permite obtener:

- Imágenes en 2D tomadas bajo diferentes iluminaciones y ángulos de iluminación.
- Imagen de la impresión visual de la superficie medida.
- Imagen de la topografía 3D. En ella se muestra la rugosidad a escala micrométrica.
- Cálculo en 3D de la topografía.
- Determinación de los parámetros de rugosidad (R_a , R_q y R_z) según los ejes X e Y.
- Análisis de imagen permitiendo seleccionar distintos perfiles en los que establece la altura máxima y mínima.
- Análisis de imagen del área estudiada utilizando distintos umbrales para establecer el porcentaje de superficie afectada por una rugosidad determinada.

El cabezal emite tres fuentes de luz blanca colimadas que inciden de forma angular (70°) con respecto a la superficie a medir (figs. 5a y 5c). Cada fuente de luz está orientada a 0° , 120° y 240° de la superficie (fig. 5 b). A partir de la combinación de las imágenes obtenidas desde los tres ángulos se obtiene la imagen en 3D (fig. 6). El campo de medición es de $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. La resolución en las tres direcciones del espacio es de $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Para materiales transparentes o semi-transparentes, como el vidrio, celuloide, papel, etc., se utiliza luz transmitida desde la parte inferior del objeto. El mapa de rugosimetría de la superficie analizada (25 mm^2) se elabora a partir del procesado de los resultados obtenidos de la medición de 1.500 líneas en el eje X y de 1.500 líneas en el eje Y. Este mapa se puede orientar en todas las direcciones del espacio para destacar gráficamente los detalles de la topografía. Los valores medios de los parámetros de rugosidad, R_a , R_z , R_q , se obtienen en el estudio estadístico de los 1.500 perfiles obtenidos en cada eje (X e Y). Los valores se obtienen de forma separada para cada uno de los ejes e índices. Estos parámetros se calculan con el *software* integrado en el equipo siguiendo las normas DIN EN ISO 3274:1996.



Figura 4. Equipo TRACEit(R).

Aplicaciones del OSR en patrimonio

La rugosimetría de superficie aplicada en el patrimonio aporta una información muy importante para la caracterización de los materiales, el conocimiento histórico de elaboración de cada elemento, ya que puede informar sobre la tecnología utilizada para la elaboración del objeto, identificar falsificaciones, establecer las causas de su deterioro, entender los efectos que generan los agentes de deterioro sobre ellos y, sobre todo, permite establecer las pautas de actuación más idóneas, con la elección de las técnicas de limpieza y de protección más adecuadas.

A continuación se muestran los resultados de la aplicación del equipo TRACEit(R) en diferentes materiales:

- Vidrios: el vidrio utilizado en muchos elementos del patrimonio mueble como inmueble sufre los procesos de deterioro (Carmona; Villegas y Fernández Navarro, 2006; Carmona, 2010). En el caso de vidrieras, por ejemplo, su textura es diferente según la técnica de elaboración utilizada, que ha cambiado con el paso del tiempo. La corrosión del vidrio puede ser debida a tensiones internas que pueden generar fisuras (pelos) en el vidrio, o por picaduras que han podido generarse por impactos de partículas transportadas por el viento. Estas picaduras pueden transformarse, en algunos casos, en cráteres por la acción química del medio ambiente en la superficie del vidrio, al aumentar el pH en ambientes húmedos, lo que afecta más directamente al vidrio alcalino. Los cráteres que se generan pueden ir aumentando de tamaño y de profundidad, lo que favorece la intercomunicación de cráteres adyacentes, favoreciendo un mayor deterioro de la superficie con pérdida del grosor original del vidrio. En la figura 7 se muestra un vidrio compuesto por silicato sódico-cálcico utilizado en una vidriera de la iglesia San Severino de Balmaseda. La rugosidad de este vidrio está marcada por una textura muy fina con un valor $R_a=0,96$. En dicho vidrio aparecen huellas de impacto que han generado pequeñas microfracturas de una profundidad de $26\ \mu\text{m}$ y un diámetro de $0,2\ \text{mm}$.
- En la catedral de León (siglo XII) las vidrieras son de silicato potásico-cálcico (Carmona; Villegas, y Fernández Navarro, 2006) lo que favorece procesos hidrolíticos con desalca-

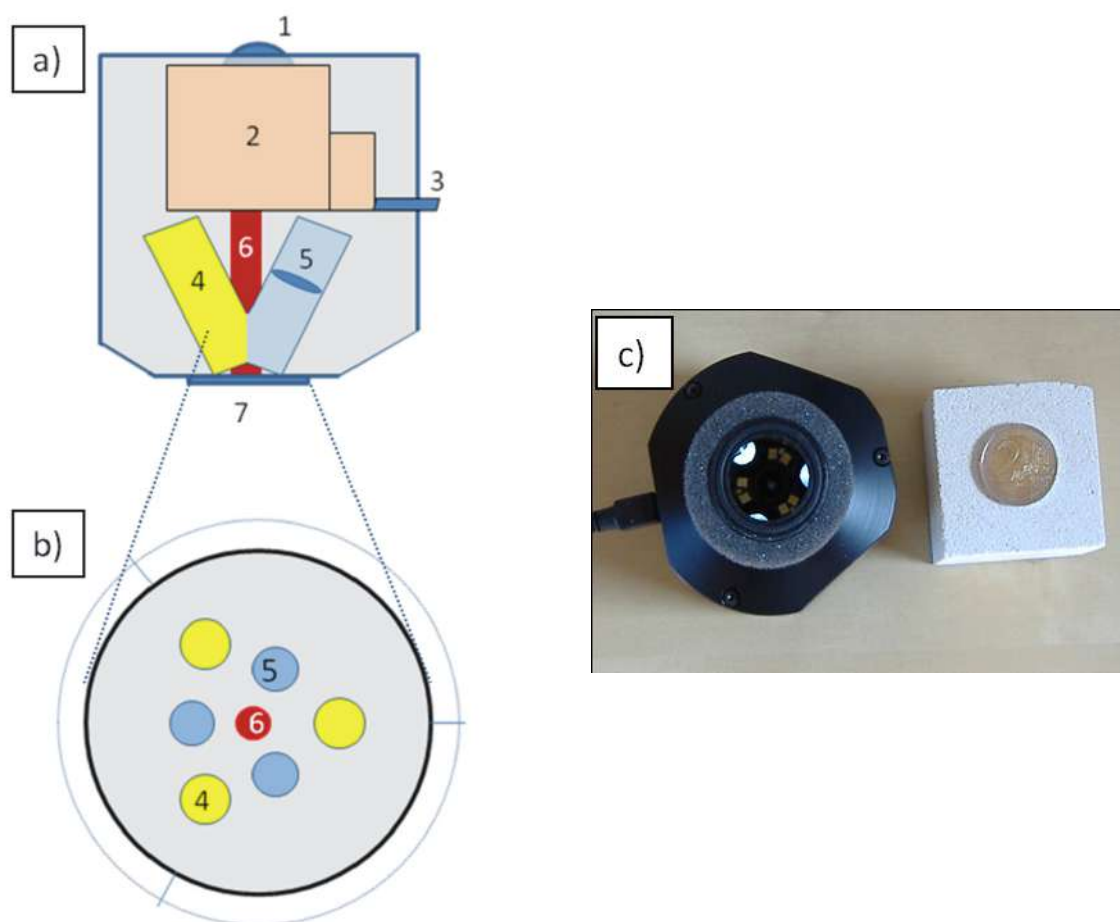


Figura 5. Cabezal de medida de la microrugosidad por sistema óptico: 1. Botón de inicio de medida; 2. Caja de circuitos electrónicos; 3. Conexión al ordenador; 4. Sensor lumínico que captura luz reflejada; 5. Fuente emisora de luz con lente; 6. Captación de imágenes; 7. Ventana de medida con puntos de apoyo almohadillado.

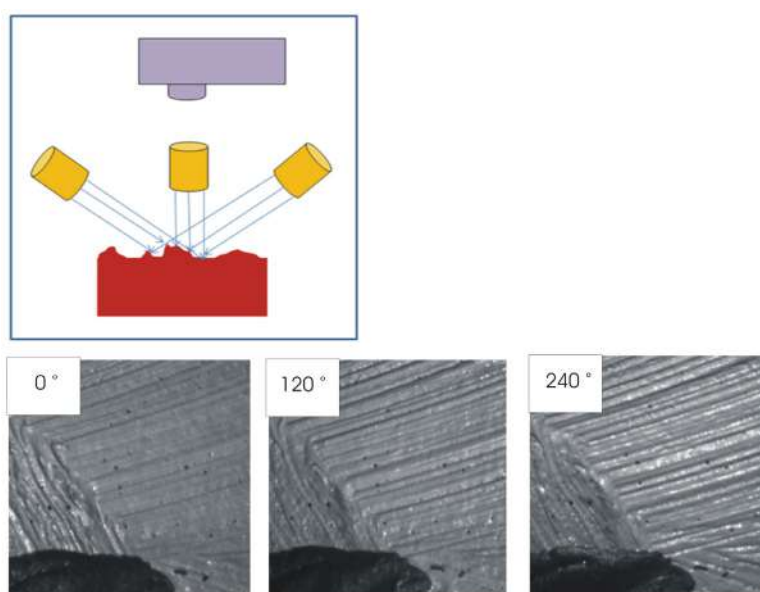


Figura 6. Esquema de la incidencia de la luz sobre la superficie de un objeto e imágenes captadas en cada emisión de luz desde el azimut 0°, 120° y 240°, cuya integración se obtiene el diagrama 3D de la rugosidad.

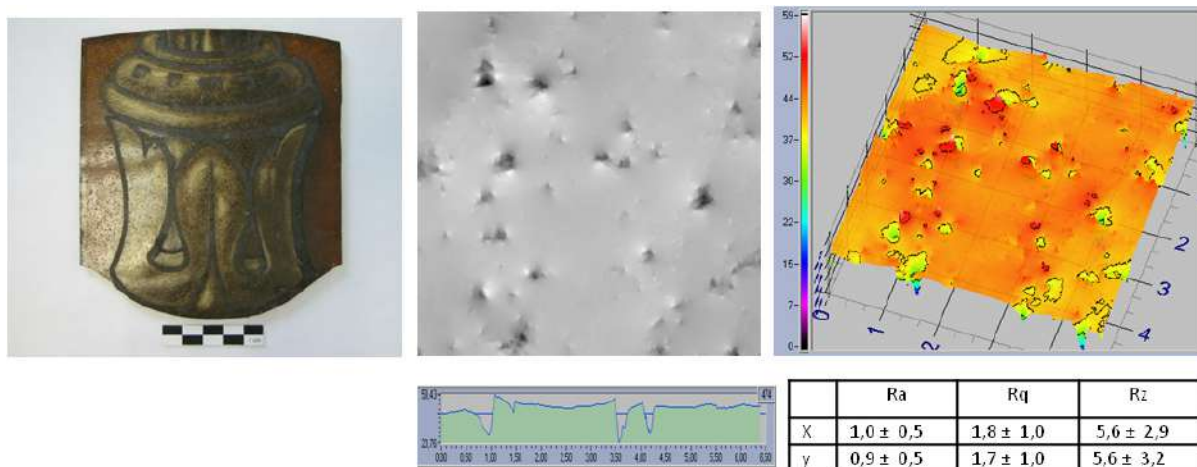


Figura 7. Vidrio procedente de una vidriera de la iglesia de San Severino de Balmaseda, Vizcaya.

linización superficial, que generan cráteres. En la figura 8 puede apreciarse el perfil de la rugosidad, en donde aparecen valles profundos y de bordes redondeados típicos de procesos de deterioro químicos con profundidades superiores a los 100 μm . La técnica de rugosimetría permite por medio de tratamiento de imágenes, establecer la superficie afectada (figs. 8g y 8h), tanto por la presencia de cráteres (17,4% de la superficie), zonas de cráteres interconectados (44,1%), y zonas en donde el vidrio no está afectado por estas patologías (37,5%).

- Metales: la aplicación de la técnica de rugosimetría es de gran valor en estudios de metales, ya que hay que tener presente que este equipamiento se desarrolló principalmente para determinar imperfecciones en piezas metálicas utilizadas en la industria. De la multitud de aplicaciones, una de ellas es la cuantificación del proceso de desgaste de monedas. De esta forma, en la figura 9 se muestra la rugosidad 3D de monedas de un céntimo de euro que fueron acuñadas en 2003 y 2011. Son de acero recubierto de cobre con un diámetro de 16,25 mm y un espesor de 1,67 mm. El reverso de la moneda tiene grabada la fachada de la catedral de Santiago de Compostela. La moneda de 2011 mantiene su color y brillo, mientras que la superficie de la acuñada en 2003 presenta un importante oscurecimiento de su superficie con pérdida de su brillo, observándose arañazos, picaduras, etc. Aunque existen variaciones de acabado final de cada una de las piezas, la rugosimetría permite determinar un importante desgaste en la superficie de la moneda de 2003, después de ocho años de circulación, que no es observada en la moneda de reciente puesta en circulación. Así, los índices de rugosimetría son más bajos en la pieza de 2003, y sobre todo puede apreciarse en el perfil de esta moneda, comparada con la de 2011, siendo la diferencia en alturas entre el punto más bajo y el más alto de la rugosidad de 138 μm , mientras que en la moneda de 2011 es de 192 μm . Igualmente, en la moneda de 2011 se aprecia un perfil más anguloso, mientras que el de la de 2003 tiene una morfología más redondeada indicándonos un importante proceso de desgaste por el uso.
- Pintura: en la figura 10b se muestran los trazos del pincel utilizado en una pintura al óleo. Pueden apreciarse tres zonas bien diferenciadas, que corresponden a diferentes tonos y que es debido a una aplicación de la pintura de forma distinta. La pintura ha sido aplicada con un pincel con una sola pasada. Posteriormente, se aplicó la pintura que recubre a la anterior con una pincelada más fina y «aglutinada» en el contacto con las pinceladas anteriores. Por último, se aplicó la pintura de tonos más rojizos en forma masiva proporcionando el mayor espesor de la sección estudiada, que llega a 300 μm . Pero

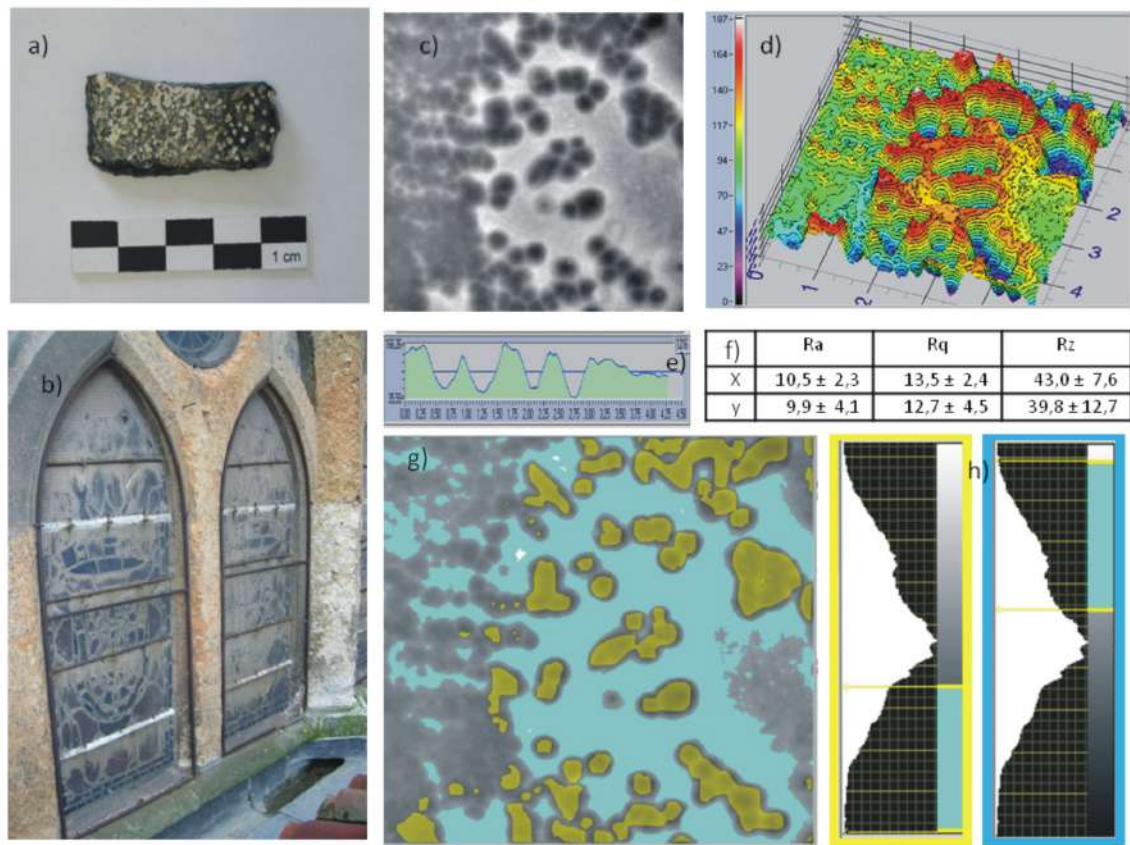


Figura 8. Estudio en una vidriera de la catedral de León: a y b) fragmento estudiado de la vidriera; c) imagen visual del sector estudiado; d) rugosidad en 3D; e) perfil de rugosidad realizado sobre la línea roja en imagen c; f) parámetros de rugosidad; g) identificación de la superficie afectada por deterioros por cráteres, coalescencia de cráteres y superficie sin alterar; h) histogramas de distribución de la rugosidad diferenciando las superficies afectadas por cada tipo de deterioro.

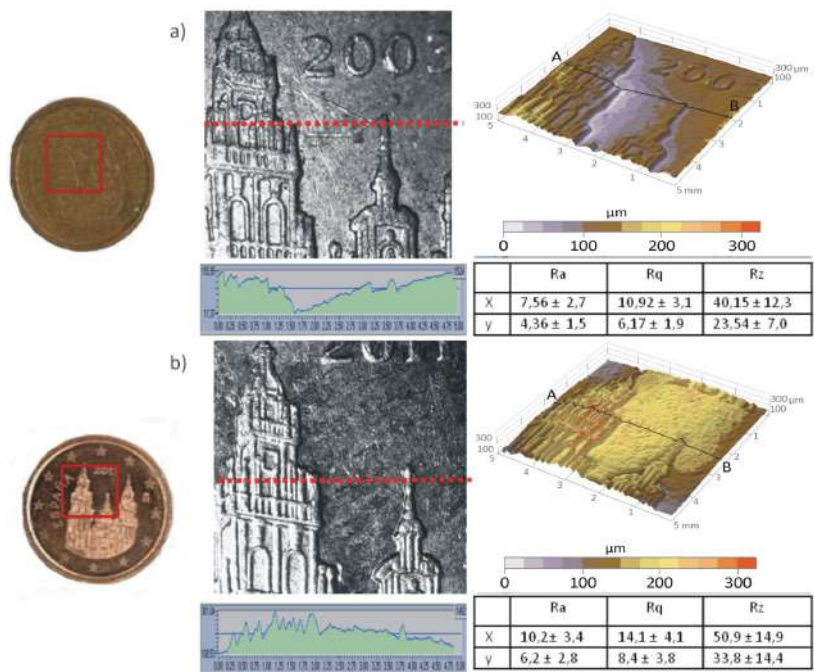


Figura 9. Rugosimetría en moneda de un céntimo de euro: a) acuñada en 2003; b) acuñada en 2011.

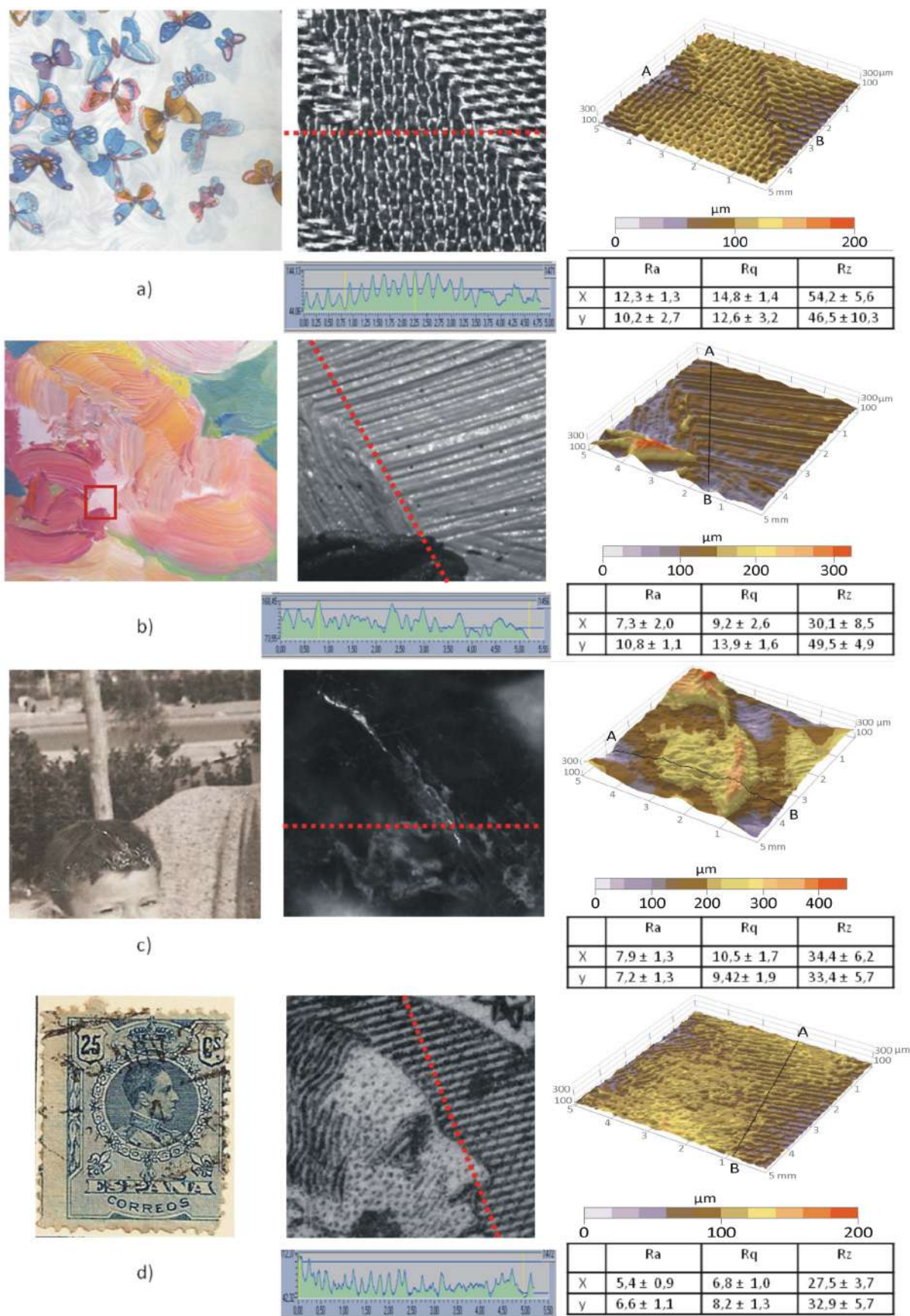


Figura 10. Rugosimetría de diferentes materiales: a) tejido; b) pintura; c) fotografía y d) sello postal.

el uso de la rugosimetría puede aportar información sobre las patologías en la pintura, como son: craquelado, decoloración, pérdida de barniz, etc. Igualmente puede identificar repintes no originales, e incluso definir la autenticidad de las obras al comparar la técnica utilizada por el artista en otras obras.

- Material fotográfico: en el deterioro de obras fotográficas, tanto de negativos, como de positivos, permite establecer el grado de deterioro y las capas que han sido afectadas. En la figura 10c se muestra un doblez (¿pliegue?) de una fotografía en blanco y negro de la primera mitad del siglo xx. Este pliegue permite aflorar al sustrato del papel fotográfico, y genera un hinchamiento en sus zonas de borde acelerando su proceso de deterioro.
- Papel: el papel impreso también se deteriora y pierde la calidad de sus tintas. La rugosimetría permite conocer algunos de los procesos de deterioro, no sólo físicos, sino también químicos por la degradación de sus compuestos. Define también cómo se realiza la degradación de las tintas y cómo afecta al soporte. Pero un valor importante es la información que puede dar sobre el espesor de las tintas utilizadas, e incluso definir la dirección de los trazos realizados durante la escritura. Esta técnica es muy útil sobre cualquier tipo de soporte. En la figura 10d se muestra un sello postal de 1909 de 25 céntimos de peseta de Alfonso XIII. Puede apreciarse el relieve de las tintas utilizadas para su impresión, que se mantienen con muy buena calidad.
- Piedra: uno de los ejemplos del estudio de la rugosimetría en piedra es el llevado a cabo por Fort *et al.* (2013) en el estudio de parte de las esculturas de la Edad de Hierro, encontradas en el Cerrillo Blanco de Porcuna (Jaén) y que se encuentran en el Museo Arqueológico de Jaén. Algunas de estas esculturas presentan incisiones que se han interpretado como marcas de escultor (fig. 11). El empleo del rugosímetro óptico 3D permitió establecer que las marcas realizadas en varias de las piezas estaban efectuadas con el mismo tipo de herramienta y con el mismo tipo de técnica de grabado, por lo que parece que se trata de un mismo taller; sin embargo, las diferencias grafológicas apuntaban a la existencia de distintos autores. Para realizar este estudio, además de medir con el rugosímetro las marcas de las piezas estudiadas, se efectuaron en una pieza de la misma roca una serie de incisiones con un punzón con el fin de comparar estas marcas con las presentes en las muestras, lo cual permitió corroborar los resultados expuestos anteriormente. Como resultado se identificó que el trazado se realizó por medio de un elemento puntiagudo de un diámetro de 0,7 mm, diferenciándolo de otras inscripciones que fueron realizadas con un instrumento puntiagudo de 0,5 mm.

Pero el empleo de la rugosimetría sobre piedra no sólo es útil para la caracterización de marcas escultóricas, sino que también es posible su empleo, en combinación con otras técnicas, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) o la espectrofotometría, para la evaluación de métodos de limpieza de una fachada. Un ejemplo de esto es el estudio llevado a cabo por Vázquez-Calvo *et al.* (2012) en la valoración de las pruebas de limpieza del claustro de la catedral de Segovia. Los métodos de limpieza a evaluar habían sido previamente determinados en proyecto. Se trataba de evaluar la limpieza mediante proyección de partículas en seco utilizando distintos tipos de partículas –en cuanto a composición y dimensión–, y diferentes presiones. Este tipo de limpieza además de eliminar los depósitos de suciedad puede dejar una superficie más rugosa, lo que potenciaría la posterior acumulación de suciedad y retención de agua debido al incremento de la superficie específica. Por otra parte, el método de limpieza podría ser tan agresivo que suavizara la superficie de la piedra (rebajando la rugosidad inicial) por una pérdida excesiva de material (incluyendo, además de los depósitos de suciedad, parte del sustrato pétreo).

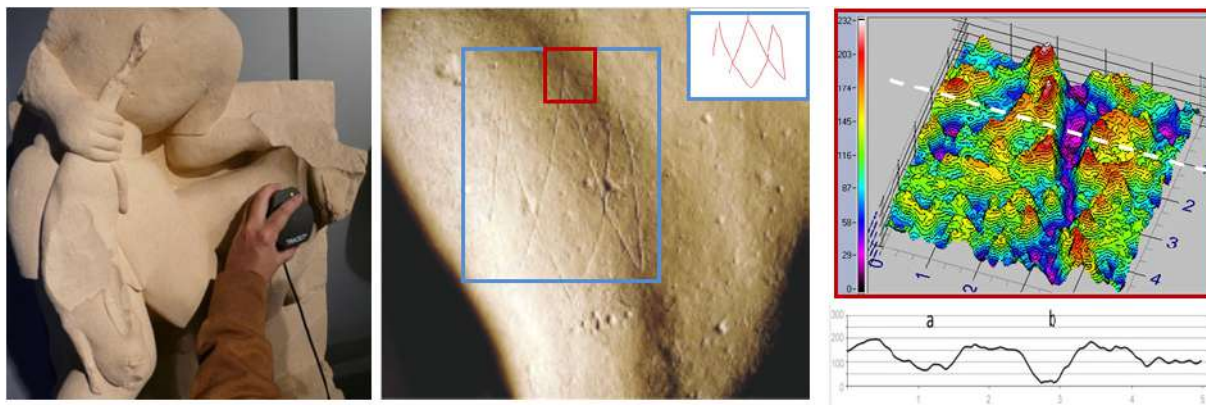


Figura 11. Rugosimetría en la escultura procedente de Cerrillo Blanco, Jaén, denominada «Cazador y liebre» expuesta en el Museo Arqueológico de Jaén.

Por medio de la rugosimetría, y en combinación con las técnicas anteriormente mencionadas, se pudo determinar el método más efectivo y menos agresivo con el substrato para cada una de las dos variedades de piedra estudiadas en el claustro. Así mismo, y dado que las variedades de piedra se encontraban entremezcladas en los paramentos, se propuso un método que aunque podía no ser el óptimo definido para cada una de las variedades por separado, sí que se podía usar de forma conjunta sin dañar el material y con un grado de efectividad adecuado. En la figura 12 se puede observar un ejemplo en el que el método de limpieza ha sido demasiado agresivo. En la imagen obtenida después de la limpieza se puede observar la formación de cráteres de impacto en la superficie de la piedra.

También la técnica de rugosimetría óptica permite de una forma rápida determinar la capacidad de recubrimiento de los tratamientos de consolidación y de protección de la superficie de los materiales (López Arce *et al.*, 2010). Como ejemplo se puede indicar la figura 13, en la que se analiza el comportamiento de nanopartículas de hidróxido de calcio sobre una roca dolomítica, utilizada en el patrimonio construido de monumentos de la Comunidad de Madrid (dolomía de Redueña). Puede apreciarse cómo el perfil de la rugosidad es modificado por el depósito del consolidante sobre la superficie del material. Este consolidante recubre de forma homogénea la superficie con un espesor del tratamiento próximo a los 50 μm , aunque en las zonas de mayor porosidad no llega a recubrirla completamente. Aunque las técnicas ORR no están diseñadas para determinar la rugosidad a nivel de nanopartículas, estos materiales, durante el proceso de carbonatación, tienden a aglomerarse alcanzando valores de varios micrómetros

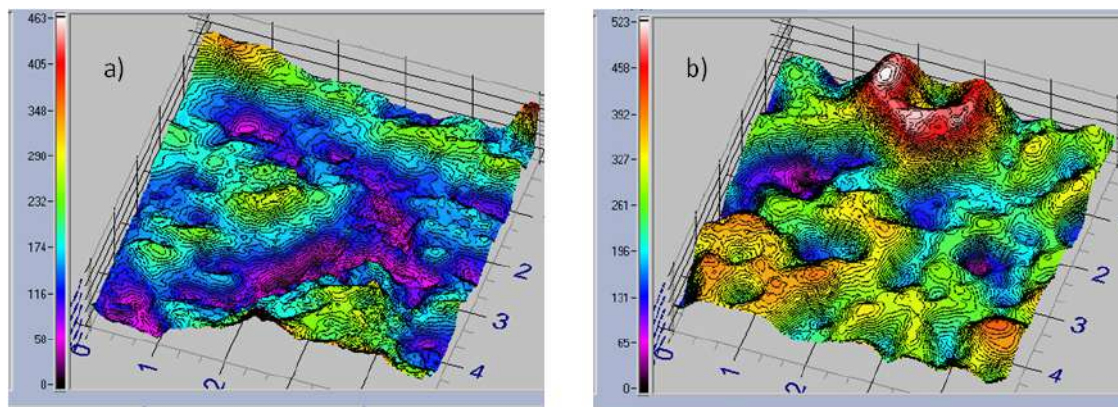


Figura 12. Análisis de la modificación de la rugosidad superficial de la piedra en pruebas de limpieza por medio de proyección de microesferas la catedral de Segovia: a) antes de la limpieza; b) después de la limpieza.

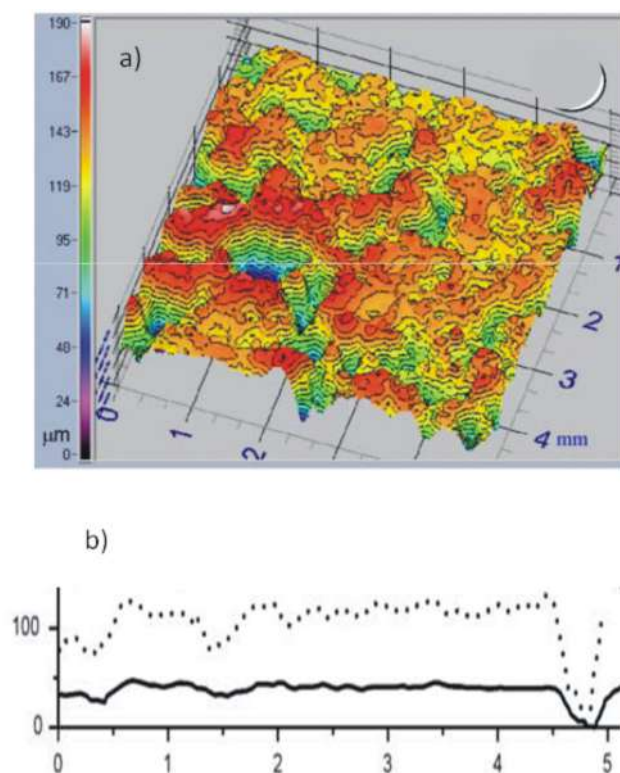


Figura 13. a) Representación 3D de la rugosidad en la superficie de la piedra de Redueña después del tratamiento de consolidación; b) perfil de la rugosidad: línea continua: antes de la consolidación; línea de puntos: después de la consolidación.

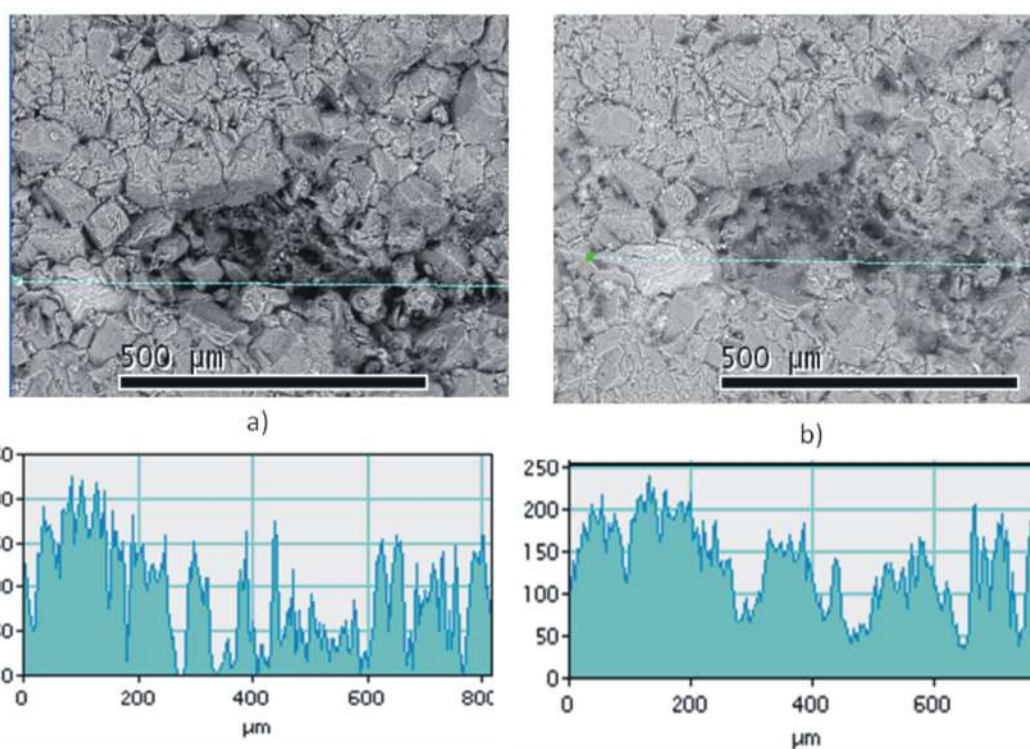


Figura 14. Rugosimetría por medio de SEM antes (a) y después (b) del tratamiento de consolidación.

(Gómez-Villalba *et al.*, 2011a), lo que puede favorecer el proceso de consolidación en función de la porosidad de los materiales que se quieran consolidar. También estos estudios pueden realizarse con el apoyo de técnicas SEM, lo que permite visualizar, con más detalle el proceso de consolidación de estos materiales. En la figura 14 se muestra el efecto del consolidante que tiende a cerrar la porosidad de la roca en su superficie, predominantemente en el intervalo de tamaños de poro entre 30 y 110 μm de diámetro, aunque no rellena los poros mayores de 110 μm de diámetro (Gómez-Villalba *et al.*, 2011b).

Conclusiones

La rugosimetría es una técnica que tiene una gran aplicación en el estudio del patrimonio mueble e inmueble que permite utilizar equipamientos portátiles y de no contacto, teniendo muchas más ventajas que los perfilómetros tradicionales. Los OSR pueden obtener representaciones 3D de la superficie, proporcionando información sobre la textura de los materiales y sobre todo sobre aspectos relacionados con su degradación. Además estas técnicas permiten valorar las diferentes técnicas de limpieza y de consolidación y protección que se realizan sobre los materiales. La técnica de rugosimetría tiene que estar acompañada de otras técnicas analíticas que permitan una visualización de la superficie como es la técnica SEM.

Agradecimientos

A los programas Geomateriales (S2009/MAT-1629) y CONSOLIDER-TCP (CSD2007-0058) y a la financiación del grupo de investigación de la UCM: Alteración y Conservación de los materiales pétreos del Patrimonio (ref. 921349) perteneciente al CEI-Moncloa. Agradecemos al grupo CERVITRUM del centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC y al grupo de Óptica Aplicada de la EU de Óptica de la UCM el habernos facilitado poder realizar medidas de rugosimetría en vidrios y pinturas al óleo.

Bibliografía

- AIRES-BARROS, L.; MAURICIO A., y FIGUEIREDO C. (2001): «Profilometry and image application to in situ study of monuments stone decay problems», en *The 3rd International Symposium on The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. 1994. Venice: Soprintendenza ai Beni Culturali e Storici di Venezia, pp. 19-24.
- ARRANZ, G.; PALACIO, L.; PRÁDANOS, P., y HERNÁNDEZ A. (2004): «Estudio de la modificación de la microestructura de polímeros porosos por metalización mediante STM y AFM», en *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, n.º 43, 2, pp. 337-339.
- AUCOUTURIER, M., y DARQUE-CERETTI, E. (2007): «The surface of cultural heritage artefacts: physicochemical investigations for their knowledge and their conservation», en *Chemical Society*, n.º 36, pp. 1605-1620.
- BAI, C. (1999): *Scanning Tunneling Microscopy and Its Applications*, segunda edición. Berlin: Shanghai Scientific & Technical Publishers.
- BINNIG, G., y ROHRER H. (1983): «Scanning tunneling microscopy», en *Surface Science* 126, pp. 236-244.
- CARMONA, N.; VILLEGAS, M. A., y FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M. (2006): «Study of glasses with grisailles from historic stained glass windows of the Cathedral of León (Spain)», en *Applied Surface Science*, n.º 252, 16, pp. 5936-5945.

