

La Ciencia y el Arte II

Ministerio
de Cultura

Ciencias experimentales
y conservación del Patrimonio Histórico

LA CIENCIA Y EL ARTE II
CIENCIAS EXPERIMENTALES Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO

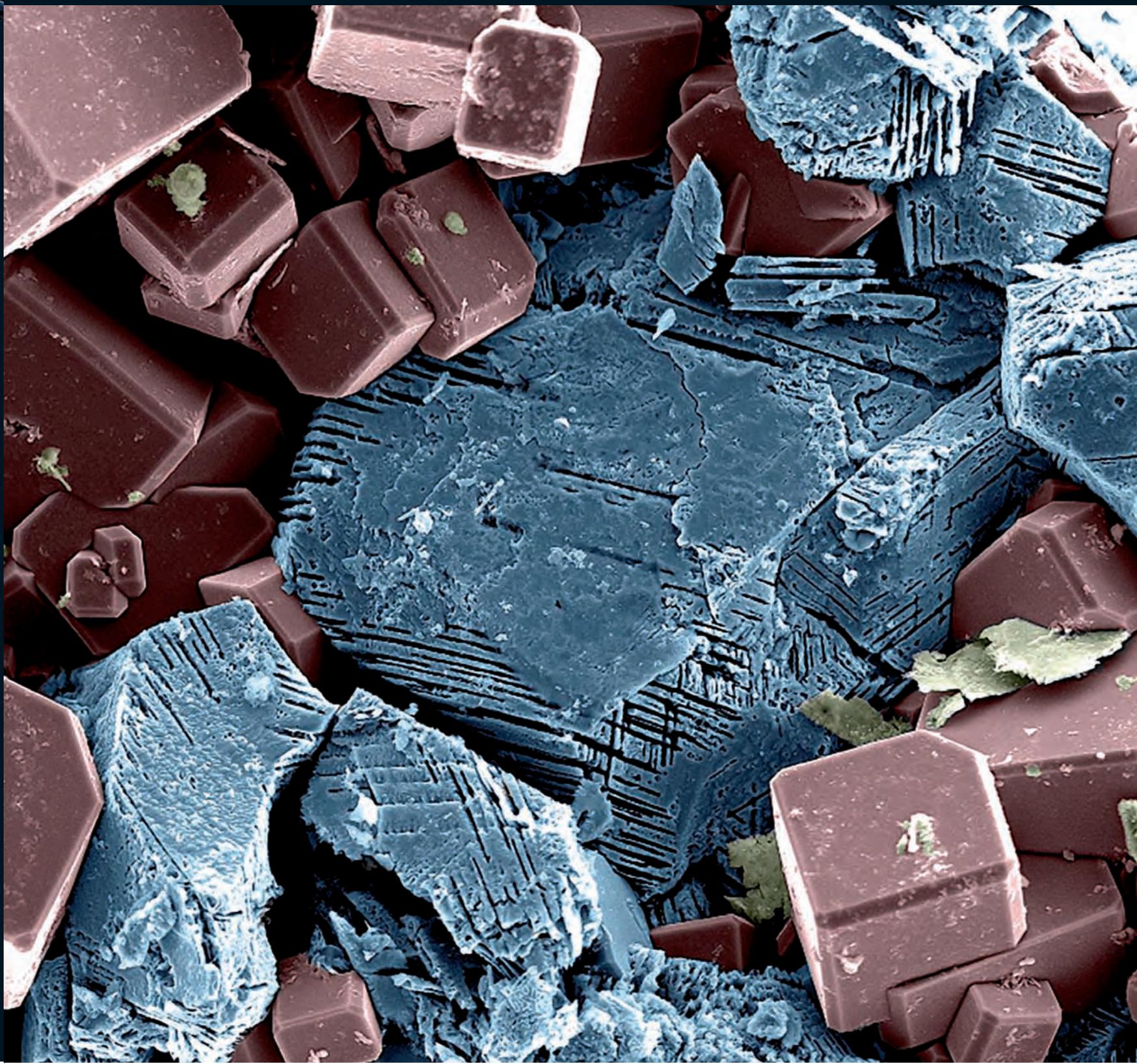


Imagen de electrones secundarios de la corrosión por descincificación a través de planos de maclado mecánico y desarrollo de cristales de cuprita en una pieza romana de latón.

La Ciencia y el Arte II

Ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico

www.mcu.es
www.060.es

Subdirector General del IPCE
Alfonso Muñoz Cosme

Jefe del Área de Formación, Documentación y Difusión del IPCE
María Domingo Fominaya

Jefe del Servicio de Documentación del IPCE
Antonio J. Sánchez Luengo

Coordinación científica
Marián del Egado. IPCE
David Juanes. ICV+R



MINISTERIO DE CULTURA

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

© De los textos e imágenes: los autores

NIPO: 551-10-154-6
ISBN: 978-84-8181-461-3



MINISTERIO
DE CULTURA

Ángeles González-Sinde
Ministra de Cultura

Mercedes E. del Palacio Tascón
Subsecretaria de Cultura

Ángeles Albert
Directora General de Bellas Artes y Bienes Culturales

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1. Las ciencias experimentales en los institutos de conservación..... | 9 |
| <i>Carmen Pérez*, David Juanes*, Marián del Egado**</i> | |
| *Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales | |
| **Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| Capítulo 2. Métodos y técnicas para el estudio científico de los bienes culturales | 18 |
| 2.1. La documentación geométrica del Patrimonio en el IPCE del Ministerio de Cultura | 18 |
| <i>José Manuel Lodeiro.</i> Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| 2.2. La tomografía axial computerizada. Estudio de escultura de madera | 32 |
| <i>David Juanes.</i> Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales | |
| 2.3. Métodos analíticos desarrollados en el IPCE para el estudio de bienes culturales basados en la Espectroscopia de Infrarrojos por Transformada de Fourier y Técnicas Cromatográficas..... | 44 |
| <i>Estrella Sanz*, M^a Antonia García** y Ruth Chércoles*</i> | |
| **Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| *Universidad Complutense de Madrid | |
| 2.4. Las pinturas murales de la Casa de Ariadna en Pompeya: Un ejemplo de estudios e investigaciones científicas aplicados en el proyecto de conservación y restauración..... | 59 |
| <i>Carmen Pérez*, Livio Ferrazza*, Margarita Doménech*, Fanny Sarrió*, Albert V. Ribera**.</i> | |
| *Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales | |
| **Sección de Arqueología del Ayuntamiento de Valencia | |
| Capítulo 3. Casos de aplicación: los bienes culturales como objetos científicos..... | 71 |
| 3.1. Aplicación de los estudios físicos en el campo en la restauración..... | 71 |
| <i>Pilar Ineba.</i> Museo de las Bellas Artes San Pío V | |
| 3.2. Estudio de las condiciones microclimáticas y lumínicas. Metodología y práctica en la Sede del Instituto del Patrimonio Cultural de España..... | 78 |
| <i>Guillermo Enríquez de Salamanca y Teresa Gil Muñoz.</i> Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| 3.3. Metodología de análisis físico-químicos en obras policromadas de gran formato | 94 |
| <i>Marisa Gómez y Margarita San Andrés.</i> Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| 3.4. Analizando residuos de limpieza. Potencial analítico de los materiales eliminados durante la restauración | 113 |
| <i>José V. Navarro Gascón.</i> Instituto del Patrimonio Cultural de España | |
| 3.5. Técnicas de procesamiento de imagen y visión artificial en entornos artísticos | 126 |
| <i>Juan Torres Arjona.</i> E.T.S.I.T. Universidad Politécnica de Madrid | |
| 3.6. Nuevas perspectivas metodológicas en la documentación y estudio y en la conservación del arte rupestre del Arco Mediterráneo..... | 138 |
| <i>Pere M. Guillem Calatayud y Rafael Martínez Valle.</i> Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales | |
| 3.7. Caracterización de elementos metálicos en textiles históricos y estudio de sus diversas alteraciones mediante técnicas microscópicas..... | 150 |
| <i>Livio Ferrazza y María Gertrudis Jaén Sánchez.</i> Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales | |

| | |
|--|-----|
| Capítulo 4. Innovación | 162 |
| 4.1. Estudio y cartografía de sales en paramentos pétreos: innovaciones tecnológicas con este propósito | 162 |
| <i>Josep Gisbert Aguilar, Manuel Blanco Domínguez, Óscar Buj Fandos, Francesca Colucci, Josep Gisbert Aguilar, Pedro López Julián, Belén Franco López, Ignacio Mateos Royo y Pilar Navarro Echeverría. Universidad de Zaragoza</i> | |
| 4.2. Iluminación no invasiva de pinturas rupestres | 171 |
| <i>Daniel Vázquez Moliní, Jesús Zoido Chamorro y Antonio Álvarez. Universidad Complutense de Madrid</i> | |
| 4.3. El plomo en las vidrieras históricas: características, deterioro y conservación | 181 |
| <i>Fernando Cortés Pizano. Fundació Mas Carandell. Reus</i> | |
| 4.4. Reconstrucción 3D partiendo de imágenes TAC. El caso de Atapuerca | 196 |
| <i>Elena Santos, José Miguel Carretero Díaz, Rebeca García González, Laura Juez Aparicio, Laura Rodríguez Aparicio. Universidad de Burgos</i> | |
| 4.5. Sistemas digitales de adquisición de imágenes visibles, infrarrojos e hiperespectrales | 205 |
| <i>Salvador Giró. Infaimon S.L.</i> | |

Capítulo 1

Las Ciencias Experimentales en los Institutos de Conservación

Carmen Pérez y David Juanes

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales

Marián del Egido

Instituto del Patrimonio Cultural de España

Ciencias y conservación: lugares comunes

Las ciencias naturales y la tecnología forman parte de nuestra vida cotidiana y son un instrumento para la paz, la defensa de los derechos humanos y la promoción del desarrollo sostenible, tal como defiende la UNESCO en sus programas. Esta misma organización, en su *Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural*, afirma que procurará “desarrollar los estudios y la investigación científica y técnica y perfeccionar los métodos de intervención que permitan a un Estado hacer frente a los peligros que amenacen a su patrimonio cultural y natural” (UNESCO).

Esta afirmación, realizada en 1972, se nutre de una experiencia iniciada tímida y puntualmente a finales del s. XVIII (Calderado, 1987) (Ress-Jones, 1990). En la actualidad, los estudios basados en la aplicación de las ciencias experimentales son parte integrante de los proyectos de conservación y restauración del patrimonio histórico. Desde el primer laboratorio creado en 1888 y adscrito a los Museos Reales de Berlín (Gilbert 1987), dedicado al análisis de las colecciones llegadas desde Egipto y Medio Oriente, hasta la situación actual con Laboratorios dedicados a la conservación del patrimonio en todos los países occidentales y gran parte del resto del mundo, la evolución ha desembocado en una nueva disciplina, las ciencias para la conservación. En suma, las ciencias experimentales han encontrado su lugar dentro de

la conservación del patrimonio cultural, de igual modo, que la conservación y la restauración han ido creando su hueco dentro de las ciencias aplicadas.

En estos ciento veinte años de recorrido se han tenido que superar dificultades y retos de todo tipo (Egido, 2008). Se ha tenido que convivir y superar el rechazo desde las filas de los más tradicionales conservadores e historiadores del arte, y desde áreas más estrictamente científicas, ambos argumentando que el estudio científico de las obras de arte se alejaba, respectivamente, del arte y de las ciencias puras. Unos y otros tenían motivos a su favor para defenderlas. Los primeros se apoyaban en claros ejemplos en los que se habían aplicado directamente una técnica, un producto o una práctica propia de las ciencias al ámbito del patrimonio histórico con resultados nefastos, y generando unos problemas de conservación más graves que los que tenía originalmente. Estos hechos dieron alas y argumentos a aquellas personas que desconfiaban y rechazaban la aplicación de las ciencias al arte (Melucco, 1996). En el lado opuesto, las ciencias aplicadas al estudio del patrimonio no estaban bien consideradas por la propia comunidad científica, que consideraba que este campo se alejaba de la investigación científica pura.

Con el paso de los años, se han ido suavizando las posturas, dando lugar a canales de comunicación efectiva entre los científicos y los profesionales a cargo de los trabajos de conservación del patrimonio. Hoy en día, se detecta una cierta armonía entre

las dos áreas del conocimiento, que se pone de manifiesto en los currículos de las carreras universitarias. Se imparten ciencias en diversas especialidades relacionadas con la conservación y la restauración, y existen distintas vías –aunque escasas– para que los alumnos de ciencias se pueden especializar en estudios aplicados al patrimonio histórico. También la disciplina de la Conservación del Patrimonio comienza a tener una historia que demuestra que, al igual que hay ejemplos de resultados nefastos provocados por aplicar una técnica o producto sin ser previamente testado, también hay numerosos ejemplos de intervenciones erróneas o almacenajes inapropiados que han dañado seriamente el objeto, por no conocer desde el punto de vista material o estructural, el bien cultural con el que se trataba.

El resultado de todo este proceso es que, desde hace algunos años, los proyectos de conservación y restauración del patrimonio histórico y cultural se realizan desde una perspectiva interdisciplinar en el que se implican restauradores, científicos, historiadores, arquitectos, arqueólogos, fotógrafos, entre otros profesionales, quienes aportan su visión a los problemas relacionados con la conservación de las obras de arte. Todas las aportaciones tienen una gran trascendencia dentro del objetivo común que es conservar nuestro patrimonio histórico y cultural.

El trabajo propio de los departamentos científicos se basa en preguntas cuya respuesta sea de interés para los conservadores y restauradores de ese bien, de modo que constituyen una herramienta útil para su trabajo. Sin embargo, cualquier estudio y tecnología aplicados al análisis del problema debe partir de dos condiciones sine qua non: mínima intervención de la obra y no modificación de los valores históricos y artísticos del bien cultural. Esto impone límites para los estudios científicos que deben ser identificados, reconocidos y asumidos, aunque esto suponga aceptar que no todo tiene solución abordable en la actualidad y que, seguramente en un corto espacio de tiempo, alguna técnica podrá adaptarse mejor a los requisitos específicos ese objeto cultural (Egido, 2008).

Las actividades de los departamentos científicos abarcan muchas áreas de la conservación del patrimonio. La que más directamente se asocia son los estudios que se realizan a las obras de arte como apoyo a sus procesos de conservación y restauración.

La obra de arte es un valor intangible asociado a un soporte material. Por tanto, tiene una naturaleza físico-química compleja indisociable a cualquier otro valor que se le puede atribuir (histórico, artístico, etc). Así por ejemplo, un pigmento mineral no es más que un compuesto químico con una determinada estructura cristalina que ha sufrido un proceso de preparación. El aceite secante empleado en pintura está compuesto por triglicéridos de ácidos grasos fundamentalmente insaturados, mientras que las colas son polímeros de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Los metales arqueológicos son metales puros, como el oro o la plata, o mezclas de aleaciones como el oro bajo, bronce y el latón. Los soportes de ciertas obras de arte son de origen vegetal, como la madera, lino, cáñamo, etc., o animal como el pergamino.

Esta naturaleza físico-química es la que le permite al científico desvelar su estructura constitutiva a partir de un complejo análisis de los materiales que la componen. La interpretación de estos resultados permite desvelar su método de elaboración, reutilizaciones, arrepentimientos y el comportamiento de la obra a lo largo del tiempo hasta ofrecer la imagen que se muestra en la actualidad. Todos estos datos facilitan la comprensión y el entendimiento de la obra, y permiten elaborar propuestas junto con los profesionales dedicados a la conservación y restauración que permitan su disfrute en el futuro.

Cualquier análisis comienza con el estudio preliminar in situ. El examen detallado de la obra debe realizarse con ayuda del restaurador que indique las zonas de interés prioritario. Es la única forma de valorar el problema, su gravedad, su dimensión y definir el objeto del análisis. Todo ello es necesario para seleccionar los ensayos y evaluar si el daño que sufre la pieza compensa los datos que se obtienen del análisis. En caso negativo es preferible estabilizar el objeto y esperar a que la tecnología evolucione. En caso afirmativo se procede con el análisis. Su resultado debe responder a las cuestiones planteadas y debe poder ser comprendido por los otros especialistas implicados, ya que es necesario compartir la información, discutir los resultados y cooperar durante el proceso de intervención.

Estos estudios también proporcionan información de gran interés desde el punto de vista histórico. El análisis de materiales permite conocer las intenciones del artista, etapas evolutivas de la obra y del autor, o las técnicas de ejecución de una escuela o una época en concreto (figura 1). Estos resultados son mucho más amplios y se obtienen a más largo plazo, ya que requieren el estudio en conjunto de numerosas obras, lo que complica aun más el trabajo.



Figura 1. Sección transversal de la encarnación de la mano de La Virgen de las Batallas Siglo XIII. Iglesia Parroquial de San Andrés Apóstol, Valencia. La gran cantidad de policromías sucesivas es un reflejo de la historia de la propia obra

Otra línea de trabajo de los departamentos científicos de conservación debe ser la adecuación de técnicas analíticas procedentes de otros campos al estudio del patrimonio histórico. Todas las técnicas de análisis empleadas en el patrimonio cultural proceden de las ciencias experimentales y de la industria. También se debería incluir en este punto el ensayo y valoración, en colaboración con el resto de profesionales dedicados a la conservación, de nuevos productos y metodologías, que se puedan aplicar en este campo. Partir del conocimiento de una técnica, una práctica, o una sustancia derivada de alguna ciencia experimental, ensayo de laboratorio o aplicación industrial, y extrapolarla directamente al ámbito del patrimonio histórico es un error de planteamiento que puede conducir a un grave problema de conservación. Por tanto, deben ser los departamentos científicos junto con los profesionales de la conservación y restauración los que deben adecuar una técnica o producto al campo a la conservación y restauración de obras de arte, mediante un adecuado proceso de transferencia tecnológica. Para ello, es necesario que todos especialistas en conservación mantengan un continuo interés por la puesta al día de posibilidades técnicas y hallazgos en otros campos que puedan ser aplicables al patrimonio.

Además, los departamentos científicos deben tener un conocimiento crítico de las técnicas experimentales y un alto grado de objetividad. Existe un gran riesgo de llegar a la utilización masiva de los medios tecnológicos hasta el punto de realizar grandes inversiones en equipamientos que proporcionen informaciones que se pueden obtener de forma similar con otras técnicas más sencillas y menos costosas. Por otro lado, hay que evitar caer en la tentación de aplicar técnicas de última generación para llegar a resultados triviales. Existen ejemplos en la literatura de análisis con equipos punteros realizados exclusivamente a un artista de gran importancia sin que aporten una información excesivamente relevante.