- CARMONA, N.; KOWAL, A.; RINCÓN, J. M., y VILLEGAS, M. A. (2010): «AFM assessment of the surface nano/microstructure on chemically damaged historical and model glasses», en *Materials Chemistry and Physics*, n.º 119, pp. 254-260.
- EZRATI J. J. (2008): «Two non-invasive techniques for the study of the surface of cultural heritage objects: optical measurement of micro roughness and backscattering spectro-colorimetry», en *Proceedings of Art 2008-09th International Conference on NDT of Art*. Jerusalem Israel, 25-30 May 2008.
- EUROPEAN AND GERMAN STANDARD DIN EN ISO: 3274 (1996): *Geometrical Product Specifications (GPS) -Surface texture: Profile method-Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* (ISO 3274: 1996).
- FORT, R.; VÁZQUEZ-CALVO, C.; CHAPA, T.; MARTÍNEZ NAVARRETE, I., y BELÉN, M. (2013): «An analytical study of Iberian Iron age stone sculptures and their surface marks», en *Archaeometry*, n.º 55(3), pp. 391-406.
- GÓMEZ-VILLALBA, L. S.; LÓPEZ-ARCE, P.; FORT GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M., y ZORNOZA, A. (2011a): «Aplicación de nanopartículas a la consolidación del patrimonio pétreo», en *La Ciencia y el Arte III. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 39-58.
- GÓMEZ-VILLALBA, L. S.; LÓPEZ-ARCE, P.; ZORNOZA, A.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M., y FORT, R. (2011b): «Evaluación del tratamiento de consolidación de dolomías mediante nanopartículas de hidróxido de calcio en condiciones de alta humedad relativa», en *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, n.º 50, 2, pp. 59-66.
- GRISSOM, C. A.; CHAROLA, A. E., y WASHOWIAK, M. J. (2000): «Measuring surface roughness on stone; back to basics», en *Studies in Conservation*, n.º 45, pp. 73-84.
- LÓPEZ-ARCE, P.; GÓMEZ-VILLALBA, L. S.; PINHO L.; FERNÁNDEZ-VALLE, M. E.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M., y FORT, R. (2010): «Influence of porosity and relative humidity on consolidation of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non-destructive techniques», en *Materials Characterization*, n.º 61, 2, pp. 168-184.
- MOROPOULOU, A.; HARALAMPOPOULOS, G.; TSIOURVA, T.; AUGER, F., y BIRGINE, J. M. (2003): «Artificial weathering and nondestructive tests for the performance evaluation of consolidation materials applied on porous stones», en *Materials and Structures*, n.º 36, pp. 210-217.
- MYSHKIN, N. K.; GRIGORIEV, A. Y. A., y KHOLODILOV, O. V. (1992): «Quantitative analysis of surface topography using scanning electron microscopy», en *Wear* 153, 1, pp. 119-133.
- NOTHEGGER, C., y DORNIGER, P. (2009): «3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation», en *Photogrammetrie- Fernerkundung-Geoinformation* 1, pp. 53-63.
- PÉREZ-MONTSERRAT, E. (2012): «Técnicas de caracterización petrológicas: Microscopía óptica de caracterización y difracción de rayos X», en *La conservación de los Geomateriales utilizados en el patrimonio*. Curso de postgrado CSIC, editores Geomateriales, pp. 23-30.
- OON, C. Y., y BHUSHAN, B. (1995): «Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM, and non-contact optical profiler», en *Wear*, n.º 190, pp. 76-88.
- PRICE, C. A. (1996): «Stone conservation: an overview of current research», en *Research in conservation*. Santa Monica: Cal. Getty Conservation Institute, XIII, 73p.
- ROS-YÁÑEZ, T.; HOUBAERT, Y., y MERTENS, A. (2001): «Characterization of TRIP-assisted multiphase steel surface topography by atomic force microscopy», en *Materials Characterization*, n.º 47, pp. 93-104.

- THOMAS, T. R. (1999): *Rough Surfaces*, segunda edición. London: Imperial College Press.
- TRINKS, I.; DÍAZ-ANDREU, M.; HOBBS, R. y SHARPE, K. E. (2005): «Digital Rock Art Recording: Visualising Petroglyphs using 3D Laser Scanning Data», en *Rock Art Research*, n.º 22, 2, pp. 131-139.
- VÁZQUEZ-CALVO, C.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M.; FORT, R.; y VARAS, M. J. (2012): «The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning», en *Journal of Geophysics and Engineering*, n.º 9, pp. 108-117.
- VICKERMAN, J. C., y GILMORE, I. S. (2009): «Surface Analysis: The Principal Technique», en *Wiley*. Chichester.

III. Proyectos de investigación

Conservación del patrimonio paleontológico. Criterios de intervención e innovaciones tecnológicas destinadas a su puesta en valor

Soledad Díaz

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
soledad.diaz@mecd.es

Manuel Blanco

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
rutiloblanco@gmail.com

Félix Pérez-Lorente

Universidad de La Rioja. Director Científico del Centro Paleontológico
felix.perez@unirioja.es

José Vicente Navarro

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
vicente.navarro@mecd.es

Josep Gisbert

Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza
gisbert@unizar.es

Raquel Ferrer

Escuela Taller de Restauración Paleontológica. FCPTD
rakelferrerb@hotmail.com

Daniel Ayala

Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis (FCPTD)
ayala@fundaciondinopolis.org

Pedro Pablo Pérez

Dacitec, S. L.
pedrogeol@terra.es

Resumen: Las provincias de La Rioja y Teruel poseen un rico y variado patrimonio paleontológico. Las actuaciones de preservación de dichos recursos requieren en numerosas ocasiones acometer intervenciones que presentan una metodología notablemente compleja, según el tipo de yacimiento o colección y del lugar en el cuál se encuentra. Su conservación exige establecer proyectos y metodologías de trabajo apropiadas (criterios y protocolos de actuación), además de elaborar estrategias que controlen y aseguren las condiciones ambientales y de exposición más adecuadas (sistemas limpieza, protección y mantenimiento) (figs. 1 y 2).

Este proyecto interdisciplinar surge de la necesidad de incrementar el conocimiento existente en la materia y en mejorar la conservación de los sustratos materiales que constituyen el patrimonio paleontológico.

Palabras clave: Patrimonio paleontológico, criterios de conservación y restauración, sistemas de monitorización (parámetros ambientales), limpieza (láser, proyección de micropartículas), protección.

Abstract: La Rioja and Teruel provinces have a rich and broad Paleontological Heritage. The conservation of these resources requires in many occasions the undertaking of intervention projects that have a remarkably complex methodology, according to the type of site or collection and the place where it is. Their conservation demands to establish appropriate intervention methodologies (performance criteria and protocols) and the development of strategies to control and ensure adequate environmental and exhibition conditions (monitoring, cleaning and protection systems). This interdisciplinary project aims to increase the existing knowledge on the subject and to enhance the conservation of the Paleontological Heritage.

Keywords: Paleontological Heritage, conservation criteria, monitoring (environmental parameters), cleaning (laser, blasting), protection systems.



Figuras 1 y 2. Icnitas de dinosaurio del yacimiento de Peñaportillo-La Rioja (Edad Cretácico Inferior, aproximadamente hace 130-110 Ma). Izquierda, huellas de un dinosaurio herbívoro, probablemente *Stegosaurus*, que en su desplazamiento dejó además marcas de la cola. Derecha, recreación tridimensional de un *Stegosaurus*. Fotografías: Félix Pérez-Lorente.

Introducción

Nuestro país tiene un rico y variado patrimonio paleontológico, clave para el conocimiento de la evolución de todos los seres vivos; por ello la conservación de los sitios y los elementos asociados resulta fundamental. En los últimos años, se ha observado que este tipo de patrimonio actúa como potenciador de las actividades económicas en zonas tradicionalmente deprimidas, afectando esta mejora a todas las tramas del tejido social, aportando un significativo aumento de la tasa de empleo en varias actividades relacionadas con la cultura y el sector servicios (figs. 3).

Las actuaciones de preservación de dichos recursos requieren en numerosas ocasiones acometer proyectos de intervención que presentan una metodología notablemente compleja, puesto que confluyen múltiples factores de alteración que inciden directamente en su deterioro. Hay que abordar proyectos globales que abarcan extensiones geográficas considerables, la exposición medioambiental constante de los sitios, su variada composición geológica y morfológica, el furtivismo, etc. En definitiva, la conservación de los yacimientos y colecciones de material paleontológico exige elaborar estrategias que contemplen el desarrollo de sistemas que controlen y aseguren las condiciones ambientales y de entorno más adecuadas, además de establecer metodologías de intervención apropiadas según el tipo de yacimiento o colección y del lugar en el cuál se encuentra.

En las provincias de La Rioja y Teruel existe un gran número de yacimientos paleontológicos relevantes por su interés geológico y natural, destacados por su importancia científica (Pérez-Lorente, 1999; Royo *et al.*, 2006, etc.) y a su vez como recurso turístico y didáctico (Alcalá, 2011 y Cobos, 2011). Los aproximadamente 200 yacimientos de huellas de dinosaurio censados en La Rioja (con más de 10.000 huellas) se encuentran repartidos en 20 términos municipales, distribuidos, a su vez, en tres grandes rutas: Leza-Jubera, Cidacos y Alhama-Linares. En el año 1997, para la gestión territorial de dichos recursos se fundan por iniciativa del Gobierno de la Rioja y la Fundación Caja Rioja la Fundación Patrimonio Paleontológico de la Rioja y su centro



Figura 3. Icnitas de dinosaurio del yacimiento de Los Cayos-La Rioja (Edad Cretácico Inferior, aproximadamente hace 130-110 Ma). Rastros de dinosaurios carnívoros (Terópodos) que se desplazaban sobre sus patas traseras. Fotografías: Félix Pérez-Lorente.

neurálgico de actividad, el Centro Paleontológico de Enciso. En diciembre de 2011 la Fundación Patrimonio Paleontológico desapareció, y las tareas científicas han pasado a coordinarse mediante un convenio entre la Universidad y el Gobierno de La Rioja. La provincia de Teruel, con sus más de 2.000 yacimientos paleontológicos catalogados es uno de los registros fósiles más completos de Europa. Este gran patrimonio paleontológico turolense se está gestionando a través del proyecto Dinópolis (Parque y Fundación) en la propia ciudad de Teruel y en varios municipios turolenses como Rubielos de Mora, Galve, Peñarroya de Tastavins, Castellote, Albaracín y Riodeva, donde ya se cuenta con exposiciones paleontológicas formando parte todas ellas del Museo Aragonés de Paleontología. Además, Teruel es la única ciudad de nuestro país en la que se desarrolla una escuela taller de restauración paleontológica, cuyo principal objetivo es formar a restauradores-conservadores en el ámbito de la preparación de fósiles.

El proyecto interdisciplinar que pretendemos llevar a cabo surge de la coordinación de instituciones del sector público y privado, con la vocación de incrementar el conocimiento existente en la materia y mejorar la conservación de los materiales que constituyen el patrimonio paleontológico.

Antecedentes

Podemos considerar como punto de partida la vigente candidatura de las «Icnitas de dinosaurios de la Península Ibérica» a ser inscritas en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO. Iniciativa hispano portuguesa para que 11 yacimientos formen parte del Patrimonio Mundial de la UNESCO (IDPI-FCPTD, 2009). Poseen un valor paleontológico excepcional, alrededor de 230 afloramientos y más de 22.000 huellas, por mostrar la sucesión faunística de los últimos cien millones de años del Mesozoico (Jurásico Medio-Cretácico Superior). La candidatura ha sido promovida por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, y es un ejemplo de coordinación entre las administraciones públicas (regionales y centrales) y distintas instituciones. Constatar que varios participantes y colaboradores de este proyecto (Fundación Patrimonio Paleontológico y FCPTD –Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis–) contribuyeron a la elaboración de la documentación para su candidatura.



Figuras 4 y 5. Icnitas de dinosaurio del yacimiento de Valdecevilla-La Rioja (Edad Cretácico Inferior, aproximadamente hace 130-110 Ma). Izquierda, espectacular huella de un dinosaurio carnívoro bípedo (Terópodo), de la cual se deduce que tenía los dedos largos, delgados y terminados en uñas afiladas. Derecha, marcas dejadas por un dinosaurio que caminaba a cuatro patas, las patas traseras dejaban marcas grandes y redondeadas y las delanteras pequeñas y con forma de media luna. Las huellas pertenecen a un *Braquiosaurio*, dinosaurio herbívoro muy grande y pesado (Saurópodo). Fotografías: Félix Pérez-Lorente.

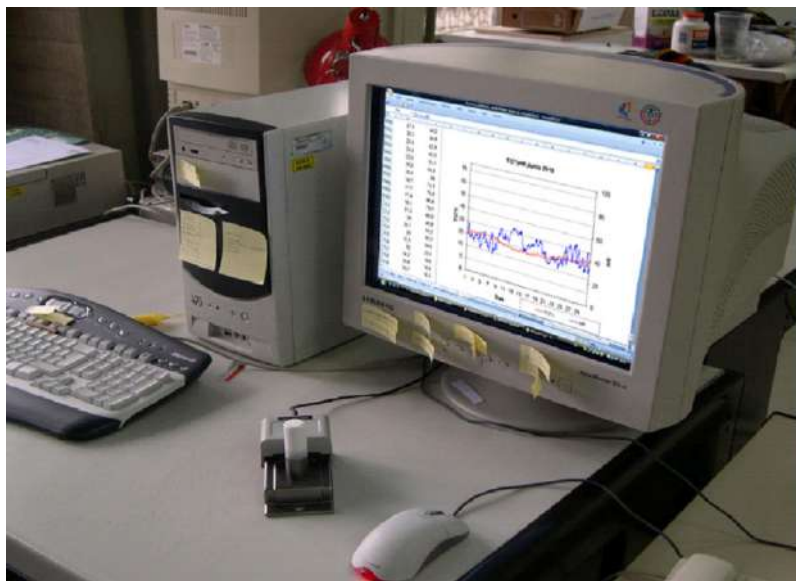


Figura 6. Monitorización. Imagen en la que se muestra la descarga de la información registrada por un sensor de temperatura (T ; $^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (HR%) en un ordenador, y la representación gráfica de los datos recogidos (pantalla).

Es necesario decir que tradicionalmente el material fósil extraído *in situ* ha sido tratado por paleontólogos con técnicas denominadas «preparación», siempre con el fin de obtener los fósiles, pero con intervenciones que han podido ser más o menos acertadas (a veces bastante agresivas). A partir de la Ley 16/1985, de 2 de junio, del Patrimonio Histórico Español, en la que específicamente se articula la conservación y protección del patrimonio paleontológico, se requiere a técnicos conservadores-restauradores para aplicar tratamientos de conservación más efectivos y estables. Pero la realidad es que las metodologías existentes, tanto para las preparaciones como para la conservación de yacimientos y materiales arqueológicos, no resultan específicas para esta práctica. La escasísima bibliografía existente en la materia (Pérez-Lorente, 2000; Baeza *et al.*, 2005 y Pérez-Lorente *et al.*, 2007) muestra la necesidad de fomentar la investigación en este campo, el de la conservación de yacimientos y materiales paleontológicos, siempre bajo la supervisión de un organismo competente y de referencia a nivel nacional e internacional en el ámbito de la conservación como es el IPCE, cuyos profesionales poseen una dilatada experiencia en la conservación de materiales arqueológicos y piedra monumental (Díaz, 1989; 2004; Esbert *et al.*, 2003 y Navarro, 2007) (fig. 6).

En abril de 2011, el IPCE organizó en la Escuela de Patrimonio Histórico de Nájera (La Rioja) el primer curso sobre «Conservación y Restauración de Yacimientos y Materiales Paleontológicos», que ha tenido muy buena acogida y proyección a nivel nacional e internacional. Fue en este curso donde se gestó el germen del proyecto que aquí se presenta; en su segunda edición, celebrada en septiembre de 2012, se potenciaron las sesiones prácticas (docencia impartida a cargo de los profesionales del IPCE, del IGME, de la Escuela Taller de Restauración Paleontológica y del Laboratorio de Dinópolis), y se realizó una reunión entre especialistas sobre la materia (fig. 7).

Objetivos

El objetivo final de este proyecto es contribuir a la preservación del patrimonio paleontológico mediante la evaluación del conocimiento existente en el ámbito de la conservación y restauración de los yacimientos y materiales paleontológicos, junto con la implantación de mejoras



Figura 7. Cartel promocional de la primera edición del curso.

y avances técnicos en las metodologías utilizadas para su conservación. Nos planteamos como objetivos fundamentales: 1. La elaboración y unificación de criterios y protocolos de actuación; 2. La implantación de innovaciones tecnológicas en lo que compete a sistemas de limpieza y a la monitorización (parámetros ambientales) y protección de espacios, tanto en los yacimientos como en las colecciones expuestas en salas de museos o almacenadas.

Metodología

Alcanzaremos los objetivos concretos que nos hemos planteado abordando el proyecto desde un planteamiento científico, interdisciplinar e integral, mediante la realización de reuniones entre especialistas, estudios de laboratorio y ejecuciones *in situ*.

Para el primer propósito pretendemos establecer desde la Universidad de La Rioja, la

FCPTD (Aragón), el IPCE (Secretaría de Estado de Cultura), y los responsables de las Comunidades Autónomas implicadas, un corpus sobre criterios de conservación y restauración del patrimonio paleontológico, que incluya aspectos como: prospección, excavación y protección de los yacimientos; conservación y restauración de material paleontológico; manipulación de los restos almacenados y/o musealizados, etc. Dicho corpus se materializará con la edición de una publicación que recoja los criterios, métodos y protocolos de actuación en la conservación y restauración del patrimonio paleontológico.

Para el segundo, por un lado, se realizará una investigación sobre nuevos productos y sistemas de limpieza de restos paleontológicos que contempla los siguientes aspectos fundamentales: evaluación de los sistemas de limpieza láser (Brunetto, 2000; Cooper, 2005), limpieza mediante chorro de micropartículas abrasivas (Iglesias *et al.*, 2006) y la aplicación mecanizada de distintos apósitos destinados a la limpieza química o a la desalación (Gisbert *et al.*, 2002 y Blanco *et al.*, 2010). Por otro lado, seleccionaremos aquellos recursos (yacimientos y colecciones), que se consideren más relevantes para estudiar sus condiciones actuales de exposición o almacenaje (estado de conservación, factores de alteración, parámetros ambientales, instalaciones y sistemas de protección, etc.) y sugerir posteriormente posibles mejoras técnicas que favorezcan su protección y conservación.

Conclusiones

Si se tiene en cuenta la importancia que encierran los yacimientos paleontológicos de nuestro país, como recurso natural, científico y turístico, comprenderemos la relevancia del desarrollo de las tareas que en este proyecto se plantean. Estimamos oportuno insistir en la necesidad de vertebrar desde un organismo competente las propuestas metodológicas e instrumentales que permitan conservar durante el mayor tiempo posible, en beneficio de las generaciones futuras, tan excepcionales testigos de la fauna y flora del pasado de nuestro planeta. El registro de la historia de la vida en la tierra exige actuaciones como las demandas, en pro de su conservación

y difusión como elemento generador de riqueza para las comarcas donde se encuentran. La presente iniciativa consiste en una investigación específica orientada al desarrollo de metodologías y técnicas para la conservación y gestión del patrimonio paleontológico, abordando los planteamientos desde una base conceptual, teórica y técnica, según los articulados legislativos y la deontología profesional vigentes. El compromiso de procurar los últimos conocimientos y avances tecnológicos del ámbito de la conservación del patrimonio histórico, con el objetivo de aplicarlos en este campo y obtener resultados afines. El proyecto mejorará los conocimientos de los mecanismos de degradación *in situ*, y determinará la eficacia de utilizar técnicas innovadoras para su conservación, dotando a los especialistas en esta área, de otra herramienta y nuevos recursos para su protección. Recalcar de nuevo que las actividades económicas relacionadas con el patrimonio, tales como el turismo cultural, contribuyen de manera muy significativa a la economía de nuestro país. Conservar correctamente este patrimonio cultural es, por lo tanto, imprescindible para el desarrollo sostenible de este sector clave. Investigar y transmitir el conocimiento generado es la única forma de abordar de manera eficaz (y eficiente) los retos y problemas que esta conservación plantea. En este caso específico, el patrimonio paleontológico ocupa grandes zonas geográficas peninsulares, muchas de ellas tradicionalmente deprimidas, y su conservación, genera beneficios sociales, culturales y económicos indiscutibles, de ahí la necesidad imperante de su conservación. La investigación científica aplicada al estudio y protección del patrimonio está siendo reconocida a nivel europeo como uno de los temas prioritarios de investigación, como lo demuestra la puesta en marcha de la «Joint Programming Initiative on Cultural Heritage and Global Change: a new challenge for Europe». A nivel nacional, el interés en la investigación en este campo ha recibido también un impulso significativo con acciones como la puesta en marcha por parte del Instituto del Patrimonio Cultural de España (Secretaría de Estado de Cultura) de un Plan Nacional de Investigación en Conservación del Patrimonio. En todos estos ámbitos, se reconoce como uno de los temas prioritarios el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías, o la adaptación de otros procedentes de otros ámbitos, para mejorar el diagnóstico, análisis y conservación del patrimonio cultural. El presente proyecto encaja perfectamente dentro de estas líneas temáticas, y el beneficio del mismo es, además de la contribución general al conocimiento, un avance hacia una mejor conservación del patrimonio cultural (figs. 8 y 9).



Figuras 8 y 9. Izquierda, detalle de los metacarpos de la mano izquierda de *Turiasaurus* en el yacimiento Barrihonda-El Humero (Teruel). Derecha, pie derecho de *Turiasaurus riodevensis*. El *Turiasaurus riodevensis* es el primer Saurópodo primitivo gigante encontrado hasta la fecha en el mundo, desarrolló una masa corporal de casi 50 toneladas y tenía más de 30 metros de longitud. Vivió entre hace unos 143 y 147 millones de años, intervalo en el que se incluye el límite Jurásico-Cretácico. Fotografías: cortesía de Luís Alcalá.

Agradecimientos

A todas aquellas personas que participarán en este proyecto, doña Marián del Egido, doña Ana González, don Andrés Santos, don Eleuterio Baeza y don Manuel Ángel Iglesias Campos. A don Alfonso Muñoz Cosme, Subdirector General del Instituto de Patrimonio Cultural de España, y al doctor don Luis Alcalá Martínez, Director Gerente de la Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis, don Javier Callizo Director General de Patrimonio de la DGA, por apoyar y promover esta iniciativa. Por último, a las empresas MPA, S. L., y Dacitec, S. L., por su colaboración y apoyo logístico.

Bibliografía

- ABERASTURI, A.; FERRER, R.; CASAS, E.; CIRUGEDA, L. y DEL FRESNO, A. (2008): «Yacimiento “El Pozo” (El Castellar, Teruel): Realización de moldes y réplicas de huellas de dinosaurio», en *Kausis*, n.º 5. Revista de la Escuela Taller de Restauración de Aragón II, pp. 77-84.
- ALCALÁ, L. (2011): «Territorio Dinópolis», en *Her&Mus*, 3 (3), pp. 96-106.
- AYALA, D.; ABERASTURE, A.; ESPÍLEZ, E.; FIERRO, I.; GONZÁLEZ, A.; MAMPEL, I., y LUQUE, L. (2007): *El laboratorio de Paleontología: Aplicación de técnicas de laboratorio de los dinosaurios de Teruel*. Territorio paleontológico. ¡Fundamental! FCPT.D, pp. 25-51.
- BAEZA, E., y MENÉNDEZ, S. (2005): «Conservación y restauración de ammonites piritizados del museo geominero (IGME, Madrid)», en *Actas del II Congreso del Geic: Investigación en Conservación y Restauración*. Barcelona.
- BALLANO, V.; BELLOC, A.; FRAGUAS, S., y GONZÁLEZ, L. (2008): «Intervención de conservación en el yacimiento de icnitas de dinosaurio “El Pozo” (El Castellar, Teruel)» en *Kausis*, n.º 5. Revista de la Escuela Taller de Restauración de Aragón II, pp. 69-76.
- BLANCO, M.; BUJ, O.; COLUCCI, F.; GISBERT, J.; LÓPEZ, P.; FRANCO, B.; MATEOS, I., y NAVARRO, P. (2010): «Estudio y cartografía de sales en paramentos pétreos: innovaciones tecnológicas con este propósito», en *La Ciencia y el Arte II*, pp. 162-170. Ministerio de Cultura.
- BRUNETTO, A. (2000): *L'utilizzo della strumentazione laser per la pulitura delle superfici nei manufatti artistici*. Editorial Il prato.
- COBOS, A. (2011): *Los dinosaurios de Teruel como recurso para el desarrollo territorial*. Tesis doctoral inédita. Universidad del País Vasco, 584p.
- COOPER, M. (2005): *Introducción a la limpieza con láseres*. Madrid: ISTMO, Madrid.
- DÍAZ MARTÍNEZ, S. (1989): «Métodos de extracción de restos óseos», en *Cuadernos del Juncal*, 1. Alcalá de Henares. (2004): «Técnicas de Conservación y Restauración en los Yacimientos Arqueológicos», en *Proyectos*, vol. 3. Murcia.
- ESBERT *et al.* (2003): «Criterios de intervención en materiales pétreos», en *Bienes Culturales*, n.º 2 (anexo). Madrid: Ministerio de Cultura.
- GISBERT, J.; FRANCO, B.; MATEOS, I., y NAVARRO, P. (2002): «Deterioro de los materiales pétreos por sales: Cinética del proceso, cartografía y métodos de extracción», en *Actas: I Congreso GEIIC*. Valencia, pp 287-294.
- IDPI-FCPTD (2009): *Icnitas de Dinosaurios de la Península Ibérica, World Heritage Candidacy*. Ministerio de Cultura de España y Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional de Portugal, 460 p.

- IGLESIAS, M. *et al.* (2006): «Low-pressure abrasive cleaning of historic building materials», en *Heritage, Weathering and Conservation. Proceedings of the International Conference*, vols. 1 y 2. Edición de Fort *et al.* London: Taylor & Francis Group.
- NAVARRO, J. V. (2007): «Principales técnicas de laboratorio aplicables al estudio de los materiales pétreos», en *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una Conservación Sostenible del Patrimonio Pétreo*, pp. 139-149.
- PÉREZ-LORENTE, F. (1999): «Patrimonio y valoración de yacimientos paleontológicos», en *IV Sesión científica de la Sociedad para la defensa de Patrimonio Geológico y Minero*, pp. 5-18.
- (2000): «Experiencias de Geoconservación en La Rioja», en *Patrimonio Geológico y Gestión*. Edición de D. Barettino, W. A. P. Wimbledon y E. Gallego. Madrid: Instituto Tecnológico y Geominero de España, pp. 179-196.
- (2000): «Restauración y mantenimiento en los yacimientos de la Era del Peladillo 1 y 5 (Igea), La Virgen del Campo y Las Losas (Enciso). Prospección en la Escurquilla y camino de Hornillos a Larriba. Limpieza y estudio del yacimiento del Contadero (Torremuña)», en *Estrato*, 11, pp. 98-102.
- PÉREZ-LORENTE, F.; BOUTAKIOUT, M.; ENNADIFI, Y.; CARO, S.; HADRI, M., y NOURI, J. (2007): «Dinosaur footprints in Central High-Atlas: ichnodiversity, restoration and valorization», en *Fisrt. MAPG International convection, conference and exhibition*. Marrakech, p. 137.
- RIXON, E. (1976): *Fossil Animal Remains: Their Preparation and Conservation*. Londres: Athlone Press. N.
- ROYO, R.; TORRES, A., y ALCALÁ, L. (2006): «A giant european dinosaur and a new sauropod clade», en *Science*, vol. 314, pp. 1925-1927.
- (2009): «Turiasaurus riodevensis: el gigante europeo», en *Investigación y Ciencia*, n.º junio, pp. 50-57.

Efectos derivados de las intervenciones de conservación y restauración aplicados sobre material pétreo en el Conjunto Arqueológico de Mérida

Avance de investigación

Natalia Pérez Ema

Becaria Predoctoral PICATA (CEI Campus Moncloa UCM-UPM, Madrid)
natalia.perez@upm.es

Rosa Bustamante Montoro

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Madrid

Mónica Álvarez de Buergo

CSIC, Instituto de Geociencias (CSIC, UCM). Departamento de Geomateriales

Resumen: Las alteraciones derivadas de los trabajos de restauración constituyen un campo de estudio para evaluar las intervenciones realizadas en el patrimonio cultural, en particular sobre yacimientos arqueológicos, puesto que se desconocen, en muchos casos, los efectos de dichas intervenciones a largo plazo. Los estudios sobre durabilidad y eficacia de los tratamientos sobre material pétreo (principalmente de consolidación) forman un campo de investigación prolífico y en notable desarrollo en las últimas décadas, no obstante centrado principalmente en la conservación de edificios históricos. Las particulares características del material arqueológico conservado *in situ* dificultan la extrapolación de resultados, requiriendo estudios propios, muy escasos hasta la fecha. El caso de Mérida es especialmente interesante a la hora de valorar las intervenciones que, desde los años veinte del siglo pasado, se han ejecutado sobre los diversos bienes. En este trabajo se trata de presentar el proyecto de investigación que en este sentido se está desarrollando en el marco del CEI Moncloa (UCM-UPM).

Palabras clave: Conservación, tratamientos, alteración, piedra, Mérida.

Abstract: Decay resulting from the restoration works is a field of study to assess interventions in cultural heritage, archaeological sites in particular, since long-term mechanism of degradation are still poorly known. Studies in durability and effectiveness of treatments are a prolific area of research and considerable development in recent decades has been done, however mainly focused on the conservation of historic buildings. The particular features of archaeological material preserved on site preclude the extrapolation of results, requiring a different approach, limited studies has been carried out to date in this sense. Merida case study is especially interesting when assessing interventions, since there has been restoration works from 20's of last century to

date. The aim of this paper is to introduce the research project regarding this topic, within the framework of CEI Moncloa.

Keywords: Conservation, treatments, alteration, stone, Mérida.

Introducción

Los restauradores que se dedican a la conservación de yacimientos arqueológicos se enfrentan en numerosas ocasiones a la necesidad de intervenir sobre zonas ya restauradas donde bien el producto utilizado (limpieza, consolidación o protección), bien la metodología de aplicación, por la acción de los agentes naturales o por la acción antrópica directa e indirecta, ha derivado en la degradación del material pétreo original. La revisión de las intervenciones que se han ejecutado sobre un determinado bien es una tarea necesaria a la hora de realizar el estudio del estado de conservación. Sin embargo, no siempre existe información detallada sobre dichas actuaciones.

El proyecto de investigación que en la actualidad se desarrolla entre la ETSAM (UPM) y el Instituto de Geociencias (CISC-UCM) trata de precisar cuáles son los efectos, causas y mecanismos a medio y largo plazo, derivados de estos tratamientos. El Conjunto Arqueológico de Mérida ofrece la posibilidad de estudiar dichos efectos contando con un lapso de tiempo considerable, y con varios casos de estudio para la comparación y distinción de variables que influyen en la evolución del estado de conservación.

Conjunto Arqueológico de Mérida

Las excavaciones sistemáticas en Mérida comienzan en 1910 por parte de José Ramón Mélida y Maximiliano Macías en el teatro romano, donde en seguida plantearon la reconstrucción y puesta en valor del monumento (Álvarez Martínez, 2010) (fig.1). Progresivamente se fue interviniendo en los vestigios más monumentales como el Anfiteatro, Templo de Diana (previamente «engullido» por el palacio renacentista de los Corbos), el Circo o las diversas obras de ingeniería conservadas, para centrarse a partir de los años sesenta y setenta en la arqueología del mundo doméstico y funerario.

Los materiales constructivos utilizados por los romanos son comunes destacando principalmente materiales graníticos (Pizzo, 2010) y el mármol entre las piedras, y ladrillo como material cerámico conjuntamente con la obra de hormigón romano (*opus caementicium*). Por lo tanto, contamos con cierta homogeneidad en los materiales. También en las intervenciones realizadas, que en un primer momento siguen una metodología propia de la restauración arquitectónica (más que arqueológica), es decir, profusión en el uso de cemento Portland y hormigón armado en la reconstrucción de elementos estructurales, uso de resinas de alta resistencia (tipo Krauto©) en los sistemas de unión y anclaje, o la restitución de elementos con piedra artificial y/o natural. Destacan las labores de J. Menéndez-Pidal que dirigió los trabajos de restauración desde 1948 hasta los años setenta (Menéndez-Pidal, 1976), configurando la imagen actual de gran parte de los monumentos emeritenses. En las últimas décadas se ha intentado cumplir con el criterio de mínima intervención, alejándose de los grandes proyectos de restauración monumental para acercarse al de conservación preventiva, interviniendo sólo donde existe degradación manifiesta y procurando, en la medida de lo posible, el mantenimiento de los bienes



Figura 1. Reconstrucción del frente escénico del teatro romano de Mérida. Fotografía: Archivo Loty. Fototeca del IPCE.

ya intervenidos. En cuanto a los productos de restauración destaca el uso de resinas sintéticas (sobre todo sobre pintura mural), «agua de cal» y silicato de etilo para la consolidación general del material pétreo, así como el uso de morteros tradicionales sustituyendo los de cemento.

Objetivos

- a) Documentación, estudio y localización precisa de antiguas intervenciones en yacimientos seleccionados: teatro, Templo de Diana, Casa del Mitreo. Revisión y estado actual de las actuaciones de restauración realizadas sobre los casos de estudio a lo largo del siglo xx y primeros años del siglo xxi.
- b) Evaluación de las condiciones de durabilidad, efectividad o alteraciones producidas en su caso, en particular, de los tratamientos de consolidación.
- c) Análisis físico-químico para la determinación de los efectos derivados de la interacción de los productos de restauración con el sustrato original.
- d) Diagnóstico; establecimiento de las causas y mecanismos de degradación.

El fin último general es la validación, o desestimación, de estos tratamientos, lo cual nos permitiría un acercamiento al establecimiento de protocolos estandarizados de actuación y al cumplimiento realista del criterio de compatibilidad de materiales y mínima intervención. Paralelamente se trata de profundizar en el uso y aplicación de técnicas de análisis portátiles y no destructivas con el fin de fomentar los trabajos de seguimiento de las actuaciones de restauración y las mediciones *in situ*.

Plan de trabajo

1. Búsqueda bibliográfica de proyectos, informes, archivos fotográficos, etc. para documentar las intervenciones realizadas sobre los yacimientos seleccionados. La información exhaustiva, esto es, datos sobre los productos utilizados, localización precisa, metodología de aplicación o condiciones climáticas, es esencial a la hora de evaluar dichas intervenciones y sus efectos (Laurenzzi y Simon, 2006). Sin embargo, raramente podemos contar con datos tan precisos, y Mérida no es una excepción en este sentido. Contamos con varios proyectos arquitectónicos (fundamentalmente de J. Ménendez-Pidal y D. Hernández Gil) pero muy poca información publicada en informes finales, a excepción de la memoria de intervención ejecutada por Agora S. L. en el frente escénico en 1996, en la cual se centra este proyecto.
2. El consiguiente trabajo de campo para la valoración del estado de conservación de las zonas intervenidas. Un primer examen visual nos permite ya establecer algunos de los efectos desencadenados: problemas derivados del uso de cemento, cuyas propiedades físico- químicas son incompatibles con los materiales tradicionales, generando problemas de sales y humedades. Un ejemplo claro lo vemos en la Casa Basílica (fig. 2), junto al teatro, donde la colocación del mosaico consolidado con cemento dificulta la transpiración del pavimento, desviando la humedad hacia los muros laterales, donde se evidencia el daño sobre las pinturas murales (este problema ha motivado la eliminación del cemento recientemente). O daños derivados del uso de resinas sintéticas como sistemas de unión de elementos ornamentales del frente escénico, al quedar expuestas a la fotodegradación pierden sus propiedades y los fragmentos caen.
3. La investigación en laboratorio es parte fundamental de este proyecto, donde se analizarán los materiales tratados para su valoración y comparación con zonas sin tratar. Los objetivos y técnicas son los siguientes:



Figura 2. Problemas derivados del uso de cemento en Casa Basílica. Fotografía: Natalia Pérez Ema.

– Detección y análisis de los tratamientos:

- μ FRX (identificación de compuestos inorgánicos), μ FTIR (compuestos orgánicos), Raman portátil (proporciona información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico e inorgánico): estas tres técnicas son no destructivas y de las tres existen versiones portátiles.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS): permite combinar observación de imágenes a escala micro y nanométrica y análisis elemental de la composición de un material, muy útil en el análisis comparativo de zonas tratadas y sin tratar; textura, porosidad, profundidad de penetración de un tratamiento en el sustrato (fig. 3).
- Petrografía mediante microscopía óptica de polarización (MOP): tamaño, composición y unión de cristales, sistema poroso del material, etc.

– Detección de elementos metálicos en el interior de estructuras: magnetometría.

– Análisis de los efectos desencadenados:

- Determinar cambios cromáticos: espectrofotometría (determina cualitativa y cuantitativamente el color mediante la medida de parámetros cromáticos).
- Determinar la efectividad de tratamientos consolidantes:
 - Medida de la velocidad de propagación de ultrasonidos: permite descubrir partes alteradas, frágiles o de calidad diferente. En caso de aplicación de consolidantes, determina el aumento en la velocidad de propagación de los ultrasonidos por relleno de poros y fisuras.

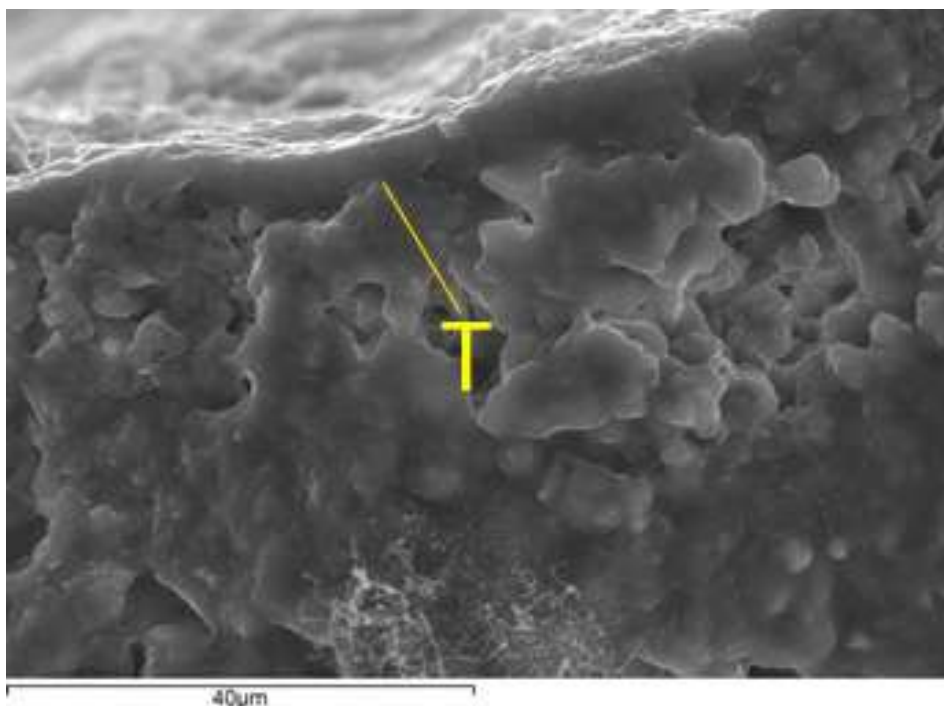


Figura 3. Imagen de SEM (sección transversal de una muestra de dolomía, modo electrones secundarios), en la que T señala el tratamiento consolidante aplicado sobre la piedra, a base de resinas acrílicas. Fotografía: Laboratorio de Petrofísica, IGEO.

- *Drilling Resistance Measuring System* (DRMS): determina la resistencia que ofrece un material a la perforación –eficacia de la consolidación superficial–, o determina la profundidad de una costra o parte superficial alterada de un material.
- Profundidad de penetración por microtomografía computerizada de rayos X (CT) y todo lo relacionado con el comportamiento hídrico de un material mediante resonancia magnética nuclear (NMR).
- Transformación del sistema poroso: Porosimetría por intrusión de mercurio
- Determinar cambios en el comportamiento térmico de los materiales por la aplicación de un producto: termografía de infrarrojos.

Conclusiones

La revisión de los tratamientos de restauración que se han venido ejecutando sobre el patrimonio arqueológico es una tarea necesaria, incluso imprescindible, para conocer el estado real de conservación de los materiales, realizar un diagnóstico integral y proponer medidas de conservación realistas. Ya hemos mencionado el avance que en las últimas décadas se ha realizado en cuanto a la evaluación de tratamientos sobre piedra, si bien se basan, mayoritariamente, en ensayos de laboratorio (test de envejecimiento acelerado), para la certificación de los productos en una fase previa a su aplicación, y escasamente en valoraciones desarrolladas *in situ* transcurrido un lapso de tiempo amplio posterior a la intervención (Laurenzi y Simon, 2006), y en condiciones naturales.

Por otro lado la revisión de estos estudios nos permite proponer para nuestro caso áreas de investigación aún abiertas como es el problema del «retratamiento» (Doehne, y Price, 2010), es decir, la compatibilidad e interacción entre tratamientos superpuestos sobre un mismo material.

Agradecimientos

Al personal del Consorcio Ciudad Monumental de Mérida, especialmente a María Paz Pérez Chívite y a Pedro Dámaso Sánchez Barrero por su amable colaboración.

Esta investigación está siendo realizada gracias al apoyo de la beca predoctoral del Programa PICATA concedida por el CEI Campus Moncloa.

Bibliografía

- ÁLVAREZ MARTÍNEZ, J. M. (2010): «Cien años de arqueología en Mérida. 1910-2010», en *Revista de Estudios Extremeños*, tomo LXVI, n.º II, pp. 627-676.
- DOEHNE, E., y PRICE, C. A. (2010): *The Stone Conservation. An Overview of Current Research*. Segunda edición. Los Ángeles: Getty Conservation Institute.
- FORT, R., y PÉREZ-MONTSERRAT, E. (2012): *La Conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Programa Geomateriales, Instituto de Geociencias (CSIC-UCM).
- MENÉNDEZ-PIDAL, J. (1976): «Algunas notas sobre la restauración y atención prestadas a los monumentos emeritenses», en *Augusta Emerita. Actas del Bimilenario de Mérida*. Madrid: Dirección General del Patrimonio Artístico y Cultural y Patronato de la Ciudad de Mérida.

- LAURENZI TABASSO, M., y SIMON, S. (2006): «Testing methods and criteria for the selection/evaluation of products for the conservation of porous building materials», en *Review in Conservation*, n.º 7, pp. 67-82.
- Pizzo, A. (2010): «Las técnicas constructivas de la arquitectura pública de Augusta Emerita», en *Anejos de AEspA* 56, Madrid.

Documentación, valorización y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro

Jorge Angás Pajas

Departamento de Ciencias de la Antigüedad. Universidad de Zaragoza
Grupo de investigación Primeros Pobladores del Valle del Ebro
j.angas@3dscanner.es

Paula Uribe Agudo

Institut Ausonius. Maison de l'Archéologie. Université de Bordeaux III
Grupo de investigación URBS. Departamento de Ciencias de la Antigüedad.
Universidad de Zaragoza
uribe@unizar.es

Resumen: Los objetivos del proyecto de investigación «Documentación geométrica, valorización y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro» han abarcado dos vertientes, hoy en día necesarias en la investigación del patrimonio cultural. De esta manera, en primer lugar, se ha realizado el registro geométrico de un conjunto definido de monumentos pertenecientes a la arquitectura hidráulica romana del valle medio del Ebro para mejorar su conservación. Por otro lado, esta información ha sido procesada con el objetivo de introducir los datos adquiridos en una plataforma web de libre acceso, completando el binomio científico-divulgativo.

La metodología utilizada en los monumentos –representativos cada uno de la captación, distribución y evacuación del agua en el mundo romano (presas de gravedad, cisternas, acueductos rupestres, acueductos con *arquationes*, depósitos de agua, *castellum aquae* y cloacas)– se ha realizado con la combinación de diferentes tipos de escáner 3D, topografía y fotogrametría aérea.

Los resultados han sido, en primer lugar, la obtención, por primera vez, de una documentación topográfica exhaustiva de las principales estructuras hidráulicas romanas del valle medio del Ebro que garantizará su conservación y prevención estructural. Así mismo, la principal contribución de este proyecto ha sido la incorporación de toda esta información tridimensional en una plataforma web de libre acceso: www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano de acuerdo a unos estándares. Medio divulgativo que sirve como base documental de conservación y prevención tanto para los responsables científicos –con la incorporación de la información geométrica obtenida– como para la propia sociedad –con la creación de modelos 3D didácticos– que permiten difundir el estado actual de la arquitectura hidráulica romana.

Palabras clave: Escáner 3D, documentación geométrica, patrimonio hidráulico romano, democratización 3D.

Abstract: The accomplishment of the project «Documentation, assessment and diffusion of Roman Hydraulic Cultural Heritage in the middle-valley of the river Ebro» has had as a main target the combination of the trinomial: register, value enhancement and cultural circulation of the different monuments related to the Roman hydraulic cultural heritage located in the middle-valley of the river Ebro.

The subject matter, that lays the foundations of the project, is focused on the process called «water cycle» –collection, distribution and evacuation– found in Roman architecture. In order to reach this target, we have selected each one of the archaeological sites according to two main criteria: the architectonical models and the state of conservation. The final aim of the selection of the sites has been to pass on to society, as clearly as possible, the use of hydraulic resources in the Roman period.

The project was under development from the end of 2010 to September, 2011, and it was directed by the Spin Off of the University of Zaragoza Scanner Patrimonio e Industria, together with the technical advice of the Research Group URBS, which also belongs to University of Zaragoza. Apart from this, the project has had the support of other institutions and the knowledge of the scientist responsible for each one of the archaeological sites.

Keywords: 3D scanner, geometric data, Roman Hydraulic Cultural Heritage, 3D democratizing.

Actualmente, enfocar nuevas técnicas de documentación geométrica del patrimonio cultural con fines didácticos resulta un proceso complejo. El desarrollo de estos fines debe equilibrar los procesos de investigación con la difusión social de los conocimientos científicos. El siguiente proyecto emerge con esta inquietud y tiene como finalidad la documentación geométrica –acompañada de una valorización y difusión en un entorno web– de una selección representativa de estructuras hidráulicas romanas. Esta elección se ha centrado en los hallazgos arqueológicos del valle medio del Ebro, concretamente en monumentos ubicados en La Rioja, Navarra y Aragón. De este modo, el proyecto ha pretendido documentar y difundir con un nexo didáctico: acueductos, presas, cloacas, depósitos y cisternas romanas, fundamentales para entender el ciclo del agua en la época romana.

Definición de objetivos y estado de la cuestión

Las técnicas de documentación del patrimonio 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. La velocidad es tal, que en pocos meses pensamos que la tecnología –y con ello la técnica– ya está obsoleta. Llegado a este punto, se suple por otra cuando, desgraciadamente, todavía no se ha integrado dentro de un proceso metodológico la técnica anterior. De esta manera, asistimos a un diálogo diacrónico e infrutilizado entre tecnología y metodología, con el fin de aprovechar o gestionar toda la información disponible (Angás, 2011: 160). Por ello, en la mayoría de los casos el verdadero avance no se encuentra en la propia técnica utilizada, sino en la conjugación de ambos objetivos con el fin de obtener una optimización de los resultados. Estos deben ser útiles para la extensa gama de posibles aplicaciones derivadas; sin caer en el error de enfatizar más la tecnología o técnica utilizada que el propio objetivo científico.

Con este proyecto hemos intentado orientar esta incongruencia metodológica gracias al trinomio: documentación-conservación-difusión, con un nexo común que ha sido la propia didáctica. En primer lugar, generamos una documentación válida, que en muchos casos no existía, para cada uno de los yacimientos que integraron este proyecto. Pero, al mismo tiempo, toda esta información creada, por la documentación geométrica, tiene que ser filtrada y organizada desde un punto de vista didáctico. Mediante el uso de estos filtros, se obtiene una continuidad en el proceso final de transmisión de los conocimientos a la sociedad que los generó en un momento determinado, en nuestro caso, en la época imperial romana.

La utilización de técnicas de documentación patrimonial a través de tecnología escáner 3D es, sin duda una de las soluciones que más información puede aportar a los investigadores y al público en general. Pero, al mismo tiempo, se trata de uno de los procesos más complicados de gestionar por la propia heterogeneidad del patrimonio. De este modo, en el planteamiento del proyecto que presentamos, hemos querido conjugar racionalmente el trinomio anteriormente citado, aportando 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 puesta en valor, siempre con un marcado componente didáctico como nexo entre la difusión y la investigación.

Documentación, valorización y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro

La temática que ha vertebrado el proyecto se centró en el proceso denominado «ciclo del agua» –captación, distribución y evacuación– dentro de la arquitectura romana. De este modo, seleccionamos 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.

La primera fase del proyecto se desarrolló desde finales del 2010 hasta septiembre de 2011, fue dirigida por la *Spin Off* de la Universidad de Zaragoza *Scanner Patrimonio e Industria*, junto con el asesoramiento científico del grupo de investigación de excelencia *URBS*, también, de la Universidad de Zaragoza. Además, colaboraron diferentes organismos autonómicos –Gobierno de Navarra, Gobierno de La Rioja, Gobierno de Aragón– y organismos locales –Ayuntamiento de Zaragoza y Museo de Teruel–, encargados de la gestión de los yacimientos (fig. 1).

El ámbito geográfico definido abarcó un grupo de ciudades o municipios que en época romana –a partir de Augusto– conformaron el *Conventus Caesaraugustanus*. Este hecho proporcionó al proyecto un carácter interterritorial entre La Rioja, Navarra, Zaragoza y Teruel.

Los monumentos documentados se estructuraron en tres bloques principales según el ciclo del agua:

– Sistemas de captación del agua

El abastecimiento de las ciudades romanas estuvo influido, tal y como sucede en la actualidad, por la situación de éstas respecto a los cursos de agua junto con la incidencia del clima en general y de las variantes locales. Estos condicionantes ponen de manifiesto la adaptación de la sociedad a los medios disponibles y el desarrollo que alcanzaron las construcciones hidráulicas del valle medio del Ebro.

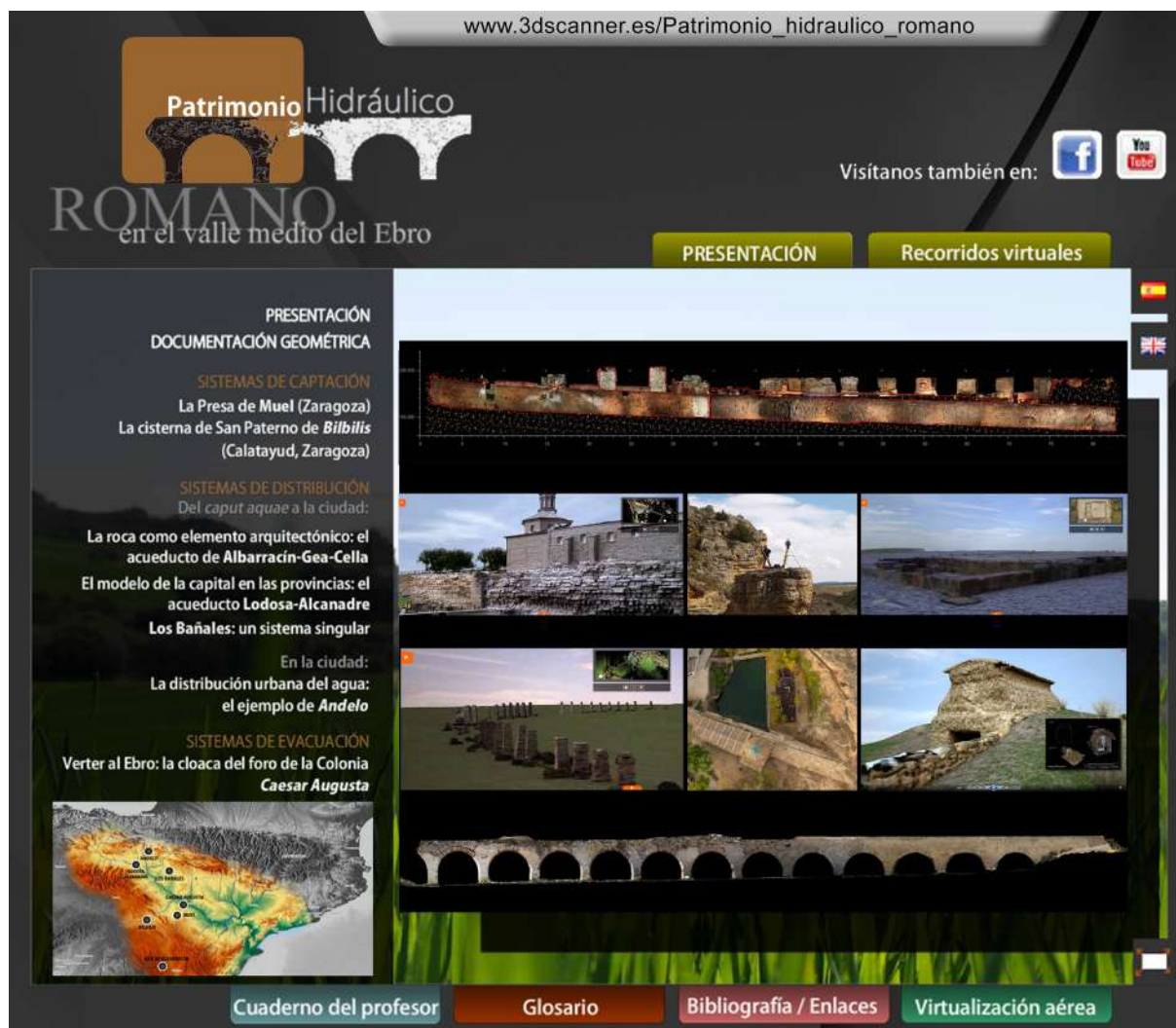


Figura 1. Imagen del entorno web creado con los diferentes yacimientos arqueológicos y su ámbito geográfico, según su tipología arquitectónica dentro la hidráulica romana.

La experiencia adquirida con la práctica y los conocimientos previos de otras civilizaciones hizo 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:

- Las cisternas del municipio romano de *Bilbilis*, Calatayud, Zaragoza (Martin-Bueno, 1975b: 205-222).
- La presa romana de Muel, Zaragoza (Uribe *et al.*, 2010: 333-345).

– Distribución del agua a las ciudades

Realizada a través de acueductos, se han documentado tres tipologías diferentes de acueductos: con *arquationes* (a), pilares con un canal de madera (b) y un acueducto excavado en la roca (c):

- Acueducto «Puente de los Moros», Lodosa-Alcanadre, Navarra-La Rioja (Mezquíriz, 1979: 139-147).
- Acueducto de Los Bañales, Uncastillo, Zaragoza (Beltrán-Martínez, 1977: 91-127).
- Acueducto de Albarracín-Gea-Cella, Teruel (Almagro, 2002: 213-237; Ezquerro, 2008: 175-188).

- La distribución dentro de las ciudades
 - El complejo hidráulico de *Andelo(s)*, Navarra (Mezquíriz, 1988: 237-266).
- Evacuación de las aguas residuales
 - Cloacas de la colonia de *Caesar Augusta*, Zaragoza (Aguarod *et al.*, 2010).

Técnicas aplicadas en los monumentos

La aplicación de la técnica láser escáner 3D se plantea como un nexo que conjuga e integra otras técnicas de documentación (fotogrametría, topografía, geodesia y fotografía), constituyéndose, de este modo, un mismo esquema metodológico.

Para la correcta elección de la técnica utilizada, existen unos factores heterogéneos dependiendo de las características particulares de cada monumento documentado. Por ello, resulta necesario distinguir diferentes técnicas empleadas, escáner láser (utilizando equipos de tiempo de vuelo o diferencia de fase dependiendo del yacimiento, distancia al objeto y entorno inmediato), escáner de luz blanca estructurada (para representar los detalles más significativos en cada monumento, como el caso de inscripciones epigráficas en la presa de Muel), sistemas GNSS (para georreferenciar la localización) y el encaje final del modelo mediante estación total. A pesar de que la aplicación del escáner 3D permite generar una textura original de cada estructura arquitectónica, se ha optimizado el resultado de renderización del valor RGB de cada punto, agregando una capa de texturas, al modelo tridimensional, obtenida a partir de la toma de imágenes con una cámara métrica de mejor resolución (fig. 2).

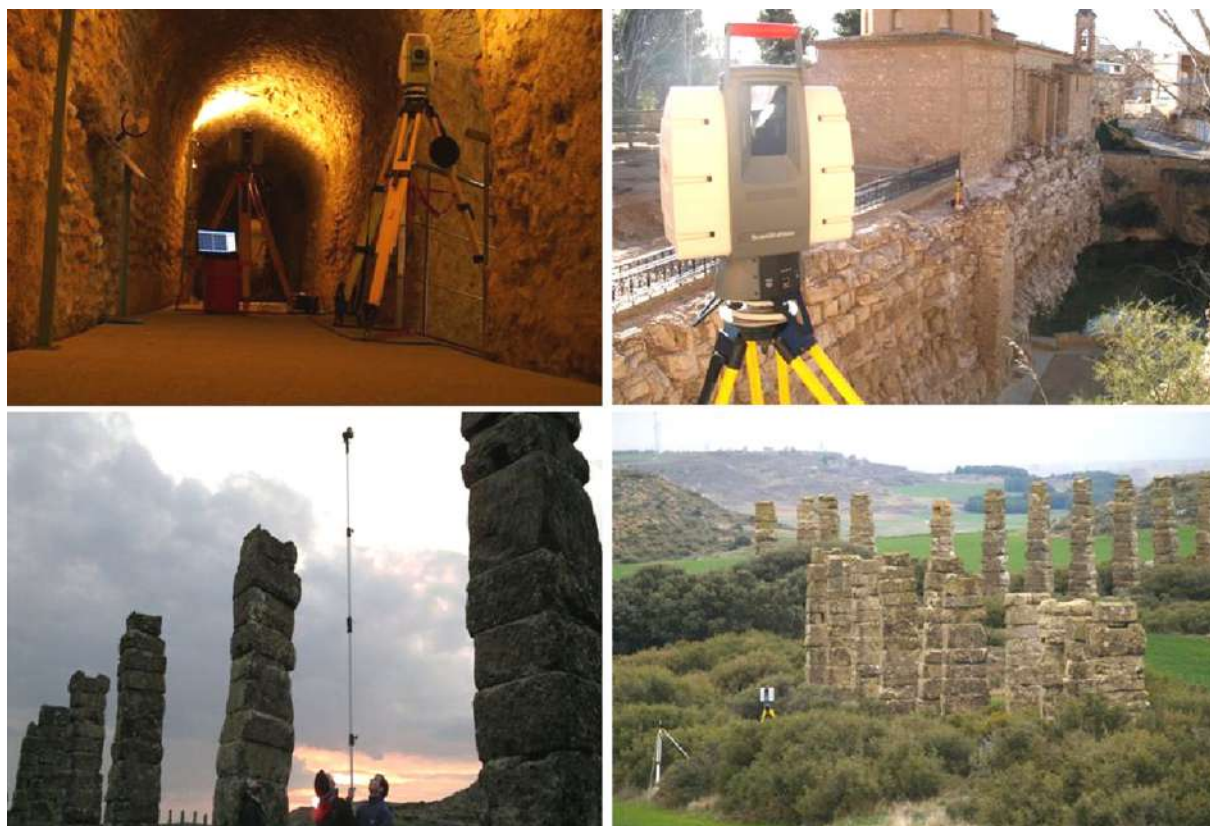


Figura 2. Imágenes de las diferentes técnicas combinadas de documentación terrestre (topografía y escáner 3D) empleadas en la documentación gráfica y geométrica de cada estructura hidráulica. Fotografías: Jorge Angás.

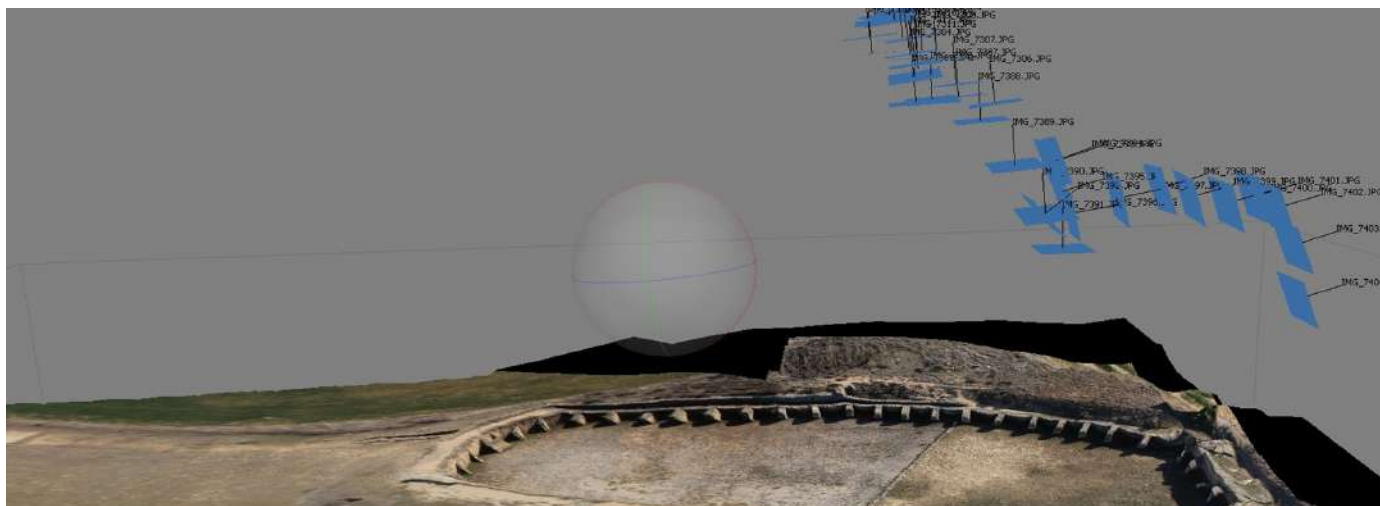


Figura 3. Generación del modelo 3D a través de fotogrametría aérea a baja altura mediante un sistema aéreo no tripulado (UAV) en el depósito de *Andelo(s)*, Mendigorria, Navarra.

Por otro lado, un nuevo paso evolutivo en la documentación del patrimonio ha consistido en la documentación aérea del entorno, realizada a través de un dispositivo UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Este sistema hace referencia a un vehículo aéreo no tripulado que puede ser controlado de manera remota y su funcionamiento puede ser semi-autónomo o completamente autónomo mediante un sistema GNSS. Dichos vehículos tienen en la actualidad numerosas aplicaciones relacionadas con la robótica, inteligencia artificial, agricultura, monitorización de recursos naturales, industria aeroespacial o defensa (fig. 3)

La integración de esta tecnología nos ha permitido crear una plataforma de medida fotogramétrica que permitió la digitalización de cada uno de los yacimientos seleccionados a partir de imágenes aéreas. Dicha plataforma se ha desarrollado de manera autónoma, mediante pre-programación de las trayectorias de vuelo necesarias, ya que este sistema es capaz de, una vez efectuado el despegue, seguir una trayectoria de vuelo programada en cada yacimiento a partir de coordenadas absolutas. Del mismo modo, la incorporación de una cámara calibrada de alta resolución ha tenido como resultado que los modelos y ortofotos obtenidos tengan una excelente resolución gráfica aproximadamente de 1,5 centímetros por píxel en cada ortofoto generada.

En definitiva, los resultados alcanzados han correspondido a los propios criterios científicos y divulgativos del proyecto. De este modo, se han obtenido una serie de fotografías que, mediante técnicas fotogramétricas y topográficas, han generado un modelo tridimensional de cada uno de los entornos documentados. El último capítulo en la fase de documentación aérea ha permitido que estos resultados se aprovechen, de igual modo, para ofrecer una visión aérea esférica de 360 grados de cada uno de los entornos arqueológicos (véase capítulo dedicado a la visualización aérea en la página web del proyecto www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano) (fig. 4).

La divulgación del patrimonio cultural a través de aplicaciones obtenidas de datos de escáner 3D

La línea de desarrollo del método postprocesual ha tenido como objetivo final una «democratización» del resultado tridimensional de cada uno de los yacimientos registrados (Roecker, 2008: 341-355). Así, del mismo modo que se generaba un corpus métrico con los datos obtenidos, se



Figura 4. A) presa romana de Muel (Zaragoza) registrada a 85 metros de altura con un UAV; B) modelo 3D triangulado y gestionado en diferentes capas en un fichero estándar pdf 3D.

obtenía información accesible al resto del público. De esta manera se han generado una serie de documentos, en formatos asequibles y fáciles de manejar por cualquier usuario, mediante el empleo de *software* libre, que han permitido obtener un mayor conocimiento de cada monumento y su entorno.

Debido a la propia heterogeneidad de cada uno de los yacimientos documentados, existen varios puntos que requieren una atención especial:

1. Registro de cada yacimiento en su estado actual. Prescindiendo, si es el caso, de otros elementos externos o arquitecturas modernas –tal y como ha sucedido con la cloaca de la colonia de *Caesar Augusta*– con el fin de entender la relación existente entre la arquitectura romana con su medio natural (fig. 5).

Para esta fase de registro se han establecido criterios metodológicos con procesos relacionados con otras disciplinas exógenas como la ingeniería, industria y ciencias ambientales. Estableciendo puntos de contacto con otros sectores se contribuye a la adquisición de una visión global en cómo organizar y gestionar la información tridimensional adquirida. Por ello, entendemos que intercambiar metodologías de trabajo para la divulgación del patrimonio cultural de los yacimientos será uno de los objetivos en los próximos años, sobre todo a nivel de gestión y procedimientos técnicos de trabajo.

2. Estandarización de procesos. Control de calidad y verificación de los datos. 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.
3. Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionasen una mayor difusión y divulgación, tanto métrica como gráfica. Para ello se han utilizado formatos compatibles con *software* libre. Con este proceso se consigue completar un grado mínimo de acceso y comprensión de la información al resto de la sociedad.
4. Metodología interdisciplinar. Apostando por un tratamiento híbrido entre el conjunto de profesionales que documentan el patrimonio cultural.

Finalmente, consideramos que, según lo expuesto, se han cumplido los objetivos del proyecto:

- Adquisición de modelos métricos tridimensionales de diferentes tipologías hidráulicas romanas mejorando la documentación anterior.
- Utilización de esta misma información para estudios científicos como divulgativos, ofreciendo una plataforma web de acceso público: www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano
- Documentación de cada estructura tal y como está, realizando una restitución y no una reconstitución infográfica. De esta manera, se ofrece una visión real explicativa al espectador del yacimiento y, sobre todo, del espacio que ocupa el yacimiento en el paisaje arqueológico.
- Finalmente, el factor más relevante es que, toda esta información métrica adquirida ha quedado almacenada como una base de datos documental, organizada a través de metadatos que podrá ser rescatada y analizada en cualquier otro período para analizar cualquier posible patología estructural.

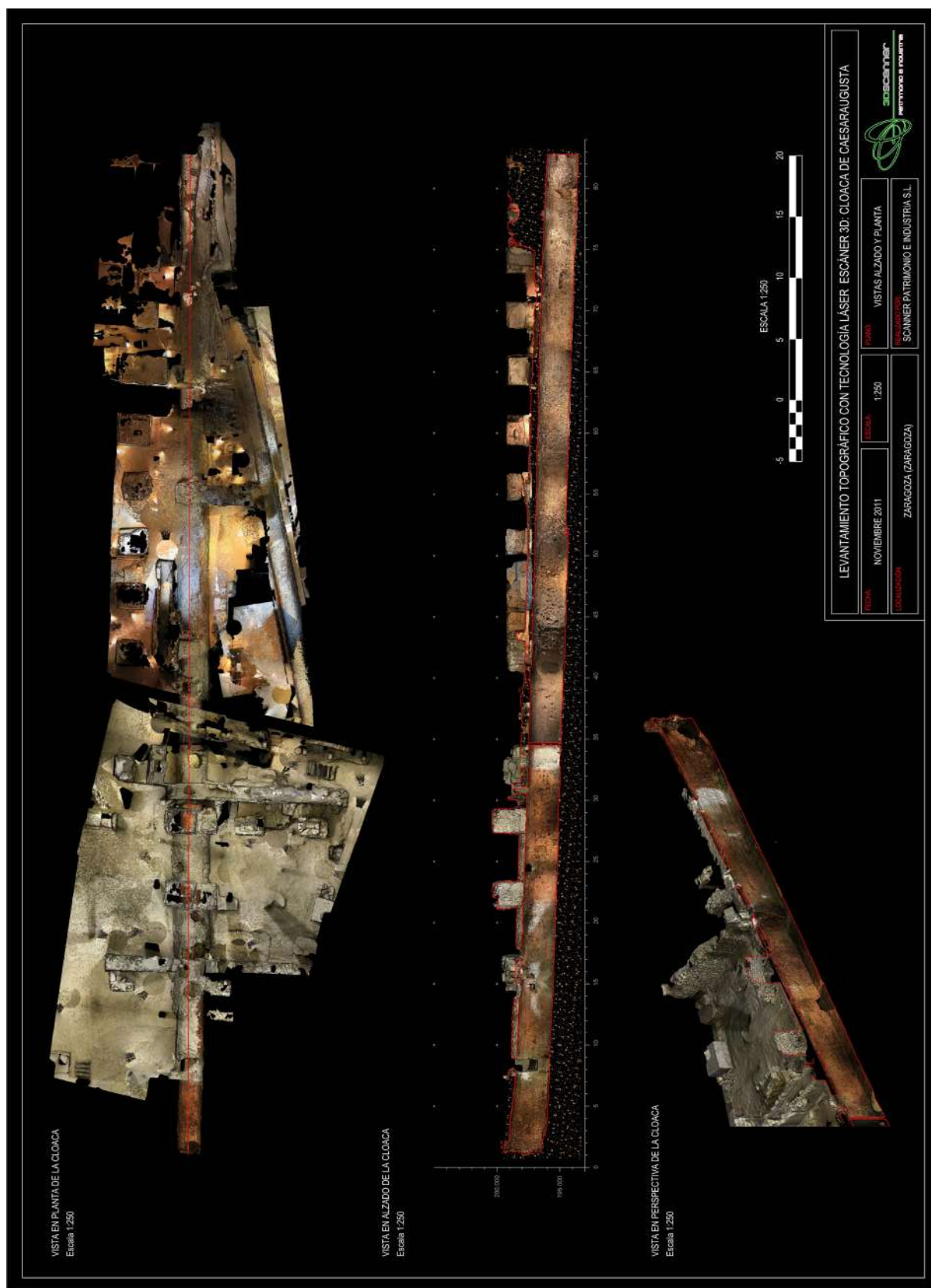


Figura 5. Diferentes planos sobre el modelo 3D, integrado con los diferentes espacios que forman la cloaca del foro de la colonia romana de *Caesar Augusta*. Análisis de la ortofoto y sección longitudinal referido al actual sistema de coordenadas del Ayuntamiento de Zaragoza, prescindiendo de los elementos arquitectónicos modernos.

Agradecimientos

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 y de Archivos y Bibliotecas del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Además queremos agradecer la colaboración y disponibilidad del personal científico de todos los organismos que han colaborado en el desarrollo del mismo: Gobierno de Navarra, Gobierno de La Rioja, Gobierno de Aragón, Ayuntamiento de Zaragoza, Museo de Teruel, Fundación Uncastillo.

Bibliografía

- AGUAROD, Carmen (ed.) (2010): *Ayer y hoy del foro de Caesaraugusta*. Zaragoza.
- ALMAGRO GORBEA, Antonio (2002): «El Acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)», en *Artifex. Ingeniería romana en España*. Madrid, pp. 213-237.
- ANDREU, J.; GONZÁLEZ SOUTELO, S.; GARCÍA-ENTERO, V.; LASUÉN, M., y JORDÁN, Á. A. (2008): «Cuestiones urbanísticas en torno a la ciuitas de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza)», en *SPAL*, 17, pp. 233-266.
- ANGÁS, Jorge (2011): «Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio», en *Documentación gráfica del Patrimonio, Instituto de Patrimonio Cultural*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 154-163.
- ANGÁS, J., y SERRETA, A. (2010): «Assessment, dissemination and standardization of geometric data recording of Archaeological Heritage obtained from 3D laser scanning», en *Virtual Retrospect 2009*. CNRS Bordeaux, pp. 190-195.
- ARENILLAS, Miguel (2003): «Presas romanas en España», en *Ingeniería y territorio*, n.º 62, pp. 72-78.
- BELTRÁN LLORIS, FRANCISCO (2006): «An Irrigation Decree from Roman Spain: The Lex Rivi Hiberiensis», en *Journal of Roman Studies*, n.º 96, pp. 147-197.
- BELTRÁN MARTÍNEZ, Antonio (1977): «Las obras hidráulicas de Los Bañales», en *Simposio Segovia y la arqueología romana*. Barcelona, pp. 91-127.
- EZQUERRA LEBRÓN, Beatriz (2008): «El acueducto romano de Albarracín-Gea-Cella», en *Comarca de La Sierra de Albarracín*. Albarracín, pp. 175-180.
- MARTÍN-BUENO, Manuel (1975): «El abastecimiento y distribución de aguas al *Municipium Augusta Bilbilis*», en *H. A. V*, pp. 205-222.
- MEZQUÍRIZ, María Ángeles (1979): «El acueducto de Alcanadre-Lodosa», en *Trabajos de Arqueología Navarra*, n.º 1, pp. 139-147.
- MEZQUÍRIZ, M. A., y UNZU, M. (1988): «De hidráulica romana: el abastecimiento de agua a la ciudad romana de Andelos», en *Trabajos de Arqueología Navarra*, n.º 7, pp. 237-266.
- ROECKER, Ian (2008): «Democratizing the Process of Heritage Conservation, Research, and Practice: An Internet-based Knowledge Assembly and Visualization Tool», en *Digital Media and its Applications in Cultural Heritage*. Edición de Jamal Al-Qawasmi; Michele A. Chiuini, y Sabry El-Hakim. Túnez: CSAAR Publications, pp. 341-355.

URIBE, P.; FANLO, J.; MAGALLÓN, A.; BEA, M.; MARTÍNEZ, R.; REKLAITYTE, I., y LAMBÁN, F. (2010): «La presa romana de Muel: novedades de hidráulica romana en el Valle del Ebro», en *Aquam perducendam curavit*. Cádiz, pp. 333-345.

VALLE, José Manuel (2007): *Documentación Geométrica del Patrimonio: propuesta conceptual y metodológica*. Tesis doctoral inédita. Universidad de La Rioja.

Identificación de hongos causantes de pudrición en las bóvedas de las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada mediante técnicas de biología molecular

Víctor M. Menguiano Chaparro

Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico
victorm.menguiano@juntadeandalucia.es

José Román Pérez Castiñeira

Universidad de Sevilla
jroman@us.es

Marta Sameño Puerto

Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico
marta.sameno@juntadeandalucia.es

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados obtenidos tras aplicar técnicas de biología molecular, basadas en la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y amplificación de ADN_r, para la identificación de hongos de pudrición de la madera, extrayendo ADN directamente de una muestra de madera con pudrición.

Palabras clave: Biología molecular, identificación, hongos de pudrición, ADN, PCR.

Abstract: This work presents the obtained results after applying molecular biology techniques, based on the polymerase chain reaction (PCR) and rDNA amplification, to identify wood decay fungi, extracting DNA directly from decay wood.

Keywords: Molecular biology, identification, decay fungi, DNA, PCR.

Introducción

El estudio previo para la conservación-restauración de las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada reveló que la madera soporte de las bóvedas (*Populus alba*), sobre las que se asientan las pinturas, sufría un proceso de biodeterioro causado por hongos de pudrición de la madera (fig. 1).



Figura 1. Vista del reverso de una de las bóvedas, donde se aprecian zonas con pudrición. Fotografía: Víctor M. Menguiano.

La detección e identificación precisa de los microorganismos involucrados en los procesos de biodeterioro de los bienes culturales es el primer paso necesario para su conservación, pero por sus características intrínsecas, los hongos de pudrición no pueden ser fácilmente detectados e identificados mediante técnicas microbiológicas tradicionales, basadas en aislamiento y cultivo en laboratorio para posterior caracterización de sus micelios y estructuras reproductoras.

La observación de varias muestras de madera con pudrición al microscopio óptico con luz polarizada, evidenció la presencia de hifas fúngicas que no pudieron ser identificadas, por lo que se recurrió a técnicas de biología molecular, aislando ADN fúngico directamente de las muestras de madera con pudrición.

Materiales y métodos

Muestras

Se utilizaron tres pequeñas muestras de madera con pudrición tomadas del reverso de una de las bóvedas. Dichas muestras se mantuvieron previamente en una cámara húmeda (90% HR) a temperatura ambiente.