La importancia de los análisis científicos y el carácter interdisciplinar de la conservación y restauración de bienes culturales se pone de manifiesto en el gran número de museos y centros de restauración que tienen un laboratorio o departamento científico, en el de Universidades y Centros de Investigación que se interesan en este tema y en una incipiente empresa privada que lleva a cabo algunos estudios científicos en bienes culturales. En España, existen distintos institutos de conservación y restauración como son el Instituto de Patrimonio Cultural de España, el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, el Centro de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Castilla y León, etc. que cuentan con laboratorios dedicados al estudio del Patrimonio. También museos como el Museo Nacional del Prado, el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía y el Museo Thyssen Bornemisza disponen de un departamento científico que asesora y ayuda en las tareas de conservación y restauración. Por su parte, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas cuenta con una Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural que aglutina

los proyectos de sus investigadores desde distintos institutos o centros en este ámbito. La Universidad también se ha incorporado a los estudios de conservación, no sólo desde la perspectiva de la arqueología y la historia, como tradicionalmente ha sucedido, sino también desde las Facultades de Ciencias con proyectos de investigación aplicados al Patrimonio.

Dentro del ámbito internacional destacan los laboratorios del Getty Conservation Institute, del Metropolitan Museum of Art de Nueva York o instituciones como el C2RMF, el Opificio delle Pietre Dure o el Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro.

Sea cual fuere la procedencia de estos Laboratorios dedicados a conservación, su puesta en funcionamiento no es una tarea sencilla por muchas razones. Requiere un esfuerzo económico considerable de inversión en costoso equipamiento. Hay que tener presente que se utilizan técnicas procedentes de las ciencias experimentales y de la industria que deben ser adecuadas al análisis de las obras de arte. Además, hay que ser respetuoso con la obra, lo que implica empleo de ensayos no destructivos o microdestructivos que aporten el máximo de información, lo que encarece enormemente los equipamientos de análisis (figura 2).

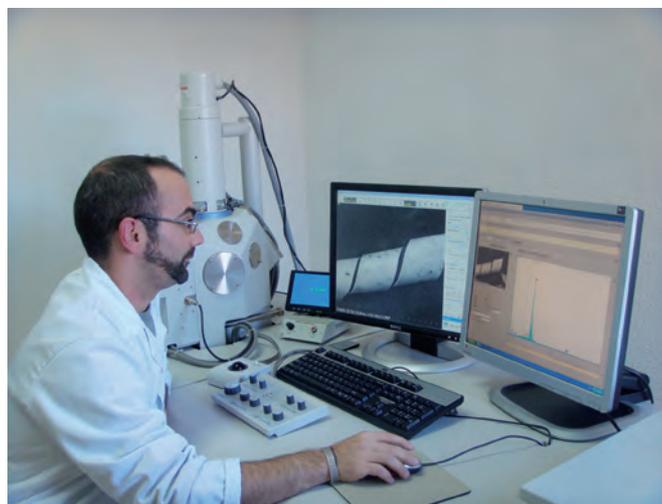


Figura 2. Microscopio electrónico de barrido de presión variable con sistema de microanálisis acoplado. Permite el estudio morfológico y el análisis químico elemental de micromuestras sin necesidad de recubrimientos de carbono u oro.

Otro factor importante que dificulta la puesta en marcha de un departamento científico es la escasez de personal cualificado. Los científicos que actualmente trabajan en este campo tienen una formación de ciencias que se ha ido complementando a medida que trabajaban en instituciones de conservación del patrimonio. Al no existir una formación reglada, el número de profesionales es bastante bajo. La especialización a través de los másteres que ofrecen algunas universidades y trabajos de doctorado o post doctorales es una sólida esperanza que se ve enturbiada por la inexistencia de un Programa Nacional de I+D+I dedicado a Patrimonio desde 1996 y por la escasez de proyectos de investigación

de esta naturaleza que alcanzan financiación pública solicitados en el marco de otros Programas.

Tipos de departamentos científicos de conservación. Ventajas e inconvenientes

Las mencionadas dificultades son comunes a cualquier grupo científico dedicado a conservación, adscrito a museos, facultades de ciencias u organismos de investigación científica, institutos nacionales de conservación o ámbitos privados. Pero existen particularidades que atañen a cada una de estas adscripciones que diferencian el funcionamiento de unos y otros (Tennet, 1997).

Los Laboratorios de los museos se dedican a la conservación de la colección que albergan, objetivo común al resto de personal técnico de la institución y, en particular, en estrecha colaboración con los restauradores, en todas las intervenciones que realizan. Además, la programación en un único centro que conserva sus propias colecciones –con notables excepciones fruto del intenso intercambio de obras en las exposiciones temporales- no depende tanto de causas ajenas al museo para diseñar los programas de conservación. Sin embargo, la implicación total resulta utópica teniendo en cuenta que las plantillas de científicos en estos Laboratorios consisten en una o dos personas, en la mayoría de casos, que deben enfrentarse a todo tipo de materiales, épocas y alteraciones. La imposibilidad de abordar este enorme trabajo puede desembocar en frustración y en dirigir sus esfuerzos a la investigación con independencia de las intervenciones de conservación y restauración que el museo tenga proyectadas. Volvemos pues a la divergencia en el quehacer entre científicos y conservadores y restauradores. No obstante, estas dificultades no son insalvables. La comunicación y colaboración con otros científicos dedicados a la conservación fuera del museo, el establecimiento de prioridades junto con el resto de personal del museo, la búsqueda de objetivos comunes al mayor número posible de proyectos de restauración, la identificación de objetivos necesarios pero abordables frente a grandes ambiciones y, por qué no, un área de especialización concreta que pueda responder a la satisfacción profesional de la investigación, son herramientas que pueden propiciar buenos resultados.

En las Universidades y en otros Organismo Públicos de Investigación, la investigación científica goza de una mayor especialización y capacidad, disponibilidad de tiempo y los más modernos recursos tecnológicos para una actividad que les es propia. Los trabajos más minuciosos y expertos, las instalaciones y tecnologías más avanzadas de un país se encuentran en este tipo de centros. En este sentido, ningún laboratorio de las instituciones dedicadas a la conservación tiene las posibilidades científicas y tecnológicas de una Facultad de Ciencias, Escuela Técnica o, en España, el CSIC, por ejemplo. La conservación científica puede recibir grandes beneficios de este alto nivel de especialización. Sin embargo, estos departamentos no están únicamente dirigidos a la conservación del patrimonio, de donde además, los recursos que

pueden obtener son muy escasos. La distancia entre estos laboratorios y las necesidades de la conservación científica es grande, no sólo espacialmente, lo que también resulta en ocasiones un serio inconveniente frente a los centros de conservación, si no en prioridades, en el conocimiento de las obras y en la necesidad de dar respuesta práctica en corto espacio de tiempo a los problemas planteados. La profundidad y especificidad de los programas de investigación académicos chocan con la amplitud de perspectiva necesaria para dar respuesta a la diversidad de los problemas de conservación de una amplia variedad de objetos y monumentos.

Otra enorme distancia se encuentra en los medios de publicación de resultados. Las revistas científicas de interés para publicar del personal de los centros de investigación no suelen coincidir con las publicaciones habituales especializadas en conservación y restauración. Esto provoca que los resultados estén dispersos en multitud de publicaciones de forma que queda, en cierto modo, oculta a los profesionales que deberían hacer uso de ellos. La importancia dentro de ámbito científico que está adquiriendo las ciencias aplicadas a la conservación empieza a reflejarse en que las publicaciones científicas tradicionales de vez en cuando, realizan monográficos de aplicación al patrimonio, aunque siguen alejadas de los círculos de la conservación. Por esta razón, es importante que los centros públicos dedicados a conservación procuren la confluencia de los medios de difusión –monográficos, jornadas, cursos, etc.- de los contenidos científicos dirigidos a la conservación producidos por universidades, organismos de investigación y departamentos científicos de centros de conservación.

A pesar de todo ello, cuando se consigue aunar objetivos y puntos de vista complementarios por parte de los equipos profesionales que trabajan en estos dos tipos de instituciones, los resultados son magníficos. Las investigaciones sobre el azul maya que se realizan en el sincrotrón de Grenoble desde hace años están ofreciendo luz sobre una tecnología y la posibilidad de identificación de este pigmento largamente estudiado a las que difícilmente se habría llegado en un departamento científico de un centro de conservación (Sánchez del Río, 2006).

La tercera tipología identificada son los laboratorios de los institutos o centros públicos de investigación. En muchos sentidos, se puede decir que estos centros aúnan las ventajas mencionadas para los departamentos científicos de los museos y para los grupos de investigación sobre conservación en centros de investigación y universidades. Los Laboratorios en los centros de conservación pueden dedicar sus esfuerzos exclusivamente a los objetivos que el estudio científico del patrimonio y su conservación requieren y están en permanente contacto con las obras por lo que la investigación está dirigida a identificar métodos y técnicas prácticos y viables a corto plazo. Son estos departamentos los que conocen las necesidades de análisis y tiene los conocimientos científicos necesarios para adaptar nuevas tecnologías a la conservación del patrimonio.

La interdisciplinariedad es una práctica cotidiana ya que ningún proyecto de conservación de un Instituto se diseña sin la necesaria colaboración de los diferentes perfiles profesio-

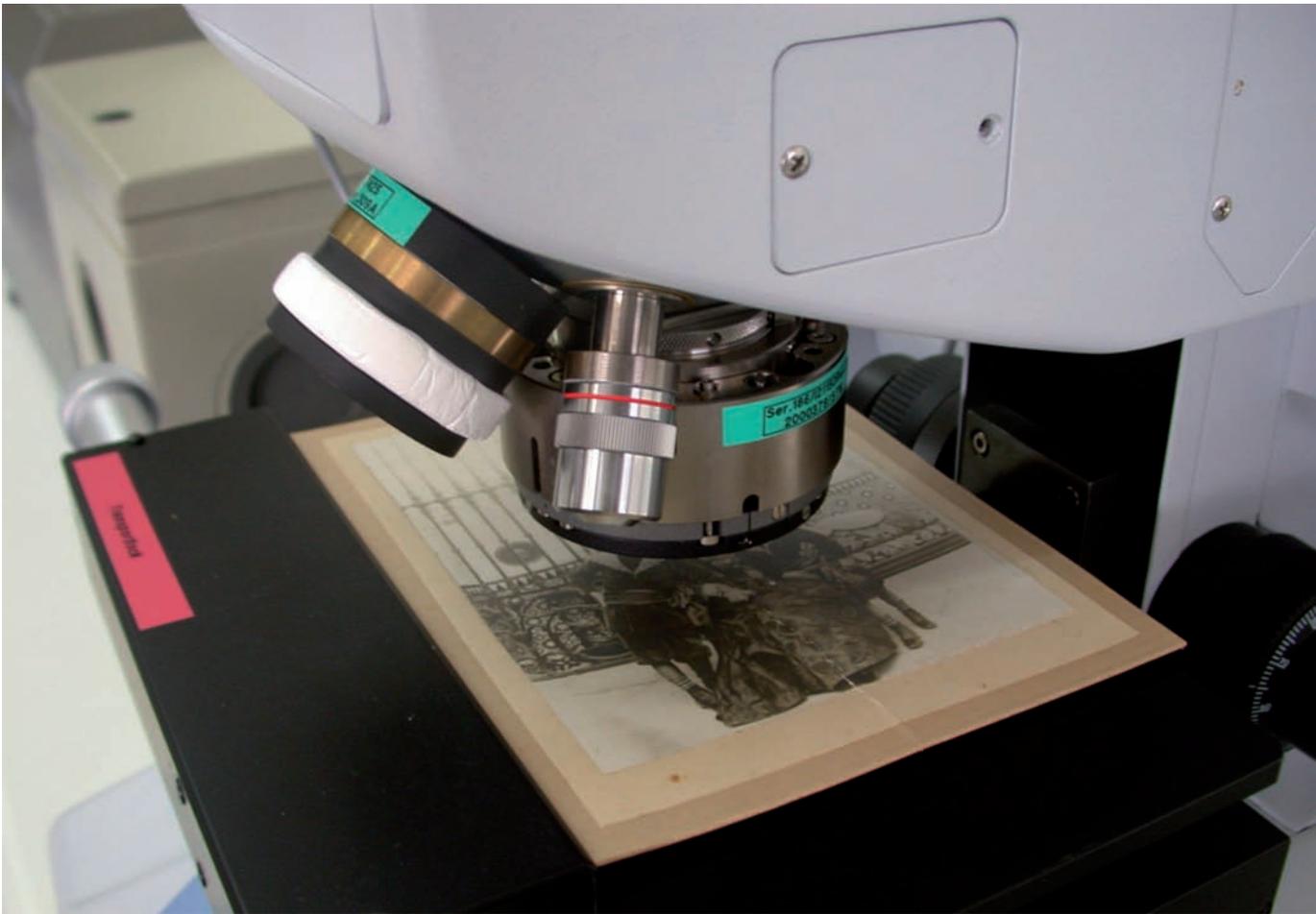


Figura 3. FTIR con objetivo ATR que permite la identificación de materiales orgánicos en fotografía histórica sin toma de muestra y sin efectos destructivos para el bien cultural.

nales implicados: restaurador, arqueólogo o arquitecto suelen coordinar los proyectos de intervención y científicos, historiadores, conservadores formar parte del grupo de trabajo. Este permanente contacto propicia que los proyectos de investigación programados en los Laboratorios de los Institutos cuenten también con la participación de estos otros perfiles profesionales. Por tanto, pueden coexistir las intervenciones a corto plazo de la actividad cotidiana con los proyectos de investigación con mayor proyección temporal y especificidad de contenidos. Las líneas de trabajo prioritarias en estos centros en la actualidad van encaminadas a los siguientes contenidos (Tagle, 2008):

- Importancia del estudio de las dinámicas de alteraciones de los materiales constituyente de los bienes culturales o utilizados para su conservación y restauración.
- Mejora e innovación en nuevas tecnologías de documentación científica e imagen como reflectografía, termografía, fotogrametría, radiografía, que amplíen sus posibilidades de aplicación en bienes culturales y ofrezcan resultados de mejor calidad.
- Puesta a punto de nuevas técnicas de análisis y la evolución de las existentes es otro reto que tienen los departamentos científicos. En particular, el desarrollo de técnicas de análisis sin toma de muestra y no destructivas es un objetivo que se lleva persiguiendo desde los años 70 y en el que sigue habiendo avances. Por ello existen ya muchos grupos de científicos de centros de conservación impulsando la implantación y desarrollo de técnicas portátiles, sin toma de muestra y no destructivas que permitan el estudio in situ, colaboren en la minimización de la toma de muestra o permitan obtener un buen resultado sin toma de muestra en los casos que sea preciso.
- Publicación y defensa de los criterios científicos de la conservación básicos en la toma de decisiones adecuadas para la investigación, la conservación y la asignación de recursos con criterios objetivos y utilizando el conocimiento científico.

La consecución de estos objetivos mejora notablemente si los departamentos científicos de los Institutos hacen de interlocutor entre el mundo universitario, los centros de investigación científica y los organismos de conservación. La coparticipación en proyectos de investigación, la firma de convenios de colaboración científica, incluyendo, en el caso español, los que propician el trabajo en equipo entre los institutos de las diferentes Comunidades Autónomas y el Estado, ofrecen indudables beneficios profesionales y científicos y facilitan el intercambio de técnicas y conocimientos.

Los institutos nacionales cuentan además con recursos e infraestructura, siempre menos de los deseados, pero más que los laboratorios de los museos. Existen al menos diferentes profesionales con perfiles complementarios –químicos, físicos, biólogos, geólogos, ingenieros,...- lo que permite contar con la masa crítica suficiente para establecer secciones de especialización, consolidar el apoyo entre ellas y, de esa manera, conjugar las respuestas a los problemas cotidianos con la necesaria investigación. Ciertamente es que algunos grandes museos norteamericanos y británicos, como el Metropolitan Museum of Art de Nueva York, cuentan con estos sólidos departamentos científicos pero no es el caso mayoritario y se debe, probablemente, a que en estos países no existen institutos nacionales de conservación. En cualquier caso, esa situación no tiene paralelo en España puesto que aquí ni siquiera los grandes museos cuentan con más de dos científicos en plantilla en sus Laboratorios.

Otro aspecto interesante de los Laboratorios de los institutos nacionales de conservación es el valor que, como organismo de una administración pública, tiene para elaborar las especificaciones técnicas de las adjudicaciones en proyectos de conservación de bienes muebles e inmuebles y, con ello, defender criterios profesionales que incluyan estudios científicos previos y de seguimiento durante la ejecución. En este sentido, tanto el Instituto del Patrimonio Cultural de España dependiente del Ministerio de Cultura, como los Institutos de Comunidades Autónomas dependientes de sus correspondientes Consejerías o Diputaciones, pueden y deben utilizarse por los profesionales como instrumento de difusión y aplicación de criterios de conservación científica que las empresas licitadoras deberán cumplir.

A pesar de lo mencionado, la escasez de profesionales también provoca que los departamentos científicos dentro de los Institutos de restauración sean pequeños comparados con el resto de departamentos. Esto genera un exceso de trabajo que únicamente se puede subsanar con una mayor dotación de medios. Lamentablemente, como sucede en el caso de los Laboratorios de los Museos, esto rara vez se produce, por lo que es necesaria una selección crítica de los problemas que se van a estudiar, de modo que se optimicen los recursos disponibles.

La evolución tecnológica y el propio trabajo multidisciplinar plantean nuevos restos que se deben abarcar. Uno de los más importantes, que ya se ha mencionado, es la formación. Continuamente aparecen nuevos materiales y técnicas que son potencialmente aplicables a la conservación del patrimonio. Algunos ejemplos son los nuevos materiales que incorpora el arte contem-

poráneo y que se alejan bastante de los tradicionales; la polémica sobre el uso de polímeros para la restauración y la propuesta de sustitución por tratamientos con materiales que incluyen nanopartículas, sobre todo en monumentos y pintura mural (Baglioni, 2006) (Giorgi, 2006). Toda esta rápida evolución provoca que sea necesario un constante aprendizaje, que muchas veces, es difícil de compaginar con el trabajo diario. Una vez más, los convenios con las universidades y centros de investigación, en los que los Laboratorios de conservación formen a científicos en el campo del estudio de los bienes culturales, y las universidades se impliquen en la resolución de los problemas que las nuevas tecnologías plantean y en la investigación específica.

Criterios profesionales

Desde el inicio de las contribuciones de las ciencias experimentales a la conservación del Patrimonio con la química analítica hasta nuestros días, se han producido enormes cambios y un desarrollo altamente positivo. El más evidente es la mejora en los equipamientos y tecnología y un marco más amplio en el que la química se consolidó, pero también otras ramas científicas y técnicas, desde la geofísica a los sistemas electrónicos de visión multispectral. Pero quizá el cambio más relevante, porque define el ámbito y los límites en que esas ciencias deben aplicarse, es la consolidación de una metodología de trabajo que aúna práctica científica y criterios de conservación de patrimonio. Este es el aspecto más característico del trabajo de los científicos dedicados a conservación y el que delimita lo que es viable y cuáles deben ser las líneas de investigación en las que profundizar. Los proyectos de investigación en ciencias aplicadas a la conservación actuales se dirigen hacia la identificación de los materiales y sus dinámicas de alteración, la conservación preventiva, las tecnologías de imagen en diferentes longitudes de onda más precisas y las propuestas de tratamiento frente a los deterioros diagnosticados, incluyendo los de origen biológico.

Todos los objetivos propuestos en estas áreas temáticas dedicadas a patrimonio asientan en principios inspirados por los criterios de conservación científica. Cabe mencionar el avance tecnológico que proporcionen equipos portátiles, compactos y sólidos que permitan el trabajo in situ. De este modo, los bienes inmuebles pueden beneficiarse del estudio y en los bienes muebles se evitan traslados que, como es sabido, son potenciales fuentes de deterioro. La realización de radiografías de retablos in situ y sin desmontar, las limpiezas de grandes superficies pétreas monumentales con la posibilidad de análisis de la capa de alteración eliminada y el análisis de piezas de museo sin necesidad de sacarlas de su vitrina, son ejemplos de esta línea de trabajo.

Un segundo aspecto de importante desarrollo es la implantación de sistemas analíticos sin toma de muestra y no destructivos. El objetivo es realizar el estudio sin que esto implique una modificación de propiedades físicas y químicas de los materiales constituyentes de los bienes culturales. Existen en la actualidad ya muchos equipos con los que trabajar in situ sin toma de muestra



Figura 4. Prototipo mecanizado desarrollado por el IPCE en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación en el proyecto de investigación VARIM para la realización de reflectografía y radiografía in situ en grandes formatos. Imagen de Tomás Antelo.

y continúa el avance en esta línea con equipos de fluorescencia de rayos X más precisos y ligeros y diferentes tipos de espectroscopías sin toma de muestra. Esto permite acceder a información en objetos en los que la toma de muestra no es viable desde un criterio de conservación.

Cabe destacar como tercer aspecto la minimización de las muestras. Este logro viene asentado en dos pilares. Uno es que el uso de barridos previos en los bienes culturales objeto de estudio permitan identificar de forma precisa cuáles son los puntos de interés para la toma de muestra. Esto significa sistematizar en lo posible el uso de técnicas de imagen –barridos con endoscopio, radiación uv, reflectografía infrarroja, radiografía, etc.- o de técnicas analíticas sin toma de muestra –mecanización de los sistemas de XRF para barrer superficies- para identificar de forma precisa los puntos conflictivos en los que sólo la toma de muestra garantiza obtener una información veraz sobre lo que se busca. Otro de los pilares es el avance tecnológico que permite obtener resultados analíticos de calidad con una mínima cantidad de muestra. En estudios de datación, por ejemplo, el avance en este sentido ha sido notable en los últimos años.

El resultado de estos avances permite el diseño de una metodología de acercamiento y análisis de las obras de arte desde el

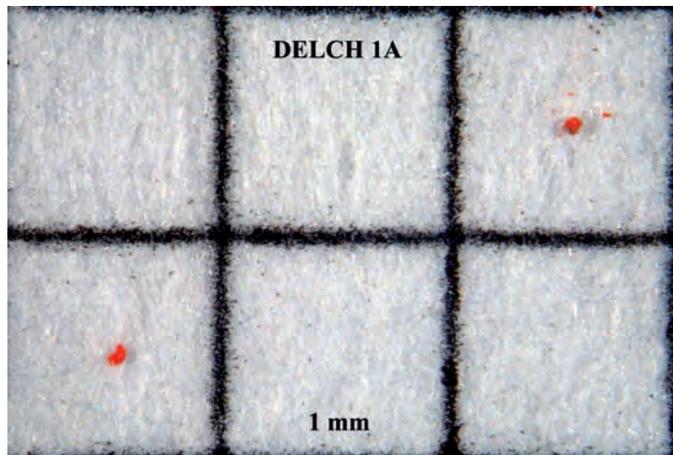


Figura 5. Estudio analítico de la Dama de Elche en colaboración con el Museo Arqueológico Nacional. Un barrido inicial con XRF permite minimizar la toma posterior de micromuestras. Muestras tomadas por Marisa Gómez.

punto de vista de la conservación científica que minimiza los daños y mejora los resultados obtenidos. Ejemplo de la aplicación de estos criterios son algunos proyectos realizados en colaboración entre el Instituto de Patrimonio Cultural de España y el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (Vega, 2009).

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 a la obra de arte y al objetivo que se pretende. En primer lugar, se utilizan 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 con luz rasante, fotografía visible y ultravioleta; o más complejas como la reflectografía infrarroja, el análisis multiespectral, la radiografía y el 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 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, 2004) (Martín de Hijas, 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.

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. Un ejemplo digno de mención han sido los estudios sobre escultura ibérica realizados en colaboración con el Museo Arqueológico Nacional de Madrid. Los barridos realizados mediante XRF sin toma de muestra permitieron hacer un estudio más amplio en zonas con y sin policromía, o, en el caso de la Dama de Baza, con concreciones y restos del material que la enterraba. Estos amplios barridos permitieron detectar trazas de estaño que, aunque débiles, resultaron un gran descubrimiento. Una adecuada toma de muestra en una zona de pliegues en la que, sin la información obtenida con XRF, no se hubiera realizado, permitió identificar láminas de estaño mediante microscopía electrónica que demuestran una decoración dorada original hasta ese momento nunca probada (Gómez, 2008). 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.

Una importante aportación identificada desde los primeros años de existencia de los Laboratorios dedicados a la conservación se refiere a las propuestas de nuevos materiales y métodos de tratamiento para la conservación y restauración. Siempre apoyados en la clásica propuesta de Brandi de reversibilidad, y en la más realista desde el punto de vista estrictamente científico de la compatibilidad con los materiales originales, las investigaciones analíticas se han dirigido a optimizar el tipo de materiales utilizados en los bienes culturales.

Otro de los principios de procedimiento introducido en los últimos veinte años es la importancia de conocer las interacciones de los materiales propuestos para la conservación y restauración con el medio ambiente. Es lógico que los primeros estudios científicos históricos de bienes culturales se dirigieran a la caracterización de los materiales, como ocurre en la actualidad con cualquier proyecto científico de un bien cultural. Pero con el tiempo alcanzaron una progresiva relevancia el estudio de los procesos de deterioro y la propuesta de tratamientos para la

conservación, signo de madurez de la disciplina. Es de todos conocido el aumento del uso de polímeros en los tratamientos de conservación utilizados como consolidantes, capas de protección, hidrofugantes, producido en las tres últimas décadas del siglo XX, basado únicamente en estudios de análisis de materiales, tanto constituyentes de los bienes culturales, como posibles añadidos o aplicados. Y también es conocido el exceso de confianza en estos productos que con el tiempo producían efectos no deseados que contribuían más si cabe al deterioro de los materiales. Casos muy extendidos son la aplicación de estos productos en piedra y morteros, y las posteriores disgregaciones y pérdidas de cohesión ocasionadas. Desde finales de la década de 1990 y, cada vez con más fuerza, se ha ido imponiendo una estrategia de evaluación de factores de riesgo y evaluación de parámetros que minimicen el deterioro –contaminantes, humedad y temperatura y sus variaciones, iluminación, etc.- para el uso tanto de los materiales de conservación y restauración, como de instalaciones de control. La disciplina ha pasado de contar con una carta de recomendaciones preventivas básicas a introducirse con fuerza en las investigaciones sobre materiales y técnicas, dotando a esta estrategia de conservación de un cuerpo teórico y práctico de un importante contenido científico y técnico. El objetivo no reside en una propuesta de tratamiento o de restauración, sino en la identificación y prevención de los riesgos más a medio y largo plazo. Se abordan la compatibilidad con los materiales de restauración en determinados ambientes, o los materiales y diseño de vitrinas en función de los objetos que deban contener y los espacios en que se encuentren, apoyándose en técnicas analíticas de mayor sensibilidad que permiten identificar alteraciones o sustancias nocivas; el establecimiento de condiciones de almacenaje seguras basadas en estudios de envejecimiento de materiales; el control de parámetros ambientales mediante sensores más ajustados, pequeños y funcionales, entre otros ejemplos. Esta nueva dimensión en el que las ciencias experimentales y la tecnología contribuyen a identificar y prevenir los factores de riesgo ha dotado a la conservación preventiva de una personalidad más amplia y una mayor interacción con las ciencias. Además ha puesto a disposición de conservadores, restauradores y gestores del patrimonio herramientas de control y planificación

Estos criterios, hasta ahora mencionados, se refieren a aspectos puramente científicos en cuanto a que aluden a los avances y direcciones prioritarias que guían los estudios y las propuestas de los científicos dedicados a conservación. Pero hay un aspecto previo importante. Todos debemos ser conscientes de que el conocimiento es único y las subdivisiones en diferentes ramas del saber con las que todos nos acercamos al conocimiento, establecidas del modo más lógico encontrado, no debe distanciarnos de la consciencia de que esa separación es forzada. En particular, en la conservación de bienes culturales, los especialistas de diferentes ramas del saber deben participar conjuntamente en los procesos de identificación de los bienes culturales, sus valores tangibles e intangibles y su relevancia social y cultural. Sólo de este modo podrán establecerse prioridades y decidir la secuencia de actua-

ciones que rentabilice el esfuerzo y maximice la calidad y durabilidad de los tratamientos de conservación desde el punto de vista de las ciencias experimentales. La consecuencia natural de este proceso es una utilización racional de los recursos científicos y técnicos. Esta consecuencia es deseable no sólo por evidentes razones de uso adecuado de los recursos sino por la confianza que despierta en otros profesionales, quizá ajenos a la comprensión de los procesos físicos y químicos, pero muy cercanos a la competen-

cia profesional de conservar el patrimonio del mejor modo posible. Tanto si se trata de una pequeña intervención, pongamos de limpieza o reintegración de una superficie pictórica, como de un proyecto de conservación más amplio, tan sólo la interdisciplinariedad permite tomar las decisiones estratégicas necesarias para programar un buen trabajo de conservación (Tagle, 2008).

Bibliografía

Baglioni, P., Giorgi, R. "Soft and hard nanomaterials for restoration and conservation of cultural heritage", *Soft Matter*, **230**, (2006), pp. 293-303.

Caldararo, N.L., "An Outline History of Conservation in Archaeology and Anthropology as Presented through Its Publications", *Journal of the American Institute for Conservation (JAIC)*, Vol. 26, No. 2 (Autumn, 1987), pp. 85-104

Gilberg, M., Rathgen, F., "The father of modern archaeological conservation", *Journal of the American Institute for Conservation (JAIC)*, Vol. 26, Number 2, 1987, pp 105-120.

Giorgi, R., Chelazzi, D., Carrasco, R., Colon, M., Desprat, A., Baglioni, P. "The Maya site of Calakmul: "in situ" preservation of wall paintings and limestone by using nanotechnologies" en Saunders et al (Eds.) *IIC Congress 2006* , pp.162-169. (2006).

Gómez, M., Navarro, J.V., Martín de Hijas, C., del Egado, M. Algueró, M., González, E., Arteaga, A., Juanes, D., "Revisión y actualización de los análisis de policromía de la Dama de Baza. Comparación con la Dama de Elche" en *Bienes Culturales. Ciencias aplicadas al patrimonio*, numero 8, Ministerio de Cultura, Madrid, 2008, pp. 211-221.

Egido, M. del "Reflexiones sobre las ciencias aplicadas y la conservación del Patrimonio", *La Ciencia y el Arte: Ciencias experimentales y conservación de patrimonio histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura. 2008. pp 13-24.

Martín de Hijas, C., Juanes, D., García, M.A., "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*, numero 4, Ministerio de Cultura, Madrid, 2004, pp. 81-102.

Martín de Hijas, C., del Egado, M. Juanes, D., "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*, numero 8, Ministerio de Cultura, Madrid, 2008, pp. 147-156.

Melucco, A. (1996) "The role of science and technology", Price, S. et al (ed.) *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Rees-Jones, S.G. "Early Experiments in Pigment Analysis", *Studies in Conservation*, Vol. 35, No. 2 (May, 1990), pp. 93-109.

Sánchez Del Río, M.; Martinetto, P.; Reyes-Valerio, C.; Doryhée, E.; Suárez, M. "Synthesis And Acid Resistance Of Maya Blue Pigment", *Archaeometry*, **48**, 1, February 2006, pp. 115-130.

Tagle, A. "El Papel de las Ciencias en la Preservación del Patrimonio Cultural. La situación en Europa". *Bienes culturales: revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, **8**, (2008), pp. 27-36.

Tennent, N.H. "Conservation Science: a view from tour perspectives", *The interface between Science and Conservation. The British Museum Occasional Paper*, **116**. Londres: British Museum. 1997. pp. 15-24.

Vega, C., Juanes, D., García, M.A., Gómez, M. "The Sky of Salamanca. An example of experimental methodology applied to a singular work of art" en *LASMAC & Archaeological & Issues in Material Science* en Cancún (México) del 16 al 20 de agosto de 2009.

UNESCO, <http://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf> consultado el 14 de septiembre de 2009.

Capítulo 2

Métodos y técnicas para el estudio científico de los bienes culturales

2.1. La documentación Geométrica del Patrimonio en el IPCE del Ministerio de Cultura

José Manuel Lodeiro

Instituto del Patrimonio Cultural de España

18

Entendemos como Documentación Geométrica del Patrimonio todos aquellos métodos o técnicas que nos permiten definir la forma, medida o dimensión de los bienes culturales que conforman el Patrimonio Cultural.

Son muchos los sistemas que utilizamos en esta documentación, citemos los más usuales: mediciones con cinta métrica, jalón, nivel de agua, escaneado mediante fotografías, distanciómetro

láser, rectificación fotográfica, levantamientos topográficos, fotogrametría o escaneado láser 3D. Unos son muy sencillos, otros complejos, desde muy económicos a los más caros, con poca precisión o de alta precisión. etc.

La utilización de unos u otros dependerá no sólo del presupuesto para el proyecto, también de la fase en que nos encontremos y fundamentalmente de la precisión que necesitemos para la documentación.



Figuras 1 y 2. Detalle Retablo S. Francisco de Tarazona (Izquierda empastado por mala elección de Escala y Derecha Escala Adecuada): Restitución fotográfica. IPCE: JM Lodeiro, F. J. Laguna



Figura 3. Medición con cinta

No es lo mismo tener que documentar una fachada que todo un edificio, igualmente es muy diferente querer definir un mapa de daños a necesitar documentar las deformaciones de una estructura, o tener que definir las dimensiones de una obra para un anteproyecto, que la documentación de la misma obra para la definición del proyecto de intervención.

La precisión puede venir definida bien por unos errores máximos, esto es, decidir que la documentación no debe exceder de 1 cm. de error en el plano y en la altura; bien en función de la precisión gráfica: precisión = 0,2 mm. * Escala de dibujo (Si el plano se va a realizar a $E_d = 1/50 \rightarrow Pr = 0,2 * 50 = 10$ mm., es decir, los trabajos deben de realizarse de forma que los errores no excedan de 1 cm. de precisión. De igual manera se puede exigir la documentación de un detalle mínimo que es necesario que sea representado y que debe de quedar perfectamente definido.

La elección adecuada de la escala o precisión, determinará el coste de los trabajos de documentación, ya que a mayor precisión, mayor coste, teniendo presente que el aumento de precio no es proporcional (más bien exponencial) al aumento de precisión (por ejemplo si un levantamiento a $E=1/100$ cuesta 20, al aumentar la precisión para obtener una $E=1/20$, no va a costar 100 si no del orden de 1000); por otra parte hay que tener en cuenta que a mayor precisión, la metodología ha de ser más precisa así como los equipos empleados, lo que encarecerá los trabajos. Esta elección también condicionará la calidad de los trabajos, que se empasten o no, que la documentación sea mejor o peor.

Una vez vista la importancia de la elección de precisión o escala, pasaremos a ver los distintos métodos de documentación geométrica.

El más utilizado y que proporciona una mejor relación calidad precio es la **medición con cinta métrica**, que puede ser muy preciso si empleamos la metodología adecuada (cintas metálicas, mediciones a ras de suelo, nunca superar los 20 m. etc.) Nos permite definir la geometría, alturas, sus dimensiones y, muy importante, el detalle, por pequeño que éste sea, pues sigue siendo el mejor sistema para registrarlo.



Figura 4. Medición de detalles con flexómetro

Un buen levantamiento con cinta nos proporcionará una precisa definición del bien a documentar. De hecho si nos basamos en los fondos gráficos del Instituto, los planos obtenidos por este procedimiento suponen más del 90 %.

Disponemos de 3 sistemas fundamentales para realizar un levantamiento con cinta, que son:

- *Triangulación (o Trilateración)*: por el que descomponemos el objeto a documentar en triángulos, de los que medimos sus tres lados.



Figura 5. Medición con cinta – Trilateración

- *Alineación*: disponemos de una cinta sobre el suelo, que va a representar el eje de abscisas, midiendo con un flexómetro la componente vertical (eje de ordenadas), con lo que cada

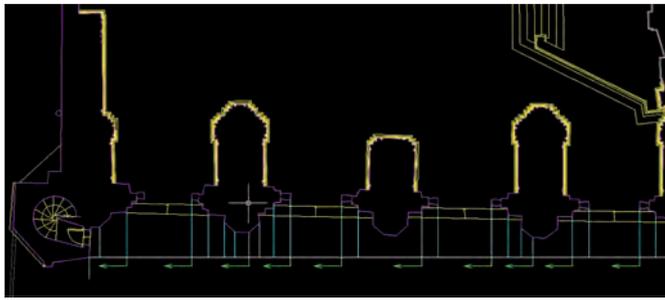


Figura 6. Medición con cinta – Alineación

detalle queda definido por una distancia al origen de la cinta y otra perpendicular a ésta.