Extracción del ADN

Para la extracción de ADN, primero las muestras de madera con pudrición se pulverizaron en un mortero de porcelana, con ayuda de nitrógeno líquido.

Posteriormente, se utilizó el kit comercial de extracción de ADN *Zymo Research Fungal/Bacterial DNA Kit*, siguiendo el protocolo del fabricante, excepto que se utilizó agua Milli-Q

(*Sigma W4502*) en lugar del tampón de elución del fabricante. De esta forma, se obtuvieron soluciones de 100 μ l.

La extracción de ADN fue verificada mediante electroforesis, de 18 μ l de cada solución obtenida, en gel de agarosa al 0,7% en tampón TBE $\frac{1}{2}$ y teñido con bromuro de etidio. La electroforesis se realizó a 120V, durante 30 minutos, y se usó como patrón ADN de fago λ (*Promega*) digerido con las endonucleasas de restricción HindIII y EcoRI con un patrón de bandas en un rango de 564 a 21226 pb.

Amplificación por PCR

El ADN extraído se utilizó como molde para la amplificación mediante PCR de un fragmento del gen que codifica la subunidad 28S del ARN ribosómico de eucariotas. Para ello se utilizaron como cebadores dos oligonucleótidos correspondientes a sendas secuencias consenso utilizados convencionalmente para la amplificación y secuenciación de dicho fragmento. Los oligonucleótidos, cuyas secuencias son 5'-ACCCGCTGAATTTAAGCAT-3' (FW) y 5'-TCCGTGTTTCAAGACGG-3' (REV), fueron sintetizados por la empresa Eurofins MWG *Operon*. Estos cebadores amplifican una sola banda de ADN de unas 600 pares de bases (pb) de longitud.

Las reacciones de amplificación se realizaron en un volumen final de 50 μ l y contenían: 1 μ l de ADN molde, 5 μ l de tampón Taq DNA polimerasa, 1 μ l de Taq DNA polimerasa (5 U), 2 μ l de mezcla de dNTPs 10 mM cada uno, 50 pmol de cada cebador, completando con agua Milli-Q (*Sigma W4502*).

El termociclador (*MyCycler™* de *Bio-Rad*) se programó con las siguientes condiciones: dos minutos a 95° C para la desnaturalización del ADN molde, seguido de 40 ciclos de un minuto de desnaturalización a 95° C, un minuto de hibridación de cebadores a 55° C y un minuto de elongación a 72° C, con un paso de extensión final de 10 minutos a 72° C.

Para comprobar la efectiva amplificación del fragmento de DNA, de aproximadamente 600 pb, una muestra de 25 μ l del producto resultante de la PCR se corrió mediante electroforesis en gel de agarosa al 1% (p/v) en 150 ml de tampón TBE $\frac{1}{2}$ teñido con bromuro de etidio, a 120 V, durante 30 minutos.

Purificación y cuantificación del ADN

Las bandas de ADN incluidas en el gel de agarosa se recuperaron y purificaron mediante el kit comercial de purificación *Bioline Isolate PCR and Gel Kit*, siguiendo las instrucciones del fabricante (excepto que se utilizó agua Milli-Q en lugar del tampón de elución del fabricante), obteniéndose una solución de 30 μ l de ADN puro.

La cuantificación del ADN purificado se realizó mediante electroforesis en gel de agarosa y comparación frente a un marcador de pesos moleculares, y mediante espectrofotometría, midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 260 nm (A260) con un espectrofotómetro *NanoDrop*.

Secuenciación

Una vez cuantificadas las muestras de ADN, éstas se prepararon y enviaron para su secuenciación al Instituto de Parasitología y Biomedicina López-Neyra (CSIC) de Granada, donde la se-

cuenciación de ADN se realiza mediante el procedimiento de secuenciación cíclica utilizando la química *BigDye Terminator v3.1* y electroforesis en sistema multicapilar automático.

Análisis Blast

Con el fin de determinar a qué especies corresponden las secuencias de ADN obtenidas a partir de las muestras, se realizó una comparación mediante análisis Blast de éstas con las existentes en la base de datos del NCBI (National Center for Biotechnology Information, USA), utilizando el programa «nucleotide blast»¹.

Resultados y discusión

La observación bajo luz ultravioleta de la electroforesis de verificación de extracción revela bandas de ADN, pero muy tenues, es decir, se obtuvo poco ADN. Esto es lógico si tenemos en cuenta que no partimos de cultivos fúngicos, sino directamente de muestras de madera con pudrición, cuyo tamaño era reducido (unos 5 cm³). No obstante, la cantidad obtenida fue suficiente para amplificar por PCR.

Las soluciones de ADN obtenidas presentaban una ligera pigmentación, mayor cuanto más podrida estaba la muestra de madera, debida a subproductos de la descomposición de la madera (por ejemplo ácidos húmicos) que co-precipitan con el ADN. Estas sustancias podrían inhibir la posterior reacción de amplificación por PCR, aunque no fue el caso.

La electroforesis en gel de agarosa al 1% de los productos de PCR obtenidos (fig. 2), muestra una amplificación satisfactoria, tanto en cantidad, como en el tamaño del fragmento amplificado, de aproximadamente 600 pb de longitud.

Se intentó una cuantificación del ADN purificado mediante electroforesis en gel de agarosa y comparación frente a un marcador de pesos moleculares, pero dada la poca cantidad de ADN purificado, no fue posible.

Por ello la cuantificación se realizó mediante espectrofotometría. Las concentraciones de ADN obtenidas para las muestras 1, 2 y 3 fueron, respectivamente, 4,4, 6,1 y 4,7 ng/μl.

Una vez obtenidas las secuencias de los fragmentos amplificados, se comprobó que és-

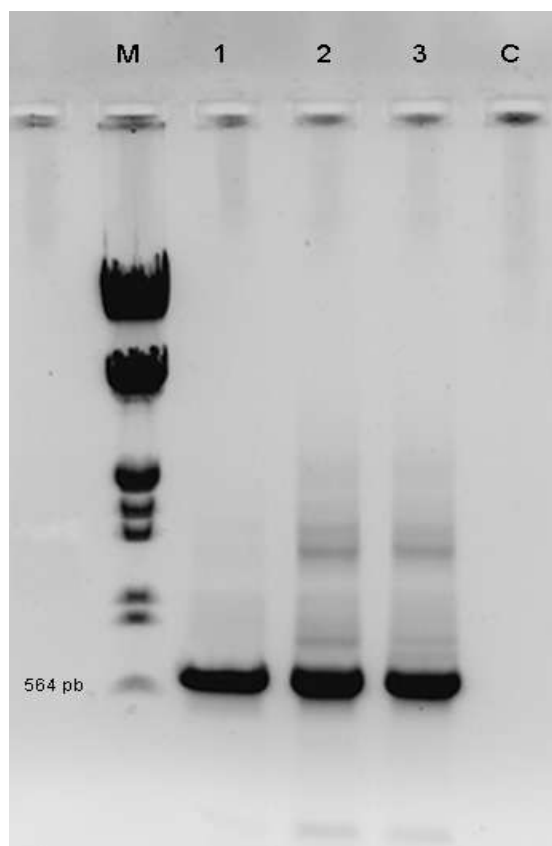


Figura 2. Electroforesis en gel de agarosa al 1% mostrando los productos amplificados por PCR. M=marcador molecular, C=control sin ADN molde. Fotografía: José Román Pérez Castiñeira.

¹ Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast/Blast.cgi>

tas no eran buenas en el caso de las muestras 1 y 3, debido probablemente a que la cantidad de ADN presente en la muestra fuera inferior a la necesaria para la correcta secuenciación.

El análisis comparativo Blast de la secuencia de la muestra 2 con las secuencias de referencia (fig. 3) mostró que este fragmento amplificado presenta una homología del 99 % con la secuencia de referencia de *Petriella setifera*, un ascomiceto causante de pudrición blanda de la madera.

Conclusiones

Este trabajo demuestra que es posible la detección e identificación de los hongos xilófagos directamente a partir de la muestra de madera podrida, evitando la necesidad de cultivo previo, por lo que dicha detección e identificación no estaría limitada por la capacidad de cultivo de las especies fúngicas.

Sin embargo, la identificación no resulta sencilla cuando aparecen varias especies de hongos xilófagos en una misma muestra de madera, algo habitual en muestras biológicas naturales, de gran diversidad. En estos casos es más difícil la identificación de todos los microorganismos, pues los fragmentos amplificados pertenecen a distintas especies y se obtiene una superposición de secuencias. Se está salvando este inconveniente mediante clonación de los fragmentos amplificados y análisis de restricción enzimática de los fragmentos de ADN clonados.

```
>gb|DQ470969.1| Petriella setifera isolate AFTOL-ID 956 28S large subunit ribosomal
RNA gene, partial sequence
Length=1297

Score = 1009 bits (1118), Expect = 0.0
Identities = 568/574 (99%), Gaps = 0/574 (0%)
Strand=Plus/Plus

Query 18  TGCCTCAGTAACGGCGAGTGAAGCGGCAACAGCTCAAATTTGAAATCTGGCGGCCTCTGG 77
Sbjct 1  TGCCTCAGTAACGGCGAGTGAAGCGGCAACAGCTCAAATTTGAAATCTGGCGGCCTCTGG 60

Query 78  GCCGTCCGAGTTGTAATTTGAAGAGGATGCTTTTGGCGAGGCGCCTTCCGAGTGCCCTGG 137
Sbjct 61  GCCGTCCGAGTTGTAATTTGAAGAGGATGCTTTTGGCGAGGCGCCTTCCGAGTGCCCTGG 120

Query 138  AACGGGACGCCACAGAGGGTGAGAGCCCCGTATGGTTGGACGCCGAGCCTCTGTAAAGCT 197
Sbjct 121  AACGGGACGCCACAGAGGGTGAGAGCCCCGTATGGTTGGACGCCGAGCCTCTGTAAAGCT 180

Query 198  CCTTCGACGAGTCGAGTAGTTTGGGAATGCTGCTCAAAATGGGAGGTAAACCCCTTCTAA 257
Sbjct 181  CCTTCGACGAGTCGAGTAGTTTGGGAATGCTGCTCAAAATGGGAGGTAAACCCCTTCTAA 240

Query 258  AGCTAAATACTGGCCAGAGACCGATAGCGCACAAGTAGAGTGATCGAAAGATGAAAAGCA 317
Sbjct 241  AGCTAAATACTGGCCAGAGACCGATAGCGCACAAGTAGAGTGATCGAAAGATGAAAAGCA 300

Query 318  CTTTGAAAAGAGAGTTAAATAGCACGTGAAATTGTTGAAAGGGAAGCGCTTGCGACCAGA 377
Sbjct 301  CTTTGAAAAGAGAGTTAAACAGCACGTGAAATTGTTGAAAGGGAAGCGCTTGCGACCAGA 360

Query 378  CTTGTGCCCGTCGAATCAGCCGCCGCTCGCCGGCGGCGCACTTCGGCGGGGCTCAGGCCAG 437
Sbjct 361  CTTGTGCCCGTCGAATCAGCCGCCGCTCGTCGGCGGCGCACTTCGGCGGGGCTCAGGCCAG 420

Query 438  CATCATTTGCTGTCAGGGGGAGAAAGCGGCGGGAATGTGGCTCTTCGGAGTGTTATAGC 497
Sbjct 421  CATCAGTTGCTGTCAGGGGGAGAAAGCGATGGGAATGTGGCTCTTCGGAGTGTTATAGC 480

Query 498  CCGCCGCGCAATACCCCTCGGCGGACTGAGGACCGCGCATCTGCAAGGATGCTGGCGTAA 557
Sbjct 481  CCGCCGCGCAATACCCCTCGGCGGACTGAGGACCGCGCATCTGCAAGGATGCTGGCGTAA 540

Query 558  TGGTCGTCAGCGACCCGCTTTGAAACACGGAACA 591
Sbjct 541  TGGTCGTCAGCGACCCGCTTTGAAACACGGAACA 574
```

Figura 3. Alineamiento mediante análisis Blast de la secuencia obtenida de la muestra 2 con la aparecida en la base de datos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, y se enmarca dentro del Convenio Específico de Colaboración entre el Patronato de la Alhambra y Generalife y el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico para el desarrollo del Proyecto de conservación de las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra.

Bibliografía

- GONZÁLEZ, J. M., y SAIZ-JIMÉNEZ, C. (2005): «Application of molecular nucleic acid-based techniques for the study of microbial communities in monuments and artworks», en *International Microbiology*, 8(3), pp. 189-194.
- GUGLIELMO, F.; BERGEMANN, S. E.; GONTHIER, P.; NICOLOTTI, G., y GARBELOTTO, M. (2007): «A multiplex PCR-based method for the detection and early identification of wood rotting fungi in standing trees», en *Journal of Applied Microbiology*, 103, pp. 1490-1507.
- HOGBERG, N., y LAND, C. J. (2004): «Identification of *Serpula lacrymans* and other decay fungi in construction timber by sequencing of ribosomal DNA: A practical approach», en *Holzforschung*, 58, pp. 199-204.
- JASALAVICH, C. A.; OSTROFSKY, A., y JELLISON, J. (2000): «Detection and identification of decay fungi in spruce wood by restriction fragment length polymorphism analysis of amplified genes encoding rRNA», en *Applied and Environmental Microbiology*, 66, pp. 4725-4734.
- JELLISON, J., y JASALAVICH, C. A. (2000): «A review of selected methods for the detection of degradative fungi», en *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46, pp. 241-244.
- MORETH, U., y SCHMIDT, O. (2001): «Identification of indoor rot fungi by taxon-specific priming polymerase chain reaction», en *Holzforschung*, 54, pp. 1-8.
- NICOLOTTI, G.; GONTHIER, P.; GUGLIELMO, F., y GARBELOTTO, M. (2009): «A Biomolecular Method for the Detection of Wood Decay Fungi: A Focus on Tree Stability Assessment», en *Arboriculture & Urban Forestry*, 35(1), pp.14-19.
- SARRÓ, M. I., y ARROYO, I. (2008): «Microbiología y biología molecular aplicada al patrimonio en el IPHE», en *Revista Bienes Culturales*, 8, pp. 197-210.
- WARD, D. M.; WELLER, R., y BATESON, M. M. (1990): «16S rRNA sequences reveal numerous uncultured microorganisms in a natural community», en *Nature*, 345, pp. 63-65.

Reconocimiento y estudio de los efectos arqueosísmicos generados en el patrimonio durante el terremoto de Lorca: proyecto RESCATELO

Fidel Martín-González

Área de Geología. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid
fidel.martin@urjc.es

Miguel Ángel Rodríguez-Pascua

Instituto Geológico y Minero de España. Madrid
ma.rodriguez@igme.es

Raúl Pérez-López

Instituto Geológico y Minero de España. Madrid
r.perez@igme.es

Jorge Luis Giner-Robles

Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias.
Universidad Autónoma de Madrid
jorge.giner@uam.es

Resumen: El 11 de mayo de 2011 tuvo lugar en Lorca un terremoto que afectó sobre todo al patrimonio histórico de la ciudad, clasificándose como la mayor catástrofe patrimonial de Europa en los últimos años. Este terremoto es un ejemplo excepcional para el estudio de daños en edificios históricos asociados al campo cercano durante un sismo. Un equipo de investigadores pertenecientes a universidades y centros de investigación (IGME, URJC, UAM y UCM), y financiados por el MCI, trabaja en el proyecto RESCATELO para realizar su inventario y análisis antes de que sean eliminados. Los objetivos de este proyecto son: a) extrapolar los resultados del terremoto de Lorca a los estudios de yacimientos y enclaves arqueológicos donde se observan los daños, pero no se conocen los parámetros instrumentales del terremoto, y b) estudiar y analizar la orientación del pulso del movimiento del terreno y por tanto de los daños (dirección N130° E), para encaminar y facilitar la restauración y las futuras actuaciones sobre el patrimonio, teniendo en cuenta esta orientación de sacudida del terremoto.

Palabras clave: Efectos arqueosísmicos de terremotos EAE, edificios de patrimonio histórico, Lorca, terremotos, plan de restauración.

Abstract: On May 11th, 2011 took place in Lorca an earthquake that affected mainly the historical heritage of the city, catalogued as the greatest catastrophe heritage of Europe in recent years. This earthquake is an outstanding example for the study of damage to historic buildings

associated with the near field during an earthquake. A team of researchers from universities and research centers (IGME, URJC, UAM and UCM), funded by the MCI, works in the RESCATELO project in order to inventory and analysis of the effects before they are removed. The objectives of this project are: a) to extrapolate the results of the Lorca earthquake to archaeological sites where damages are observed but no instrumental parameters of the earthquake are available, b) study and analyze of the ground shake and therefore the oriented damage (direction N130° E), to facilitate the restoration and future actions taking into account this orientation.

Keywords: Earthquake Archaeological Effects (EAE), Lorca, Earthquakes, Restoration plans.

Introducción

El terremoto de Lorca (11 de mayo de 2011), de magnitud 5,1 Mw, fue generado por la falla de Alhama de Murcia (Martínez-Díaz *et al.*, 2010; 2011) y se caracterizó por una destacada orientación del pulso de sacudida del terreno, lo que generó la orientación de los efectos y daños en edificaciones al paso de la onda sísmica. El terremoto causó nueve víctimas mortales, daño aproximadamente el 80% de las infraestructuras, se calculó 2.000 millones de euros en pérdidas, y sobre todo afectó al patrimonio histórico de la ciudad clasificándose como la mayor catástrofe patrimonial de Europa en los últimos años según las autoridades.

Este terremoto se ha convertido en un ejemplo excepcional para el estudio de efectos asociados al campo cercano durante un sismo, ya que permite correlacionar los efectos y el daño en el patrimonio histórico de la ciudad con los parámetros instrumentales del terremoto. Algunos de estos efectos por su carácter efímero necesitan ser completados, catalogados y estudiados con urgencia antes de que sean eliminados y se pierdan para siempre tras la reconstrucción o acción antrópica. Por este motivo un equipo de investigadores pertenecientes a universidades y centros de investigación (IGME, URJC, UAM y UCM) y financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación trabaja en el proyecto RESCATELO, para estudiar entre otros objetivos, los daños en el patrimonio de la ciudad de Lorca tras el terremoto y las posibles actuaciones para su restauración y prevención frente a futuros terremotos.

La región de Murcia es conocida desde hace tiempo como una de las zonas con más actividad sísmica de España. Históricamente ha sufrido varios terremotos destructivos, así como las cercanas localidades de Totana o Alhama de Murcia (Martínez-Díaz *et al.*, 2010) (fig. 1). Sin embargo, las edificaciones del patrimonio histórico de la región no tienen previsto ningún tipo de actuación frente a terremotos.

Objetivos del proyecto

Un equipo de geólogos pertenecientes al Instituto Geológico y Minero de España, Universidad Rey Juan Carlos, Universidad Complutense y Universidad Autónoma de Madrid, está recopilando y analizando los efectos y daños producidos por el terremoto de Lorca de 2011. La rapidez de este reconocimiento se debe a que parte de estos efectos se pierden rápidamente por erosión (lluvia, viento, etc.) que elimina los efectos geológicos y los arqueosísmicos producidos (comienzo del desescombrado, reparación y demolición de edificios).

El reconocimiento y estudio de los efectos de un terremoto *a posteriori*, es fundamental para entender cómo se comportarán y prevenir sus consecuencias en terremotos futuros. Este

hecho cobra mayor importancia en países en los que los períodos de retorno de los terremotos exceden el registro instrumental, como es el caso de España. De esta forma, en España los terremotos ocurren después de largos períodos de tiempo, lo que hace que no se puedan estudiar sólo con el registro instrumental de las últimas décadas, sino que haya que recurrir a los efectos de los terremotos en el pasado para poder completar el catálogo sísmico y ofrecer una idea de la peligrosidad más real y fiable.

Además de reconocer importantes efectos geológicos como desprendimientos de rocas, caída de bloques independientes y desmoronamientos de tramos de la muralla exterior del castillo de Lorca, se reconocieron, clasificaron y describieron un total de 182 efectos (ver ficha ejemplo figura 2), la mayoría de los cuales están localizados en los edificios históricos del casco antiguo de la ciudad. A lo largo del casco histórico se observaron daños tanto en las edificaciones más antiguas como el pórtico de San Antonio, cuyo origen es una antigua muralla defensiva del siglo XIII, como en las diferentes iglesias y conventos de los siglos XVI y XVII repartidos en el centro cultural lorquino. Se observó una concentración de daños en las torres elevadas, afectando principalmente a los arcos, tejadillos, arbotantes, bolardos y algún cimborrio. También se observaron gran cantidad de efectos como rotaciones en elementos decorativos sueltos (bolardos y obeliscos, por ejemplo), como el obelisco de la pequeña plazuela anexa a la iglesia de San Francisco. Además, se han descrito estructuras similares en edificaciones modernas como en el colapso orientado del edificio de las Viñas y en otras edificaciones modernas de ladrillo y estructura de hormigón.

Metodología

En los últimos 50 años se ha desarrollado a nivel mundial la metodología para el estudio de la actividad de las fallas sismogénicas fundamentalmente centrada en una gran cantidad de datos geológicos y sismológicos en fallas del sur de California, Japón y Nueva Zelanda. Desde los años ochenta se ha reconocido que fallas en zonas aparentemente mucho menos activas y de menor velocidad que las estudiadas en las zonas citadas, son capaces de producir en la actualidad grandes terremotos destructivos (Crone *et al.*, 1992; Gupta, 1993 y Martín-González, 2009).

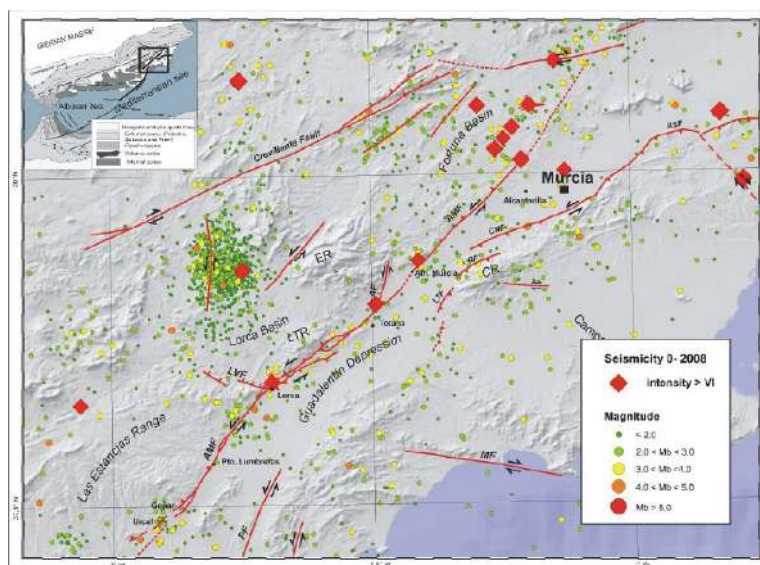


Figura 1. Mapa de la sismicidad ocurrida en la zona hasta el año 2008. Los rombos rojos indican la posición de terremotos históricos destructores. Los círculos muestran los epicentros de los sismos con el color en función de la magnitud del evento. Las líneas rojas muestran las trazas de las principales fallas activas (Martínez Díaz *et al.*, 2011).

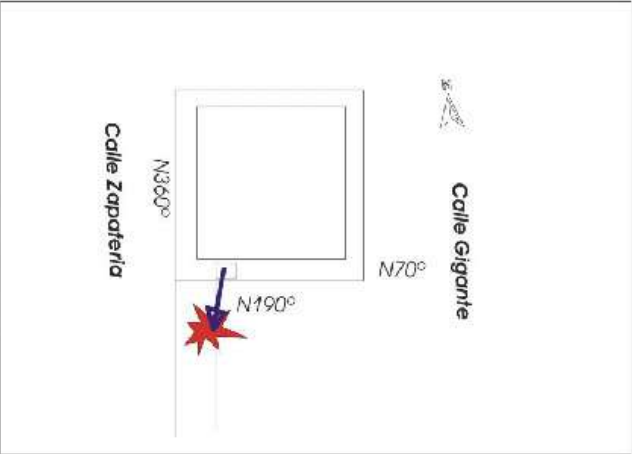
Nombre de la estructura: Almena del Porche de San Antonio (torre de la antigua Muralla) n.º y nombre calle: Calle Zapatería Coordenadas: 1°41'51.69"W 37°40'44.88"N altura 347m	Mapa de situación
	Fotos
	
Esquema	
Orientación de estructura afectada (muro, casa, etc): muros: N360° N70°	
Azimut caída: N190°	Se observa el impacto en el suelo para el calculo del azimut. Solo cayó una almena.
Comentarios	

Figura 2. Ficha tipo empleada para la clasificación y descripción sistemática de los efectos del terremoto sobre construcciones del patrimonio histórico.

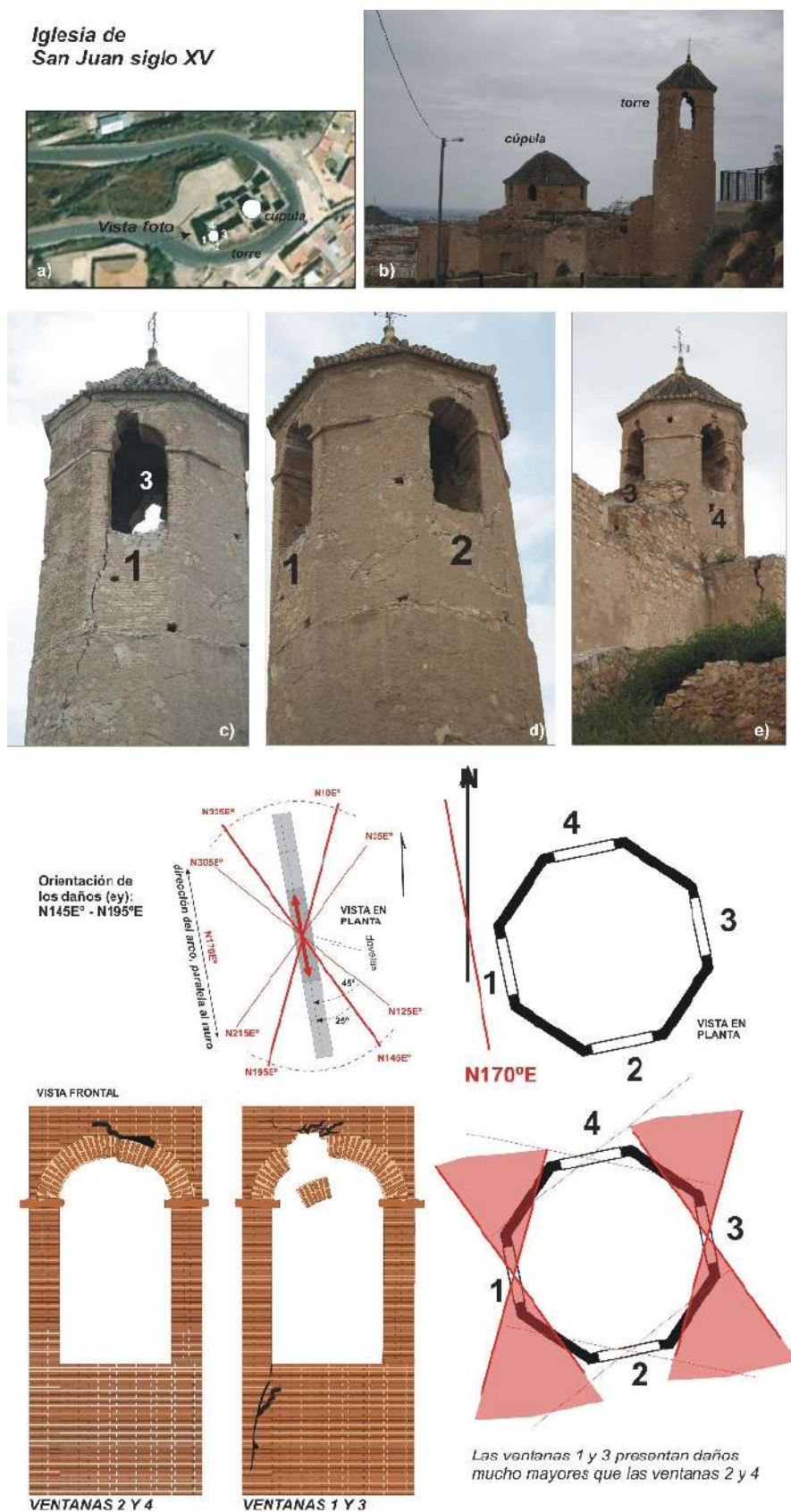


Figura 3. Ejemplo del estudio de orientación de daño en la torre de la iglesia de San Juan, donde se observa cómo la torre presenta diferentes efectos arqueológicos en función de la orientación de sus fachadas, indicando la orientación de pulso del movimiento del terreno.

Para el análisis arqueosísmico la metodología se basa en la identificación y cuantificación de los efectos y las deformaciones (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011 y Giner-Robles *et al.*, 2009; 2011), permitiendo definir la posible localización de las fallas sísmicas que los generan (figs. 2 y 3). Esta información arqueológica puede mejorar la caracterización de terremotos históricos e incluso definir episodios sísmicos de época histórica que no están registrados en los catálogos sísmicos.

En el presente proyecto una vez identificadas los efectos y daños que se han producido por efecto del terremoto en estructuras históricas y estableciendo la clasificación según la escala EAE's, se cuantifica la deformación sísmica en los diferentes EAE's y se correlacionarán con los parámetros focales y situación del foco sísmico previamente caracterizados instrumentalmente. Para realizar el análisis del conjunto de deformaciones sísmicas observadas en la ciudad de Lorca se ha seguido la metodología propuesta por Giner-Robles *et al.* (2009), que consta de cinco fases: a) análisis individual de los datos; b) análisis conjunto de los datos; c) análisis por EAE's; d) cálculo de trayectorias de deformación, y e) análisis por zonas.

Algunos resultados preliminares del proyecto

El análisis de los datos de orientación muestra una orientación media del pulso del daño según la dirección N130° E (vectores de caídas de ornamentación orientadas, de marcas de impacto, de dirección de colapso de muros, roturas en aspa en muros y fachadas, etc.) (figs. 3 y 4). Los resultados obtenidos del análisis muestran orientaciones homogéneas con muy poca dispersión. El estudio y análisis de estos datos en función de orientaciones de calles y de las estructuras mismas (torres, muros, etc.) indica además, que la orientación media obtenida para el conjunto de la ciudad es independiente del tipo de efecto inventariado (Giner *et al.*, 2012). Se ha reco-

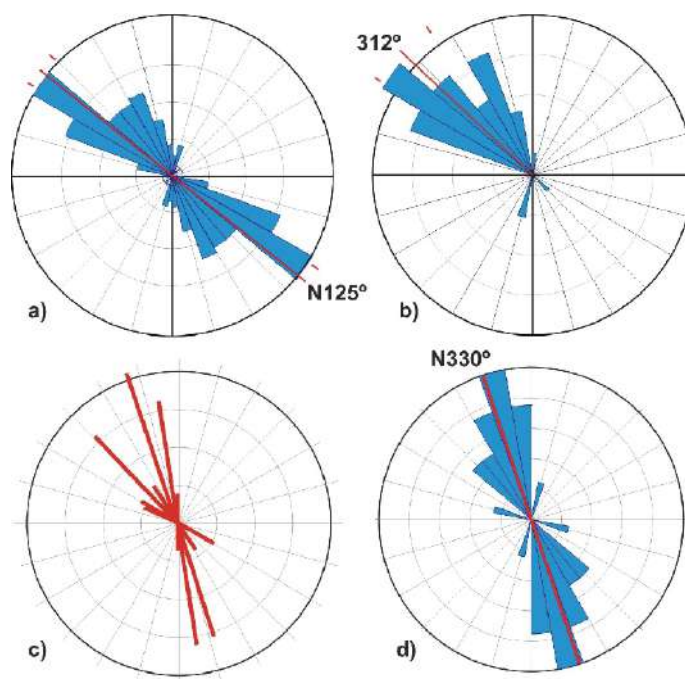


Figura 4. a) Rosa de orientaciones del pulso de movimiento recogido de los datos obtenidos en la ciudad de Lorca (140 datos); b) rosa de acimuts del daño (45 datos); c) orientación de los vectores de desplazamiento 2D deducidos del acelerograma registrado en la estación de Lorca (situado en el centro histórico, cárcel); d) rosa de orientaciones de las estructuras que se localizan en un radio de 250 m alrededor del acelerógrafo (15 datos) (Giner *et al.*, 2012).

nocido además dos nuevos EAEs, uno corresponde a compactaciones de rellenos antrópicos y el otro a extrusiones de claves de arco, que completan la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011).

Del análisis preliminar de estos datos se puede establecer, por tanto, un pulso en la dirección de movimiento del terreno al paso de la onda sísmica que coincide con los mismos efectos observados en los edificios afectados por el terremoto de 1674 (Rodríguez Pascua *et al.*, 2012), lo que indicaría que la ciudad se somete a la misma dirección de sacudida del terreno frente a los terremotos de este tipo. De esta forma se puede correlacionar esta orientación de daño en el patrimonio con la falla de Alhama de Murcia que es perpendicular a esta orientación, y por tanto podemos obtener dos recomendaciones preliminares. Por un lado, en las actuaciones y restauraciones sobre el patrimonio dañado, ya que tiene que tenerse en cuenta que los principales daños producidos por el sismo de 2011 en las edificaciones están relacionados con esta orientación. Y por otro lado, es esta dirección de daño la que tiene que ser considerada para establecer las actuaciones de refuerzo y consolidación de edificios patrimoniales ante futuros terremotos en los que esté involucrada la misma falla.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado con el proyecto del Plan Nacional RESCATELO (CGL2011-14925-E). También nos gustaría agradecer los datos y facilidades aportadas por el Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ayuntamiento de Lorca, Lavila Arquitectos, Grupo Entorno, Ferrovial, Acciona y Archivo Municipal de Lorca.

Bibliografía

- CRONE, A.; MACHETTE, M. N., y BOWMAN, R. (1992): «Geologic investigations of the 1988 Tennant Creek, Australia, earthquakes. Implications for paleoseismicity in stable continental regions», en *U.S Geological Survey Bulletin* 3032, pp.1-51.
- GINER-ROBLES, J. L.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; SILVA BARROSO, P.; RODRÍGUEZ-PASCUA M. A.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F., y CABANAS, L. (2012): «Análisis estructural de daños orientados en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Aplicaciones en Arqueosismología», en *Boletín Geológico y Minero*. Madrid.
- GINER-ROBLES, J. L.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; SILVA, P. G.; BARDAJÍ, T.; GRÜTZNER, C., y REICHERTER, K. (2009): *Structural analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE) Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain)*, 137 p.
- GINER-ROBLES, J. L.; SILVA BARROSO, P. G.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; BARDAJÍ AZCÁRATE, T.; GARDUÑO-MONROY, V. H., y LARIO GÓMEZ, J. (2011): *Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico*. Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE, 96 p.
- GUPTA, H. K. (1993): «The deadly Latur earthquake», en *Science* 262, pp. 1666-1667.
- MARTÍNEZ DÍAZ, J. J.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. Á.; PÉREZ LÓPEZ, R.; GARCÍA MAYORDOMO, J.; GINER ROBLES, J. L.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F.; RODRÍGUEZ PECES, M.; ÁLVAREZ GÓMEZ, J. A., e INSUA ARÉVALO, J. M. (2011): *Informe geológico preliminar del terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011, 5.1 Mw (20 de marzo de 2011)*. Disponible en: <http://www.igme.es/>
- MARTÍNEZ-DÍAZ, J. J.; MASANA, E., y MORTUÑO, M. (2010): «Implications Of The Structure Of The Alhama De Murcia Fault On Its Paleoseismological Analysis», en *Contribución de la geología al*

análisis de la peligrosidad sísmica. Edición de J. M. Insua y F. Martín-González. Guadalajara, pp. 97-101.

MARTÍN-GONZÁLEZ, F. (2009): «Cenozoic tectonic activity in a Variscan basement: Evidence from geomorphological markers and structural mapping (NW Iberian Massif)», en *Geomorphology*, 107, pp. 210-225.

PÉREZ-LÓPEZ, R.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; GINER-ROBLES, J. L.; MARTÍNEZ-DÍAZ, J. J.; MARCOS-NUEZ, A.; SILVA, P.; BEJAR, M., y CALVO, J. P. (2009): «Spelaeoseismology and palaeoseismicity of the “Benis Cave” (Murcia, SE of Spain): coseismic effects of the 1999 Mula earthquake (mb 4.8)», en *Palaeoseismology: Historical and Prehistorical Records of Earthquake Ground Effects for Seismic Hazard Assessment*. Edición de K. Reicherter, A. M. Michetti, y P. G. Silva, P. London: Geological Society, Special Publications.

RODRÍGUEZ-PÁSCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F.; GINER-ROBLES J. L., y SILVA P. G. (2012): «Efectos arquitectónicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Neoformación y reactivación de efectos en su Patrimonio Cultural», en *Boletín Geológico y Minero*. Madrid.

RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; PÉREZ-LÓPEZ, R.; SILVA, P. G.; GINER-ROBLES, J. L.; GARDUÑO-MONROY, V. H., y REICHERTER, K. (2011): «A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology», en *Quaternary International*, n.º 242, pp. 20-30.

Nanomateriales para la conservación y preservación de obras mueble e inmueble. Posibles enfoques aplicados al patrimonio documental

Elena González

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
elenagoart@gmail.com

Carmen Peña

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
carmen.pena@mecd.es

Emma Sánchez

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)
emma.sanchez@mecd.es

Resumen: El IPCE, con su participación en el proyecto NANOFORART, se suma a la corriente de investigaciones sobre las novedosas propiedades de la materia en su escala nano. En él van a trabajar de manera conjunta científicos y restauradores-conservadores de diversas instituciones, mayoritariamente europeas, dedicadas a la conservación del patrimonio. Su objetivo común es la de ampliar las herramientas y técnicas de trabajo a la hora de abordar la tarea de limpieza y consolidación en las obras de carácter inmueble, y la desacidificación y limpieza en las de carácter mueble. El IPCE trabajará, principalmente, en la aplicación de estos nanomateriales dentro del ámbito del documento gráfico, tanto en soporte celulósico como proteínico.

Palabras clave: Nanotecnología, papel, pergamino, cuero, limpieza, desacidificación.

Abstract: The IPCE (Instituto del Patrimonio Cultural de España) joins the current researches on the novelty capabilities of nanoscale matter, taking part in the NANOFORART Project. Scientists and restorers-conservators from several institutions dedicated to heritage conservation, mostly European, will work together towards the target of expanding the tools and work techniques involved in the tasks of cleaning and consolidation for immovable artworks, also of cleaning and deacidification for movable artworks. The activities of the IPCE will mainly focus on its application within the field of graphic materials, both on cellulosic and protein substrate.

Keywords: Nanotechnology, paper, parchment, leather, cleaning, deacidification.