- *Medición directa:* que permite completar la totalidad del trabajo y precisar cuanto deseemos los detalles del objeto.
- Como veremos, la cinta se utiliza combinada con otros muchos métodos y se hace imprescindible en la definición de los detalles.

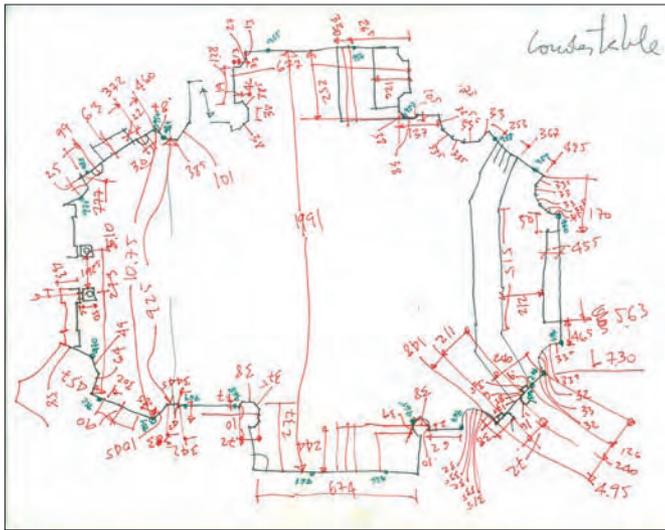


Figura 7. Ejemplo medición con cinta (Capilla del Condestable – Catedral de Burgos). IPCE: José Sandoval

La definición de los elementos verticales (cornisas, portadas, ventanas, etc.) resulta más compleja que la de las plantas; las metodologías más precisas resultan caras.

Veamos algunos ejemplos:

- **Foto Escalada:** consistente en la utilización de una fotografía del objeto, tomada lo más frontal a éste y lo más recta posible y aplicarle una regla de tres con una medida conocida. Para ello podemos fotografiar nuestro objeto a documentar con un jalón de distancia conocida, o bien medir un elemento que aparezca en la foto (es mucho más operativa la utilización del jalón, pero si no disponemos de uno tenemos la otra alternativa). Como conocemos la longitud del jalón (J), en la foto medimos la magnitud del

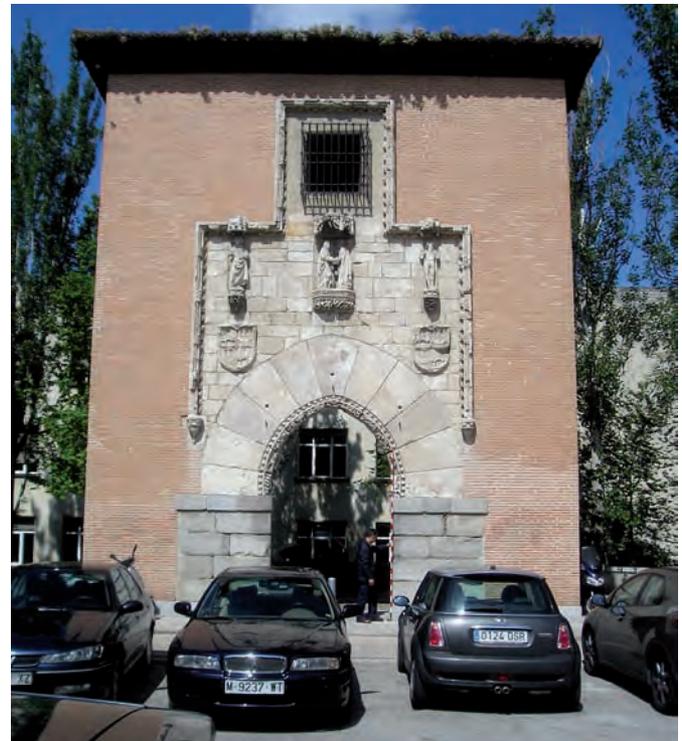


Figura 8. Ajuste fotográfico mediante Jalón



Figura 9. Sombras arrojadas

jalón (j) y el elemento deseado (e). Mediante regla de tres, obtendremos lo que mide el elemento (E) $E/e = J/j \Rightarrow E = J * e / j$. Fórmula que aplicaríamos a todos los elementos que necesitemos para la documentación. De igual manera podemos introducir la foto en un sistema de CAD, escalarla y utilizar la foto escalada para sacar todos esos elementos que deseamos documentar.



Figura 10. Rectificación fotográfica

Una metodología análoga consiste en medir las Sombras arrojadas por un jalón y el elemento que deseamos registrar aplicando de forma similar una regla de tres.

Las últimas versiones de Photoshop incluyen una función de *corrección de lente*, que permite realizar un ajuste de las fotogra-

fías. Una vez conseguido que tanto las verticales del objeto sean verticales, como que las horizontales también sean lo más horizontales posibles, podemos utilizar esta foto corregida en cualquier sistema de CAD y obtener medidas de ella. (Es imprescindible una magnitud conocida del objeto para escalar la foto).

Las precisiones que obtenemos no son adecuadas para una documentación de precisión, pero sí que son perfectamente útiles en una primera fase o en un levantamiento a escalas grandes.

Actualmente disponemos de unos programas de Rectificación fotográfica, que son útiles para definir con bastante precisión (1 o 2 cm.) los objetos deseados. Dichos programas sólo son válidos para documentar elementos planos (no utilizar nunca en objetos con relieve). Esta tecnología es precisa para definir planos y muy conveniente ya que obtenemos una ortofotografía o ftoplano del objeto, teniendo a la vez la información geométrica y la fotográfica muy útil en el mundo de la restauración. Creo que es uno de los métodos que se impondrán en un futuro inmediato por las ventajas que presenta, ya que de una ortofoto podemos obtener magnitudes, información del tipo de materiales, el estado de conservación de estos, superficies de deterioro, etc.

En la imagen (Palacio de Cogolludo) se ve el resultado de una rectificación fotográfica (ortofoto) en la que se aprecian con toda claridad los tipos de materiales, en la que se pueden medir no sólo las dimensiones, también obtener superficies de deterioros, observar las zonas más afectadas, hacer sobre la propia ortofoto el mapa de daños, etc.

- **Métodos Topográficos:** es uno de los métodos más utilizados en el IPCE ya que puede utilizarse por sí sólo o en combinación con otros sistemas.

Permite obtener plantas, alzados, distancias, alturas de un objeto o edificio. Sirve lo mismo para interiores o exteriores. Es muy útil ya que define un sistema de coordenadas único y homogéneo para todo un objeto o conjunto. Puede ser tan preciso como requiera nuestra documentación (recordemos que cuanto



Figura 11. Ortofoto alzado patio del palacio ducal de Cogolludo (Guadalajara): IPCE: JM Lodeiro

más preciso, mucho más caro nos resultará el trabajo), pudiendo llegar a la décima de milímetro si fuera necesario.

El único inconveniente, es que se obtiene punto a punto, lo que implica una simplificación de la realidad o una obtención masiva de puntos (lo que podría disparar el coste de la documentación gráfica).

Para su empleo es necesario contar con equipos topográficos (taquímetros, estaciones topográficas, niveles, etc.), así como con personal cualificado.

Los métodos utilizados son dos:

Radiación: bien por medición láser o mediante prisma, se obtiene la distancia geométrica entre la estación y el elemento al que vamos a dar coordenadas, mediante las lecturas de los ángu-

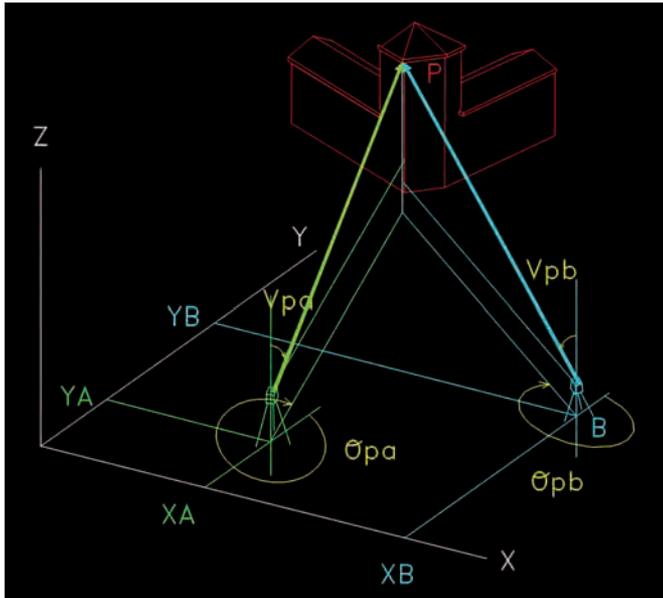


Figura 12. Esquema de Radiación e Intersección Directa topográfica.

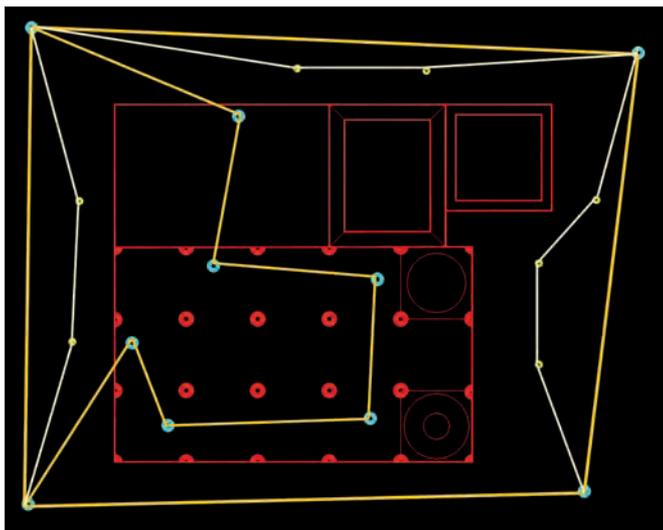


Figura 13. Esquema de Poligonales topográficas.

los horizontal y vertical, calculamos por polares las coordenadas tridimensionales del punto medido (X, Y, Z).

Intersección Directa: consiste en determinar las coordenadas de un punto por la observación de dicho punto desde al menos 2 estaciones conocidas. Con ello resolvemos el problema por la intersección de dos rectas en el espacio.

Para conseguir que todo el objeto esté en un único sistema y que sea homogéneo, disponemos de una variada metodología: *Base, Alineación, triángulo, etc.* Pero los más precisos y usados son:

- **Poligonales:** Consistente en la concatenación de estaciones topográficas a las que damos coordenadas (X, Y, Z) por radiación, que nos permiten unir, interior y exte-

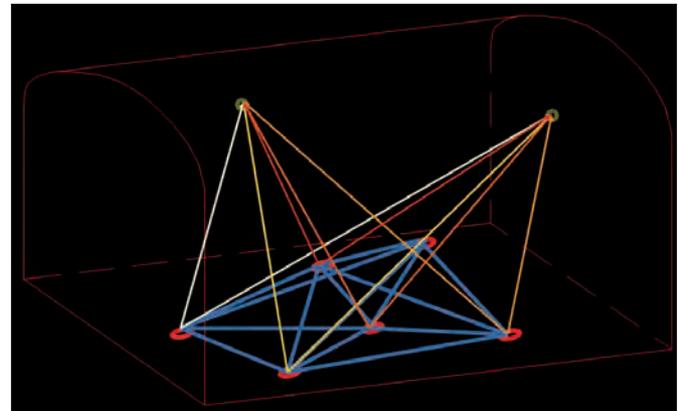
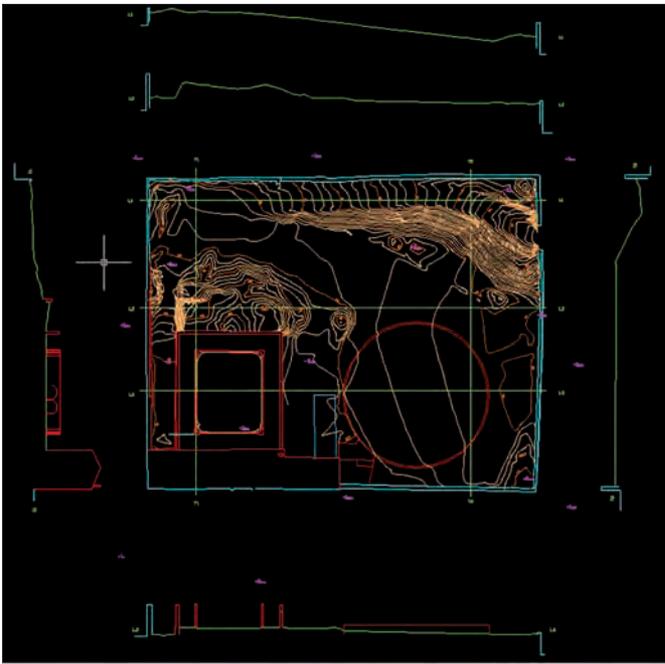


Figura 14. Esquema de red microgeodésica topográfica

rior del conjunto, con la precisión adecuada a cada tipo levantamiento.

- **Triangulación:** Es el más preciso de los sistemas topográficos, desde cada vértice observamos a todos los demás, y a los puntos a los cuales queremos dar coordenadas. Con ello tenemos un sistema de observación de datos superabundantes que permiten obtener por mínimos cuadrados, tanto las coordenadas de los vértices como de los puntos. (Se utiliza en trabajos de alta precisión).

Como hemos citado la topografía se puede utilizar como método de trabajo *per se*, es decir, que con el solo empleo de la topografía, podemos obtener la planta, curvas de nivel, alzados, secciones, etc., como queda reflejado en el ejemplo que vemos a continuación, del Palacio Ducal de Cogolludo (Guadalajara), quedando perfectamente definido el Bien en cuestión.



↑ **Figura 15.** Planta, curvas de nivel y secciones Palacio Ducal de Cogolludo (Guadalajara). IPCE: JM Lodeiro

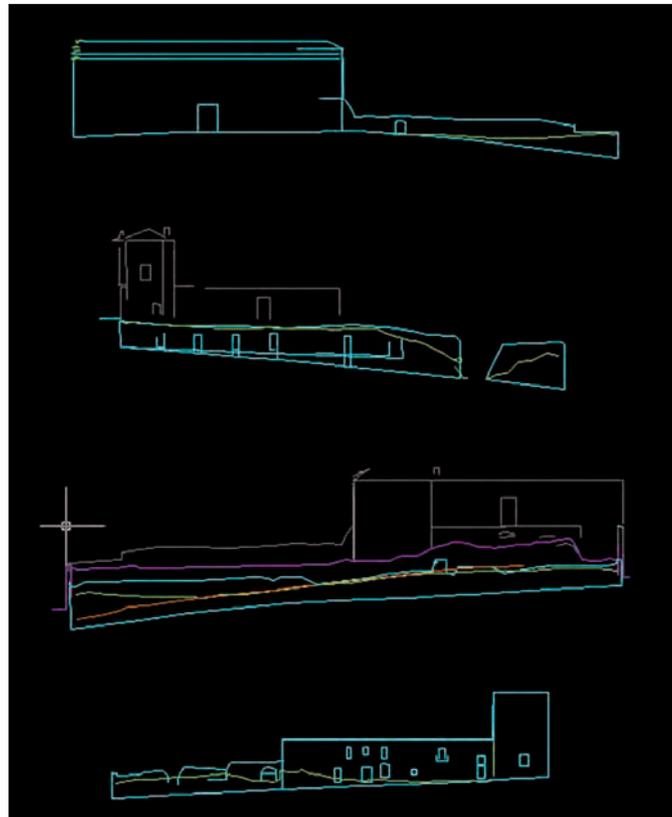
→ **Figura 16.** Alzados y secciones Palacio Ducal de Cogolludo (Guadalajara)

O podemos emplearla en combinación con otros métodos, pasemos a ver un ejemplo:

- **Topografía y Delineación:** por métodos topográficos definimos el armazón general del objeto (en este caso la catedral de Burgos), en donde se han dado los puntos base, para definir la geometría (quebrados, esquinas, alineaciones, etc.). Este armazón podemos considerarlo exento de errores.



Figura 17. Planta general Catedral de Burgos. IPCE: JM Lodeiro, José Sandoval, Joaquín Díaz



Ahora apoyándonos en él, realizamos las medidas con cinta, triangulaciones y alineaciones necesarias para definir con todo detalle la planta que nos ocupa.

23

Como se puede apreciar en los detalles sacados de la planta general, mediante la medición con cinta podemos llegar a la precisión y detalle que deseemos definir.

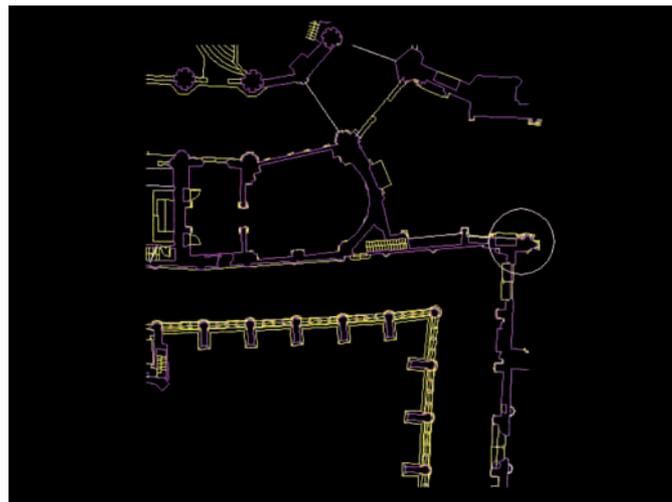


Figura 18. Detalle Catedral de Burgos



Figura 19. Detalle ampliado Catedral de Burgos. IPCE: José Sandoval

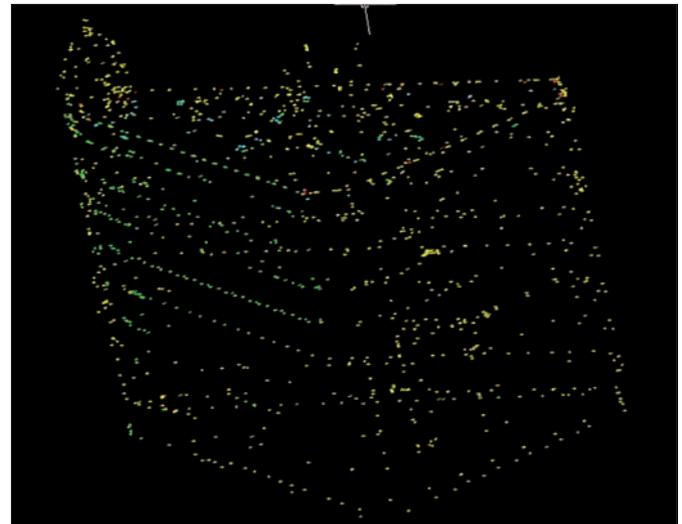


Figura 20. Nube de puntos topográficos (3D): JM Lodeiro



Figura 21. Alzados edificación (topografía y delineación): JM Lodeiro F.J. Laguna.