La nanotecnología es una ciencia que comprende el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala. La explotación de fenómenos y propiedades de esta materia ha permitido obtener de ella novedosas propiedades, hasta ahora únicas. El continuo desarrollo de estos materiales y el estudio de los fenómenos físico-químicos a una escala menor del micrómetro está creando nuevos enfoques en diversos sectores socio-económicos: medicina, energía, biología, ingeniería, etc. En la última década se ha incorporado también el de la conservación de patrimonio, aportando nuevas herramientas que permiten desarrollar metodologías todavía más eficaces y respetuosas con la obra (ver tabla 1).

Tabla 1. Relación entre unidades del sistema métrico longitudinal

Metro	m	1
Milímetro	mm	10^{-3} (milésimo)
Micrómetro (micrón)	μ	10^{-6} (millonésimo)
Nanómetro	nm	10^{-9} (milmillonésima)
Picómetro	pm	10^{-12} (milmillonésima de millonésima)

El IPCE participa en el proyecto NANOFORART, incluido dentro del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea y que se configura como una continuación de proyectos europeos anteriores que iniciaron la investigación en este campo. Se ha iniciado a finales de 2011 y tiene una duración de tres años. Está liderado por el Consorzio Interuniversitario Per Lo Sviluppo Dei Sistemi A Grande Interfase, de la Universidad de Florencia, y cuenta con la participación de otras 14 instituciones, mayoritariamente europeas: Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE); Instituto Nacional de Antropología e Historia (MNAH), México; Nationalmuseum (NMD), Alemania; MBN Nanomaterialia S.p.A. (MBN), Italia; University College London (UCL), Reino Unido; Univerzita Pardubice (UPCEFR); República Checa; Birkbeck College-University of London (BC); Reino Unido; Zentrum für Bucherhaltung GmbH (ZFB), Alemania; Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), Francia; Chevalier Aurelia (CM), Francia; SIT Transportes Internacionales S. L. (SIT), España; Gema Art Group AS (GEMA), República Checa; Morana RTD d. o. o. (MRTD), Eslovenia; Università Ca'Foscari Venezia, Italia.

La finalidad principal del proyecto es el desarrollo y la experimentación práctica de nuevos nanomateriales para la preservación del patrimonio y el estudio del comportamiento de las obras a largo plazo tras el tratamiento; para ello, se trabajará en obra real y en modelos, intentando con ellos abarcar una amplia representación de materiales y deterioros. Será primordial con la finalidad del proyecto conseguir una plena seguridad laboral y un bajo impacto medioambiental.

Para desarrollar adecuadamente todos los objetivos del programa se ha establecido una planificación en 10 grupos de trabajo. Se ha tenido en cuenta, a la hora de incluir a las instituciones participantes en cada uno de ellos, su trayectoria y experiencia, además de los medios técnicos y humanos que podían aportar. El Área de Investigación y Formación y el Servicio de Libros y Documentos del Instituto del Patrimonio Cultural de España, dirigidos por su respectivos jefes de área, Marián del Egidio y Carmen Hidalgo, colaboran de manera conjunta en tres de estos diez grupos de trabajo: WP 3, WP 6 y WP 8 (ver tabla 2).

Tabla 2. Objetivos del proyecto y relación de instituciones participantes

Grupo trabajo	Objetivos del grupo	Participantes
WP 1	Diseño y formulación de sistemas nanoestructurados para la conservación del patrimonio	CSGI, MBN, BC, ZFB
WP 2	Caracterización físico-química de los nanomateriales	CSGI, UCL, ZFB
WP 3	Evaluación de la aplicabilidad sobre los objetos y su contribución a la conservación del patrimonio: –Bienes muebles (papel, pergamino, cuero y lienzo): limpieza/desacidificación –Bienes inmueble(pintura mural, revoco y piedra): limpieza/consolidación	CSGI, MNAH, NMD, IPCE, UCL, UPCEFR, BC, ZFB, C2RMF, CM, GEMA, MRTD
WP 4	Mejora en los métodos de producción con el objetivo de desarrollar una producción industrial de mediana y gran escala, y en la estandarización de los protocolos de producción y aplicabilidad	CSGI, MBN, ZFB, SIT
WP 5	Explotación y comercialización. Desarrollo de procesos industriales para la transferencia de la tecnología al mercado para su estandarización	MBN, ZFB, SIT
WP 6	Estudio del comportamiento a largo plazo sobre las obras	MNAH, NMD, IPCE, UCL, UPCEFR, BC, ZFB, C2RMF, GEMA, MRTD
WP 7	Evaluación del impacto ambiental y toxicidad	UNIVE
WP 8	Difusión y formación	CSGI, MNAH, NMD, IPCE, UPCEFR, BC, C2RMF, CM, SIT, GEMA, UNIVE
WP 9	Dirección y administración	CSGI, MBN, UPCEFR, GEMA, UNIVE
WP 10	Coordinación	CSGI, MBN, UPCEFR

WP 3. Evaluación de la aplicabilidad de sistemas nanoestructurados en la conservación del patrimonio

En este grupo de trabajo se incluyen la gran mayoría de las instituciones participantes. El IPCE, coordinador de este grupo, centrará su participación práctica en el patrimonio documental, tanto en soporte celulósico como proteínico, con dos objetivos principales: desacidificación (regulación del nivel de pH) y limpieza (eliminación de elementos ajenos a la pieza que están causando un deterioro).

El tratamiento de desacidificación con nanopartículas alcalinas en soportes como el lienzo y el papel, es de los primeros en desarrollarse en el campo de la nanotecnología aplicada a la conservación (GIORGI *et al.*, 2002: 8198-8203). Se ha demostrado que las dispersiones alcohólicas (isopropanol, 2-propanol) de nanopartículas de hidróxido de calcio y de magnesio, pueden considerarse un tratamiento en seco eficaz tanto para la neutralización de un soporte celulósico ácido, como para el aporte de una reserva alcalina estable y duradera en forma de carbonato cálcico al reaccionar el hidróxido con el CO₂ del aire. De este modo, el uso de estas dispersiones se convertiría en una alternativa a otros productos comerciales similares, ya existentes en el mercado. Frente a estos últimos, presenta dos principales ventajas: no necesitar tensioactivos fluorados en la composición final del producto y la posibilidad de poder introducir Ca(OH)₂, además de Mg(OH)₂ (único agente desacidificador en seco hasta ahora). El Ca presenta una excelente compatibilidad fisicoquímica con el soporte, además de tratarse del agente alcalino presente originariamente en la composición del papel (fig. 1).

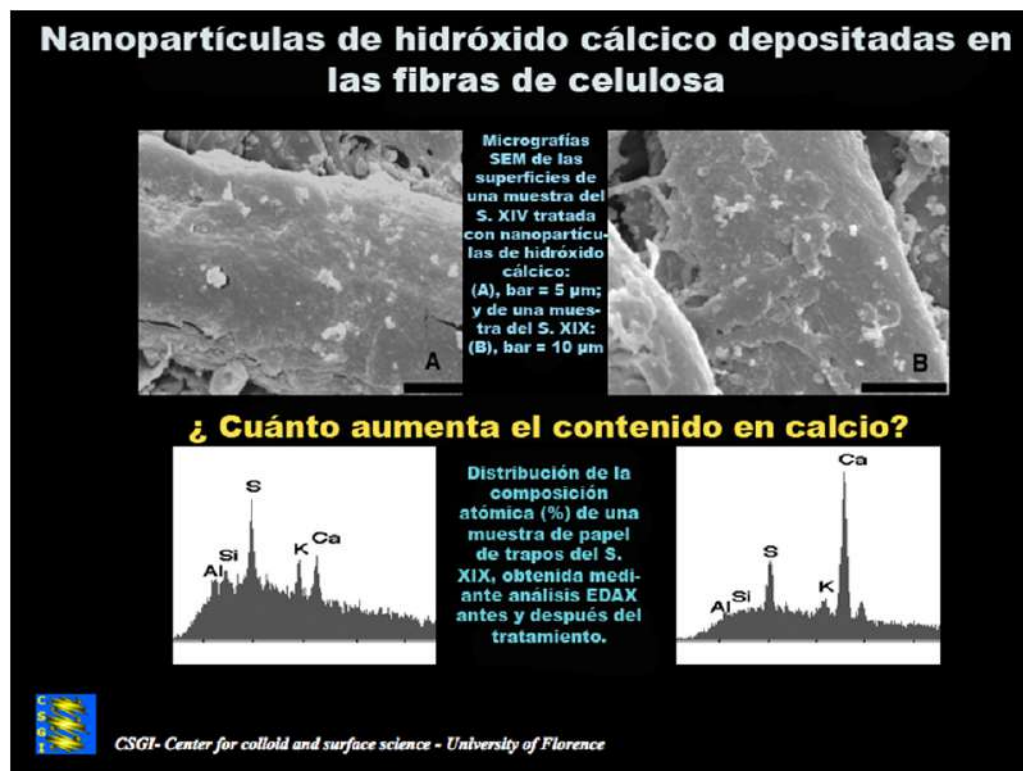


Figura 1. Desacidificación del papel con nanopartículas de hidróxido cálcico. Fuente: Langmuir, n.º 18 (21).

Dentro de la desacidificación del patrimonio documental, el marco de este nuevo programa va a trabajar sobre los siguientes aspectos:

1. Continuar con la investigación de hidróxidos y carbonatos alcalinotérreos nanoestructurados para la desacidificación del papel, evaluando la mejora en la penetración de las partículas y la rapidez de su penetración.
2. Estudio de nuevos disolventes orgánicos que permitan su aplicación en documentos con tintas sensibles a la dispersión alcohólica desarrollada hasta ahora (como las tintas modernas de anilinas). De esta manera se ampliaría el espectro de documentación que pueda recibir dicho tratamiento.
3. Avanzar en las recientes investigaciones sobre la capacidad inhibidora de la desacidificación con nanopartículas, sobre papel con problemas de corrosión por tintas metalogálicas (Poggi *et al.*, 2010: 19084-19090) (fig. 2).
4. Abrir nuevas vías de ajuste del pH para soportes proteínicos. Para ello, el objetivo del proyecto es encontrar un agente desacidificador óptimo nanocristalino (ejemplo: lactato cálcico) que pueda aplicarse como una dispersión en disolventes no polares, para así evitar la hinchazón de las fibras de colágeno de la piel y facilitar la penetración en su estructura interna. Dentro de este campo, también se estudiará la posibilidad de tratamiento químico en pieles afectadas con «úlceras rojas».

La limpieza será otro de los tratamientos a evaluar, dentro del estudio de aplicabilidad de los nanomateriales. Es muy habitual que en las obras de arte se depositen sustancias ajenas potencialmente dañinas y que además provocan una modificación de su apariencia. Eliminar estas sustancias sin alterar los elementos originales, supone un delicado proceso de limpieza.



Figura 2. Capacidad inhibidora de la desacidificación con nanopartículas ante la corrosión de las tintas metalogáficas. Fuente: Langmuir, n.º 26 (24).

Desde mediados del siglo XIX, los disolventes orgánicos han sido considerados eficientes agentes de limpieza, pero en numerosas ocasiones resultan muy invasivos con la obra debido a su alta penetración. Esto provoca que puedan traspasar la capa a eliminar, llegando a trastocar las capas subyacentes originales; por otro lado, provocan un estrés mecánico del soporte debido al aumento y disminución de su volumen tras la absorción y posterior evaporación del disolvente. Además, no debemos olvidar que el uso de estos disolventes se considera una práctica nociva para la salud y el medio ambiente.

A partir de la década de los ochenta, empezó a desarrollarse el uso de geles (acuosos, disolventes, enzimáticos y mixtos), lo que ha permitido una acción más localizada y ha reducido notablemente el peligro que suponía la permeabilidad del disolvente orgánico puro¹. Sin embargo, estos geles presentan algunas dificultades en su completa eliminación, pudiendo dejar residuos en la superficie de la obra tras su aplicación.

Partiendo de esta perspectiva, la nanotecnología trabaja en ampliar estas posibilidades, desarrollando innovadoras herramientas de limpieza como las microemulsiones, soluciones micelares y nuevos geles.

El uso de dispersiones coloidales O/A, al ser sistemas basados en agua, reducen el peligro de la toxicidad y la penetración de los disolventes orgánicos puros. Dentro de éstas, las microemulsiones y soluciones micelares presentan en su fase dispersa partículas cuyo diámetro medio es menor a 0,05 micrones (entre 0,05-0,01 en el caso de las microemulsiones y

¹ Los geles tradicionalmente utilizados en el campo de la conservación han sido geles físicos, denominados polímeros no entrecruzados. No son completamente estables, debido a que su red está formada por uniones de tipo Van der Waals, más débiles que las uniones covalentes (presentes, sin embargo, en los geles químicos). Estos geles pueden albergar y retener moléculas de líquido que puede separar las cadenas, pasando de un aspecto elástico a un aspecto viscoso.

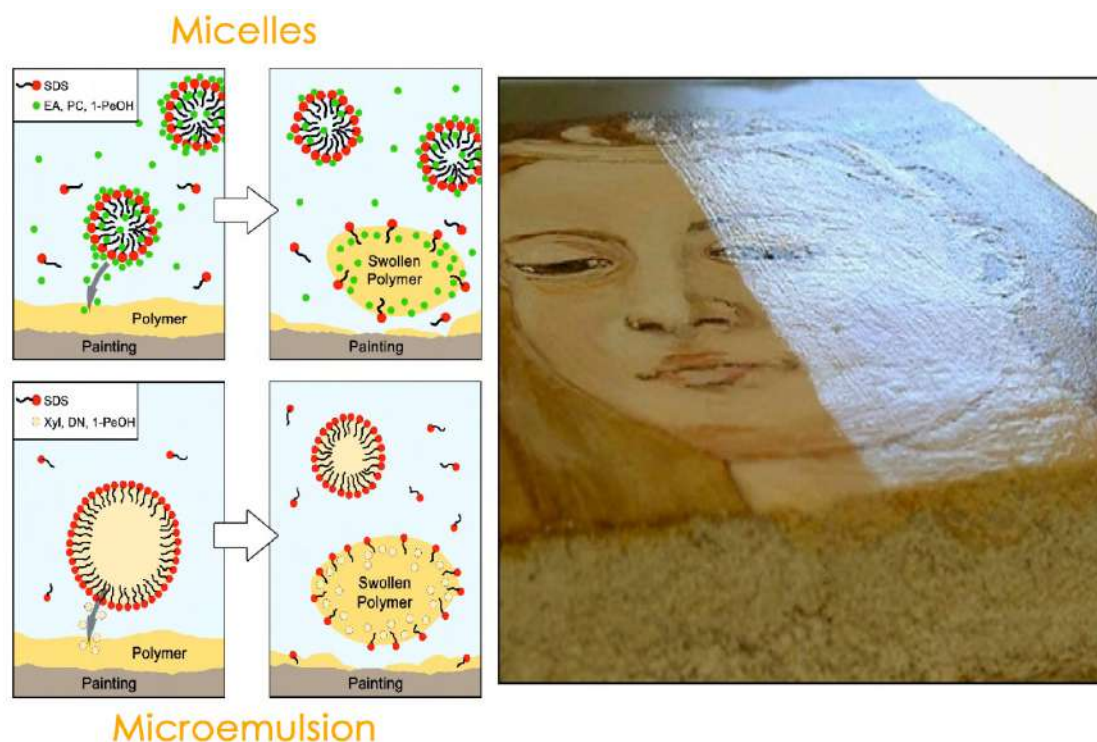


Figura 3. Nueva estrategia para la limpieza de obras de arte: soluciones micelares y microemulsiones. Fuente: *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, n.º 6.

0,002-0,006 en el de las soluciones micelares). Ambas muestran importantes ventajas frente a las emulsiones tradicionales: obtención espontánea (sin necesidad de acción mecánica), estabilidad termodinámica y transparencia, lo que permite controlar visualmente el proceso. Además las nanogotas presentan una gran superficie de área frente a su volumen, lo que aumenta la superficie de contacto; de esta manera, se consigue solubilizar los elementos a eliminar con el uso de menor cantidad de disolvente (fig. 3)².

Los anteriores programas de nanotecnología desarrollaron como herramientas de limpieza, nuevos geles con los que se ha pretendido solventar las limitaciones de los que se vienen usando tradicionalmente. Se trabajó principalmente, en la formulación de geles químicos³ que pudiesen ser adaptados para actuar también como contenedores de microemulsiones y soluciones micelares. En este tipo de geles podemos ajustar el tamaño de su red durante el proceso de la reacción de polimerización. Esto nos permite mejorar el control durante la liberación o absorción del elemento de limpieza contenido en ellos. Además, para lograr el objetivo de su eliminación completa y eficaz de superficies porosas, se les hizo sensibles a estímulos externos (pH, campos magnéticos, agentes químicos,...), cuya reacción ante ellos permitiese su remoción total tras la acción de limpieza. Hidrogeles de alta viscoelasticidad, eliminables por «peeling» o levantamiento, y geles magnéticos (o nanoesponjas magnéticas) que se retiran por imantación, se formularon y probaron por el equipo de Carretti y Bonini respectivamente (Carretti *et al.*, 2010: 751-760).

² Las soluciones micelares y microemulsiones ya han sido utilizadas en pinturas murales y lienzos para la eliminación de productos derivados de la contaminación y polímeros sintéticos usados en antiguos tratamientos de consolidación y recubrimiento. De hecho, existen formulaciones específicas para la remoción o eliminación del Paraloid B72®, Primal AC33® y Mowilith DM5® (Giorgi *et al.*, 2010: 695-704).

³ Estos geles químicos se caracterizan por la formación de una red tridimensional formada a través de enlaces covalentes, dando lugar a mallas entrecruzadas, y su ruptura conduciría a una degradación del gel.

Partiendo de todos estos resultados, NANOFORART va a trabajar en el progreso y confirmación de estas nuevas técnicas, centrándose en el desarrollo de nuevas formulaciones químicas, con el fin de hacerlas factibles en un amplio rango de aplicaciones de limpieza y estudiar su comportamiento y posibles efectos a largo plazo sobre las obras.

El IPCE analizará su comportamiento en:

- Soporte celulósico (papel): trabajará con elementos externos, de difícil eliminación habituales en estas obras, tales como cintas autoadhesivas, barnices de recubrimiento o laminaciones sintéticas. Sobre estas muestras se pondrá en práctica la acción de hidrogeles y geles químicos que contengan, además de los disolventes tradicionales y enzimas, los nuevos agentes de limpieza nanoestructurados (soluciones micelares).
- Soporte proteínico (pergamino y cuero): se utilizarán por primera vez en este tipo de soporte, geles y sistemas de limpieza nanoestructurados. La limpieza del cuero envejecido supone un auténtico reto, ya que la degradación de las moléculas de proteína se produce por procesos de hidrólisis y oxidación, y son extremadamente sensibles al agua y a los disolventes polares, los cuales provocan su gelatinización. Por ello, frente a los sistemas de limpieza acuosos o polares, el proyecto formulará organogeles, cuya baja polaridad evite los indeseables efectos de hinchazón, rotura y alteraciones de color en las fibras de colágeno.

WP 6. Estudio del comportamiento a largo plazo sobre las obras

El Área de Investigación y Formación del IPCE contribuirá en el proyecto con el estudio del comportamiento de las obras que han recibido tratamiento. Para ello, se realizarán aquellas técnicas de análisis necesarias para proceder a la caracterización de los soportes, así como procesos de envejecimiento artificial para analizar su comportamiento a largo plazo. Las técnicas analíticas que se incluyen por parte del IPCE son: espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (SEM-EDX), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), reflectancia total atenuada (ATR), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) (fig. 4).

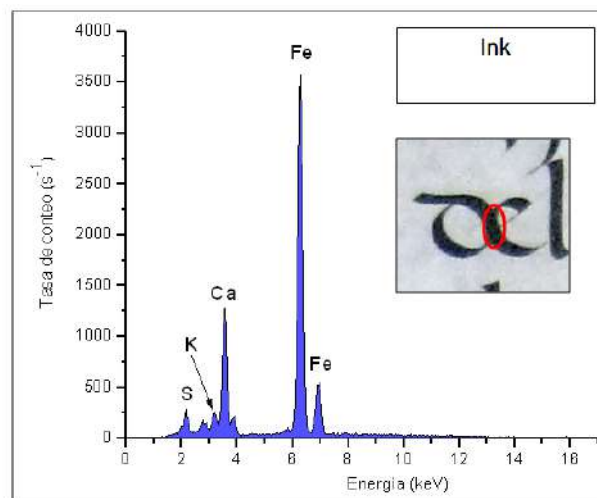
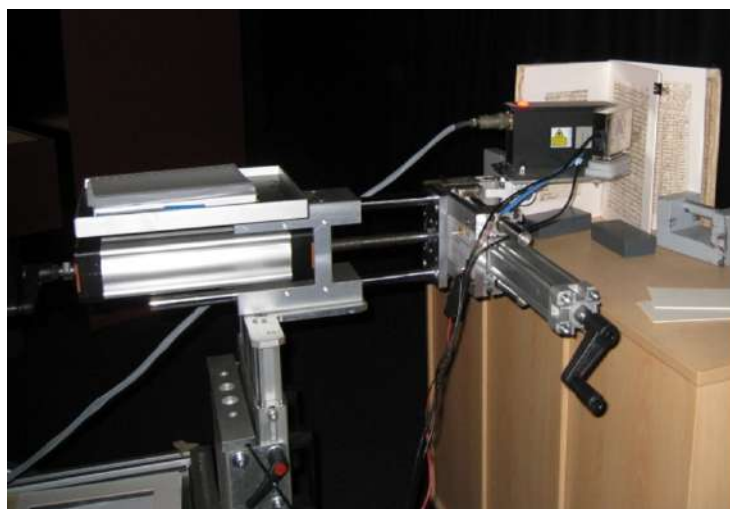


Figura 4. Equipo de Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) y tabla de resultados en la caracterización de tinta. Fotografía: Elena González Arteaga.

El envejecimiento acelerado se llevará a cabo en las muestras, antes y después de cada tratamiento. Se realizará en cámaras dinámicas y siguiendo los protocolos de envejecimiento tanto en la foto-oxidación, como en el envejecimiento higrotérmico (ciclos de temperatura y humedad relativa). El estudio del comportamiento a largo plazo de los productos y obras se realiza con el fin de evitar los daños imprevistos que puedan producirse con el envejecimiento natural, y evaluar la viabilidad de los nuevos tratamientos de limpieza, desacidificación y consolidación.

En el caso del tratamiento de desacidificación, los resultados se compararán con los datos de la velocidad de degradación del papel desacidificado y sin tratar, bajo las condiciones de envejecimiento acelerado; esto nos permitirá evaluar y confirmar el impacto que los nanomateriales muestran en el papel. También se evaluará si la utilización de microemulsiones, soluciones micelares o de nuevos geles en los tratamientos de limpieza, son óptimas para el objetivo que se persigue; es decir, para la eliminación de sustancias dañinas sin que ello suponga una variación de las características físico-químicas del soporte o la aparición de residuos procedentes del tratamiento. Por ello, la realización de estos experimentos será fundamental para la evaluación de los materiales sujetos a estudio.

WP 8. Difusión y formación

El IPCE participará en este grupo de trabajo con el objetivo de difundir los resultados de la tecnología desarrollada y su aplicación a los usuarios finales no vinculados inicialmente al proyecto. Para ello se utilizarán todos los recursos a nuestro alcance, tales como la realización de actividades de formación y publicaciones.

Como producto de todo este trabajo conjunto de científicos y restauradores esperamos dar un paso más en la tarea de entender los complejos mecanismos de deterioro de las obras que conforman nuestro patrimonio y, en consecuencia, poder ampliar el abanico de posibilidades a la hora de abordar la difícil labor de su conservación. Para que esto sea posible, se valorará en todo momento la eficacia del tratamiento y su compatibilidad con la obra, así como su versatilidad, aplicabilidad, coste económico y su toxicidad e impacto medioambiental.

Bibliografía

- BAGLIONI, P.; DEI, L.; CARRETTI, E., y GIORGI, R. (2009): «Gels for the Conservation of Cultural Heritage», en *Langmuir*, n.º 25 (15), pp. 8373-8374.
- BONINI, M.; LENZ, S.; GIORGI, R., y BAGLIONI, P. (2007): «Nanomagnetic Sponges for the Cleaning of Works of Art», en *Langmuir*, n.º 23, pp. 12644-12650.
- BONINI, M.; LENZ, S.; FALLETTA, E.; RIDI, F.; CARRETTI, E.; FRATINI, E.; WIEDENMANN, A., y BAGLIONI, P. (2008): «Acrylamide-Based Magnetic Nanosponges: A New Smart Nanocomposite Material», en *Langmuir*, n.º 24, pp. 12644-12650.
- CARRETTI, E.; GIORGI, R.; BERTI, D., y BAGLIONI, P. (2007): «Oil-in-Water Nanocontainers as Low Environmental Impact Cleaning Tools for Works of Art: Two Case Studies», en *Langmuir*, n.º 23, pp. 6396-6403.
- CARRETTI, E.; BONINI, M.; DEI, L.; BERRIE, B. ANGELOVA, L.; BAGLIONI, P., y WEISS, R. (2010): «New Frontiers in Material Science for Art Conservation: Responsive Gels and Beyond», en *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, n.º 6, pp. 751-760.

- GIORGI, R.; DEI, L.; CECCATO, M.; SCHETTINO, C., y BAGLIONI, P. (2002): «Nanotechnologies for Conservation of Cultural Heritage: Paper and Canvas Deacidification», en *Langmuir*, n.º 18, pp. 8198-8203.
- GIORGI, R.; BAGLIONI, M.; BERTI, D., y BAGLIONI, P. (2010): «New Methodologies for the Conservation of Cultural Heritage: Micellar Solutions, Microemulsions, and Hydroxide Nanoparticles», en *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, n.º 6, pp. 695-704.
- POGGI, G.; GIORGI, R.; TOCCAFONDI, N.; KATZUR, V., y BAGLIONI, P. (2010): «Hydroxide Nanoparticles for Deacidification and Concomitant Inhibition of Iron-Gall Ink Corrosion of Paper», en *Langmuir*, n.º 26 (24), pp. 19084-19090.

Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento (CREMEL)

Emilio Cano

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC), Madrid
ecano@cenim.csic.es

Diana Lafuente

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

J. Pérez

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

M.^a Llanos Flores

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

I. Martínez

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

Inmaculada Traver

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

Livio Ferrazza

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), Valencia

Soledad Díaz

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)

Emma García

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)

E. Martín

Museo Oteiza, Navarra

P. Letardi

Centro Nazionale di Ricerca, Istituto di Scienze Marine (CNR-ISMAR), Génova (Italia)

Resumen: El uso de técnicas electroquímicas como tratamiento de restauración del patrimonio metálico estuvo muy extendido durante el siglo pasado pero, debido al poco control de las mismas y al cambio en los criterios/ética de la restauración, dejaron de usarse. En los últimos años, sin embargo, han resurgido con fuerza tanto para tratamientos de restauración, como para su aplicación como técnica de análisis; aunque su aplicación aún no está realmente generalizada. Estas técnicas permiten comprobar la eficacia de las capas de protección aplicadas o inhibidores, así como evaluar el estado de conservación de los objetos metálicos. En la presente comunicación se presenta el proyecto CREMEL, cuyo objetivo es el de avanzar en la aplicación de estas técnicas en la conservación y restauración del patrimonio metálico.

Palabras clave: Patrimonio metálico, corrosión, protección, electroquímica, impedancia.

Abstract: The use of electrochemical techniques for the treatment of metallic heritage was very popular in the last century, but was almost abandoned due to changes in conservation criteria. Nevertheless these techniques have re-emerged in last years both for restoration treatments and as analytical technique, but are not yet completely widespread. These techniques allow for the assessment of the efficiency of protective coatings or inhibitors, as well as evaluating the conservation condition of metallic objects. This communication presents the CREMEL project, whose aim is to advance in the application of these techniques for the conservation and restoration of metallic heritage.

Keywords: Metallic heritage, corrosion, protection, electrochemistry, impedance.

Introducción

El principal fenómeno de degradación que afecta al patrimonio cultural (PC) metálico es la corrosión. Es decir, la reacción química del metal con el medio que lo rodea: la tierra del enterramiento o el agua en el caso de un objeto arqueológico enterrado o sumergido; la atmósfera exterior de un bien expuesto a la intemperie; la atmósfera interior de la sala, la vitrina o el almacén en las piezas expuestas en museo, etc. Los fenómenos de corrosión que afectan al patrimonio cultural metálico son, de manera casi exclusiva, de tipo electroquímico; es decir, la reacción del metal con el medio ambiente se produce en el seno de un electrólito, tal como el agua de mar en el caso de objetos sumergidos, o la humedad adsorbida sobre la superficie del metal en objetos expuestos a la atmósfera. Siendo un proceso electroquímico, resulta bastante lógico pensar que el proceso de corrosión se puede estudiar o controlar estudiando o controlando las magnitudes eléctricas que intervienen. Es decir, mediante técnicas electroquímicas.



Figura 1. Logotipo del proyecto CREMEL.

Las técnicas electroquímicas en conservación de metales

El uso de técnicas electroquímicas para la conservación y restauración del patrimonio metálico se remonta a finales del siglo XIX, cuando Friedrich Rathgen comenzó a usar en los Museos Reales de Berlín reducciones electrolíticas para el tratamiento de problemas de corrosión activa por cloruros en bronce y hierros arqueológicos. Aunque había alguna referencia anterior, también fue de los primeros en utilizar reducciones electroquímicas de monedas de cobre y bronce (Gilbert, 1987). Procedimientos similares fueron recogidos por Plenderleith (1956), recomendando para la reducción del cobre y sus aleaciones hidróxido sódico como electrolito y ánodos de acero inoxidable. Estos procedimientos, que utilizan altas polarizaciones, en realidad producen la reducción del hidrógeno que se manifiesta claramente en la producción de burbujas de hidrógeno sobre el objeto, en lugar de la pretendida reducción del metal. Con ello, la eliminación de los productos de corrosión es realmente más mecánica por las burbujas formadas, que electroquímica. Estos procedimientos, por lo agresivo del tratamiento, fueron cayendo en desuso en el último tercio del siglo XX. Hay que reconocer, sin embargo, que esto se debió a un cambio en los criterios de restauración (por ejemplo, por considerar inaceptable la eliminación completa de ciertas pátinas) más que a limitaciones intrínsecas de las técnicas electroquímicas que, como se ha demostrado con los desarrollos posteriores, permiten adaptarse a los criterios actuales.



Figura 2. Ensayo electroquímico de una probeta simulando hierros históricos para la evaluación de recubrimientos protectores frente a la corrosión.

Carradice y Campbell (1994) fueron pioneros en la aplicación de las reducciones electroquímicas con control potencioestático para la reducción de plomo. Para ello, se añade un tercer electrodo, un electrodo de referencia, que permite medir y controlar el voltaje aplicado. El uso de un potencióstato permite controlar de manera continua el potencial aplicado y la monitorización continua de la evolución de la corriente. Las reducciones potencioestáticas han sido utilizadas por distintos autores en los últimos años, tanto para plomo (Barrio *et al.*, 2005 y Schotte, y Adriaens, 2006), como para plata o plata dorada (Degriigny *et al.*, 1996 y Bernard *et al.*, 2005). El control electroquímico del proceso permite, adicionalmente, desarrollar sobre la superficie del plomo o de la plata capas pasivantes tras la limpieza (Degriigny *et al.*, 1996 y Barrio *et al.*, 2005). La confianza e interés en estos tratamientos queda patente por el hecho de que numerosos laboratorios e instituciones dedicados a la conservación-restauración, en los últimos años, han adquirido equipos para comenzar a aplicar técnicas electroquímicas.

A pesar de estos importantes avances y del auge que han experimentado recientemente estas técnicas de tratamiento, como se ha mencionado, quedan aún muchos interrogantes abiertos: aunque los tratamientos electroquímicos se vienen aplicando también de manera localizada, ha sido sin un control del

potencial eléctrico del objeto al que se realiza el tratamiento, tal y como se viene haciendo con éxito probado en tratamientos por inmersión. Por otra parte, no se ha estudiado cómo afecta el tipo de tratamiento de limpieza realizado –electroquímico, químico, o mecánico– a la evolución futura del objeto intervenido, en cuanto a su resistencia a un posterior empañamiento/corrosión, y, finalmente, no se ha estudiado de manera sistemática cómo afectan superficialmente a los objetos que son tratados de manera repetitiva los distintos tratamientos, y en qué condiciones y casos puede ser preferible un tipo de tratamiento u otro.

Además de este uso de las técnicas electroquímicas como herramienta para el tratamiento de objetos, en los últimos años ha experimentado un crecimiento significativo su uso para el estudio de la corrosión y los sistemas de protección del objeto metálico. Estas técnicas están ampliamente implantadas para aplicaciones industriales desde el último tercio del siglo xx, pero su aplicación a la conservación del patrimonio es mucho más reciente, remontándose los trabajos pioneros al año 1995 y 1998 (Price *et al.*, 1995 y Letardi *et al.*, 1998).

En la comunidad dedicada a la conservación de metales hay una continua búsqueda de nuevos y mejorados recubrimientos que proporcionen una buena protección a los objetos, respetando a su vez los requisitos especiales de la ética de la conservación-restauración (Cano *et al.*, 2008; Degriigny 2008). Tanto el tratamiento como cualquier nuevo material han de ser probados a fondo, documentados y han de ajustarse al paradigma establecido antes de aplicarlos por primera vez sobre objetos reales. En este sentido, las técnicas electroquímicas permiten cuantificar la capacidad protectora de distintos sistemas de protección (recubrimientos e inhibidores), su evolución con el tiempo y el envejecimiento, permitiéndonos elegir para cada material y situación los más adecuados, de una forma mínimamente invasiva y obteniendo información en tiempos mucho más cortos de los que con otras técnicas sería posible (Cano *et al.*, 2007 y Cano *et al.*, 2010). El carácter protector de las pátinas formadas de manera natural o artificial sobre monumentos de bronce expuestos al exterior también puede ser estudiado utilizando este tipo de técnicas (Letardi y Luciano, 2007).

El proyecto CREMEL

El proyecto CREMEL (Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento) tratará, en los próximos años, de abordar estos retos desde un planteamiento interdisciplinar, tanto en el equipo investigador, como en las instituciones implicadas. Se trata con ello de abordar de una manera integral el problema, desde su estudio en laboratorio hasta su aplicación real en la conservación-restauración del patrimonio cultural metálico.

El proyecto CREMEL es un proyecto de I+D+i dirigido por el doctor Emilio Cano Díaz, del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) del CSIC, que se desarrollará entre el 2012 y el 2014, y cuenta con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad, dentro del Plan Nacional I+D+i 2008-2011 –Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental, ref. HAR2011-22402. En el proyecto participan, además del CENIM-CSIC, el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R) de la Generalitat Valenciana; el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte; la Fundación Museo Jorge Oteiza y el Instituto de Ciencias Marinas (ISMAR) del CNR de Italia.

La finalidad última del proyecto es mejorar la conservación del patrimonio cultural metálico por medio del avance en la aplicación de técnicas electroquímicas. El uso innovador de las técnicas electroquímicas puede contribuir a una conservación sostenible del patrimonio

metálico: son relativamente baratas y rápidas en comparación con otras, pueden ser portátiles, pueden aplicarse globalmente (tratamiento en masa) o selectivamente y, en análisis, pueden ser significativamente menos destructivas e invasivas que muchos otros de métodos analíticos.

Los objetivos concretos de este proyecto de investigación recién comenzado son: avanzar en la aplicación y mejora de las técnicas electroquímicas en el ámbito de la conservación-restauración de metales; abordar el estudio desde un punto de vista interdisciplinar, tanto por el equipo que compone el proyecto, como por las diferentes instituciones que participan; valorar las consecuencias y beneficios del uso de estas técnicas como tratamiento, comparándolas con el químico y físico (por ejemplo bisturí); y evaluar la efectividad de una selección de recubrimientos e inhibidores usados habitualmente en la conservación de metales.

Bibliografía

- BARRIO, J.; CANO, E.; ARROYO, M.; PARDO A. I., y CHAMÓN, J. (2005): *Actas del II Congreso del Grupo Español del IIC. Investigación y Restauración*. Barcelona: Museu Nacional d'Art de Catalunya, p. 133.
- BERNARD, M. C.; DAUVERGNE, E.; EVESQUE, M.; KEDDAM, M., y TAKENOUTI, H. (2005): *Corrosion Science*, n.º 47, p. 663.
- CANO, E.; BARRIO, J.; BASTIDAS, D. M.; FAJARDO, S.; BASTIDAS, J. M.; CHAMÓN, J., y PARDO, A. I. (2008): *Meta-España'08. Congreso de conservación y restauración del patrimonio metálico*. Edición de J. Barrio y E. Cano, E. Madrid, p. 74.
- CANO, E.; BASTIDAS, D. M.; ARGYROPOULOS, V., y SIATOU, A. (2007): *Strategies for Saving our Cultural Heritage*. Atenas: TEI of Athens, p. 121.
- CANO, E.; LAFUENTE, D., y BASTIDAS, D. M. (2010): *Solid State Electrochem*, n.º 14, p. 381.
- CARRADICE, I. A., y CAMPBELL, S. A. (1994): *Studies in Conservation*, n.º 39, p. 100. International Institute of Conservation of Historic and Artistic Works (IIC).
- DEGRIGNY, C. (2008): *Metals and Museums in the Mediterranean. Interpreting, Preserving and Exhibiting*. Athens: PROMET Project, p. 179.
- DEGRIGNY, C.; WERY, M.; VESCOLI, V., y BLENGINO J. M. (1996): *Studies in Conservation*, n.º 41, pp. 170-178. International Institute of Conservation of Historic and Artistic Works (IIC).
- GILBERT, M. (1987): *Journal of the American Institute for Conservation*, n.º 2, p. 105.
- LETARDI, P., y LUCIANO, G. (2007): *Proceedings of Metal 07*. Amsterdam: Rijksmuseum, vol. 3, p. 44.
- LETARDI, P.; BECCARIA, A.; MARABELLI, M., y D'ERCOLI, G. (1998): *Metal 98. International Conference on Metal Conservation*. Edición de J. Ashton, y D. Hallam. Draguignan-Figanières (Francia). Londres: James & James, p. 303.
- PLENDERLEITH, H. J. (1956): *The Conservation of Antiquities and Works of Art*. Londres: Oxford University Press.
- PRICE, C.; HALLAM, D.; HEATH, G.; CREAGH, D., y ASHTON, J. (1997): *Metal 95 International Conference on Metal Conservation*. Semur-en-Auxois (Francia). Londres: James & James, p. 233.
- SCHOTTE, B., y ADRIAENS, A. (2006): *Studies in Conservation*, n.º 51. International Institute of Conservation of Historic and Artistic Works (IIC).