Veamos otro ejemplo, en este caso se trata de un edificio en su totalidad, podemos observar la nube de puntos obtenida por topografía. Una vez tratada dicha nube, con la utilización de las mediciones de cinta obtendremos las diferentes plantas, si empleamos las fotografías en sus diferentes versiones obtendremos alzados y secciones.

Al acercamos a un detalle, vemos con qué precisión se están obteniendo este tipo de trabajos conjuntos de topografía, cinta y fotografía.

- **Fotogrametría:** etimológicamente es la medida de lo escrito con luz, por tanto puede considerarse fotogrametría todo aquel sistema que utilice la luz para medir, una foto, la rectificación, el photoshop, etc. Aunque se considera fotogrametría al método preciso de obtener coordenadas o el dibujo de línea de un objeto mediante la utilización de fotos métricas.

Disponemos de dos sistemas:

Fotogrametría de bases o Intersecciones: mediante la obtención de varias fotos oblicuas del objeto y la obtención de una serie de puntos con coordenadas conocidas, podemos obtener las dimensiones o coordenadas de cuantos puntos del objeto deseemos. Tiene la ventaja de que los programas no son caros, corren bajo un ordenador convencional, pero sólo es posible obtener coordenadas de puntos muy bien definidos en varias fotos (esquinas, ventanas, etc.)

Fotogrametría Estereoscópica: utiliza la capacidad del ser humano para ver en tres dimensiones; se sustituyen los dos ojos por sendas fotografías (que deben de ser paralelas entre sí y perpendiculares a la base) con lo que se puede ver el objeto tridimensionalmente.

Es la que empleamos en el IPCE ya que permite obtener un dibujo de línea continuo, indispensable en nuestro trabajo para definir los detalles (decoración de cornisas, ventanas, vestimentas y fisonomía de estatuas), es el mejor método para detectar



Figura 22. Detalle (topografía, delineación y fotografía). F.J. Laguna

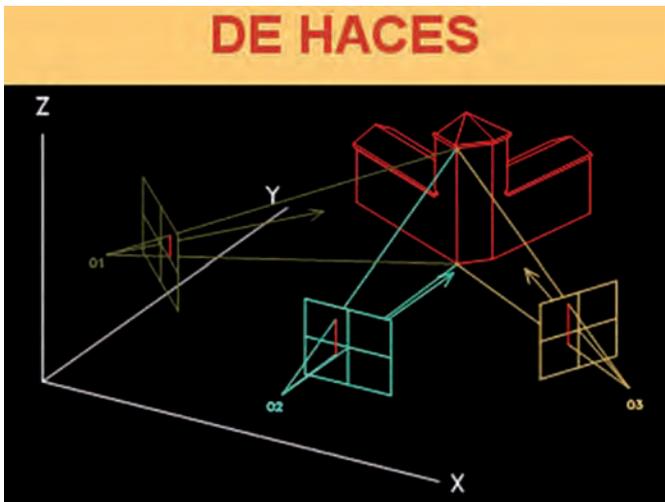


Figura 23. Esquema Fotogrametría de Haces.

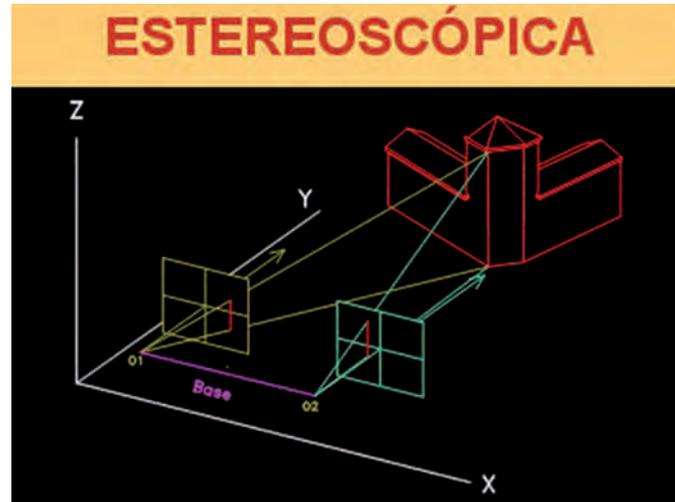


Figura 24. Esquema Fotogrametría Estereoscópica.

deformaciones que incluso no se aprecian a simple vista. Todo esto es posible al tratarse de un calco de la realidad. Con la fotogrametría estereoscópica tenemos un modelo a escala del objeto real, del que podemos sacar toda la información (coordenadas, distancias, superficies, deformaciones, geometría, volumen, secciones, alzados, plantas).

Se puede emplear como mera documentación, para definir deformaciones, como plano base para marcar deterioros, para

el mapa de daños del bien, como información geométrica para realizar proyectos, en estudios de deformaciones a lo largo del tiempo, etc.

La metodología consiste en la obtención de una serie de fotos métricas del objeto (aquellas en que se conoce con precisión la focal, la función de distorsión, el plano focal y el punto principal), poner a escala y en su posición espacial el modelo definido por éstas fotos (apoyo topográfico de los pares) y la obtención de la



Figura 25. Cámaras métricas y semimétricas del IPCE.



Figura 26. Restituidor Analítico.

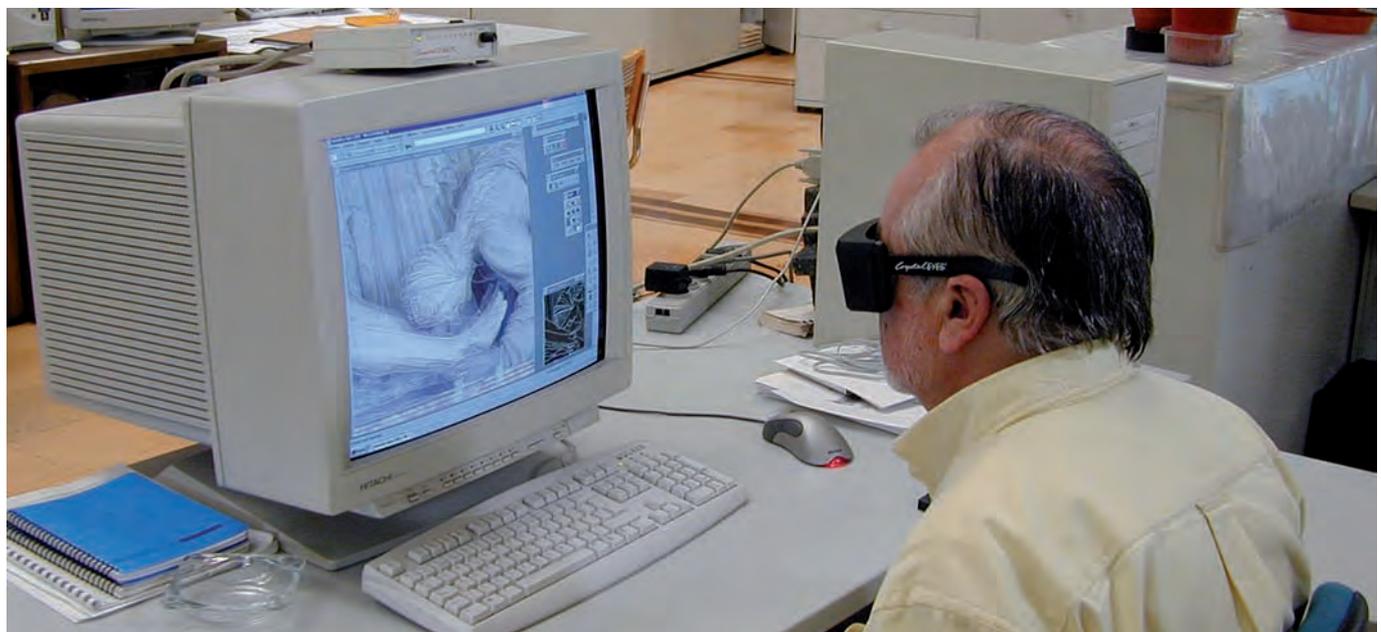


Figura 27. Restituidor Digital.

información contenida en dicho modelo (restitución fotogramétrica del Par). Como queda patente cada una de las diferentes fases, requiere la utilización de unos equipos especiales (más bien caros) para que el proceso se realice con la precisión adecuada, cámaras métricas, aparatos topográficos y restituidores.

Veamos varios ejemplos de restituciones y sus diferentes usos:

San Pietro in Montorio (Roma): Alzado principal y Sección Longitudinal.

En el caso del Retablo de Rasines (Cantabria) se pretendía obtener un documento en que se apreciaran las deformaciones, para su posterior restauración (no se dibujó la decoración ya que no era objeto del trabajo).

Como ejemplo de documentación podemos ver la Fuente de los Leones La Alhambra (Granada)

Uno de los ejemplos más completos lo tenemos en el retablo Mayor de la Catedral de Sigüenza (Guadalajara), en primer lugar obtuvimos la documentación del retablo, sobre la que se incorporó la información del tipo de escultura (bulto redondo, altorrelieve). Donde se restituyeron las secciones longitudinales y transversales para facilitar la labor del arquitecto a la hora de definir con precisión el tipo, tamaño y magnitud del andamio más adecuado para los posteriores trabajos de restauración.

Teniendo como base la fotogrametría, se plasmaron los mapas de daños de cada una de las escenas del retablo.

Por último, mostrar un claro ejemplo en el que se puede apreciar que la fotogrametría proporciona una información 3D de la totalidad del objeto a documentar (Monasterio de S. Juan de Duero – Soria).



27

Figura 28. S. Pietro in Montorio (Roma) Alzado y sección. IPCE: JM Lodeiro, José Sandoval, A. Almazán

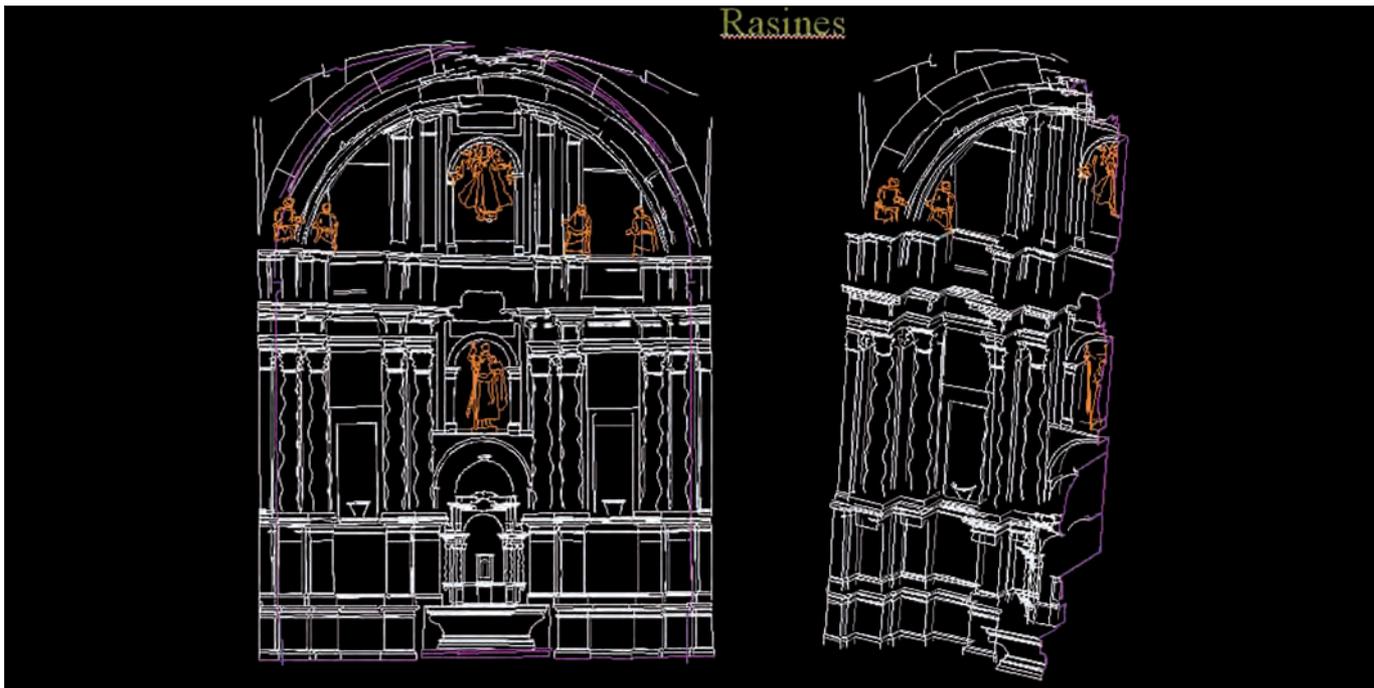


Figura 29. Alzado y Sección 3D, retablo de Rasines (Cantabria). IPCE: JM Lodeiro, Susana Fernandez

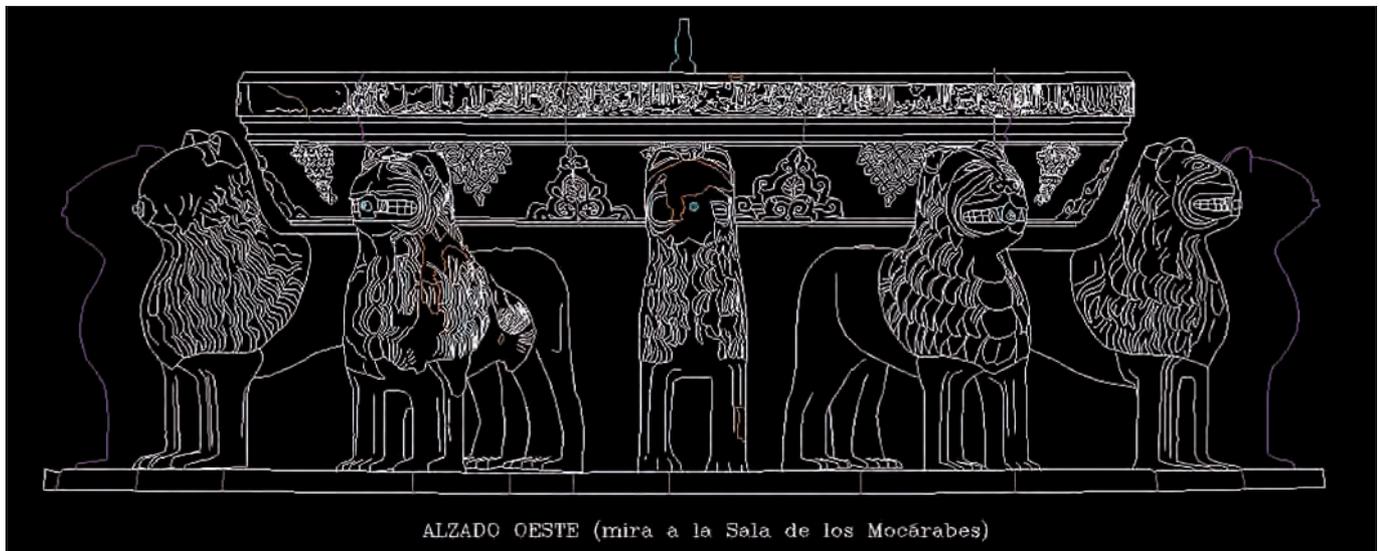


Figura 30. Alzado Fuente de los Leones, la Alhambra (Granada). IPCE: JM Lodeiro, Susana Fernandez.

28

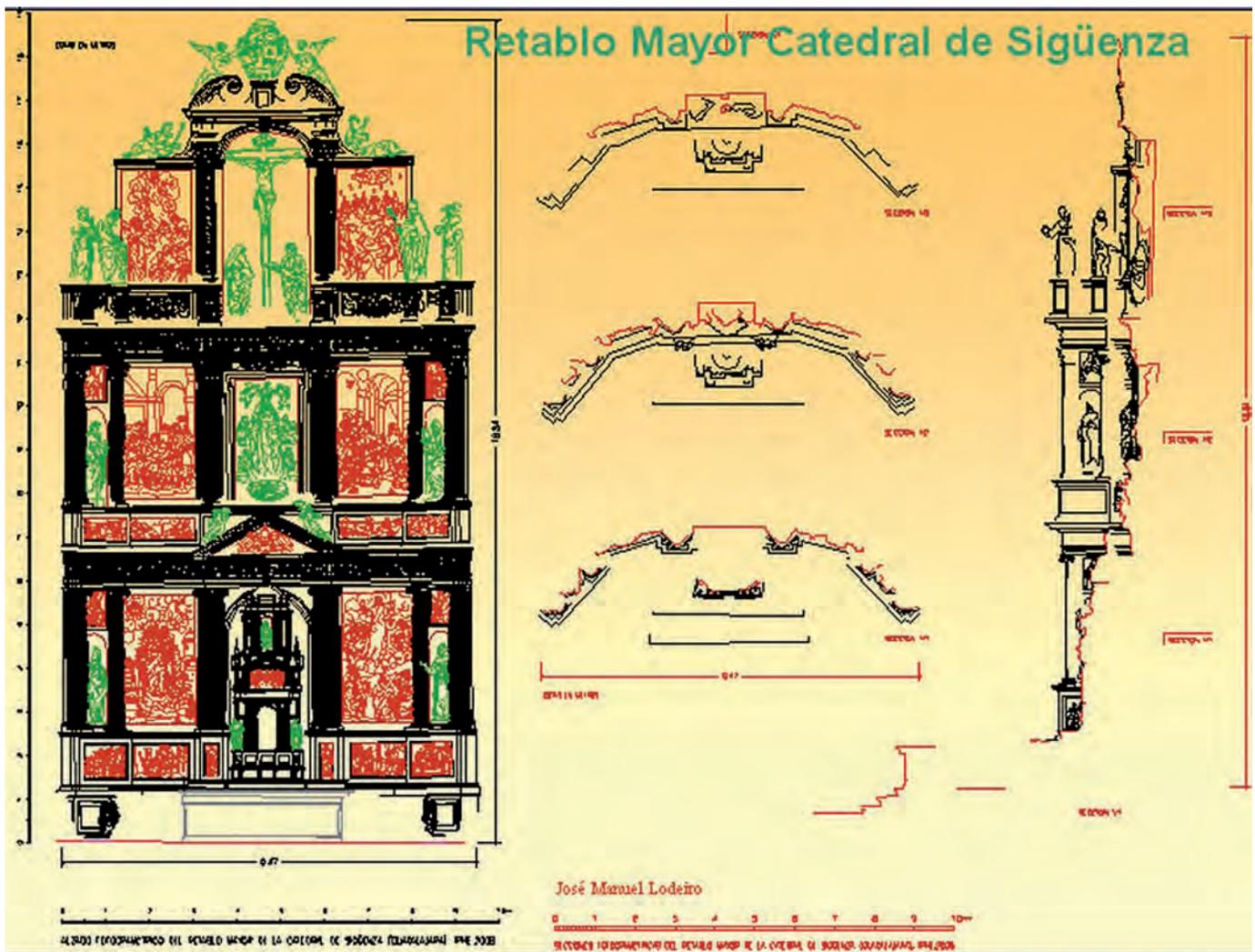


Figura 31. Alzado y secciones retablo mayor Catedral de Sigüenza (Guadalajara). IPCE: Olga Cantos, JM Lodeiro, Susana Fernandez, A. Almazán.

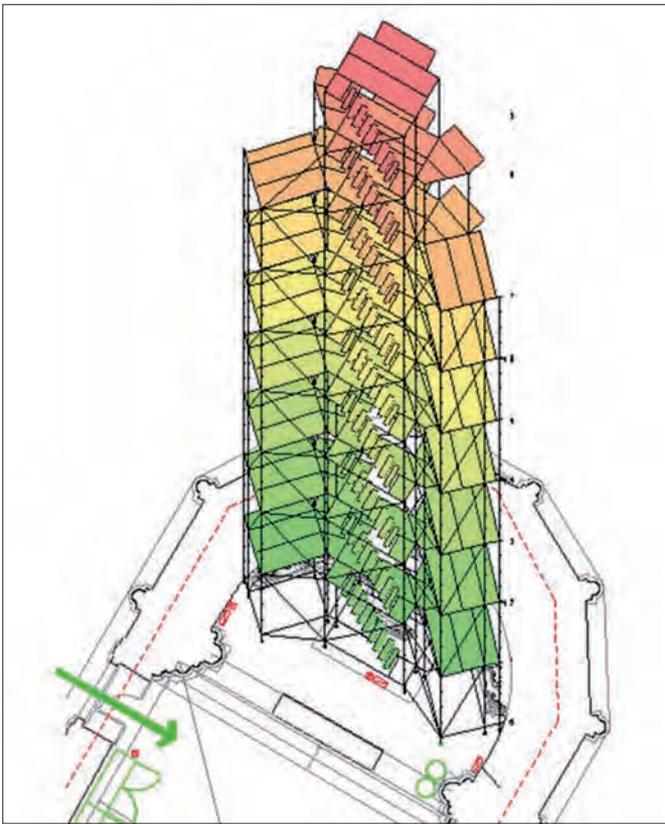


Figura 32. Esquema andamio para la restauración del retablo. IPCE: Carlos Jimenez Cuenca.

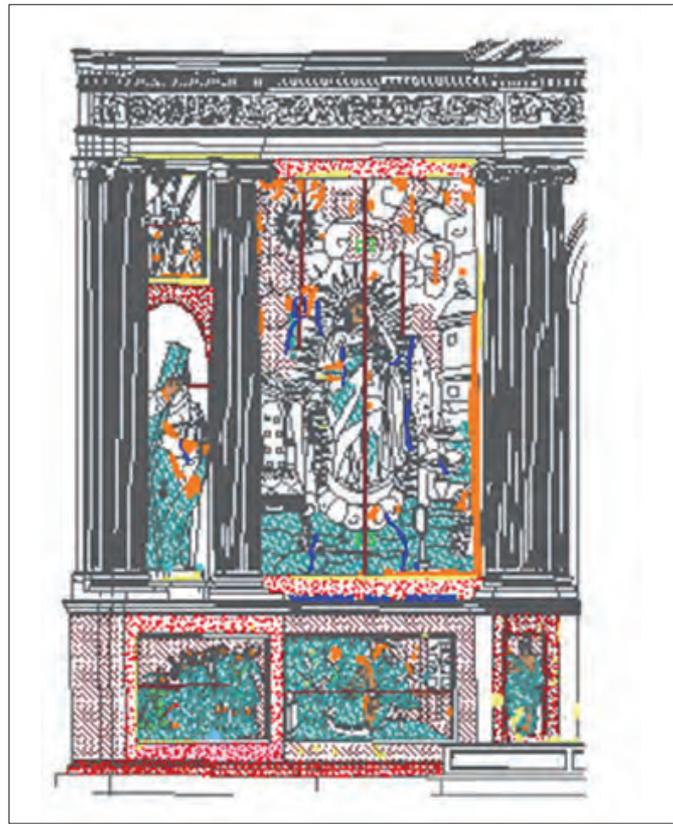


Figura 33. Detalle del Mapa de Daños del retablo mayor Catedral de Sigüenza (Guadalajara). IPCE: Olga Cantos, JM Lodeiro, Susana Fernandez.

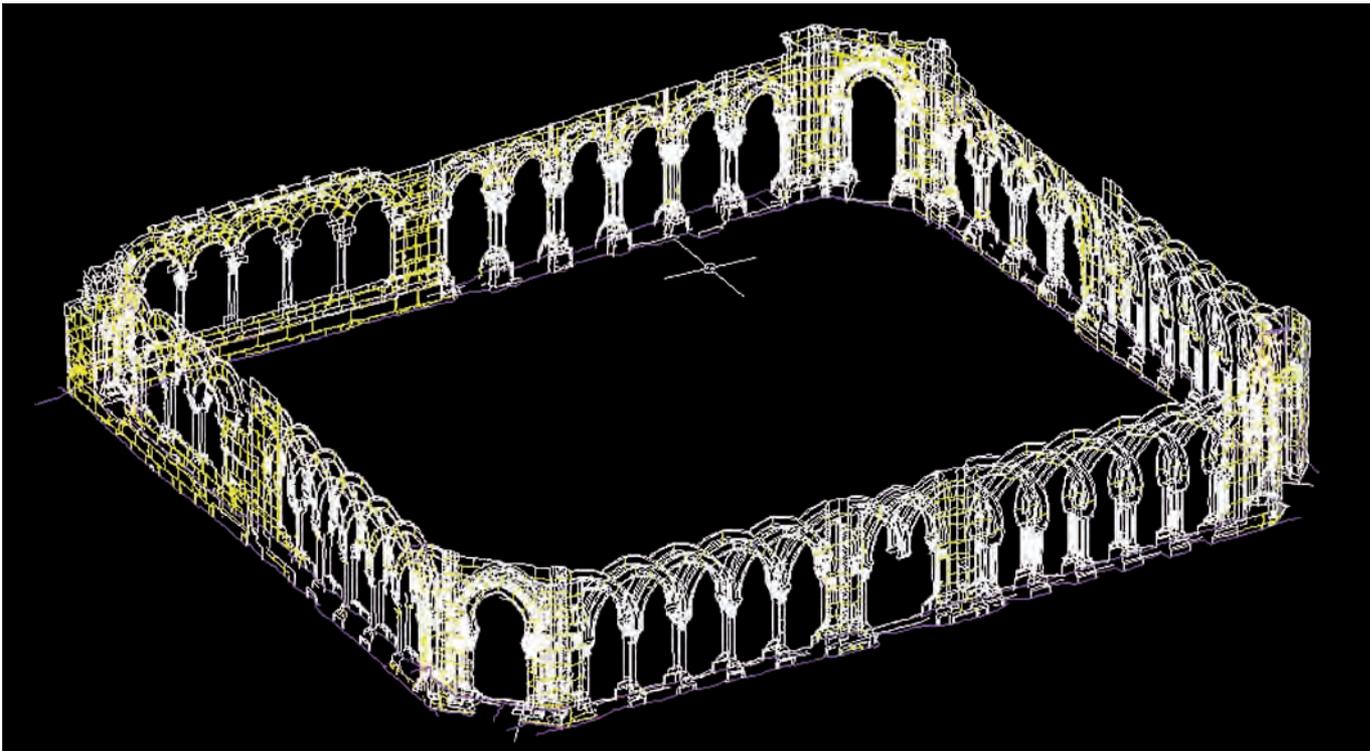


Figura 34. Montaje 3D claustro del Monasterio S. Juan de Duero (Soria). IPCE: JM Lodeiro, José Sandoval, A. Almazán.

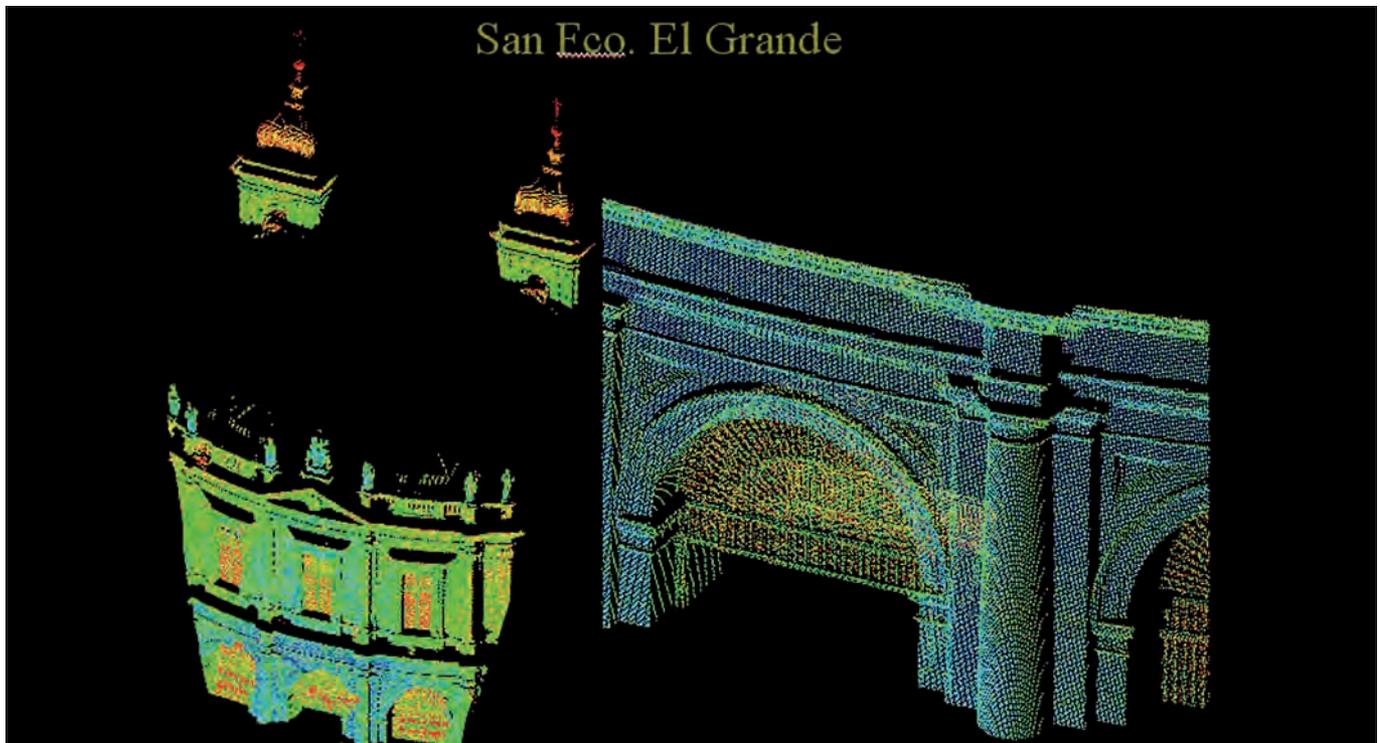


Figura 35. Nube de puntos Escáner láser 3D y detalle. Iglesia S. Fco el Grande (Madrid).

30

Para finalizar citaremos la última tecnología que se está implantando en la documentación del Patrimonio, Escaneado Láser 3D: consiste en un aparato óptico mecánico que es capaz de registrar millones de puntos de un objeto (con coordenadas X, Y, Z y un valor de refracción) con un intervalo definido por el usuario. Se obtienen unas nubes de puntos que ya son un modelo tridimensional del objeto. Éstas se pueden colorear con una fotografía consiguiendo un mayor realismo. De ellas podemos obtener de forma casi inmediata secciones y plantas.

El mayor inconveniente estriba en que con los ordenadores actuales no es posible mover estas nubes de puntos, lo que hace casi imposible su tratamiento. Los equipos son aún muy caros pero los resultados pueden llegar a ser espectaculares.

Cuando esta tecnología esté totalmente implantada será de gran utilidad en la documentación del patrimonio y la restauración. Imaginemos un modelo 3D con fotografías pegadas, en las que no sólo podamos medir, a la vez tendremos información del deterioro, tipos de materiales, humedades, etc.

En la imagen Nube de puntos de Escáner 3 D y detalle de la misma (S. Francisco el Grande – Madrid)

En las siguientes vemos la nube de puntos por escáner láser 3D de Leica de la Cúpula de Regina Martirium de la basílica del Pilar (Zaragoza). Planta y sección, así como modelo 3D con foto pegada.

A modo de resumen, lo importante es determinar la precisión que necesitamos en la documentación y en función de ella elegir la metodología que se ajuste a nuestro presupuesto y necesidades.

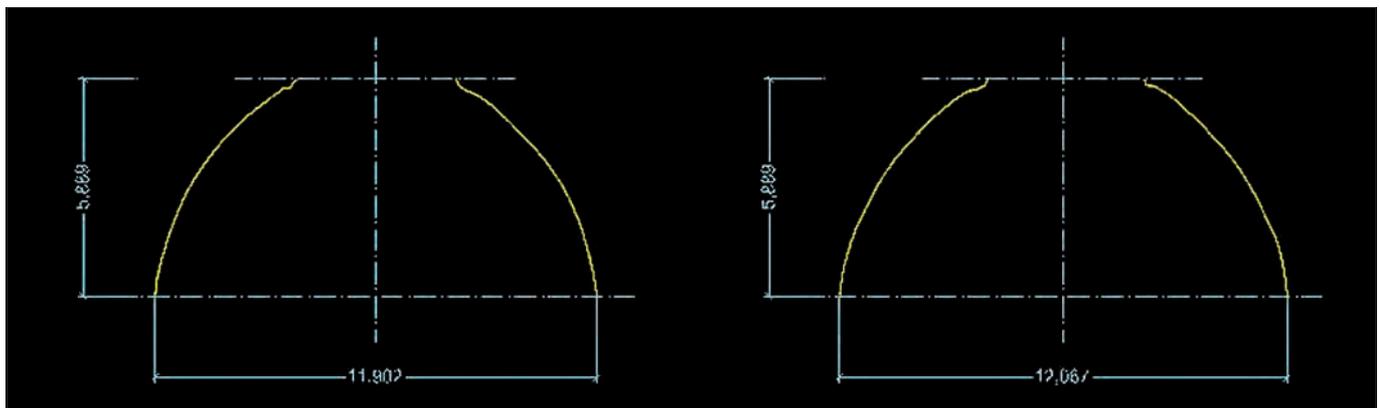


Figura 36. Secciones obtenidas mediante escáner láser, Cúpula Regina del Pilar de Zaragoza.



Figura 37. Nube obtenida mediante escáner láser, Cúpula Regina Martyrum del Pilar de Zaragoza. IPCE: CT3.



Figura 38. Visión 3D de la nube de puntos de láser y pegado de fotografías. IPCE: CT3.



Figuras 39-42. Diferentes escáner láser del mercado.

Bibliografía

ALMAGRO GORBEA, Antonio: *Levantamiento arquitectónico*, Granada: Universidad de Granada, 2004.

- *Los estudios previos en la restauración y rehabilitación de Edificios, Planimetría y Fotogrametría*, Cádiz: Rehabilitación y Ciudad Histórica. I Curso de Rehabilitación del COAAO, Cádiz.

CARBONNELL, M: *Quelques aspects du relevé photogrammétrique des monuments et des centres historiques*, Roma.

DOMINGO CLAVO, Luis: *Apuntes de Fotogrametría*, Madrid: Escuela Universitaria de ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid.

LERMA GARCIA, José Luis: *Fotogrametría moderna: Analítica y Digital*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

LODEIRO PEREZ, José Manuel: *Aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental*, Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid, 1995.

2.2. La tomografía axial computerizada. Estudio de escultura de madera

David Juanes

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales

Introducción

La mayoría de las técnicas analíticas que se emplean en el campo del Patrimonio Histórico se han desarrollado previamente en otras disciplinas, generalmente del campo de las ciencias químicas, físicas, la ingeniería o la medicina. Su aplicación a las obras de arte conlleva la necesaria adaptación de la metodología de trabajo y la instrumentación.

La tomografía axial computerizada (TAC) es una técnica de diagnóstico médico cuya utilización en el estudio de obras de arte data de finales de los años 70, aunque es una técnica que cuyo uso no se encuentra actualmente muy extendido.

El desarrollo de la técnica TAC significó un gran avance en el diagnóstico médico mediante imagen, debido a que tiene numerosas ventajas frente a la radiografía médica tradicional. El TAC es un método diagnóstico no invasivo con el que se obtienen múltiples imágenes digitales axiales, de un espesor de milímetros, del interior de cualquier objeto que pueda ser atravesado por un haz de rayos X (Coulam, 1981). Estas imágenes poseen un alto contraste que permite distinguir entre tejidos con una diferencia de densidad menor al 1%. Por último, los sistemas informáticos asociados proporcionan modos de manipular y proyectar las imágenes en distintos planos, y realizar las reconstrucciones 3D.

Todos estos avances en el campo diagnóstico médico son los que se han adoptado para el estudio de las obras de arte. Actualmente, el TAC se utiliza para objetos con volumen, como pueden ser esculturas en madera, restos fósiles y algunos materiales arqueológicos. Sin embargo, como veremos a continuación, el TAC médico tiene algunas limitaciones en su aplicación a los bienes culturales. Aún así, es una técnica que proporciona una inestimable información desde el punto de vista histórico, artístico y de conservación.