La contaminación por compuestos orgánicos en museos y exposiciones: estudio, análisis y efectos sobre el patrimonio cultural metálico

Diana Lafuente

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC)
d.lafuente@cenim.csic.es

Emilio Cano

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC)
ecano@cenim.csic.es

Resumen: La preocupación por los contaminantes atmosféricos y el daño que estos provocan en el patrimonio cultural ha ido *in crescendo* a lo largo de los últimos años. Dentro de los contaminantes de interior, los que más afectan al patrimonio metálico son los compuestos orgánicos: ácido acético y fórmico, aldehídos y compuestos orgánicos volátiles (COV), así como los compuestos reducidos del azufre y otros factores que se consideran oxidantes/reactivos de los contaminantes y que actúan sinérgicamente con ellos (por ejemplo: el ozono (O_3), o la humedad relativa).

Esta investigación se centra en las causas y efectos de dichos compuestos orgánicos en el patrimonio metálico de base Cu (cobre) y Pb (plomo). La principal fuente de emisión de éstos son los materiales de fabricación de las vitrinas de los museos: maderas, barnices, siliconas, pinturas, etc. Para ello, desde el CENIM estamos colaborando con distintos museos e instituciones de toda España y Europa para analizar tanto las emisiones de las vitrinas *in situ*, como la de los materiales que las componen y los efectos/corrosión que producen en los objetos del patrimonio metálico. Hasta el momento, las principales conclusiones obtenidas son que la presencia de estos contaminantes en los museos es evidente y que las concentraciones de ácido fórmico son particularmente altas en algunos casos.

Palabras clave: Ácidos orgánicos, aldehídos, COV, museo, patrimonio metálico.

Abstract: Concern about atmospheric pollutants and the damage they can cause in the cultural heritage has been growing during the last years. Regarding indoor pollutants, those which affect the most to the metallic heritage are the organic compounds: acetic and formic acids, aldehydes and volatile organic compounds (VOC), as well as sulphur reduced compounds and other factors that are considered pollutants/oxidants or reagents and perform synergistically with them (e.g. O_3 , relative humidity).

This research focus on the causes and effects of those organic compounds on the Cu/Pb based metallic heritage. Their main emission sources are the museums showcases fabrication materials: wood, varnishes, silicones, paints, etc. For that reason, in the CENIM, we are collaborating

with several museums and institutions from Spain and Europe to analyse *in situ* showcases emissions as well as their effects/corrosion that they produce on metallic cultural heritage. For the time being, the main conclusions we get are that those pollutants presence in museums is obvious and formic acid concentrations are particularly high in some cases.

Keywords: Organic acids, aldehydes, VOC, museum, metallic heritage.

Introducción

Los efectos provocados por los contaminantes atmosféricos sobre los metales son de sobra conocidos desde la Antigüedad. Desde su uso para la fabricación de pigmentos como el blanco de plomo (Plinio, 1952: 175), como las consecuencias de su presencia en conjuntos escultóricos de gran relevancia, como el Monumento Espartano de Delfos (al que perteneció el famoso Auriga de bronce), provocando su degradación o, como lo verían sus coetáneos, una alteración en el color de la pátina que llegó a ser incluso apreciada (Plutarco, 1935: 261, 270, y Franke, y Mircea, 2005: 103-116).

Los estudios dedicados a la conservación del patrimonio cultural y los efectos que los contaminantes atmosféricos provocan en ellos, se han centrado principalmente en las atmósferas de exterior puesto que es donde las concentraciones de dichos contaminantes son mayores y, por ende, más rápidos sus efectos sobre los objetos. Contaminantes inorgánicos como el SO_x , NO_x , O_3 y Cl_2 , tendrán una mayor presencia en el exterior que en el interior de museos y, dependiendo de las barreras/equipos empleados para frenar el acceso de éstos al interior, su concentración será mayor en las zonas de confluencia aunque también puede haber fuentes de emisiones en el interior (Brimblecombe, 1990: 1-8; Saraga, *et al.*, 2011: 2.333-2.341; Norbert, y Banks, 1985: 9-20, y Smith *et al.*, 2012: 393-399).

Los contaminantes o compuestos orgánicos tienen una mayor concentración en las atmósferas de interior y, aunque ésta no sea tan alta como la que se puede observar en los contaminantes de exterior, los efectos son igual de nocivos (Schieweck, 2009). Dentro de estos contaminantes, los que más afectan al patrimonio cultural metálico son los ácidos orgánicos (ácido acético y fórmico), aldehídos (formaldehído, acetaldehído) y, aparentemente, los compuestos orgánicos volátiles (COV). Además, hay que considerar los factores que pueden actuar sinérgicamente con ellos, oxidándolos o provocando que las reacciones químicas y los procesos de degradación se aceleren: O_3 , HR, temperatura, pH, etc.

La contaminación en los museos españoles

La investigación que se está desarrollando en el CENIM-CSIC (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas) sobre la contaminación provocada por compuestos orgánicos en el interior de museos se está haciendo en colaboración con el Museo Arqueológico Nacional, Museo de América, Museo de Aeronáutica y Astronáutica, Museo del Traje, Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, Museo Oteiza, Museo de Prehistoria de Valencia, Museo Arqueológico de Burriana (Castellón), Museo Guggenheim (Bilbao), Museu Nacional D'Art de Catalunya (Barcelona), Museu Frederic Marès (Barcelona), Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya, Museo de Arte Romano de Mérida, Museu Comarcal de l'Urgell-Tàrrrega (Lleida), Museo de Artes y costumbres populares de Sevilla y con la Diputación Foral de Álava.

Algunos de estos museos sufrían casos evidentes de corrosión en sus colecciones metálicas, presumiblemente, provocados por estos contaminantes y, en otros, sospechaban que su presencia pudiera ser un problema en el futuro.

Procedimiento experimental: mediciones de contaminantes

En esta investigación se pueden identificar varios estadios:

1. Medición de las concentraciones de ácidos orgánicos mediante captadores pasivos (tubos de Palmes) en las vitrinas y lugares que se seleccionaron en cada museo como caso de estudio, teniendo en cuenta la HR y la temperatura.
2. Medición de la corrosividad ambiental¹ mediante la exposición de probetas metálicas de Cu y Pb, así como la acidez/pH ambiental con el uso de tiras Danchek®.
3. Recolección de muestras de los materiales que componen las vitrinas de algunos de los museos para medir las concentraciones de ácidos orgánicos (y así compararlas con las ya obtenidas), aldehídos y COV.
4. Evaluación y análisis de los efectos, degradación y posibles sinergias causadas por estos contaminantes en los metales de base Pb y Cu.

Los dos primeros estadios se llevaron a cabo en dos periodos y, tanto el procedimiento experimental como algunos de los resultados, ya han sido publicados (Lafuente, Cano, Gómez, 2011, y Gibson, *et al.* 1997: 1-10, 11-19). Cabe destacar, en el primer caso, la optimización de la técnica de análisis mediante cromatografía iónica, la elaboración de un nuevo protocolo, así como el cambio en el uso de filtros de papel por filtros de acero inoxidable y la glicerina por el etilenglicol dimetil éter, mucho más estables (Gibson y Watt, 2010: 172-178, y Grzywacz, 2006) (fig. 1).

Las probetas metálicas fueron analizadas mediante ensayos gravimétricos, así como colorimetría, difracción de rayos X (XRD) y técnicas electroquímicas (voltametría cíclica y reducción potenciodinámica). Algunos de estos resultados también están publicados (Lafuente, y Cano, 2011: 380-383, y Lafuente; Cano y Gómez, 2011) (fig.2).

Dentro del tercer estadio, se seleccionaron materiales que componen las vitrinas de algunos museos. Para llevar a cabo esta parte de la investigación se está colaborando con la doctora Gibson de la Universidad de Strathclyde (Glasgow) y la doctora Schieweck y el doctor Salthammer del Instituto Fraunhofer-WKI (Braunschweig), así como los museos ya mencionados.

Los análisis de estos materiales se han realizado, primeramente, mediante ensayos dentro de atmósferas controladas en desecadores. El procedimiento experimental para la fabricación y exposición de los tubos pasivos de formaldehído también ha sido descrito (Fenech *et al.*, 2010: 2067-2073). El único procedimiento a destacar es el del uso de los tubos Tenax®² como captadores pasivos (Fenech *et al.*, 2010: 2067-2073).

¹ La corrosividad ambiental se puede definir como la habilidad de una atmósfera para causar la corrosión en un sistema dado, por ejemplo, metal o aleación (UNE-EN ISO 11844-1).

² Tenax® TA es una resina polimérica porosa compuesta por óxido de 2,6-difenileno que está diseñada para atrapar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles del aire. Su uso está estandarizado en varias normas europeas (UNE-ISO 16000-6, UNE-EN ISO 16017-2).



Figura 1. Exposición de los tubos de Palmes y Danchek® en almacén de museo. Fotografía: Diana Lafuente.

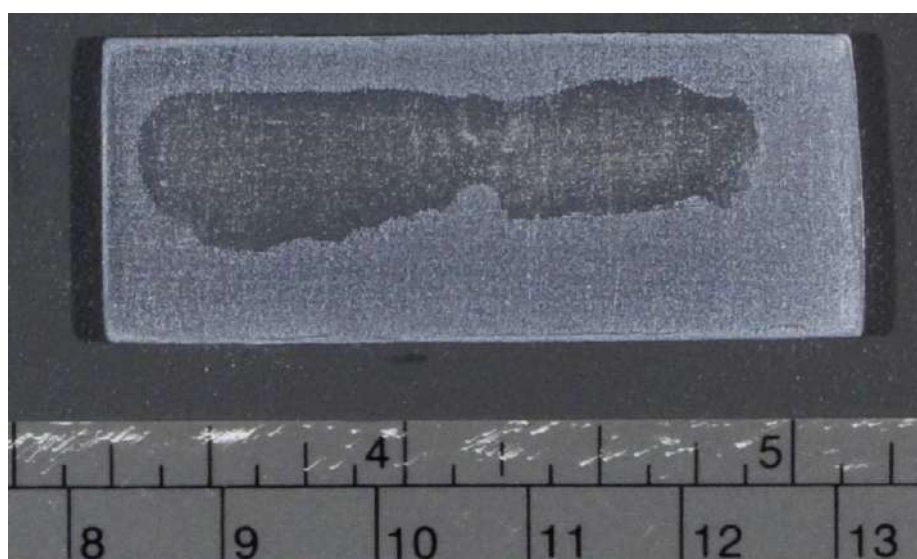


Figura 2. Ejemplo de corrosividad en una probeta metálica (Pb) expuesta en una vitrina de museo. Fotografía: Diana Lafuente.

Para medir la corrosividad ambiental, se introdujeron junto a los tubos de captación pasiva 4 probetas metálicas: 2 de Pb y 2 de Cu, que serán analizados mediante técnicas gravimétricas, electroquímicas, XRD y Raman.

El estadio actual de la investigación está dirigido a evaluar la degradación, productos de corrosión y posibles efectos sinérgicos de estos contaminantes sobre el patrimonio metálico de base Pb y Cu. Para ello se van a realizar ensayos en cámaras controladas, sometiendo probetas de Pb y Cu a dichos contaminantes para, después, analizarlas.

Discusión y primeros resultados

Es importante diferenciar la corrosividad ambiental con respecto a la contaminación ambiental. El hecho de que tengamos ciertos contaminantes no implica que vayan a afectar a nuestra colección, aquí entra el factor de «corrosividad ambiental» y es lo que pretendemos determinar, el cómo afecta cada uno de estos contaminantes al patrimonio metálico en nuestros museos.

En líneas generales, de los primeros estadios, se han obtenido los siguientes resultados:

- La presencia de estos contaminantes en la mayoría de los museos estudiados es un hecho y, en muchos casos, su corrosividad también.
- La mayor presencia de ácido fórmico que de acético en muchas de las vitrinas es algo bastante particular puesto que en la literatura sobre el tema siempre ha predominado el ácido acético como principal contaminante.
- Los resultados de los análisis de XRD realizados tanto sobre los productos de corrosión de los objetos que albergaban algunas vitrinas, como sobre algunas de las probetas metálicas expuestas, demostraron igualmente la presencia de formiatos.
- El uso de Danchek® como guía a la hora de evaluar la acidez ambiental y posible presencia de estos contaminantes es muy útil, sencillo y barato.

Resulta imposible eliminar todos los contaminantes dentro de las vitrinas, e incluso del museo, pero es necesario saber qué hay, a qué contaminantes nos podemos enfrentar y realizar todos los análisis correspondientes para poder determinar si una vitrina es óptima para albergar nuestras piezas y, en el caso de que no lo sea, aplicar las soluciones pertinentes. Esto debería ser una de las prioridades de las medidas de conservación preventiva en un museo pero, desgraciadamente, pocas veces se favorece la comunicación entre arquitecto-compañía responsable de las vitrinas y los conservadores-restauradores.

Bibliografía

- BAER, N., y BANKS, P. (1985): «Indoor air pollution: effects on cultural and historic materials», en *The International Journal of Museum Management and Curatorship*, n.º 4, pp. 9-20.
- BRIMBLECOMBE, P. (1990): «The composition of museum atmospheres», en *Atmospheric Environment*, vol. 24B, n.º 1, pp. 1-8.
- FENECH, A. *et al.* (2010): «Volatile aldehydes in libraries and archives», en *Atmospheric Environment*, n.º 44, pp. 2067-2073.

- FRANKE, A., y MIRCEA, M. (2005): «Plutarch's report on the blue patina of bronze statues at Delphi: a scientific explanation», en *JAIIC*, vol. 44, n.º 2, pp. 103-116.
- GIBSON, L. T. *et al.* (1997): «Determination of experimental diffusion coefficients of acetic and formic acid vapours in air using a passive sampler», en *Analytica Chimica Acta*, vol. 341, n.º 1, pp. 1-10.
- (1997): «A diffusion tube sampler for the determination of acetic and formic acid vapours in museum cabinets», en *Analytica Chimica Acta*, vol. 341, n.º 1, pp. 11-19.
- GIBSON, L. T., y WATT, C. M. (2010): «Acetic and formic acid emitted from wood samples and their effect on selected materials in museum environments», en *Corrosion Science*, vol. 52, n.º 1, pp. 172-178.
- GRZYWACZ, C. (2006): *Monitoring for gaseous pollutants in museum environments. Tools for conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- LAFUENTE, D., y CANO, E. (2011): «El uso de probetas metálicas para la evaluación y corrosividad en museos españoles», en *Actas del XVIII Congreso Internacional de Conservación y Restauración de BB. CC.*, pp. 380-383.
- LAFUENTE, D.; CANO, E., y GÓMEZ, T. (2011): «Degradación del patrimonio metálico causada por ácidos orgánicos en museos y exposiciones: el caso del Museo de América», en *Actas del IV Congreso Latinoamericano de Conservación y Restauración de metal*.
- PLINIO (1952): *Natural History*, vol. IX, libros 33-35. Traducción de H. Rackham. Londres: Loeb Classical Library.
- PLUTARCO (1935): *Moralia*, vol. 5. Traducción de F.C. Babbitt. Londres: Loeb Classical Library.
- SARAGA, D. *et al.* (2011): «Studying the indoor air quality in three non-residential environments of different use: A museum, a printer industry and an office», en *Building and Environment*, n.º 46, pp. 2333-2341.
- SCHIEWECK, A. (2009): *Airborne pollutants in museum showcases-material emissions, influences, impact on artwork*. Tesis. Alemania: Dresden Academy of Fine Arts.
- SMITH, U. *et al.* (2012): «Influence of building insulation on outdoor concentrations of regional air-pollutants», en *Atmospheric Environment*, n.º 54, pp. 393-399.

Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multiespectrales. Ensayos en la cueva del tío Garroso (Alacón, Teruel)¹

María Sebastián López

Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec),
Unidad Asociada CSIC-UPM

Marcos Palomo Arroyo

Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec),
Unidad Asociada CSIC-UPM

Joaquín A. Rincón Ramírez

Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec),
Unidad Asociada CSIC-UPM
juan.vicent@cchs.csic.es

Santiago Ormeño Villajos

Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec),
Unidad Asociada CSIC-UPM
santiago.ormeno@upm.es

Juan Manuel Vicent García

Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec),
Unidad Asociada CSIC-UPM

Resumen: Desde finales del siglo XIX, los estudios de arte rupestre han experimentado un desarrollo sistemático, generando un acuerdo universal para intentar garantizar la transmisión de esta parte del patrimonio arqueológico a las generaciones futuras.

¹ Este trabajo ha sido financiado por el programa de investigación en tecnologías para la valoración y conservación del patrimonio cultural (Acrónimo: TCP) –CONSOLIDER– Ingenio 2010 (CDS2007-00058).

En este contexto, surge el proyecto que se presenta a continuación, cuyo principal objetivo es el desarrollo de una metodología para la documentación integral del arte rupestre prehistórico, basada en la aplicación sistemática y combinada de técnicas fotogramétricas de modelización geométrica de superficies, caracterización espectral de las mismas por medio de la utilización de radiómetros de campo y la adquisición de imágenes multispectrales de los paneles pintados. Adicionalmente, se ha establecido un modelo de tratamiento e integración de la información adquirida por los distintos dispositivos, que permite estandarizar y sistematizar los procesos necesarios para el estudio de los abrigos pintados.

Palabras clave: Arte rupestre, documentación integral, fotogrametría, espectrorradiometría, imágenes multispectrales.

Abstract: Since the late nineteenth century, studies of rock art have undergone systematic development, creating a universal agreement to try to ensure the transmission of this part of the archaeological heritage to future generations.

In this context, there is the project that appears below, the main objective is to develop a methodology for comprehensive documentation of prehistoric rock art, based on the systematic application of photogrammetric techniques and combined geometric modeling of surfaces, spectral characterization the same through the use of field radiometers and multispectral imaging of the painted panels. Additionally, it has established a treatment model and integration of information acquired by different devices, which enables you to standardize and systematize the processes needed for the study of painted shelters.

Keywords: Rock art, comprehensive documentation, photogrammetry, radiometry and multispectral images.

Un nuevo concepto de documentación pictórica

En toda investigación uno de las tareas principales es la documentación del objeto a estudiar y, en el caso de las manifestaciones pictóricas, su reproducción gráfica se perfila como básica ya que, en el arte rupestre, éste es el principal argumento empírico (Lorbanchet, 1995).

Conscientes de esta necesidad, los esfuerzos de los investigadores se han centrado en obtener una reproducción fiel a la realidad y de la mejor calidad posible de los elementos iconográficos contenidos en los paneles de pintura rupestre. Los métodos tradicionales combinan el uso de la fotografía con técnicas de dibujo y calco directo, con objeto de mejorar la «legibilidad» de los paneles, que frecuentemente es muy deficiente. Este sistema tiene tres inconvenientes:

1. Subjetividad: la realización de calcos requiere una interpretación basada en la destreza y experiencia del observador.
2. La agresividad: los métodos de calco directo implican contacto con el panel original. La fotografía, por su parte, recurre frecuentemente a recursos para mejorar la visibilidad de las pinturas, como humedecerlas.
3. Simplificación: el enfoque tradicional se centra casi exclusivamente en los aspectos iconográficos de los paneles de arte rupestre, omitiendo en la mayor parte de los casos toda referencia al soporte y contexto.

La generalización durante la última década de la tecnología de fotografía digital ha contribuido a la progresiva sustitución de los métodos más agresivos de calco por la aplicación de técnicas de retoque fotográfico sobre imágenes digitales. Este enfoque, actualmente generalizado en los estudios sobre arte rupestre prehistórico, ha eliminado en gran parte el riesgo para las pinturas implícito en los métodos tradicionales, y ha mejorado el realismo, incorporando la captación de información sobre soportes. Pero, contra lo que se suele considerar, no ha supuesto la superación de la subjetividad implícita en el enfoque tradicional. En efecto, la aplicación de técnicas de retoque fotográfico suele consistir en la manipulación de los parámetros de visualización de imágenes digitales (brillo, contraste, color, ecualización de histogramas, etc.) mediante la utilización de paquetes de *software* comercial de retoque fotográfico. El objetivo suele ser optimizar la visibilidad de los elementos iconográficos y, para ello, la destreza y experiencia del observador es finalmente la variable más relevante. Por otra parte, los documentos digitales así obtenidos guardan una relación difícil de especificar con el original.

En este trabajo presentamos un enfoque analítico del problema de la documentación del arte rupestre prehistórico, cuyo objetivo es eliminar del proceso documental tanto la subjetividad como la agresividad, ampliando al mismo tiempo el contenido de los productos documentales desde los aspectos puramente iconográficos hasta abarcar integralmente la compleja materialidad de los paneles de arte rupestre, incluyendo todos sus elementos: pigmentos, soportes y procesos dinámicos, bióticos y abióticos.

Esta propuesta es el resultado de una larga trayectoria de investigación, iniciada en 1993 en el Laboratorio de Proceso Digital de Imagen y Teledetección (LabTel) del Departamento de Prehistoria del Instituto de Historia del CSIC, y que desde 2010 se desarrolla en el contexto del Laboratorio de Fotogrametría y Espectroscopía Arqueológicas (ArqueoSpec), Unidad Asociada CSIC-UPM.

En este contexto interdisciplinar, se viene desarrollando un enfoque que propone la transposición controlada de conceptos, métodos y técnicas procedentes del ámbito de la teledetección y la espectroscopía al contexto de los estudios sobre arte rupestre. Presentamos aquí una de las líneas centrales de investigación a través de un caso de estudio en el que la documentación integral y el análisis geométrico del arte rupestre, a través de métodos no invasivos, incorpora modelos que ofrecen información de las características espectrales de los pigmentos empleados, la variabilidad compositiva del panel y los procesos dinámicos del deterioro de las estaciones pintadas. Estos modelos que combinan las propiedades geométricas (morfología) y las radiométricas (interacción con la radiación electromagnética) de superficies de arte rupestre nos permiten establecer metodologías para la evaluación del grado de deterioro, tanto de las pinturas, como del soporte (Vicent *et al.*, 1998).

Metodología

Los estudios e investigaciones sobre el arte rupestre, tienen como objetivo crear una base de conocimiento multiparamétrica, que aporte datos fiables para su documentación, interpretación, conservación y gestión. Esta investigación es fruto de la necesidad de preservación de las manifestaciones artísticas de nuestros antepasados, así como de la necesidad de ampliar conocimientos para realizar, con precisión y objetividad, la documentación, análisis y conservación del arte rupestre prehistórico.

Para alcanzar el objetivo principal de esta investigación, consistente en el desarrollo de una metodología para la documentación integral del arte rupestre, se han estructurado en tres las principales líneas de actuación (Ormeño, 1993):

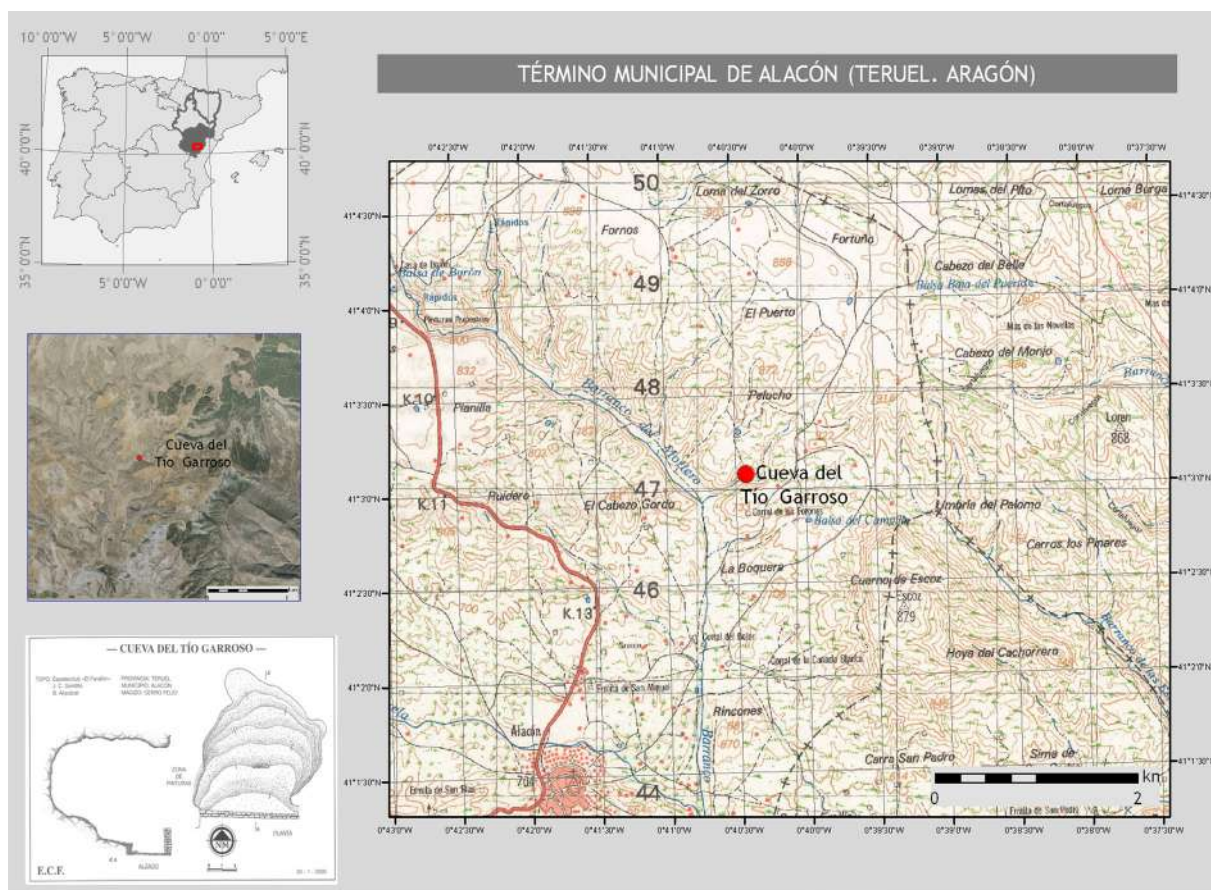


Figura 1. Descripción geográfica de la cueva del tío Garroso. En ella, se indica la distribución de las pinturas. Fuente: Mapas elaboración propia. Planta y alzado, según Beltrán y Royo, 2000.

1. Documentación de la variabilidad de las estaciones pintadas

- Generación de MDS² georreferenciados de las cavidades, obteniendo una reproducción del soporte rocoso en el que se asientan las pinturas, mediante la utilización de métodos topográficos y fotogramétricos, que proporcionan un archivo documental geométrico de forma eficaz y desligado de cualquier tipo de interpretación por parte del técnico.
- Adquisición y proceso de imágenes multispectrales, por medio de un sistema capaz de proporcionar información detallada y completa de una escena, panel o abrigo en diferentes regiones del espectro electromagnético, lo que nos permite obtener un documento clasificado de ocupación de superficies.
- Toma de datos radiométricos para cuantificar, distinguir y analizar la variabilidad espectral de los paneles, así como de las diferentes figuras entre sí. Adicionalmente, se resuelve la problemática del color de las pinturas, puesto que, conocidas las características espectrales de las mismas, se tiene información colorimétrica completa, ya que a partir de dichos espectros se pueden calcular valores en cualquier sistema de color y generar reproducciones de la escena con un colorido fiel al original.

² MDS: Modelo digital de superficies.

2. Análisis cuantitativo de las estaciones pintadas

- Identificación de propiedades físicas y químicas del soporte y de las pinturas mediante métodos de análisis de separabilidad de perfiles espectrales.
- Obtención de índices derivados que permitan caracterizar diversos aspectos de la imagen, tales como pigmentos férricos, vegetación, presencia de desconchados, costras, etc.

3. Determinación del estado de conservación de los paneles

- Cartografiado y cuantificación de procesos y alteraciones físico-químicas, biológicas y antrópicas.
- Análisis y control diacrónico de los procesos de alteración.

Caso de estudio: cueva del tío Garroso, Alacón, Teruel

Presentamos aquí la aplicación de la metodología anteriormente descrita en el abrigo del tío Garroso. El covacho se encuentra enclavado sobre roca caliza del cuaternario en plena cuenca hidrográfica del Río Martín (margen izquierda del Barranco del Mortero) y tiene unas dimensiones de 9 m de profundidad, 8 m de anchura y 7 m de altura (Beltrán *et al.*, 1993:85) (fig. 1). A nivel pictórico destaca por su riqueza, con un total de 83 figuras pintadas en rojo y negro, adscritas a diferentes tipos de arte levantino y esquemático (Picazo *et al.*, 2005: ficha 007).

La toma de datos se llevó a cabo en tres jornadas de campo, comenzando con la adquisición de imágenes color y datos topográficos para la generación de la cartografía de referencia y los MDS de los paneles del abrigo, por métodos fotogramétricos.

Los datos radiométricos fueron obtenidos mediante un muestreo significativo que recoge la variabilidad del conjunto pintado (fig. 2). De este modo, fueron tomadas un total de 152 firmas espectrales en la región comprendida entre las longitudes de onda de 400 nm y 2.500 nm, tanto de las figuras como de otros elementos del soporte (rocas, vegetación, costras calcíticas,

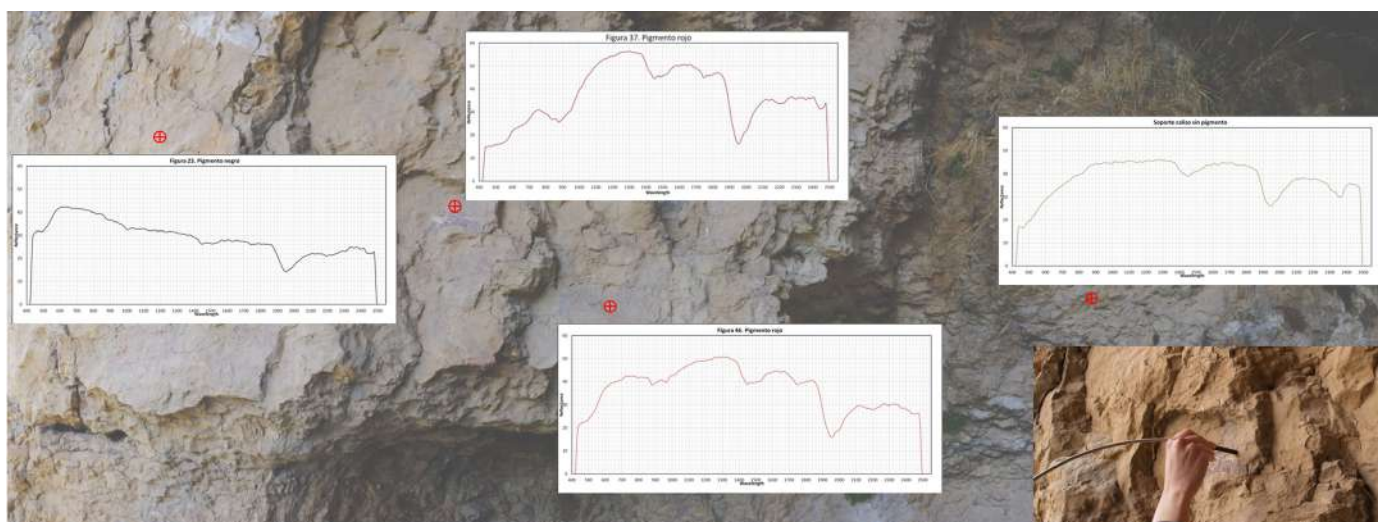


Figura 2. Proceso de toma de datos radiométricos y perfil espectral de dos muestras de pigmento rojo de distintas tonalidades, pigmento negro y soporte calizo.

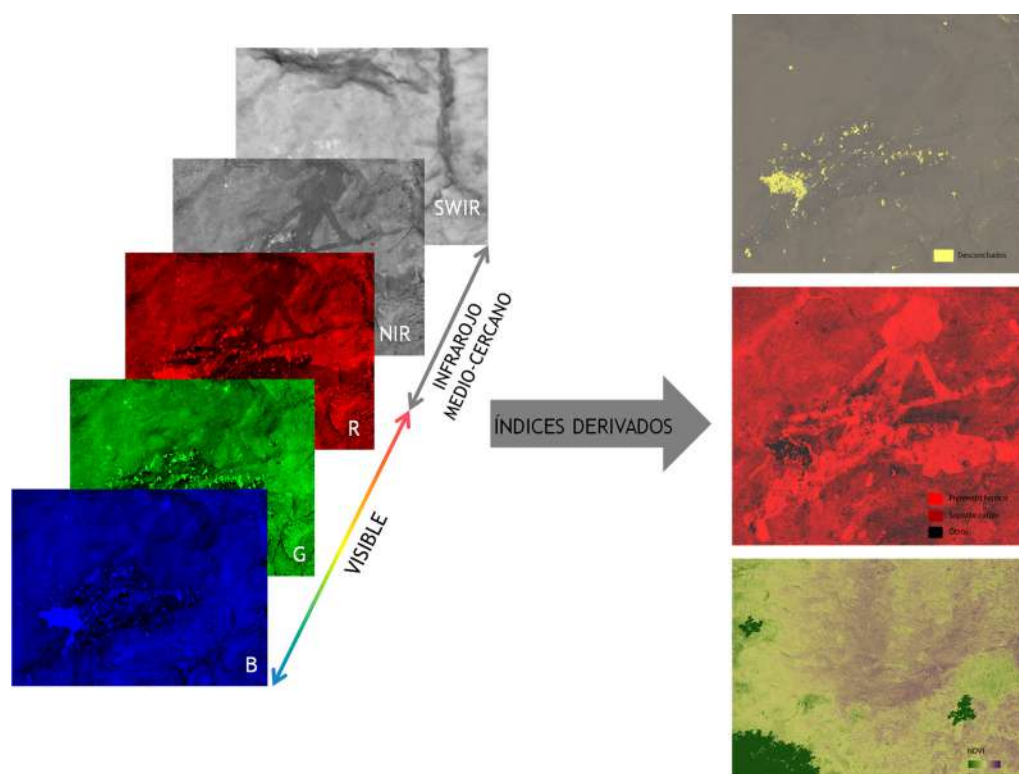


Figura 3. Imágenes multiespectrales (5 bandas) e índices cuantitativos derivados. Ejemplo de los productos derivados del análisis multiespectral: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de pigmentos férricos, así como una detección de desconchados.

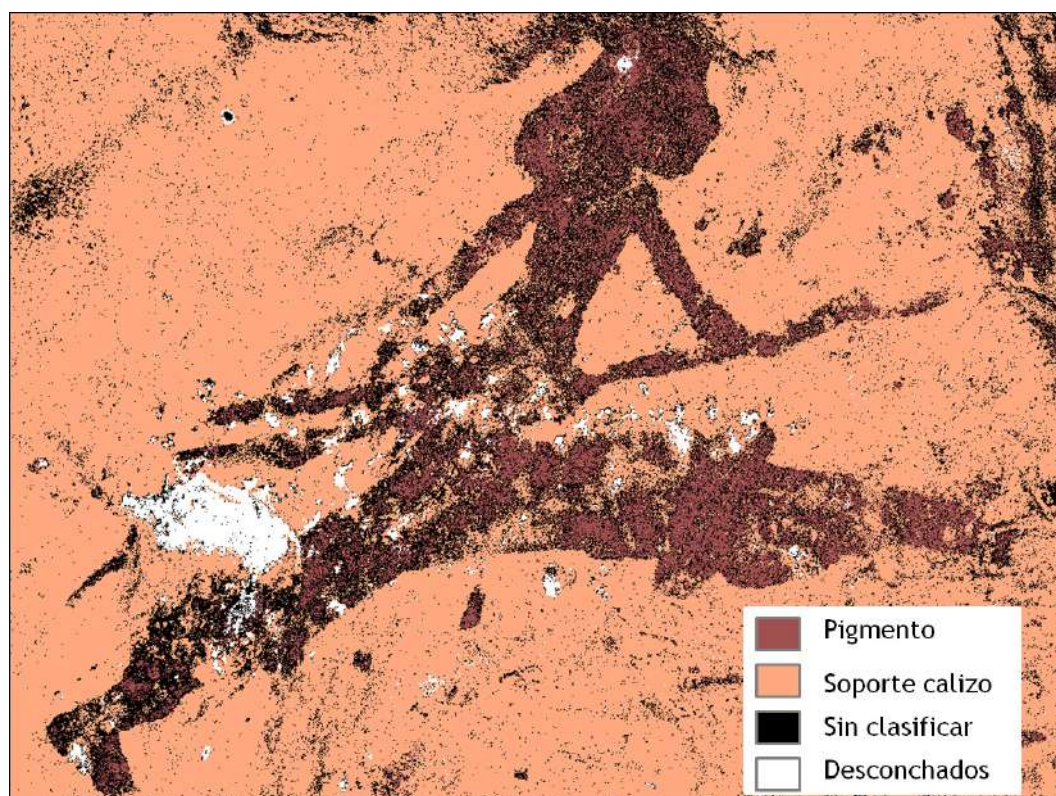


Figura 4. Resultado de la clasificación multiespectral de la figura 37 del abrigo (según Beltrán *et al.*, 2005). Se diferencian las regiones pintadas del soporte calizo.

microbacterias, etc.). Dichas muestras fueron referenciadas topográficamente, permitiendo su localización en las imágenes, y así como en posteriores visitas al abrigo. El procesado de estos datos y su agrupamiento en clases diferenciadas, se ha llevado a cabo mediante la utilización de índices de similaridad, basados en la forma del propio perfil espectral, lo que nos permite diferenciar tipos de pigmentos y soporte.

La adquisición de imágenes multispectrales se llevó a cabo siguiendo un patrón de muestreo sistemático, que ha permitido cubrir completamente la zona de estudio. El número total de imágenes es de 425, correspondientes a cinco bandas espectrales, situadas en las regiones del visible (rojo, verde y azul), infrarrojo próximo (800 nm) y medio (900-1.700 nm) (fig. 3). El proceso de imágenes espectrales, ha consistido en la generación de documentos georreferenciados y clasificados, que permiten diferenciar entre diversas tipologías de cubierta superficial, así como el cálculo de índices derivados, tales como el NDVI³ o un índice de pigmentos férricos, basado en el cociente de reflectividad de la banda roja y azul (fig. 4) (Rowan *et al.*, 1977). En esta fase, se ha puesto de manifiesto la capacidad de algunas longitudes de onda para penetrar la costra calcítica que recubre las pinturas (fig. 5).

La integración de los documentos obtenidos anteriormente en una base de datos, junto con la definición de una metodología de proceso, permite evaluar de forma sistemática diversos aspectos relacionados con las características físicas de los abrigos, así como con su estado de conservación.



Figura 5. Mejora de apreciación de motivos pictóricos en la región infrarroja del espectro. Lámina I derecha: fotografía color tomada en 2012 de la figura 35 del la cueva del tío Garroso (según Beltrán, 2005). Lámina II: calco de la misma figura (Beltrán, 2005: ficha 007). Lámina III: fotografía de la misma figura procedente del Archivo Almagro Basch, *Corpus de Pintura Rupestre Levantina CCHS-CSIC*. (<http://www.prehistoria.ih.csic.es/AAR/>). Lámina IV: fotografía infrarroja tomada en abril de 2012 por el equipo de trabajo de ArqueoSpec.

Resultados y conclusiones

La metodología presentada en este trabajo posibilita la documentación de aspectos de diversa índole, de abrigos rupestres, entendidos éstos como un todo, englobando localización, soporte y registro pictórico.

Los métodos fotogramétricos clásicos permiten la realización de documentos cartográficos de los paneles en los que se localizan las pinturas.

La utilización de los datos radiométricos, cuantifican aspectos relacionados con la composición de los pigmentos y soportes, complementando la información obtenida por otros métodos de menor resolución radiométrica.

³ Índice de vegetación de diferencia normalizada.

Como se ha mostrado anteriormente, la utilización de imágenes multispectrales permite la detección de pinturas, cuya naturaleza o estado de conservación las hacen invisibles al ojo humano, facilitando el proceso de identificación de las escenas pictóricas.

Se ha constatado que la documentación de los paneles, así como el seguimiento a lo largo del tiempo de los procesos bióticos que se desarrollan en los mismos, por medio de técnicas de tratamiento de imágenes digitales multispectrales e incluyendo la generación de modelos superficiales (topográficos), aporta información documental gráfica muy valiosa sobre la disposición espacial de las pinturas, y complementa a los datos radiométricos puntuales, lo que resulta en una mejora de las técnicas tradicionales de calco.

Se contempla el establecimiento de una estructura de almacenamiento, con soporte para información de diversa naturaleza, así como la implementación de una metodología de análisis y evaluación de aspectos relacionados con las características físicas de los abrigos y su estado de conservación.

Bibliografía

- BELTRÁN, A. (1968): «Arte rupestre Levantino», en *Monografías Arqueológicas IV*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- (1993): *Arte rupestre en Aragón*. Zaragoza: Ibercaja.
- (2005): *Corpus de arte rupestre del Parque Cultural del río Martín*. Zaragoza: Asociación del Parque Cultural del río Martín y Centro de Arte Rupestre «Antonio Beltrán».
- BELTRÁN, A., y ROYO, J. (2000): *La cueva del Tío Garroso el Cerro Felío (Alacón, Teruel)*.
- LOBRANCHET, M.(1995): *Les grottes ornées de la préhistoire*. Paris: Errance.
- MONTERO RUIZ, I.; RODRÍGUEZ ALCALDE, A. L.; VICENT GARCÍA, J. M., y CRUZ BERROCAL, M. (2000): «Técnicas analíticas basadas en el proceso de imágenes digitales multispectrales», en *Arkeos*, n.º 7, pp. 13-34.
- (1998): «Técnicas digitales para la elaboración de calcos de Arte rupestre», en *Trabajos de Prehistoria*, n.º 55, vol. 1, pp.155-169.
- ORMEÑO, S. (1993): *Teledetección Fundamental*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid.
- ROWAN, L. C.; GOETZ, A. F. H., y ASHLEY, R. P. (1977): «Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in the visible and the near infrared multispectral images», en *Geophysics*, n.º 42, pp. 522-535.
- ROUSE, J. W. J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A., y DEERING, D. W. (1974): «Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS», en *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. Washington DC, pp. 309-317.
- VICENT GARCÍA, J. M. (1993): «El Departamento de Prehistoria», en *Teoría y práctica de la Prehistoria: Perspectivas desde los extremos de Europa*. M.^a I. Martínez Navarrete (coord.). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. C. S. I. C. Santander, Madrid, pp. 19-35.
- (1994): «La digitalización del archivo de arte rupestre post-paleolítico del Departamento de Prehistoria del Centro de Estudios Históricos (C.S.I.C)», en *Boletín del Instituto Andaluz de Patrimonio*, n.º 7. Madrid, pp. 41-43.
- VICENT GARCÍA, J. M.; MONTERO, I.; RODRÍGUEZ ALCALDE, A. L.; MARTÍNEZ NAVARRETE, M.^a I., y CHAPA, T. (1996): «Aplicación de la imagen multispectral al estudio y conservación del arte rupestre postpaleolítico», en *Trabajos de Prehistoria*, n.º 53 (2), pp. 19-35.

- VICENT GARCÍA, J. M.; CRUZ BERROCAL, M.; RODRÍGUEZ ALCALDE, A. L., y MONTERO RUIZ, I. (2000): «El Corpus de Pintura Rupestre Levantina y las nuevas tecnologías de la información», en *Arkeos*, n.º 7, pp. 35-54.
- VICENT GARCÍA, J. M.; CRUZ BERROCAL, M.; DE LA TORRE SÁINZ, I.; FERNÁNDEZ FREIRE, C.; FRAGUAS BRAVO, A.; LÓPEZ ROMERO GONZÁLEZ DE LA ALEJA, E.; URIARTE GONZÁLEZ, A., y WALID SBEINATI, S. (2004): «Laboratorio de Teledetección y proceso digital de imagen», en J. C. Martín de la Cruz, y A. M.^a Lucena Martín (coord.). *Actas del I Encuentro Internacional: Informática aplicada a la investigación y la gestión arqueológicas*, Córdoba 2003, vol. II. Córdoba: Universidad de Córdoba.

Protocolo analítico científico aplicado a la identificación de microorganismos y al estudio del biodeterioro en bienes culturales. Análisis en pintura sobre lienzo

Fernando Poyatos Jiménez

Departamento de Pintura. Facultad de Bellas Artes. Universidad de Granada
fpoyatos@correo.ugr.es.

Inés Martín Sánchez

Departamento de Microbiología. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada

Fernando Bolívar Galiano

Departamento de Pintura. Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid

Resumen: Este trabajo trata de establecer un protocolo analítico aplicado al estudio del biodeterioro producido por la acción de microorganismos en pintura sobre lienzo con el objeto de identificar los materiales orgánicos e inorgánicos constitutivos, tales como preparaciones, pigmentos, aglutinantes, capas de protección y soportes, así como la identificación y clasificación de los microorganismos (hongos y bacterias) y la visualización de las alteraciones producidas por los mismos. Hemos utilizado técnicas de análisis molecular, microbiológico y bioanalítico, estableciendo un seguimiento completo y multidisciplinar. Microscopía óptica y electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM/EDX), cromatografía de gases, espectroscopía IR, análisis estratigráfico y cultivos microbiológicos han sido empleados para identificar materiales y agentes de biodeterioro y describir las alteraciones que provocan. Con los resultados se pretende ahondar en su estudio y proponer los tratamientos biocidas específicos para cada grupo de microorganismos y los más adecuados para los distintos materiales que conforman las obras pictóricas.

Palabras clave: Biodeterioro, pintura sobre lienzo, FESEM, hongos y bacterias.

Abstract: This work aims to establish an analytical protocol for the study of the biodeterioration caused by the action of microorganisms on paint on canvas in order to identify both the organic and the inorganic materials of which they are composed, such as preparations (compounds), pigments, agglutinatives, protective coatings and supports, as well as to determine and classify the microorganisms (fungi and bacteria), and view the changes they have produced. We have used molecular, microbiological and bioanalytical analysis techniques, establishing a complete and multidisciplinary monitoring. Optic and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM/EDX), Gas Chromatography, IR Spectroscopy, Stratigraphic Analysis and Microbiological

Cultures have been used so as to identify biodeterioration agents and materials, and to determine the alterations they can cause. The results are intended to look at this research in depth and to suggest specific biocidal treatments for each group of microorganisms, as well as more adequate (suitable) for the different materials which compose the pictorial work.

Keywords: Biodeterioration, canvas paintings, FESEM, *fungi*, *bacteria*.

Introducción

En pintura sobre lienzo las primeras propuestas presentaban el SEM como método analítico adecuado para la observación de alteraciones microbiológicas, (Bassi, y Giacobini, 1973: 6, 57-58), proporcionando además interesantes datos sobre el origen de estos agentes y sobre la importancia que tiene la naturaleza del soporte artístico en relación al deterioro que se pueda producir, destacando que la naturaleza de la degradación biológica en un lienzo se diferencia bastante de cualquier otra forma de degradación físico-química de carácter genérico. Sobre metodología aplicada y sobre los efectos de la acción microbiológica en capas pictóricas, concretamente el deterioro producido por hongos y bacterias, destacamos estudios posteriores más avanzados en donde se señala la importancia de especificar los grupos causantes de estas alteraciones, (Giacobini *et al.*, 1991a: 418-423; 1991b: 275-286). Para ello, se requiere de un reconocimiento previo de las condiciones ambientales y de un muestreo adecuado, empleando posteriormente técnicas tales como la observación por microscopía óptica, TEM y SEM, así como la importancia de cuantificar la «carga microbiana» o cantidad de microorganismos existentes. Otros autores dedican sus trabajos a casos más concretos como puede ser el biodeterioro producido por el hongo *Fusarium*, en el que se exponen todos los métodos analíticos empleados en su estudio, experimentos, cultivos, y observaciones en SEM (Gu *et al.*, 1998: 41, 101-109).

Así mismo se ha estudiado el protocolo de análisis de los materiales pictóricos realizado por Alonso (1997: 18, 52-55) en obras de fray Juan Sánchez Cotán pertenecientes al Museo de Bellas Artes de Granada como un claro ejemplo de trabajo multidisciplinar en donde se han realizado estudios históricos y materiales junto a análisis químicos y de microscopía óptica y electrónica para el estudio de fibras textiles y análisis elemental de capas pictóricas. Sobre el empleo de técnicas espectroscópicas, y concretamente la espectrometría infrarroja por transformada de Fourier en el análisis químico de los bienes culturales, hacemos referencia al trabajo de Gutiérrez (1998a) aplicada a la identificación de materiales orgánicos como adhesivos, consolidantes, aglutinantes, barnices y colorantes. En caracterización de barnices pictóricos destaca el estudio que propone métodos como la cromatografía de masas y la pirólisis en resinas, gomas y barnices triterpénicos (Colombini *et al.*, 2000; 385-396). En la aplicación de técnicas cromatográficas a la identificación de aglutinantes y barnices en capas pictóricas destaca el trabajo propuesto por Gutiérrez (1998b: 24, 45-51). Otro estudio específico es el referente a la oxidación sobre pinturas producida por hongos en la que se pueden extraer interesantes indicaciones sobre metodología analítica empleada en estos casos (SEM y cromatografía) y sobre compuestos orgánicos que pueden formar parte de sustancias filmógenas (Arai, 2000: 181-188). Sobre la contaminación microbiológica en soportes pictóricos textiles son diversos los estudios que proponen el empleo del SEM como método analítico (Maifreni *et al.*, 1991: 34-35). También en cuanto a degradación microbiana en patrimonio cultural destaca el estudio de Seves *et al.* (2000: 121-133), para la identificación de los microorganismos causantes del biodeterioro, además de las técnicas clásicas, destaca el uso de técnicas de biología molecular como la extracción de ADN, PCR, TGGE y análisis de secuencia de rRNA 16S (Schabereiter-Gurtner *et al.*, 2001:

77-87; y Helms *et al.*, 2004: 79-88). Carmona *et al.* (2006: 155-161) nos sirve como un reciente ejemplo de visualización de la acción de los microorganismos mediante microfotografías FESEM en materiales inorgánicos. En su trabajo podemos observar la acción físico-mecánica que se produce por el crecimiento de las hifas dentro de una estructura sólida.

Material y métodos

Este estudio ha sido realizado empleando muestras de doce obras pictóricas del Museo de Bellas Artes de Granada, pertenecientes a los siglos XVII y XVIII.

Toma de muestras

En nuestro protocolo, para el estudio científico cualitativo de los componentes, se llevó a cabo una toma de muestras de las capas pictóricas. El análisis de la composición química elemental de las muestras se realizó en los laboratorios Larco Química y Arte S. L. Se realizaron, además, tomas de muestras de depósitos y manchas con la ayuda de hisopos estériles para la búsqueda de los microorganismos presentes, y muestras de fibras textiles. Estos estudios microbiológicos y de las fibras textiles se realizaron en los departamentos de Microbiología y Botánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. Los estudios ultramicroscópicos de muestras pictóricas colonizadas y la identificación cromatográfica de materiales orgánicos se llevaron a cabo en el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (CIC).

Protocolo del muestreo

Se llevó a cabo un protocolo selectivo para cada tipo de análisis mediante tres muestras de cada obra. La primera muestra, no destructiva, se destina al análisis microbiológico ya que se realizaba con métodos húmedos de remoción mediante hisopos y se llevaba a cabo en zonas colonizadas superficialmente. La segunda, de carácter destructivo, se emplea para el análisis de tipo físico y visual mediante métodos microscópicos con el fin de observar el estado de conservación de los distintos estratos, su composición y la presencia de microorganismos. La tercera, de carácter destructivo, para el análisis químico elemental, se toma de la misma zona o capa que la muestra segunda escogiendo puntos que conservaran al máximo la estructura estratigráfica original, y por lo tanto mejor conservados. Finalmente y para realizar un análisis de identificación textil con carácter genérico se extrajeron muestras de fibras de los bordes de cuatro de las doce obras.

Técnicas analíticas

Para el estudio de los procesos de biodeterioro de estas obras, se plantea la necesidad de llevar a cabo análisis microbiológicos, físicos y químicos (Petrucci, 1993, y Turner, 1998). Pretendemos conocer, por lo tanto:

- Los microorganismos presentes (hongos y bacterias).
- Los materiales de la preparación haciendo referencia a los componentes inorgánicos y los aglutinantes orgánicos.
- Los pigmentos y aglutinantes de cada capa pictórica, así como su disposición relativa.

- La identidad de recubrimientos originales o de restauración, tanto barnices, como veladuras y/o repintes.
- La visualización de los efectos del biodeterioro en los materiales que componen una pintura sobre lienzo.
- Las fibras textiles, su identificación y estado de conservación.

Las técnicas utilizadas han sido las siguientes:

Técnicas microbiológicas Aislamiento y cultivo de microorganismos

a) Toma de muestras

La recogida de muestras se realizó sobre las zonas más deterioradas de las pinturas seleccionadas, siguiendo el siguiente procedimiento: un hisopo estéril humedecido en solución salina frotado suavemente sobre cada una de las zonas seleccionadas. Cada hisopo se introdujo inmediatamente en un tubo estéril y fue llevado al laboratorio.

b) Medios de cultivo (ver tabla 1)

Tabla 1. Medios de cultivo

Medios de cultivo	Acción	Composición
Tween 20	Se ha utilizado para disgregar los micelios de los hongos	Tween 20 al 0,01% en agua destilada
Solución salina	Se ha utilizado para obtener suspensiones de los microorganismos	Na Cl al 0,8 % ₀ en agua destilada. Medio TSB (Tryptona-Soja, Caldo)
Medio TSB (Tryptona-soja, Caldo)	Medio universalmente utilizado para el crecimiento de bacterias	Peptona de caseína (15 g) Peptona de soja (5 g) Cloruro sódico (5 g) pH 7,2
Medio TSA (Tryptona-soja Agar)	Se ha utilizado como medio de mantenimiento de los cultivos bacterianos	Su composición es igual a la del TSB adicionado de agar al 2%
Sabouraud Cloranfenicol Agar	Es un medio de cultivo sólido que al llevar cloranfenicol, antibiótico termoestable de amplio espectro antibacteriano, permite el aislamiento selectivo de hongos	Peptona micológica (10 g) Glucosa (40 g) Cloranfenicol (0,55 g) Agar (20g).pH: 6,8
Extracto de malta, Agar	Medio sólido utilizado para el mantenimiento, aislamiento e identificación de hongos	Extracto de malta (13,0 g) Dextrina (2,5 g) Peptona de gelatina (5,0 g). Agar-aga (15,0 g). pH final 5,5
Extracto de patata, Agar	Medio sólido utilizado para el mantenimiento, aislamiento e identificación de hongos	Extracto de patata (4 g) Glucosa (20 g) Agar (20 g) pH final 5,6

c) Aislamiento y conservación de los microorganismos

Con cada uno de los hisopos y mediante la técnica de siembra en estría, se sembraron una placa de medio Sabouraud para el aislamiento selectivo de hongos y una placa de TSA para el aislamiento de bacterias. Las placas se incubaron a 28° C, haciendo un seguimiento diario hasta la visualización de colonias de microorganismos. La obtención de cultivos puros de los distintos microorganismos se consiguió mediante resiembras en agar Malta y agar patata para los hongos y TSA para las bacterias. Una vez obtenidos, los microorganismos se sembraron en los mismos medios pero en tubos inclinados adecuados para su almacenamiento y conservación a 4° C hasta su posterior identificación.

d) Identificación de los microorganismos

Hongos

La identificación y clasificación taxonómica a nivel de género se realizó mediante la observación al microscopio óptico de las estructuras vegetativas y reproductivas, caracteres morfológicos, y con la ayuda de diversas fuentes bibliográficas (Barnett *et al.*, 1972; Heim *et al.*, 1969: 45-48; Hawsworth, *et al.*, 1983).

Bacterias

La identificación y clasificación taxonómica de las bacterias se realizó mediante técnicas clásicas: morfología de las colonias, tinción de Gram, pruebas fisiológicas y bioquímicas y con la consulta de la bibliografía adecuada (Prokaryotes, 1992)

Técnicas microscópicas

A) Microscopía óptica (mo)

En nuestro estudio la microscopía óptica ha sido empleada para la observación de microorganismos, para el estudio de las fibras textiles y para el análisis estratigráfico de las capas pictóricas. Para la identificación de fibras textiles se utiliza la microscopía óptica por reflexión y por transmisión con luz polarizada (aumentos de 100X, 200X, 400X y 1000X). También se ha utilizado para la visualización de cortes estratigráficos, así como para el análisis preliminar de pigmentos, aglutinantes y barnices, empleando ensayos microquímicos y de coloración selectiva de capas de temple y óleo. Las microfotografías obtenidas se realizaron con luz reflejada a un aumento de 300 X y con nicols cruzados. Como consulta metodológica se ha seguido a Arcos *et al.* (1992).

B) Microscopía electrónica por emisión de campo (FESEM)

El SEM se ha empleado para el estudio visual del crecimiento de microorganismos –permitiendo la identificación de esporas– y los efectos de estos en los estratos pictóricos ofreciendo imágenes del estado de conservación de los materiales. Los aumentos son muy superiores a los obtenidos en microscopía óptica (hasta 400.000 frente a los 1.000 del microscopio óptico). Hay que metalizar dicha muestra; con oro, cuando se desean conocer datos de su morfología, y preferentemente con carbono, si se quieren analizar los elementos que la componen (fig. 1).

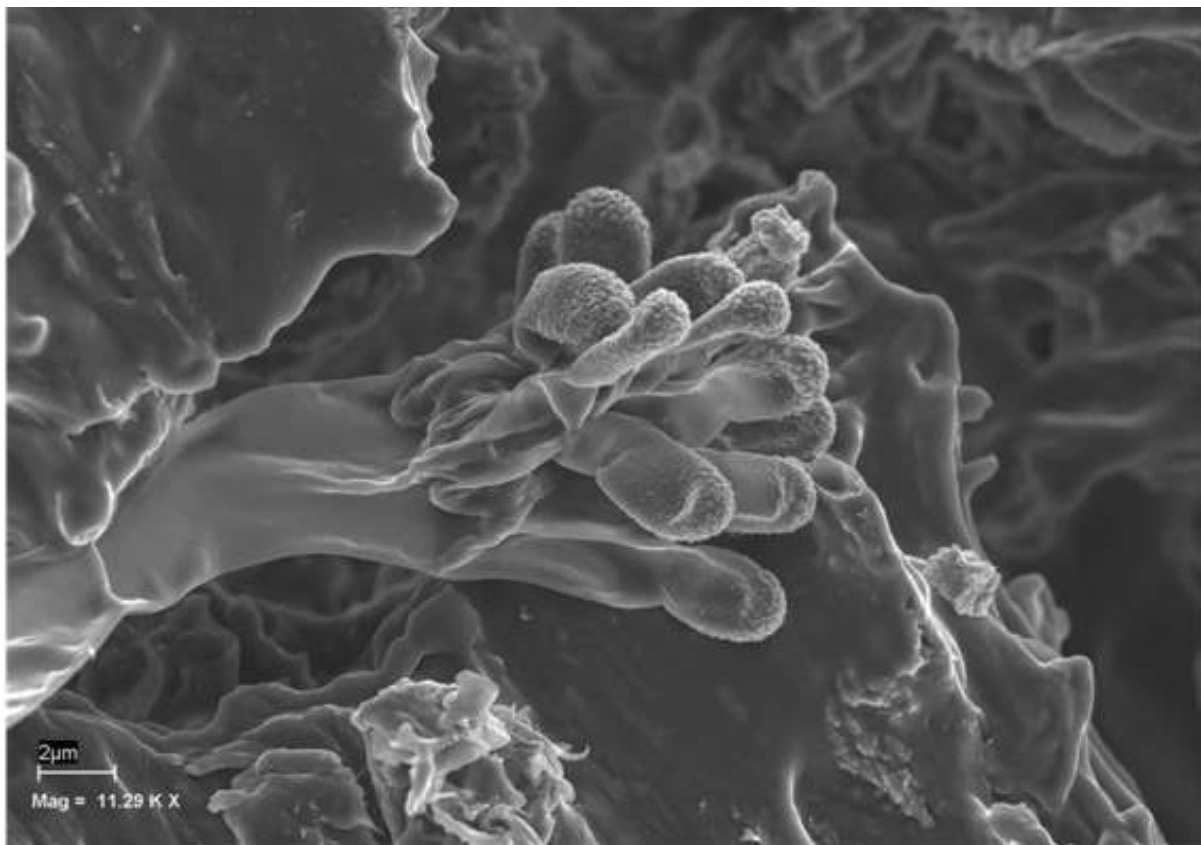


Figura 1. Imagen de FESEM. Micelios de hongos entre estratos pictóricos colonizando las capas y rompiendo los materiales. Fotografía: Alicia González Segura.

C) Microscopía electrónica de barrido (MEB/EDX)

Microscopía electrónica de barrido con análisis elemental por energía dispersiva de rayos X (MEB/EDX). Se ha empleado para el análisis elemental de granos de pigmentos, con el fin de determinar de forma puntual los elementos químicos que los constituyen.

Técnicas químico-analíticas

A) Cromatografía

En nuestro estudio empleamos la cromatografía en fase gaseosa que se emplea en la determinación de sustancias lipófilas, como aceites secantes, resinas y ceras; y de sustancias hidrófilas, como las colas animales y productos afines (Osete, 2004: 187-194; Doménech y Yusá, 2006). Las muestras se tratan con el reactivo de mutilación Meth-prep II y en el caso de sustancias de tipo ceroso u óleo-resinosas.

B) Espectroscopía IR

Esta técnica de espectroscopía molecular nos ha facilitado la identificación de moléculas orgánicas como adhesivos, consolidantes, barnices, aglutinantes, colorantes, disolventes, humectantes y fibras; también varios aniones inorgánicos, como sulfatos, carbonatos, silicatos, nitratos y cromatos. Se emplea para pigmentos, sustancias inertes aglutinantes, etc. Se utiliza para

confirmar las identificaciones microquímicas (Calvo, 1997; Gutiérrez, 1998 a: 56-60; López *et al.*: 482-483; 525-531; Gómez, 2000). Los análisis se realizan entre 4400 cm⁻¹ y 370 cm⁻¹, en pastillas de KBr o mediante análisis de superficie entre 4000 y 550 cm⁻¹ con un accesorio UATR.

Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Relación de microorganismos y materiales orgánicos de cada obra

Obra	Hongos	Bacterias	Materiales orgánicos	Materiales inorgánicos
L-1. Martirio de San Pedro de Verona	<i>Aspergillus</i>	<i>Micrococcus.</i> <i>Bacillus</i>	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Si, Ca, Fe, Al, Pb
L-2 Despedida de San Fco. Javier	–	<i>Bacillus</i>	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Ca, Si, Al, Fe, S, Pb, Ca
L-3 Inmaculada con niño	<i>Alternaria</i>	<i>Bacillus</i> <i>Micrococcus</i>	Aceite de linaza Cola animal Resina de conífera Soportecelulósico	Ca, Si, Al, Fe, Pb
L-4 Árbol de Jessé	–	<i>Bacillus</i>	Aceite de linaza Cola animal Proteína Barniz oleoso Resina de conífera Soporte celulósico	Cu, Ca, Pb, Si, Al, As
L-5 San Agustín	–	<i>Corynebacterium</i>	Aceite de linaza Cola animal Resina de conífera Soportecelulósico	Hg, S, Pb
L-6 San Antonio de Padua y el niño	–	<i>Spbaerotilus</i> <i>Bacillus</i>	Aceite de linaza Cola animal Resina de conífera Soportecelulósico	Pb
L-7 Inmaculada	–	<i>Micrococcus</i> <i>Bacillus.</i> Actinomiceto	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Ca, Si, Pb
L-8 Estigmatización de San Francisco	<i>Asperguillus</i> <i>Mucor</i> <i>Alternaria</i>	–	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Ca, Si, Pb
L-9 Virgen de La Candelaria	<i>Penicillium</i> <i>Alternaria</i>	–	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Si, Al, Fe, Pb, Ca
L-10 Cristo de La Paciencia	<i>Penicillium</i>	–	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Si, Ca, Mg, Al, Fe, Pb

Obra	Hongos	Bacterias	Materiales orgánicos	Materiales inorgánicos
L-11 <i>Cristo atado a la columna</i>	<i>Aspergillus</i>	–	Aceite de linaza Cola animal Proteína Resina de conífera Soporte celulósico	Si, Ca, Pb
L-12 <i>Noli me tangere.</i>	<i>Cladosporium</i> <i>Rhizopus</i>	<i>Micrococcus</i>	Aceite de linaza Cola animal Proteína Soportecelulósico	Al, Si, Pb

Conclusiones

1. Mediante las técnicas de análisis utilizadas comprobamos que se pueden establecer protocolos adaptados al estudio de la acción de hongos y bacterias que pueden aproximarnos en gran medida al análisis de las formas de alteración que provocan y por consiguiente a la posterior adaptación de métodos de control y tratamiento.
2. Los estudios de laboratorio con microorganismos han mostrado cómo estos actúan de manera selectiva tanto en los soportes artísticos como en los materiales filmógenos superpuestos.
3. Hongos y bacterias constituyen los grupos de microorganismos que participan de forma más activa en la colonización de los lienzos estudiados. Los hongos *Aspergillus*, *Alternaria*, y *Penicillium* y las bacterias *Micrococcus* y *Bacillus* son especialmente frecuentes en el biodeterioro de estos materiales.
4. Los resultados obtenidos con las técnicas de identificación microbiológica junto con las técnicas de identificación química permiten establecer una base de datos de relación entre la especie de microorganismo y el material deteriorado imprescindible para la búsqueda de tratamientos biocidas específicos.
5. Como principal aportación resaltamos el estudio del biodeterioro a nivel ultramicroscópico mediante FESEM (SEM de alta resolución). Las imágenes obtenidas han permitido visualizar las alteraciones producidas en los diferentes estratos de las obras poniendo de manifiesto cómo los materiales que lo componen se transforman por la acción conjunta de los microorganismos y el ambiente.

Bibliografía

- ALONSO, M. L. (1997): «Análisis de los materiales pictóricos empleados por Fray Juan Sánchez Cotán. Obras pertenecientes al Museo de Bellas Artes de Granada», en *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, n.º 18, pp. 52-55.
- ARAI, H. (2000): «Foxing caused by fungi: twenty-five years of study», en *International biodeterioration & biodegradation*, n.º 46, pp. 181-188.
- ARCOS, E.; RODRÍGUEZ, J., y SÁNCHEZ, A. (1992): *Metodología y técnicas en la restauración de obras pictóricas del siglo de oro español de la catedral de Almería*. Granada: UGR (Universidad de Granada).

- BALOWS, A.; TRUPER, H.G.; DWORKIN, H.; HARDER, N., y SCHLEIFER, K. H (1992): *Prokaryotes*. 2.^a edición. Berlín: Ed. Springer Verlag.
- BARNETT, H. L., y HUNTER, B. B. (1972): «Illustrated Genera of Imperfect Fungi», en *Burgess Publishing Company*, 3 edición. Minesota: Mineápolis.
- BASSI, M., y GIACOBINI, C. (1973): «Scanning electron microscopy: a new technique in the study of the microbiology of works of art», en *International Biodeterioration & Biodegradation*, n.º 6, pp. 57-68.
- CALVO, A. (1997): *Conservación y restauración. Materiales técnicos y procedimientos. De la A a la Z*. Barcelona: Editorial Serval.
- CARMONA, N.; LAIZ, L.; GONZALES, J. M.; GARCÍA-HERAS, M.; VILLEGAS, M. A. y SAIZ-JIMÉNEZ, C. (2006): «Biodegradation of historic stained glasses from the Cartuja de Miraflores (Spain)», en *International Biodeterioration & Biodegradation*, n.º 58, pp. 155-161.
- COLOMBINI, M. P.; GIANNARELLI, S.; MATTEINI, M.; MODUGNO, F., y FUOCO, R. (2000): «GC-MS Characterization of Paint varnishes», en *Microchemical Journal*, n.º 67 (1-3), pp. 385-396.
- DOMENECH, M.^a T., y YUSA, D. J. (2006): *Aproximación al análisis instrumental de pigmentos procedentes de obras de arte*. Valencia: Servicio de Publicaciones de La Universidad Politécnica de Valencia.
- GIACOBINI, C.; DE CICCIO, M. A.; TIGLIE, I., y ACCARDO, G. (1991a): «Actinomycetes and Biodeterioration in the Field of Fine Art», en *Biodeterioration* 7. Ed. Elsevier, pp. 418-423.
- GIACOBINI, C.; PEDICA, M., y SPINUCCI, M. (1991b): «Problems and Future Projects on the Study of Biodeterioration: Mural and Canvas Paintings», en *Biodeterioration of Cultural Property*, capítulo 31, pp. 275-286.
- GÓMEZ, M. L. (2000): *La Restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*. Ed. Cátedra.
- GU, J. D.; FORD, T. E.; BERKE, N. S., y MITCHELL, R. (1998): «Biodeterioration of concrete by the fungus *fusarium*», en *International biodeterioration & biodegradation*, 41, pp. 101-109.
- GUTIÉRREZ, F. (1998a): «Aplicación de la espectrometría infrarroja al análisis químico de los Bienes Culturales», en *PH. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, n.º 18, pp. 56-60.
- HAWSWORTH, D. L.; SUTTON, B. C., y AINSWORTH, G. C. (1983): *Dictionary of the fungi*. Surrey (7.^a edición).
- HEIM, R.; FLIEDEN, F., y NICOT, J. (1969): «Lucha contra los mohos que proliferan sobre los bienes culturales en los climas tropicales», en *La conservación de los Bienes Culturales*, Unesco 3, pp. 45-48.
- LÓPEZ, E.; DOMÉNECH-CARBÓ, M. T.; GIMENO-ADELANTADO, J. V., y BOSCH, F. (1999): «Study by FT-IR spectroscopy of ageing of adhesives used in restoration of archaeological glass objects», en *Journal of Molecular Structure*, n.º 482-483, pp. 525-531.
- MAIFRENI, T.; ROMANÓ, M., y FREDDI, G. (1991): «Studio della degradazione microbica in microscopia elettronica a scansione», en *Convegno Internazionale Applicazione della Microscopia in Campo Biologico*, Asisi, 24-26 maggio, pp. 34-35.
- OSETE-CORTINA, L.; DOMÉNECH-CARBÓ, M. T.; MATEO-CASTRO, R.; GIMENO-ADELANTADO, J. V., y BOSCH-REIG, F. (2004): «Identification of diterpenes in canvas painting varnishes by gas chromatography-mass spectrometry with combined derivatisation», en *Journal of Chromatography A*, n.º 1024, (1-2), pp. 187-194.

- PETRUCCI HARWOOD, R. (1993): *General Chemistry-Principles & Modern Applications*. Prentice-Hall.
- SCHABEREITER-GURTNER, C.; PIÑAR, G.; LUBITZ, W., y ROLLEKE, S. (2001): «And avanced molecular strategy to identify bacterial communities on art objets», en *Journal of microbiological methods*, 45(2), pp. 77-87.
- SEVES, A.; ROMANO, H.; SCILIONE, G.; MAIFRENI, T., y SORA, S. (2000): «A laboratory investigation of the microbial degradation of cultural heritage (ICMC)» en *Of microbes and art: The role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, pp. 121-133.

La conservación de materiales óseos: antiguos tratamientos y nuevas alternativas de intervención

Trinidad Pasíes Oviedo

Museo de Prehistoria de Valencia

trini.pasies@dival.es

Resumen: Uno de los problemas a los que el profesional de la conservación-restauración suele enfrentarse a la hora de trabajar con colecciones museísticas, es cómo abordar el tratamiento de piezas que ya han sufrido en el pasado algún tipo de intervención. En materiales óseos, como los que forman parte de las colecciones de fauna cuaternaria y restos humanos del Museo de Prehistoria de Valencia, hay un aspecto fundamental que tendremos que valorar: en qué medida la antigua intervención oculta o confunde la información científica que las piezas nos ofrecen.

Palabras clave: Material óseo, antiguas intervenciones, información científica.

Abstract: One of the problems that professionals of conservation and restoration often face when we are working with museum collections, is how to address the treatment of parts that have suffered some kind of intervention in the past. Bone material, as part of the Quaternary faunal and human remains from the Museum of Prehistory of Valencia, has a fundamental aspect that we have to assess: to what extent the former intervention hides or confuses the scientific information that the pieces offer us.

Keywords: Bone material, priors repairs, scientific information.

Introducción

El Museo de Prehistoria de Valencia cuenta con una de las colecciones de fauna cuaternaria y restos humanos más importantes de la Península Ibérica, y desde la fecha de creación del museo y de su Servicio de Investigación Prehistórica (SIP) en 1927, el laboratorio de restauración ha sido el encargado de intervenir los materiales allí depositados (Pasíes y Peiró, 2006). Aunque hemos de reconocer el mérito y la incasable labor que nuestros antecesores realizaron durante décadas, con escasos recursos y una formación totalmente autodidacta, en la actualidad somos conscientes del cambio de criterios que en materia de conservación y restauración se ha producido, e intentamos abordar el tratamiento de las antiguas intervenciones desde el respeto, pero también desde la necesidad de actuar en beneficio de la adecuada conservación y difusión de las piezas y de la información que éstas nos aportan.

Habitualmente nos encontramos con restos óseos que han sido restaurados no sólo con criterios diferentes a los actuales, sino empleando productos inestables, refuerzos inadecuados o rellenos de faltantes aplicados de forma indiscriminada. Para evaluar la conveniencia de eliminar o no estas antiguas reparaciones tendremos que analizar diversos aspectos, entre ellos el estado de conservación de las piezas y el posible riesgo que este nuevo tratamiento directo podría ocasionar sobre los originales.

Revisión de antiguos tratamientos

Uno de los primeros pasos que dimos al respecto, fue la investigación y revisión de los métodos de intervención que durante años habían sido utilizados para la restauración de materiales óseos dentro del propio museo. En seguida nos dimos cuenta de la dificultad de esta tarea, ya que la documentación era escasísima: unas pocas fichas mecanografiadas o escritas a mano, junto a algunas fotografías en papel mostrando el aspecto de las piezas antes y después de los trabajos. Sin embargo, en cierta medida pudimos subsanar este problema gracias a las entrevistas que realizamos a dos de los profesionales que trabajaron en el laboratorio: Rafael Fambuena e Inocencio Sarrión, ahora ya jubilados. Gracias a sus testimonios pudimos hacer una revisión de cuáles habían sido los principales métodos y productos empleados, aunque también confirmamos que algunas piezas, especialmente restos humanos de especial relevancia, habían sido intervenidas fuera del museo, en diversos centros fuera del territorio valenciano. Todos estos datos los contrastamos con el estudio de diversas piezas originales que formaban parte de la colección y, de este modo, pudimos identificar los tratamientos empleados más habitualmente.

Para la limpieza de restos óseos fuertemente concretionados se procedía de forma generalizada al empleo de soluciones ácidas. Una de las metodologías documentadas era la siguiente: inmersiones en soluciones de ácido acético al 5% y, finalizado el tratamiento, realización de lavados con agua, a los que seguía un primer secado inducido con impregnaciones de alcohol o acetona antes del posterior secado natural. En la actualidad existen estudios científicos que han constatado cómo la dispersión de los ácidos dentro del hueso es difícil de controlar, así como es difícil la completa eliminación de sus residuos y la preservación de las trazas microscópicas originales, las cuales también se pueden ver afectadas por impregnaciones de disolventes como la acetona (López-Polín *et al.*, 2008: 541, y Fernández-Jalvo y Marín, 2008: 179). La presencia de



Figura 1. Cráneo 6 de la Cova de la Pastora, Alcoi, con refuerzos metálicos.



Descripción de la muestra:

Recubrimiento

Técnicas de análisis empleadas:

FTIR

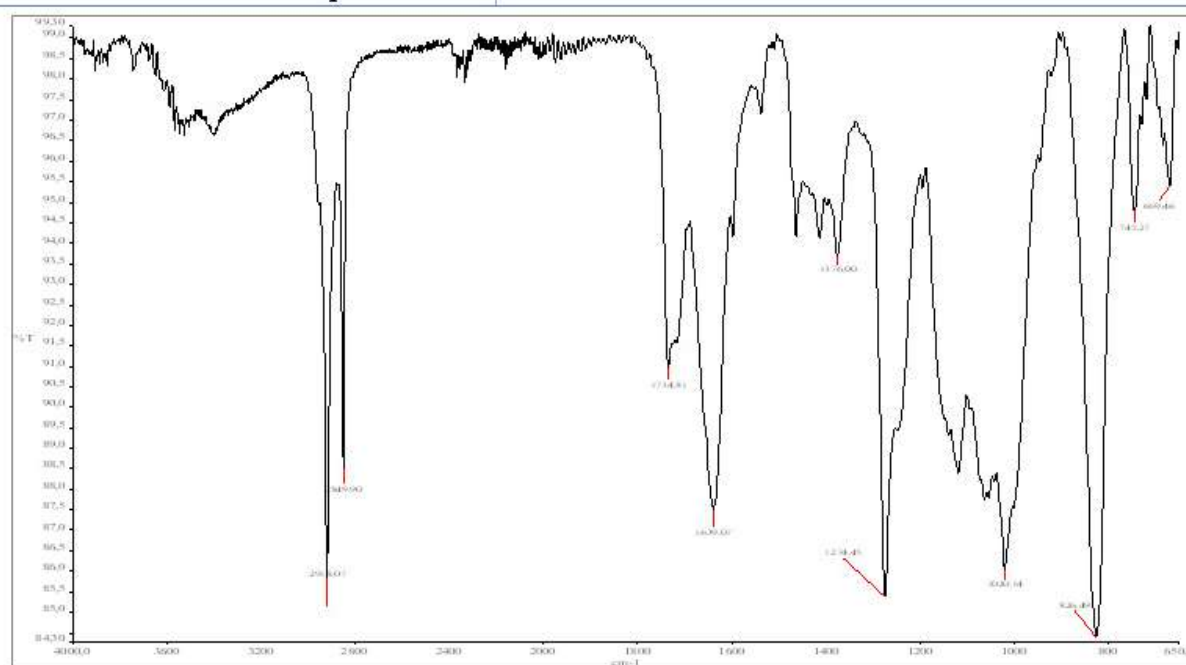


Figura 2. Parietal I de *Homo neanderthalensis* hallado en Cova Negra (Xàtiva). Se aprecian diversas zonas con rellenos de estucos y morteros, así como un denso recubrimiento de una resina en toda la superficie que, tras los análisis realizados por el equipo Arte-Lab (FTIR), fue identificada como nitrato de celulosa, presente junto a una baja proporción de un material ceroso. Debido al estado de conservación de la pieza y a su relevancia científica, se consideró inapropiado eliminar esta antigua intervención, lo que supondría un riesgo para el original.

superficies granulosas ligeramente corroídas, así como de microfracturas, son características de huesos tratados con productos ácidos.