Antecedentes históricos

Los fundamentos matemáticos en la reconstrucción de imagen fueron establecidos en 1917, aunque no fue hasta la década de los 60 cuando se produjeron las primeras investigaciones en reconstrucción de imágenes para aplicaciones médicas. En 1967 Goodfrey N. Hounsfield propuso la construcción del escáner EMI que fue la base técnica para desarrollar el TAC. En 1971 se instaló el primer TAC para el diagnóstico cerebral en el hospital de

Londres. Tres años después se desarrolló el primer modelo de TAC médico de cuerpo completo. Su implantación al estudio de bienes culturales se produjo 12 años después, en 1986, cuando se realizaron los primeros estudios mediante TAC de momias egipcias (Strouhal et al. 1986), y en 1989, se utilizó para el estudio y restauración de cráneos fósiles (Zonneveld et al. 1989). Esta técnica sirvió para comprobar si los espacios internos de cráneo contenían roca sedimentaria que fuera necesario eliminar.

Los estudios mediante TAC se han utilizado ampliamente en momias, ya que las imágenes axiales y las reconstrucciones 3D, proporcionaban una importante información sin que las momias sufrieran ninguna tensión ni daño. En 1993, la evolución tecnológica permitió estudiar una momia de la 21 dinastía del Museo Británico que había sido previamente radiografiada, y en la que se conocía la existencia de amuletos, falsos ojos, etc. Los resultados del estudio de TAC mostraron de forma independiente los dientes y los molares, lo que evidenció la pronta edad de su muerte, así como el modo de preparación del cráneo para su momificación (Hughes et al. 1993).

Principios de funcionamiento del TAC

La técnica de TAC está dividida en dos partes claramente diferenciadas. Por un lado, la parte física que incluye el flujo de rayos X generados por un tubo de rayos X, los fenómenos de absorción de radiación que se producen en el objeto, y la detección de los rayos X que lo atraviesan. Por otro lado, la parte matemática e informática recoge estos datos y los procesa, dando como resultado la reconstrucción de la imagen. La técnica TAC no sería posible sin la unión de estas dos partes.

Principios físicos y de funcionamiento del TAC

El TAC se basa en la atenuación que sufre un haz de fotones, en este caso rayos X, al atravesar un espesor de materia.

Cuando un haz de fotones atraviesa un material, sufren interacciones que dependen de su energía y las propiedades del material que esté siendo irradiado. El resultado de estas interacciones son la absorción y la difusión de la radiación incidente; la ionización o excitación de los átomos que componen el material;

y la conversión de la radiación incidente en otro tipo de radiación. En el TAC, las interacciones de los rayos X que inciden sobre objeto se reducen a tres: difusión elástica, efecto Compton y efecto fotoeléctrico. Cada una de esas tres interacciones tiene una probabilidad de que se produzca definida por la *sección eficaz*, por lo que la probabilidad $P(x)$ de que un fotón no interactúe al atravesar un espesor x viene dada por la expresión (ec 3.1)

$$P(x) = e^{-\mu x} \quad (\text{ec. 3.1})$$

donde μ es el coeficiente de atenuación lineal total y x es el espesor del material. El coeficiente de atenuación lineal total es la suma de los coeficientes de atenuación lineal de cada una de las interacciones (ec. 3.2)

$$\mu = \Omega + \tau + \sigma \quad (\text{ec. 3.2})$$

donde Ω , τ y σ son los coeficientes de atenuación de la difusión elástica, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton respectivamente. Así la atenuación de un haz de rayos X que atraviesan material (Fig. 1) puede describirse matemáticamente del siguiente modo: si un haz de fotones de intensidad I_0 incide sobre un material y espesor x , la intensidad de fotones I después de atravesar el material viene dada por la siguiente expresión (ec. 3.3)

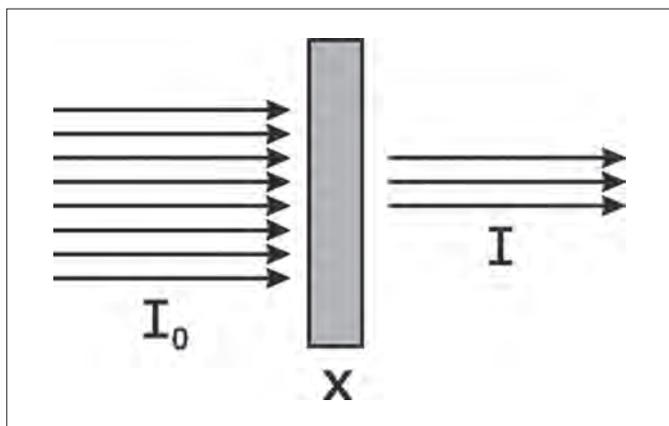


Figura 1. Esquema de la atenuación del haz de fotones al atravesar un espesor de material.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{ec. 3.3})$$

Es importante recalcar que μ depende tanto de la energía del fotón como del tipo de material, por lo que, para una misma energía de rayos X, los materiales con una mayor densidad absorben más radiación que los materiales con menor densidad. En la figura 2 se representa el coeficiente de atenuación en función de la energía de los fotones incidentes para el tejido adiposo, cuya densidad es un poco mayor (0.9) que la de las especies forestales

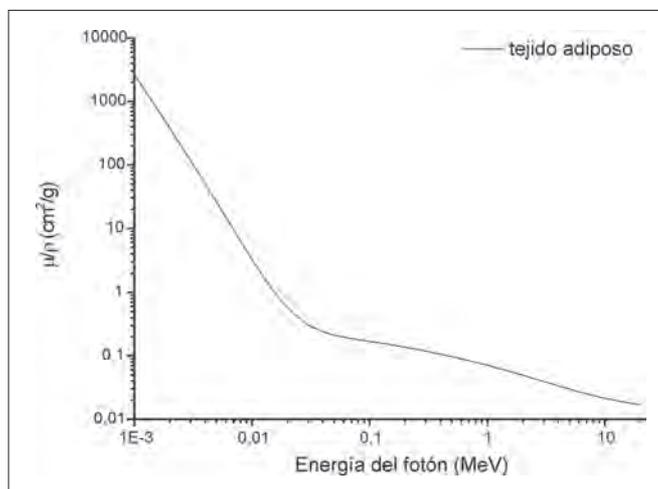


Figura 2. Coeficiente de atenuación en función de la energía del fotón incidente para el tejido adiposo (Hubbell, 2004).

más comunes en España (0.5-0.9, Rodríguez, F.), mientras que en la figura 3 se representa el coeficiente de atenuación para el hueso cortical, con mayor densidad que la madera (1.9). En la región de la izquierda, que corresponde a la zona de energías de rayos X donde trabaja el TAC, se observan diferencias en las dos gráficas, y son precisamente estas diferencias de absorción las que nos permitirán distinguir distintos materiales dentro del objeto. Por tanto, la mayor aportación del TAC es que es capaz de visualizar zonas de distintas densidades dentro del objeto, evitando la superposición de planos.

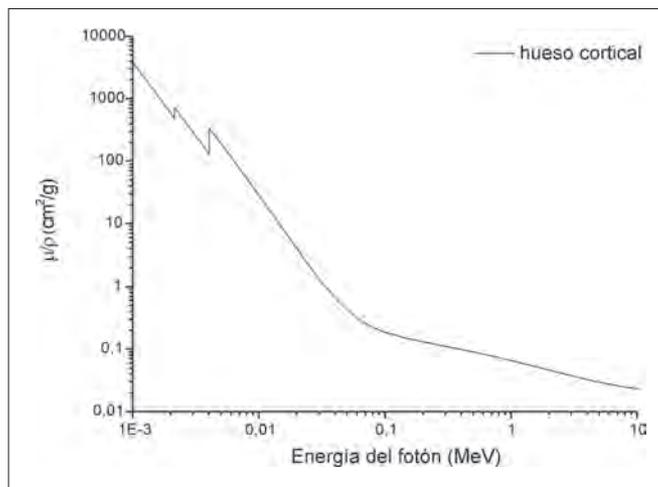


Figura 3. Coeficiente de atenuación en función de la energía del fotón incidente para el hueso cortical (Hubbell, 2004).

El TAC que actualmente se emplea en diagnóstico médico, denominado de cuarta generación, está compuesto por un anillo en el que se introduce el objeto, un generador de rayos X situado en el anillo, y un serie de detectores de rayos X situados también en el anillo pero enfrentados al tubo de rayos X (Fig. 4).

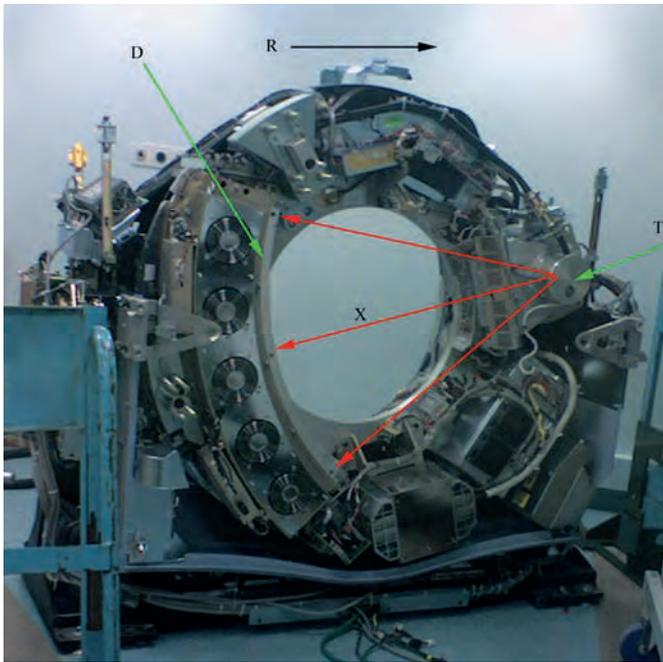


Figura 4. Interior de un TAC. El tubo de rayos X (T) y los detectores (D) están montados en un anillo que gira en el sentido (R) alrededor de la garganta, (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ct-internals.jpg> consultado el 21/09/2009)

34

El tubo de rayos X emite un haz muy fino de rayos X en forma de abanico que incide sobre el objeto a estudiar. Parte de la radiación del haz es absorbida en el interior del objeto y el resto lo atraviesa, siendo recogida por los detectores situados en el lado opuesto. De este modo, se consigue información acerca de las densidades del objeto para una disposición geométrica del tubo de rayos X y los detectores, lo que se denomina una *proyección*. Para visualizar en cada corte axial, zonas de distintas densidades en el interior del objeto, evitando la superposición de planos, es necesario obtener distintas proyecciones cambiando la geometría mediante el giro del tubo de rayos X y los detectores alrededor del anillo (Fig. 5).

Por tanto, el tubo de rayos X y los detectores van variando su orientación, obteniendo de este modo, las distintas proyecciones, hasta que el anillo da una vuelta completa.

Reconstrucción de la imagen

La imagen de un corte axial se obtiene mediante la retroproyección de todas las proyecciones obtenidas en un giro del anillo. El método más sencillo es la retroproyección simple (Fig. 6), donde la señal que se obtiene de los detectores para tres geometrías distintas se proyecta y suma sobre el plano. Como se puede ver en la figura 6, el resultado de la suma de las tres proyecciones genera una intersección en el plano que empieza a parecerse a la imagen original. Si en lugar de tres proyecciones utilizamos un número mucho mayor, la imagen reconstruida se parece mucho más original.

Existen numerosos métodos matemáticos que utilizan filtros previos y métodos de reconstrucción rápida. En la figura 7 aparece un ejemplo de la reconstrucción de un punto con la aplicación de un filtro matemático previo a la reconstrucción. Como se puede observar, la imagen reconstruida es mucho más nítida y parecida al original en el caso de la retroproyección simple.

Imagen TAC

Se puede resumir el funcionamiento del TAC del siguiente modo:

1. El tubo de rayos X emite un haz muy fino de rayos X que inciden sobre el objeto.
2. La radiación que no ha sido absorbida por el objeto, es recogida por los detectores situados en el lado opuesto, y se calcula los coeficientes de atenuación de los rayos X de esa proyección.
3. A continuación, gira el anillo que contiene los detectores y el tubo de rayos X y se repite el proceso. Una vez que anillo ha dado un giro completo se tiene la información de un corte axial.

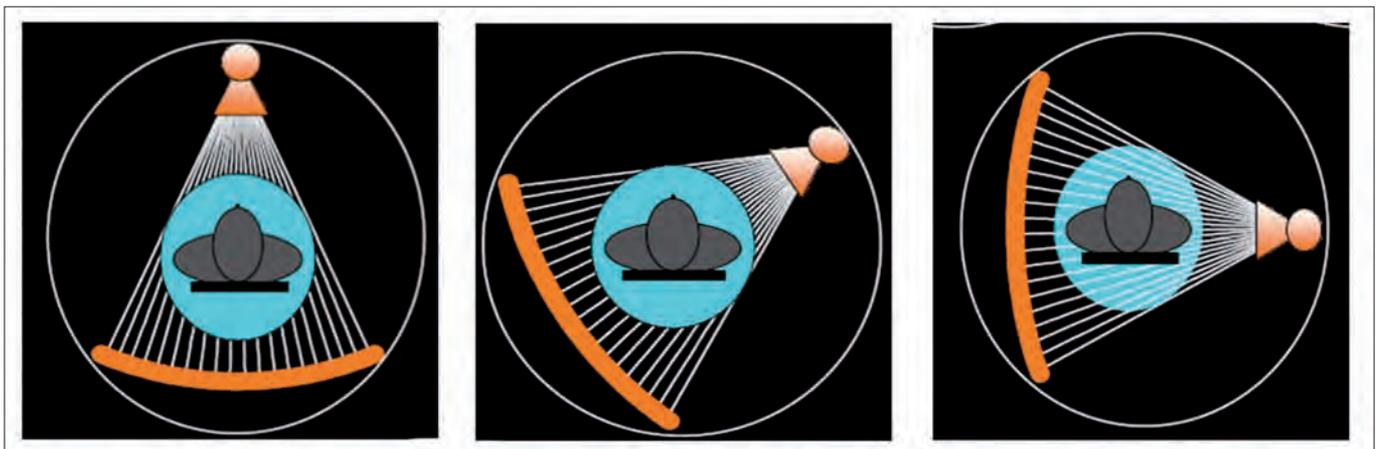


Figura 5. Giro del tubo de rayos X y de los detectores alrededor del objeto para obtener las distintas proyecciones alrededor del anillo o garganta.

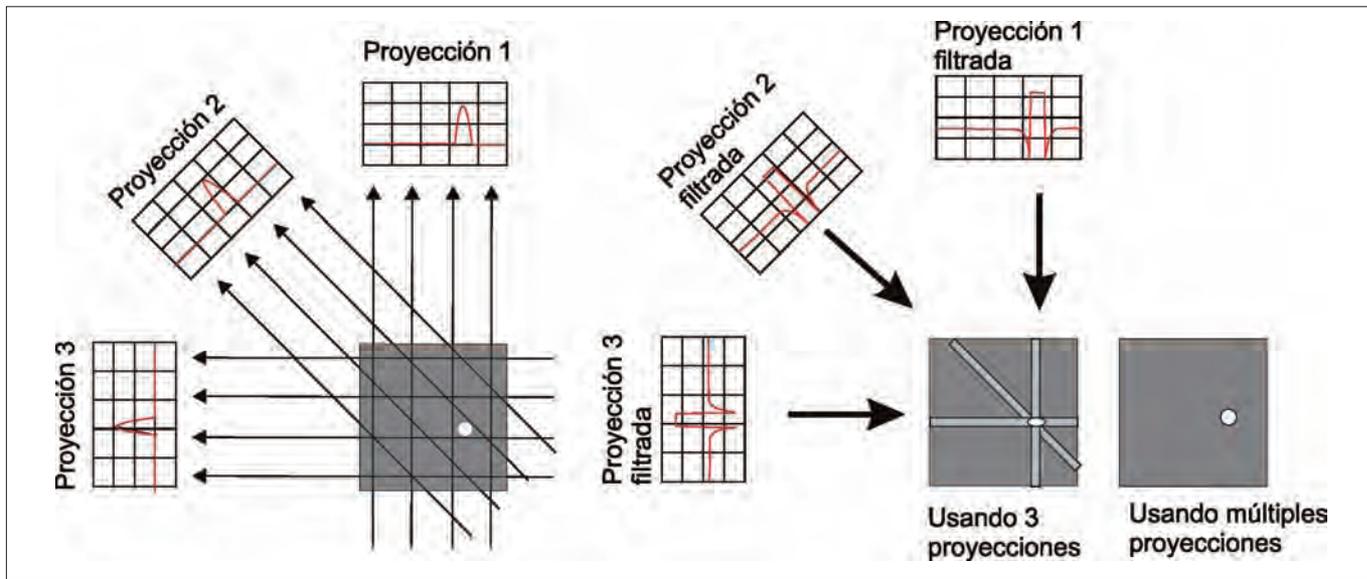


Figura 6. Esquema de la toma de datos y el proceso de reconstrucción de imagen utilizando la retroproyección simple.

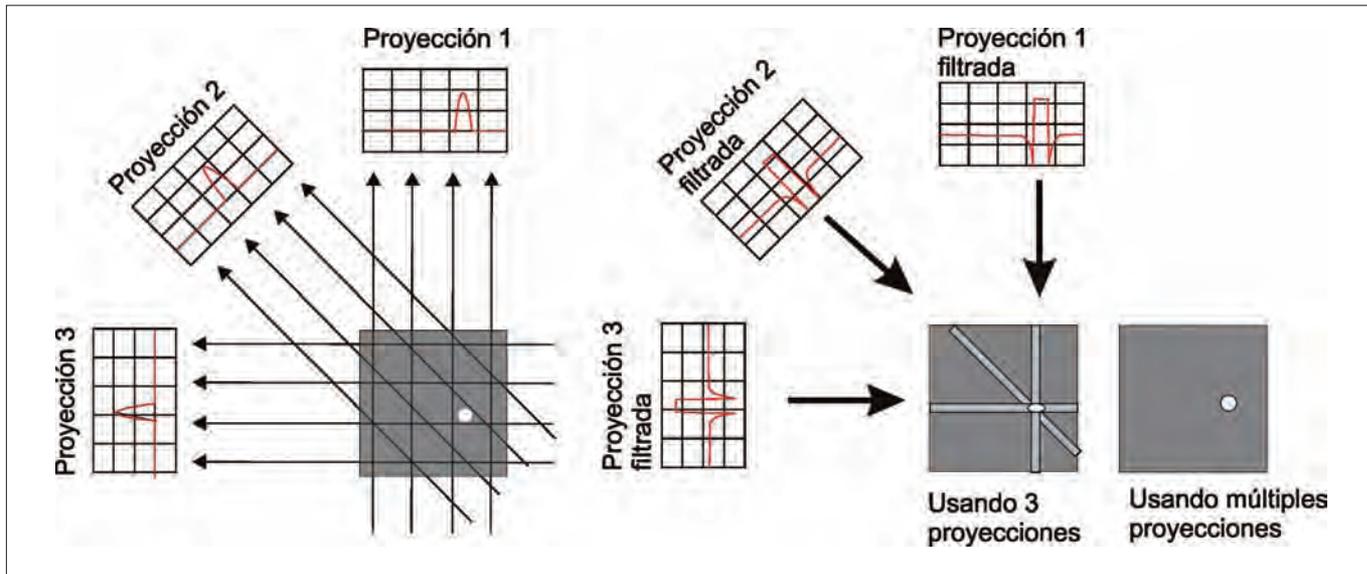


Figura 7. Esquema de la toma de datos y el proceso de reconstrucción de imagen utilizando una retroproyección filtrada.

4. Se aplican las técnicas de reconstrucción de imagen para asignar el coeficiente de atenuación de la radiación a cada punto del corte, y trasladarlo a cada uno de los píxeles de la imagen TAC.

Hay que tener en presente que el píxel es una unidad bidimensional basada en el tamaño de matriz del dispositivo que muestra la imagen. Sin embargo, el corte transversal del TAC tiene un cierto espesor, por tanto, lo que en realidad se tiene es un píxel tridimensional denominado *voxel*. De este modo, en cada píxel de la imagen TAC se haya contenida la información contenida en el voxel (Fig. 8).

Para la representación del promedio de atenuación del objeto en los píxeles de la imagen TAC, se utiliza la escala Hounsfield (HU). Esta escala se obtiene mediante una transformación lineal del coeficiente de atenuación en la que el agua destilada, en condiciones normales, tiene un valor definido de 0 HU. Así por ejemplo, con esta transformación lineal, el aire en condiciones normales tiene un valor de -1000 HU. La escala Hounsfield tiene un valor mínimo de -1024 HU y un máximo de 3071 HU, aunque en medicina sólo se trabaja con 2000 valores Hounsfield comprendidos entre el -1000 HU del aire y el 1000 HU de los elementos metálicos.

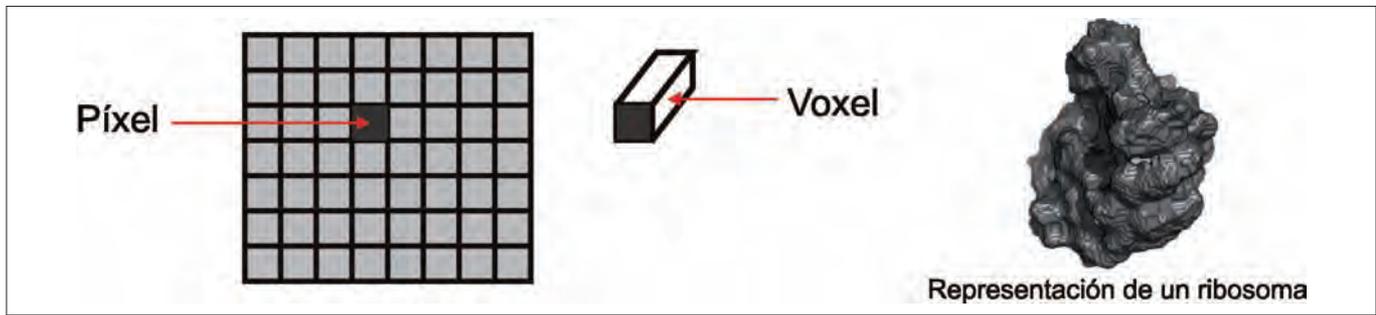
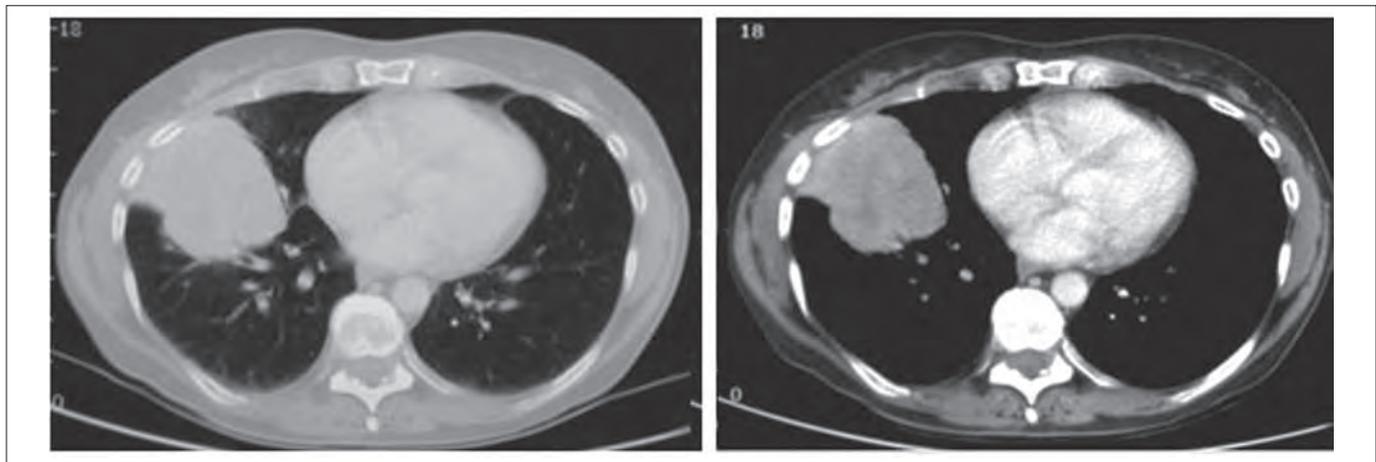


Figura 8. Representación esquemática de un píxel y de un voxel. Reconstrucción tridimensional de un ribosoma mediante la información contenida en voxels. (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ribo-Voxels.png> consultado el 21/09/2009).



36

Figura 9. Sección transversal del torso con un ancho ventana que corresponde al tejido blando (izquierda) donde se potencia los tejidos de menor densidad, perdiendo información del tejido denso. La misma imagen con un filtro de hueso (derecha), donde se potencia los tejidos de alta densidad.

Los valores Hounsfield, obtenidos en cada punto del objeto se trasladan a los 256 tonos de gris de la mayoría de los monitores actuales, mediante un proceso de *windowin*: los valores pueden ser distribuidos uniformemente entre los 256 grises, o se puede realizar un ajuste de escala o filtrado. En este caso, se establece una ventana con un valor central que corresponda un valor densidad media y un ancho de ventana de modo que los 256 tonos de gris se distribuyen uniformemente en ese ancho. En la figura 9 se puede observar una imagen del torso con un ancho de ventana que corresponde al tejido blando, mientras que a la derecha se puede observar la misma imagen con un filtro de hueso.

Las imágenes que directamente se reconstruyen del análisis TAC son las secciones transversales (Fig. 9). A menos que se diga lo contrario, las imágenes de los cortes axiales muestran el corte mirando la pieza desde abajo. Este es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de situar elementos metálicos, oquedades, fisuras, intervenciones, etc. en las piezas analizadas.

Los avances en el cálculo numérico, en los programas de reconstrucción de imagen y en los sistemas informáticos permiten obtener, a partir de la sucesión de los cortes axiales, cortes en los planos sagital y coronal (Fig.10) y reconstrucciones tridimensionales.

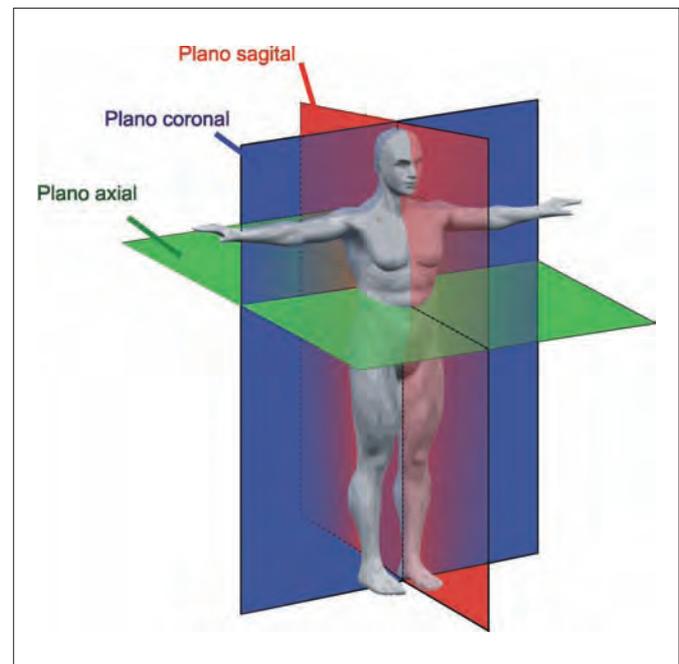


Figura 10. Esquema de los diferentes planos corporales.



Figura 11. Virgen de la Leche. Reconstrucción tridimensional de superficial (izquierda), y la misma imagen con una reconstrucción tridimensional de volumen (derecha).

El método más sencillo de reconstrucción 3D es el método multiplanar, en el que el volumen es construido solapando la sucesión de cortes axiales. Otro tipo de reconstrucción tridimensional es la reconstrucción de superficie, en la que se fija un umbral de radiodensidad al que se le asigna un color, de modo que se pueden representar diferentes componentes del objeto (Fig. 11), aunque, en esta reconstrucción, el interior de la estructura no es visible. Por último, en la reconstrucción de volumen se utilizan transparencias y colores que permiten representar el volumen transparente con una imagen simple.

Factores que influyen en el estudio mediante TAC

Como se ha mencionado, los TACs que se utilizan habitualmente son los empleados en medicina. Su diseño y desarrollo está pensado para realizar pruebas diagnósticas en el menor tiempo posible y con el menor riesgo radiológico para el paciente. La cuarta generación de TACs incluye los denominados TACs helicoidales con una o varias hileras de detectores. En estos TACs el detector de rayos X y el tubo giran continuamente, con la velocidad más alta posible, y de forma simultánea al desplazamiento de la mesa de exploración durante el tiempo que dure la prueba diagnóstica. De este modo, el haz de radiación describe una trayectoria helicoidal, eliminando las pausas entre un corte u otro

y disminuyendo el tiempo de la prueba. Por tanto, en estos TACs no se hacen cortes axiales, sino que se obtiene una hélice continua sobre la que se realizan interpolaciones numéricas para obtener cortes en el mismo plano.

Como hemos mencionado, estos TACs están adaptados a diagnóstico médico lo que conlleva una serie de limitaciones para el estudio de bienes culturales. El diámetro de la garganta por la que pasa el objeto suele ser de 80 cm aproximadamente lo que impone una limitación en el tamaño de las piezas que se pueden estudiar. Otra limitación es el potencial máximo generador de rayos X que suele estar comprendido entre los 100 y 150 kV, más que suficiente para el estudio del cuerpo humano. Sin embargo, con estos potenciales únicamente se puede estudiar objetos de densidad parecida a la humana como la madera, descartando otros objetos como los metálicos y los elaborados en piedra. Por último, el tiempo de escaneado está adaptado para las exploraciones médicas, de forma que la dosis recibida por el paciente sea la menor posible, limitando la resolución en el caso de los bienes culturales donde no existe ese riesgo radiológico.

Hay otros parámetros que sí se pueden modificar al estudiar una obra de arte. Se puede variar el grosor del corte, que determina volumen del voxel, o lo que es lo mismo, el ancho del corte; el



Figura 12. Virgen de la Leche. Escultura madera policromada, Iglesia parroquial de Nuestra Señora de los Ángeles, Torres-Torres (Castellón) 83 x 32 x 19 cm. Imagen tomada antes de la intervención (foto IVC+R).

campo de visión, que fija el diámetro del corte, y el intervalo, que se define como la distancia entre un corte y otro.

Un parámetro importante a la hora de hacer un examen TAC, y que está relacionado con el intervalo, es el denominado *pitch*. El *pitch* se define como la velocidad de la mesa (mm/s) por el tiempo de giro del anillo (s) dividido por el grosor del corte (mm), por lo que este parámetro determina la separación entre cortes sucesivos. Si el valor del *pitch* es igual a uno, los cortes están juntos; si es menor de uno, los cortes se solapan; y si es mayor de uno, los cortes están separados. A menor valor del *pitch*, mejor calidad de imagen, mayor resolución y más fácilmente se realizará la reconstrucción 3D. Para el análisis de bienes culturales es conveniente un *pitch* bajo ya que, generalmente, interesa estudiar oquedades y fisuras de pequeño tamaño que pueden no ser detectadas si en el escaneo existen espacios entre corte y corte.



Figura 13. La Virgen de las Nieves. Imagen de vestir. Romero Tena (1940). Patrona de Aspe y Hondón de las Nieves (Alicante). 149 x 60 x 44 cm. Imagen tomada antes de la intervención (foto IVC+R).

Ejemplos de aplicación en obra real

Los ejemplos escogidos pretenden mostrar el potencial del TAC en el estudio de escultura en madera. Las tres obras se intervinieron en el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales y en el Servicio Restauración de la Diputación de Castellón, y fueron analizadas mediante la técnica TAC previamente a su restauración. El primer ejemplo es *La Virgen de la Leche*, una escultura policromada procedente de de la Iglesia parroquial de Nuestra Señora de los Ángeles de Torres-Torres (Castellón) (Fig. 12). El segundo es *la Virgen de las Nieves* (Fig. 13), una imagen de vestir de Romero de Tena (1940) patrona de Aspe y de Hondón las Nieves (Alicante), y por último, una talla de madera policromada el siglo XVII titulada *San Luis* de Sellent (Valencia) (Fig. 14). Los TACs se realizaron en los servicios de radiodiagnóstico del Consorcio Hospitalario Provincial de Castellón utilizando un TAC helicoidal multicorte.



Figura 14. San Luis. Talla de madera policromada S. XVII, Sellent (Valencia) 120 x 60 x 76 cm. Imagen tomada antes de la intervención (foto IVC+R).

Estudio de la *Virgen de la leche*

La sucesión de cortes axiales de la escultura pone de manifiesto que se trata de una talla elaborada de una sola pieza. En los cortes axiales (Fig. 15) se pueden diferenciar los anillos de la madera, los nudos y fisuras debidos al propio movimiento de la madera, y la capa de policromía que cubre la pieza, etc. Así por ejemplo, la figura 15a es un corte transversal en la zona de la cabeza donde se puede observar que parte de la nariz es añadida. De la figura 15b correspondiente a la zona del cuello, se desprende que la zona derecha del velo fue reconstruida en una intervención anterior. En el corte axial del torso (Fig. 15c) se observa variaciones de la densidad y en los anillos del soporte de la parte trasera de la cabeza del niño respecto al resto de la pieza, lo que indica que es un añadido posterior en el que se utilizó otro tipo de madera.

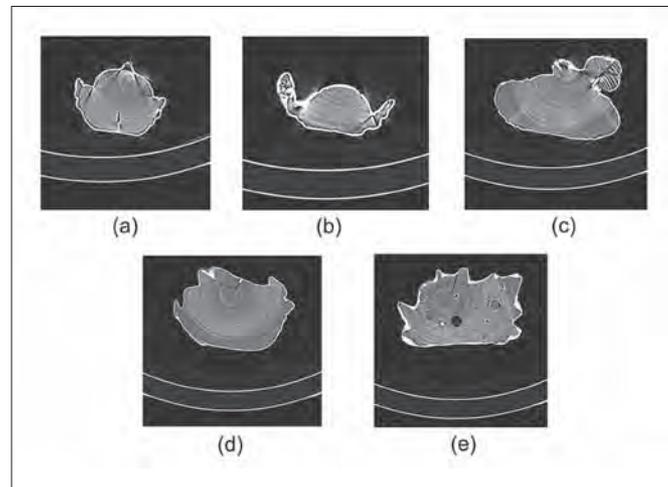


Figura 15. Cortes axiales de la Virgen de la Leche de la zona de la cabeza (a), del cuello (b), de los hombros (c), las piernas (d) y la base (e).

En general el estado de conservación de la talla es bueno, salvo por una grieta de la madera que se extiende a lo largo del torso (Fig. 15d), y por la zona de la base, donde se detectan grietas y fisuras cerca de la unión del soporte con la talla (Fig. 15e). Por último, se observan los dos vástagos de madera que se emplean para sujetar la escultura. Toda la talla está cubierta con una preparación de yeso sobre la cual se aplicó la policromía.

Estudio de la *Virgen de las Nieves*

La *Virgen de las Nieves* es un ejemplo de escultura de vestir contemporánea muy diferente a la *Virgen de la Leche*. El examen TAC pone inmediatamente en evidencia las diferentes técnicas de ejecución de ambas esculturas.

En el corte axial de la zona la cabeza (figura 16a) se puede constatar que fue elaborada con cuatro piezas de madera: una para la parte posterior, otra para la parte central, una plancha de madera delgada sujeta con clavos y una pieza de madera que da forma a la máscara. También se puede observar el detalle de que las orejas se hayan adheridas a la cabeza.

En la sección transversal de los hombros se puede apreciar que los brazos están sujetos al tronco mediante tornillos lo que les da movilidad (Fig. 16b). También permite ver la disposición de los listones empleados en la elaboración del tronco y la disposición de la plancha metálica trasera. En el corte transversal del torso (figura 16c) se puede observar cómo los brazos están elaborados con dos fragmentos de madera, y como el tronco de la escultura no es macizo, sino que tiene un vaciado que se extiende hasta la zona de la cadera.

En el cuerpo se han detectado los clavos de fijación de la estructura para sustentar y dar forma a la indumentaria a lo largo de la cintura.

A medida que se va descendiendo, el análisis TAC se pone de manifiesto la disposición de los listones de la falda y cómo se elaboraron los pliegues (Fig.17a). En cuanto a la zona de la nube, se