En el montaje de fragmentos hemos documentado el empleo de acetato de celulosa, que se obtenía disolviendo en acetona las películas fotográficas y que, en los primeros años de vida del museo y del laboratorio, era el adhesivo usado para la reconstrucción de diversos materiales arqueológicos, especialmente las cerámicas. Años más tarde sería sustituido por el nitrato de celulosa en adhesivos ya comercializados (Imedio banda azul). Las dificultades que a menudo entrañaría la reconstrucción de los restos óseos, que sin duda acumulaban en muchas zonas errores indeseables, con los consiguientes defectos en las posteriores mediciones anatómicas de las piezas, se parcheaban en muchos casos con refuerzos externos para dar consistencia al conjunto (alambres, estucos, madera, etc.) (fig. 1).

Para la consolidación de los restos era frecuente aplicar en toda la superficie resinas naturales o sintéticas, a menudo a altas concentraciones. Desde goma laca a nitrato de celulosa o Paraloid, aplicados por impregnación a pincel o incluso al vacío. Hoy en día este tipo de procesos se realizan solo cuando y donde es estrictamente necesario, ya que cualquier recubrimiento superficial puede distorsionar e interferir en los resultados de los análisis para la obtención de dataciones absolutas (Horie, 1982).

Uno de los procesos que más controversia despierta para los profesionales de la conservación-restauración es, sin duda, la reintegración volumétrica de lagunas. Nuestros antecesores no se cuestionaban criterios éticos de respeto al original o mínima intervención, sino que su mentalidad estaba encaminada, en la mayoría de los casos, a la reconstrucción de los volúmenes perdidos para facilitar la legibilidad de los restos, sin por ello plantearse en qué medida esta acción directa afectaba a la conservación de las piezas y a su investigación como producto susceptible de posteriores estudios científicos (fig. 2). La escayola era el material elegido en estas operaciones, que de igual modo se empleaba en objetos cerámicos o metálicos. Su aplicación excedía en muchas ocasiones los límites de las lagunas, colmatando grietas e incluso afectando a las zonas de hueso esponjoso.

Y como podemos imaginar, tampoco en épocas precedentes existían los protocolos de conservación preventiva que hoy en día imperan a la hora de abordar cualquier actuación sobre patrimonio. Nos encontramos pues con colecciones colocadas dentro de cajas de cartón, con protecciones rudimentarias, empleando materiales no inertes, que hoy en día sustituimos por embalajes más apropiados (fig. 3).

Finalmente podemos también citar la productiva labor de realización de réplicas llevadas a cabo en el laboratorio, sobre todo a partir de la década de 1990, tanto con fines de conservación como de difusión.

Las nuevas alternativas de intervención

Somos plenamente conscientes de que, en todas estas décadas desde la creación del museo, no solo han variado los criterios con los que se abordaba cualquier actuación sobre patrimonio arqueológico, sino las metodologías y los materiales que se han ido empleando para llevarla a cabo (fig. 4). Hoy en día, hacer prevalecer los principios de mínima intervención y máximo respeto al original conservado significa reconocer que cualquier operación directa de restauración implica un riesgo para la conservación de la pieza. Si nos referimos al tratamiento de materiales óseos la irresponsabilidad de una intervención excesivamente invasiva se revela en la oculta-



Figura 3. Caja de embalaje que contiene restos humanos de la Cova del Barranc Blanc (Rótova).

ción o incluso pérdida de una valiosísima información científica, necesaria para comprender la relación de las diversas especies de fauna con los grupos humanos prehistóricos.

A estos dos criterios mencionados podemos añadir uno más, que será fundamental para involucrarnos en el compromiso de la conservación: la colaboración interdisciplinaria. En el Museo de Prehistoria de Valencia esta cooperación se lleva a la práctica desde el respeto mutuo y el trabajo en equipo, entre la dirección del propio museo y los técnicos del laboratorio y del gabinete de fauna cuaternaria y restos humanos (Pasíes y Sanchis, 2012). Se pueden así contrastar opiniones y resolver conflictos sobre cómo abordar un tratamiento de restauración directo, definiendo claramente los límites del mismo.

En la actualidad se nos plantean a menudo en el laboratorio y el gabinete situaciones en las que debemos valorar la conveniencia o no de la eliminación de una buena parte de estas antiguas intervenciones (fig. 5). Tendremos que ser capaces de analizar cuál es la alternativa que mejor garantiza no solo la conservación del objeto, sino su investigación y difusión. Para ello el equipo debe estudiar una serie de aspectos; en primer lugar se evalúa el estado de conservación de la pieza y se analiza si la antigua reparación afecta o no negativamente a la conservación del original, pudiéndole provocar alteraciones significativas; en segundo lugar se razona sobre la relevancia científica de la propia pieza y su interés museológico, que en algunos casos puede ser excepcional; a continuación se valora la posibilidad de que esta antigua intervención obstaculice la labor de investigación, en la medida en que pueda llegar a ocultar parte de su información científica; y finalmente se considera si la misma supone un impedimento para la realización de análisis químicos en condiciones ideales. A todo ello conviene añadir un nuevo razonamiento: la consideración del riesgo potencial que para el material original supondría la eliminación de cualquier antigua restauración, unido esto al coste de recursos humanos y económicos que esta decisión implicaría.



Figura 4. Limpieza de resto óseo con el apoyo de medios físico-mecánicos bajo lupa binocular.



Figura 5. Clavija córnea de uro (*Bos primigenius*) de la Cova del Parpalló (Gandía). Tras una detallada valoración previa, se decidió la eliminación de una antigua reintegración con escayola que cubría parte del original, en cuyo proceso de vertido se empleó un relleno interno de papel de periódico. La intervención fue documentada en todas sus fases.

Si evaluados todos estos aspectos consideramos necesaria la eliminación de la antigua reparación, será preceptivo realizar un informe previo que incluya una propuesta metodológica de actuación y, a medida que ésta se vaya desarrollando, documentar exhaustivamente los distintos procesos. No podemos olvidar que estas antiguas intervenciones forman parte de la historia de estos materiales y son, a menudo, los únicos testigos de los que disponemos para conocer la manera de proceder de nuestros antecesores, por lo que cometeríamos un error pretendiendo destruir por completo la información que son capaces de aportarnos y negándoles la función que en su día cumplieron.

Agradecimientos

Mi agradecimiento a la directora del museo, Helena Bonet y al conservador Alfred Sanchis por su apoyo en la investigación. A los distintos profesionales y becarios que durante estos últimos años han colaborado en los trabajos del laboratorio. Y al archivo SIP del Museo de Prehistoria de Valencia, de donde hemos extraído la documentación fotográfica de este artículo.

Bibliografía

- FERNÁNDEZ-JALVO, Y., y MARÍN, M.^a D. (2008): «Experimental taphonomy in museums: preparation protocols for skeletons and fossil vertebrates under the scanning electron microscopy», en *Geobios*, 41, pp. 157-181.
- HORIE, C. V. (1982): «Reversibility of polymer treatments», en *Resins in conservation. Proceedings of the Symposium Edinburgh*, Scottish Society for Conservation and Research, Edinburgh, n.º 3, pp.1-36.
- LÓPEZ-POLÍN, L.; OLLÉ, A.; CÁCERES, I.; CARBONELL, E., y BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M.^a (2008): «Pleistocene human remains and conservation treatments: the case of a mandible from Atapuerca (Spain)», en *Journal of human evolution*, n.º 54, pp. 539-545.
- PASÍES, T., y PEIRÓ, M.^a A. (2006): «El laboratorio de restauración del Museo de Prehistoria de Valencia», en *Arqueología en blanco y negro. La Labor del SIP 1927-1950*, Diputación de Valencia, pp. 171-176.
- PASÍES, T., y SANCHÍS, A. (2012): «Las colecciones de fauna y restos humanos en el Museo de Prehistoria de Valencia: un ejemplo de colaboración entre dos laboratorios», en *Actas de la XIII Reunión Técnica de conservación-restauración. Interdisciplinariedad en conservación-restauración: ¿realidad o ficción?* Barcelona: Museo Nacional de Arte de Catalunya (12 y 13 noviembre 2012), pp. 157-173.

Preeminencia y complementariedad: reflexión sobre las relaciones interdisciplinarias en los estudios del patrimonio cultural

El caso de la serie de retratos de los condes
de Flandes y los abades de Nuestra Señora
de las Dunas de Koksijde, Bélgica

Francisco Mederos-Henry

Institut Royale du Patrimoine Artistique/Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (IRPA-KIK)
francisco.mederos@kikirpa.be; franciscomederos@gmail.com

Aline Genbrugge

Institut Royale du Patrimoine Artistique/Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (IRPA-KIK)

Karen Bonne

Institut Royale du Patrimoine Artistique/Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (IRPA-KIK)

Julia Kohl

Université Libre de Bruxelles (ULB)

Resumen: Desde su fundación, el quehacer interdisciplinario entre restauradores, historiadores del arte y científicos de la conservación forma parte esencial de la filosofía de trabajo del IRPA-KIK. Esta manera de estudiar y conservar el patrimonio cultural ha evidenciado la existencia de una dinámica relación de preeminencia y complementariedad entre las disciplinas involucradas. Es esta relación la que enriquece el proceso de investigación, favorece la resolución de las problemáticas encontradas y asegura la correcta toma de decisiones para la conservación-restauración de los objetos.

En esta comunicación se presentarán tres ejemplos de esta interacción y del tipo de resultados que produjo durante el estudio de una compleja serie de retratos icónicos producidos sucesivamente entre los siglos XVI y XIX.

Palabras clave: Interdisciplinariedad, grisallas, pintura flamenca, pintura sobre tabla, retratos, IRPA-KIK.

Abstract: The interdisciplinary approach reuniting conservators, art historians and conservation scientists has been fundamental to IRPA-KIK's working philosophy since its foundation. Through this particular manner of coping with the study and conservation of cultural heritage,

a dynamic preeminence-and-complementarity relation is established between the participating disciplines. This relationship enriches the research process and promotes the resolution of the different problems encountered, further guiding the decision-making process towards the best possible conservation practice.

This short communication will present three examples illustrating this relationship as well as the results it put forward while studying a complex series of iconic portraits created continuously between the 15th and 19th centuries.

Keywords: Interdisciplinarity, grisaille, Flemish painting, panel painting, portraits, IRPA-KIK.

La idea de que el estudio del patrimonio cultural y la toma de decisiones relativas a su conservación deben ser abordados de forma interdisciplinaria se esboza claramente desde la segunda década del siglo xx. Sin embargo, el término «interdisciplinario» no habría de utilizarse en el contexto específico de nuestra disciplina hasta 1971¹.

Desde entonces, un considerable número de autores ha mencionado que la colaboración interdisciplinaria debe ser la base de todo proyecto cuyo objetivo sea la conservación del patrimonio. Sin embargo, dentro de este corpus, existe un muy reducido número de reflexiones en torno a cómo se genera, comparte, interpreta y utiliza la información recabada en el marco de un estudio interdisciplinario, o en cómo éste orienta e impacta la toma de decisiones destinadas a la conservación. Estas cuestiones, que bien podrían calificarse de operativas, son esenciales y en parte dependen de las relaciones que establecen entre sí los diferentes actores involucrados. Al respecto, predomina la idea que la correcta práctica interdisciplinaria exige términos de «igualdad absoluta» entre participantes (Bergeon, 1997: 70). Sin embargo, creemos que éstos se relacionan de una manera mucho más compleja y dinámica que supera con creces la vaga mención de igualdad habitualmente consignada.

En la experiencia de trabajo acumulada por el Instituto Real del Patrimonio Artístico de Bélgica (IRPA-KIK), fundado para encarnar esta óptica interdisciplinaria, la complementariedad entre disciplinas es definitivamente la relación de base exigida para abordar su misión. Dicha complementariedad implica el trabajo conjunto de los especialistas, en un respeto absoluto por la labor del otro. Desde esta perspectiva, el intercambio de hipótesis y la interpretación conjunta de la información obtenida son permanentes, de tal forma que el resultado final integra la totalidad de los puntos de vista.

Sin embargo, ha sido interesante notar que, en diferentes momentos de este proceso y en función tanto de los resultados que se han adquirido ya como de las problemáticas que aún deben resolverse, cada uno de los participantes toma temporalmente una posición preeminente con respecto a los demás. Esta preeminencia puede ejercerse en varios sentidos: por una parte, al indicar las pautas a ser seguidas por los otros miembros del equipo, proponiendo nuevas preguntas de investigación que podrían contribuir a una mejor comprensión del objeto de estudio. Por otra, al aportar las claves para la correcta interpretación de los resultados obtenidos por los demás, dentro de sus propios campos de especialidad.

¹ Para un recuento sobre la aparición y uso del término «interdisciplinaria» en el ámbito de la conservación-restauración puede consultarse a Bergeon (1997) o a Ainsworth (2005).

Esta relación, en donde se equilibra la preeminencia y la complementariedad entre disciplinas, es para nosotros uno de los motores fundamentales en nuestro quehacer cotidiano. Al comprender cabalmente al patrimonio cultural puesto bajo nuestra tutela se enriquece la toma de decisiones destinadas a su conservación-restauración, dinámica que fue puesta en evidencia a través de un caso estudiado recientemente en el taller de restauración de pintura de caballete del instituto².

El caso de estudio

Se trata de la serie de retratos icónicos de los condes de Flandes y los abades de la abadía cisterciense de Nuestra Señora de las Dunas de Koksijde, Bélgica. Ésta se compone de diecisiete pinturas sobre tabla creadas sucesivamente entre los siglos xv y xix, conservadas actualmente en el Gran Seminario de Brujas. En ella se consigna la genealogía de condes y abades siguiendo un esquema compositivo general: los personajes son representados en cuerpo entero y de pie, rodeados por blasones que permiten identificarlos; a sus pies se encuentran una serie de textos biográficos. Si bien las pinturas en donde se representaba la genealogía de los linajes gobernantes eran comunes dentro de la producción artística de los Países Bajos entre los siglos xiv y xv, esta serie presenta ciertas particularidades que le confieren un carácter excepcional³.

A pesar de su reconocida importancia, la serie se encontraba en un mal estado de conservación por lo que, en junio de 2011, ingresó al IRPA-KIK. De acuerdo a la dinámica de trabajo establecida en el seno de este instituto, se constituyó un equipo multidisciplinario que ha perseguido una serie de objetivos fundamentales: a) resolver preguntas específicas en torno a su génesis, su primera fase de creación y su evolución material; b) evaluar integralmente su estado de conservación; c) generar un diagnóstico preciso de cada obra estableciendo nexos que permitan obtener una visión del conjunto, y d) establecer una propuesta para su futura restauración.

Los ejemplos que se mostrarán a continuación presentan una parte de los resultados obtenidos durante el estudio de la serie, e ilustran lo antes mencionado sobre las relaciones que se establecen entre las diferentes disciplinas participantes.

La evaluación del valor documental de la serie

Tradicionalmente, se ha considerado que esta serie de retratos cumple una función meramente documental. Por ello, los textos incluidos en las diferentes tablas han sido considerados como fuentes fiables de información histórica sobre los personajes representados, habiéndose transcrito en numerosas ocasiones desde, al menos, el siglo xvii. Debido al lamentable estado de conservación que presentan actualmente y en preparación a su eventual restauración, éstos se convirtieron en uno de los primeros objetivos de la investigación histórica realizada en torno a la serie.

Las transcripciones encontradas en diversas fuentes⁴ fueron revisadas críticamente, co-tejándolas además con los restos materiales encontrados en las pinturas, observados bajo luz visible, radiación ultravioleta y reflectografía infrarroja. Asimismo, se estudiaron los cambios, algunas veces sumamente sutiles, en la caligrafía utilizada a lo largo de las pinturas.

² Para obtener una visión general del proyecto y sus resultados, consultar a Genbrugge, 2012.

³ La serie ha sido el objeto de numerosas noticias desde el siglo xvii, así como de diversos estudios en donde se resaltan dichas particularidades. Ver: Sanderus (1641); de But (1839); Janssens de Bisthoven (1984); van Nerom (1992); Geirnaert (1992) y Kohl (2012). Cabe resaltar que su importancia le ha valido el título de *topstukken*, máximo apelativo en la escala de relevancia otorgado al patrimonio cultural de la comunidad flamenca de Bélgica.

⁴ Sanderus (1641); De Clercq (1650) y Janssens de Bisthoven (1984).

Este análisis comparativo permitió establecer una cronología de las fases de creación de esta serie, generando agrupaciones que serían posteriormente corroboradas por los estudios estilísticos y de la técnica de manufactura. Por otra parte, evidenció que las fuentes documentales no son una transcripción fidedigna de los textos pintados; son numerosos los cambios en las palabras transcritas, encontrando incluso interpretaciones libres en el caso de algunas. Asimismo, fue posible determinar la temporalidad de algunos cambios, asignándoles una significación histórica precisa (fig. 1).



Figura 1. Comparación bajo diferentes radiaciones electromagnéticas del texto bajo la representación del Abad Hakketus, en la pintura 4. Con radiación ultravioleta (UV) y reflectografía infrarroja (RIR) se detectaron manchas que podrían corresponder a dos retoques superpuestos (flechas blanca y roja); es posible que en estas zonas haya modificaciones al texto original. Al comparar el texto pintado con transcripciones procedentes de diferentes fuentes documentales, pudieron identificarse elementos que no se encontraban en la pintura (recuadros azules).

El insospechado cúmulo de información arrojado por este estudio histórico ha tenido un importante impacto en el trabajo de las otras disciplinas involucradas. Así, al evidenciar el carácter impreciso de las transcripciones que habrían de servir como base para la restitución del texto, se decidió que éste no sería reintegrado y que se aplicaría únicamente un tono medio sobre las lagunas. Por otra parte, los agrupamientos derivados de este estudio sirvieron como punto de partida para seleccionar las pinturas a ser estudiadas por el grupo de científicos. De esta manera, a pesar del elevado número de obras que componen la serie, pudieron respetarse los límites de tiempo y recursos disponibles para el proyecto.

La detección e interpretación de los vestigios materiales de una antigua intervención de restauración

Un acucioso examen comparativo del estado de conservación de los diecisiete soportes de madera en conjunto con el análisis de los resultados radiológicos, ha revelado un interesante patrón. En un principio, dichos soportes se encontraban constituidos por entre cuatro o cinco

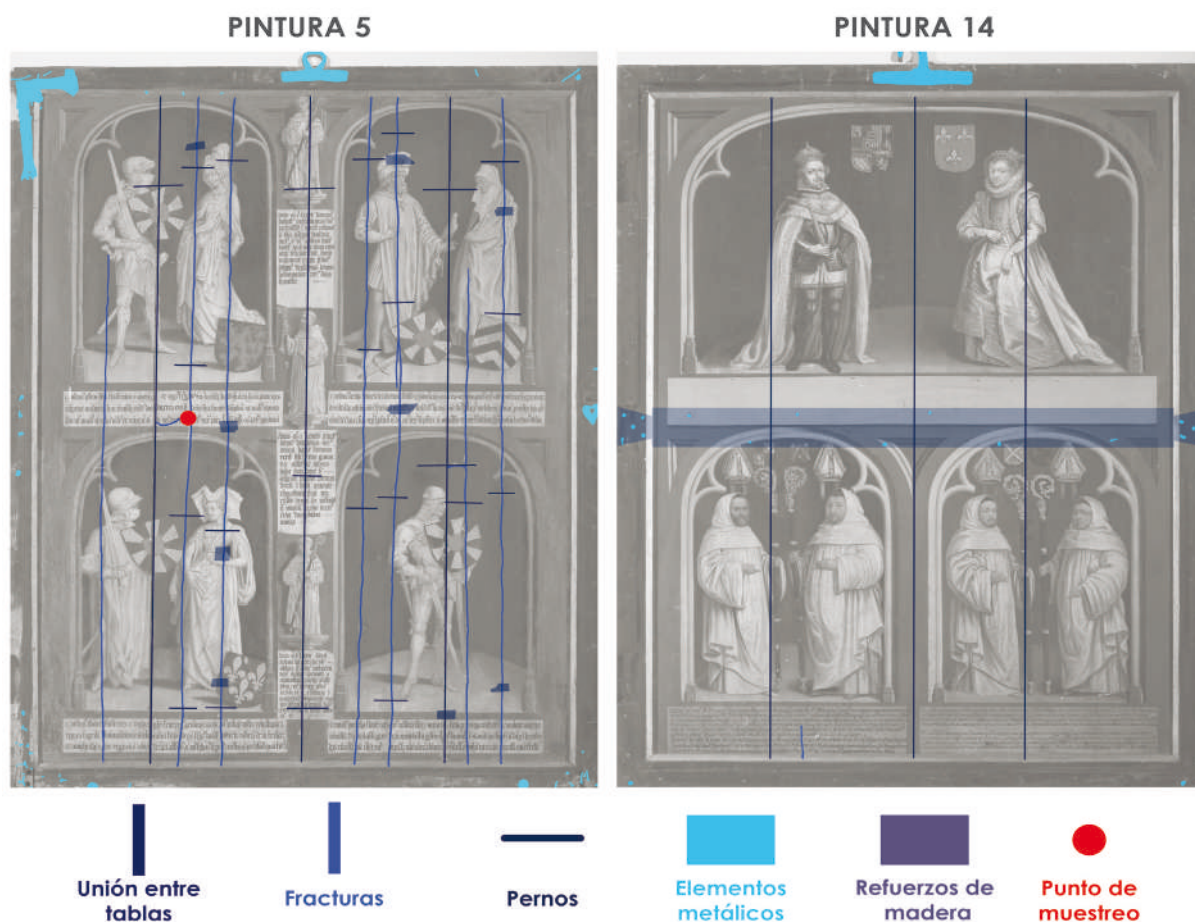


Figura 2. Esquemas que representan el estado de conservación de los soportes de madera de las pinturas 5 y 14. En la primera se percibe un importante número de fracturas reparadas con abundantes pernos, elementos metálicos y refuerzos de madera. Estos elementos agregados son representativos de la intensa campaña de restauración ejecutada sobre las diez primeras pinturas de la serie, después del ataque iconoclasta.

tablas de roble de diferentes calidades. Sin embargo, cada una de las tablas que integran las diez primeras pinturas de la serie presenta al menos una fractura longitudinal, así como numerosos pernos, injertos de madera, taquetes y refuerzos textiles.

Estas observaciones pusieron en evidencia que estas obras habían sufrido un importante daño estructural y que dichos materiales agregados eran producto de una intensa campaña de restauración. Con esta información, pudieron identificarse los estratos pictóricos asociados a esta campaña: una serie de resanes y repintes que, en la mayoría de los casos, se encuentran ya recubiertos por intervenciones posteriores (figs. 2 y 3).

La investigación histórica habría de aportar nuevos elementos para dotar estas huellas materiales de sentido. En la crónica de Adrien de But (1839: 172-173), se encontró la transcripción de un juicio verbal ejecutado en 1566. Las actas de este juicio, levantadas unos cuantos meses después de que la abadía fuera atacada por los iconoclastas, consignan que la serie de retratos de los condes de Flandes, en la cual figuraban ya estas diez tablas, «fueron todos rotos y arrancados». De esta forma, los numerosos elementos de refuerzo estructural añadidos, así como los resanes y repintes asociados, fueron revalorados como testimonio de una antigua intervención de restauración con un significado preciso y relevante para la historia de la abadía y de la región en general, decidiendo que habrían de ser conservados durante el proceso de restauración.

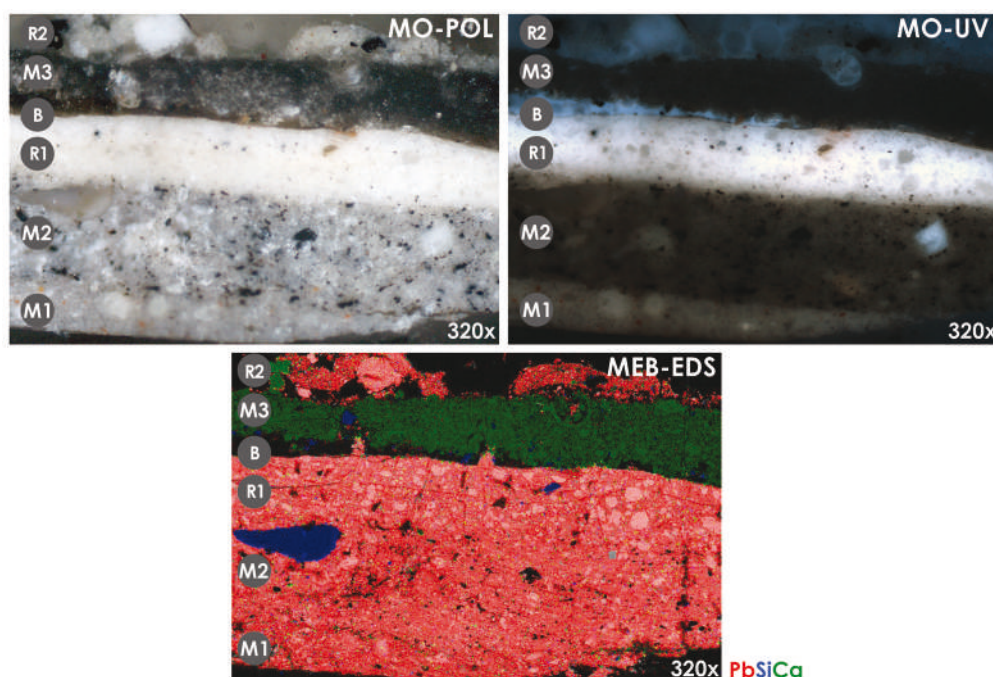


Figura 3. Muestra estratigráfica obtenida de la zona indicada por el punto rojo en la figura 2. Por microscopía óptica bajo luz polarizada y ultravioleta (MO-POL y MO-UV) se observan los materiales de resane (M1 y M2), retoque (R1) y barniz (B) asociados a la campaña de restauración ejecutada después de los ataques iconoclastas. En una intervención posterior, un nuevo resane (M3) y un segundo retoque (R2) fueron aplicados. El mapeo elemental realizado por MEB-EDS permite identificar que los materiales de la primera intervención (M1, M2 y R1) se componen principalmente de plomo mientras que el segundo resane (M3) se diferencia por su alto contenido de calcio. Esta diferencia material permite diseñar un tratamiento de restauración que elimine selectivamente el resane M3.

La comprensión de los procesos de degradación de los elementos heráldicos

Empleando documentos de época para contextualizar la función de la heráldica en el momento de creación y utilización de la serie, Kohl afirma que estos elementos «son los únicos necesarios para identificar al personaje aunque lo cierto es que tienen una función que va más allá de la identificación de sus portadores. El blasón era en esa época un sustituto de quien lo portaba (...) volvían al personaje presente, le daban vida e identidad ante los ojos del espectador» (Kohl, 2012: 14). Al ser esenciales para la función discursiva de la serie estudiada, los blasones y sus alteraciones fueron abordados con especial interés por los restauradores.

Fueron ellos quienes indicaron una apariencia anómala en algunos de los elementos heráldicos: bajo microscopio estereoscópico detectaron la presencia heterogénea de diminutos puntos negros distribuidos sobre toda la superficie de un fondo color ocre. Las partículas negras y los fondos fueron analizados comparativamente en cuatro tablas diferentes mediante fluorescencia de rayos X (FRX), determinando que éstas se componían principalmente de plata. Posteriormente, el análisis de dos muestras estratigráficas mediante técnicas de microscopía óptica y electrónica, confirmó la presencia de una hoja de plata aplicada al mixtión, transformada por un proceso de corrosión en sulfuro de plata (AgS) (figs. 4 y 5).

Creemos que en el transcurso de una intervención anterior de restauración, el desconocimiento de la naturaleza material de esta alteración ocasionó un error de interpretación: la hoja metálica corroída fue entonces eliminada como si se tratara de un depósito de suciedad. De esta forma, el significado y función de los blasones fue alterado de manera irreversible.



Figura 4. Aspecto de uno de los blasones de Portugal en donde la hoja de plata aplicada al mixtión fue eliminada (imagen izquierda). Un acercamiento a la superficie (imagen derecha) revela claramente los restos ennegrecidos de la hoja metálica y el fondo color ocre.

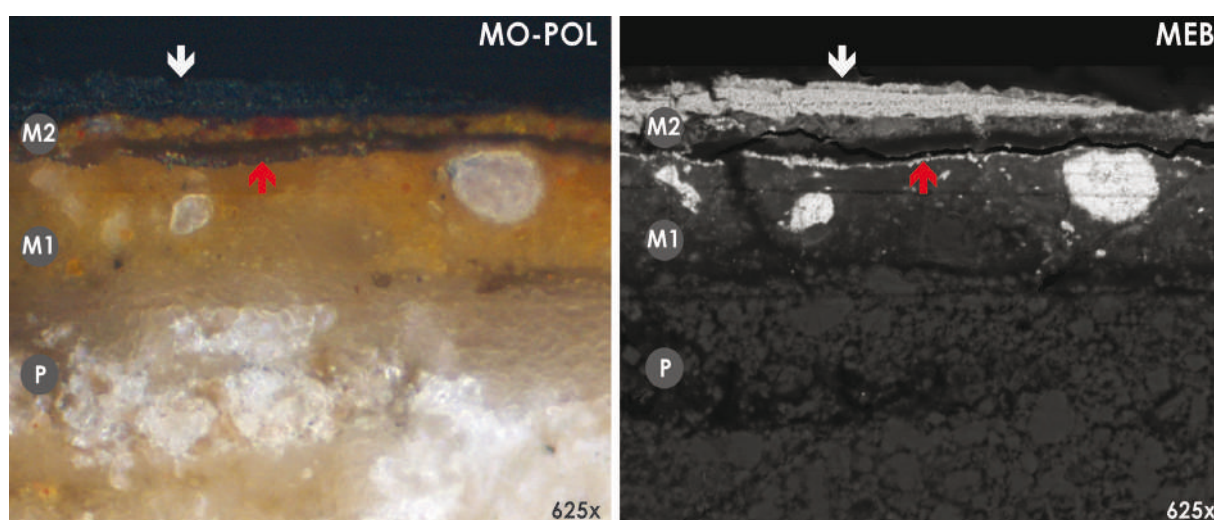


Figura 5. Detalle de una muestra estratigráfica observada por microscopía óptica con luz polarizada (MO-POL) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Proveniente de uno de los blasones alterados de la pintura 4, en la muestra se observa primero una preparación a base de carbonato de calcio (P) y un estrato compuesto de blanco de plomo y tierras férricas (M1) sobre el cual fue aplicada una hoja de plata (flechas rojas). Ésta fue recubierta por un segundo estrato (M2) de composición similar a M1, sobre el cual se aplicó una segunda hoja de plata que, al encontrarse en superficie, se transformó en sulfuro de plata (flechas blancas).

Estos resultados pusieron en evidencia la necesidad de abordar el estudio de los blasones como un campo adicional de investigación histórica. Así, se detectaron nuevas anomalías que, al ser analizadas por los científicos, habrían de revelar una amplia gama de alteraciones de la materia constitutiva de estos elementos. Un importante cúmulo de información de corte histórico y científico fue entonces entregado a los restauradores, apoyándolos en la elaboración de diferentes propuestas de tratamiento para su restauración.

Conclusiones

Desde nuestra perspectiva, el estudio interdisciplinario del patrimonio cultural persigue un objetivo principal: adquirir una comprensión cabal de los objetos para orientar las decisiones relativas a su conservación o restauración. Bajo esta óptica, en donde el patrimonio cultural y su

permanencia ocupan un lugar central, las diversas disciplinas participantes deben establecer una relación de trabajo sumamente particular.

Ejemplificada aquí como un sutil equilibrio entre complementariedad y preeminencia, esta relación debe asegurar el flujo transversal y continuo de la información generada, promoviendo el desarrollo de un vocabulario común que construya una visión compartida del objeto de estudio. De esta manera, se favorece la toma de decisiones que permite establecer metas específicas y consensuadas, expandiendo los límites del proceso de investigación y, por ende, del conocimiento mismo del objeto. Por otra parte, al permitir que los especialistas desarrollen una conciencia sobre las limitaciones de sus propias metodologías e interpretaciones, se promueve una actitud positiva y respetuosa hacia los aportes que los colegas de otras disciplinas pueden realizar al trabajo propio.

Experiencias de trabajo como la aquí presentada deben ser el punto de partida para reflexionar en torno a los mecanismos que rigen la colaboración interdisciplinaria en el ámbito de la restauración, de tal manera que puedan potencializarse sus bondades. En este sentido, quisiéramos acentuar la urgencia de crear nuevos espacios para difundir los resultados de estas colaboraciones y, muy particularmente, para efectuar una evaluación crítica de cómo llegamos a ellos.

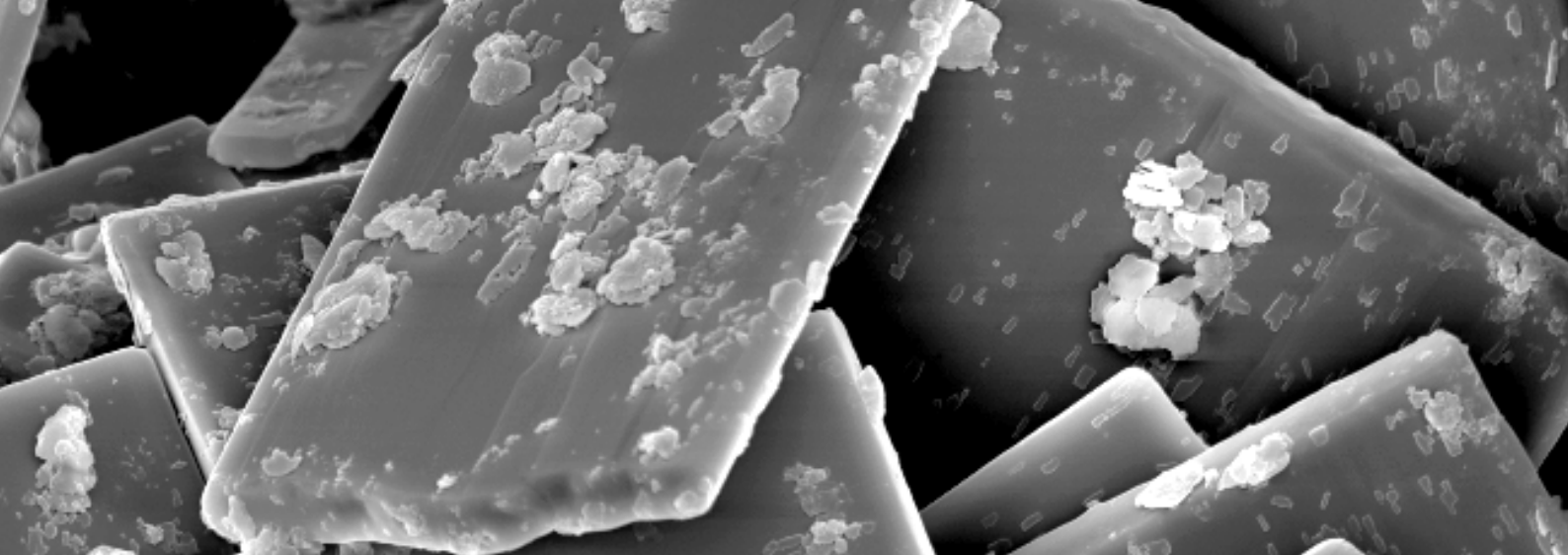
Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer a Françoise Rosier, Hélène Dubois y Livia Depuydt por las discusiones que originaron esta comunicación, a Eduardo Lamas por la revisión del texto y a los Fondos InBeV-Baillet-Latour por su apoyo financiero para el desarrollo de la investigación.

Bibliografía

- AINSWORTH, M. (2005): «From connoisseurship to technical art history. The evolution of the interdisciplinary study of art», en *The Getty Conservation Newsletter*, n.º 20(1), pp. 4-10.
- BERGEON, S. (2003): «La restauration: de l'interdisciplinarité à la discipline», en *Bulletin de l'IRPA-KIK*, n.º 30, pp. 15-21.
- (1997): «Vers un vocabulaire commun de la conservation-restauration des biens culturels: valeur d'usage et interdisciplinarité», en *Musées & collections publiques de France*, n.º 217, pp. 61-77.
- BUT, A. DE (1839): *Cronica abbatum monasterii de Dunis*. Edición de F. Van de Putte. Brujas: Vandecasteele-Werbrouck.
- CLERCQ, V. DE (1650): *Magnum Registrum Archivii Dunensis*. [Manuscrito]. Brujas: Biblioteca del Gran Seminario de Brujas.
- GEIRNAERT, N. (1992): «De portrettenreeks van de graven van Vlaanderen uit de Duinenabdij: Vlaamse schilderkunst van voor Van Eyck of van 1480», en *Jaarboek 1991-1992. Brugge, Stedelijke Musea*. Brujas: Stedelijke Musea, pp. 137-138.
- GENBRUGGE, A. (2012): *Voorstudie van de reeks schilderijen met protretten van de Graven van Vlaanderen en de Abten van Ter Duinen, bewaard in het Grootseminarie te Brugge*. Bruselas: IRPA-KIK.

- JANSSENS DE BISTHOVEN, B. (1984): «De Graven van Vlaanderen en de abten van de Duinenabdij», en *De duinenabdij (1627-1796) en het grootseminarie (1833-1983) te Brugge: bewoners, gebouwen, kunstpatrimonium*. Edición de A. Denaux y E. Vanden Berghe. Tielt: Lannoo, pp. 287-324.
- KOHL, J. (2012): *La série généalogique des comtes de Flandre provenant de l'abbaye des Dunes*. Tesis de Maestría. Université Libre de Bruxelles (ULB).
- NEROM, C. VAN, (1992): «Les panneaux des comtes de Flandres au Grand Séminaire de Bruges», en *Revue Belge d'archéologie et de l'histoire de l'art*, n.º 61, pp. 261-262.
- SANDERUS, A. (1641): *Flandria Illustrata*. Amsterdam: Jan et Cornelis Blaeu.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE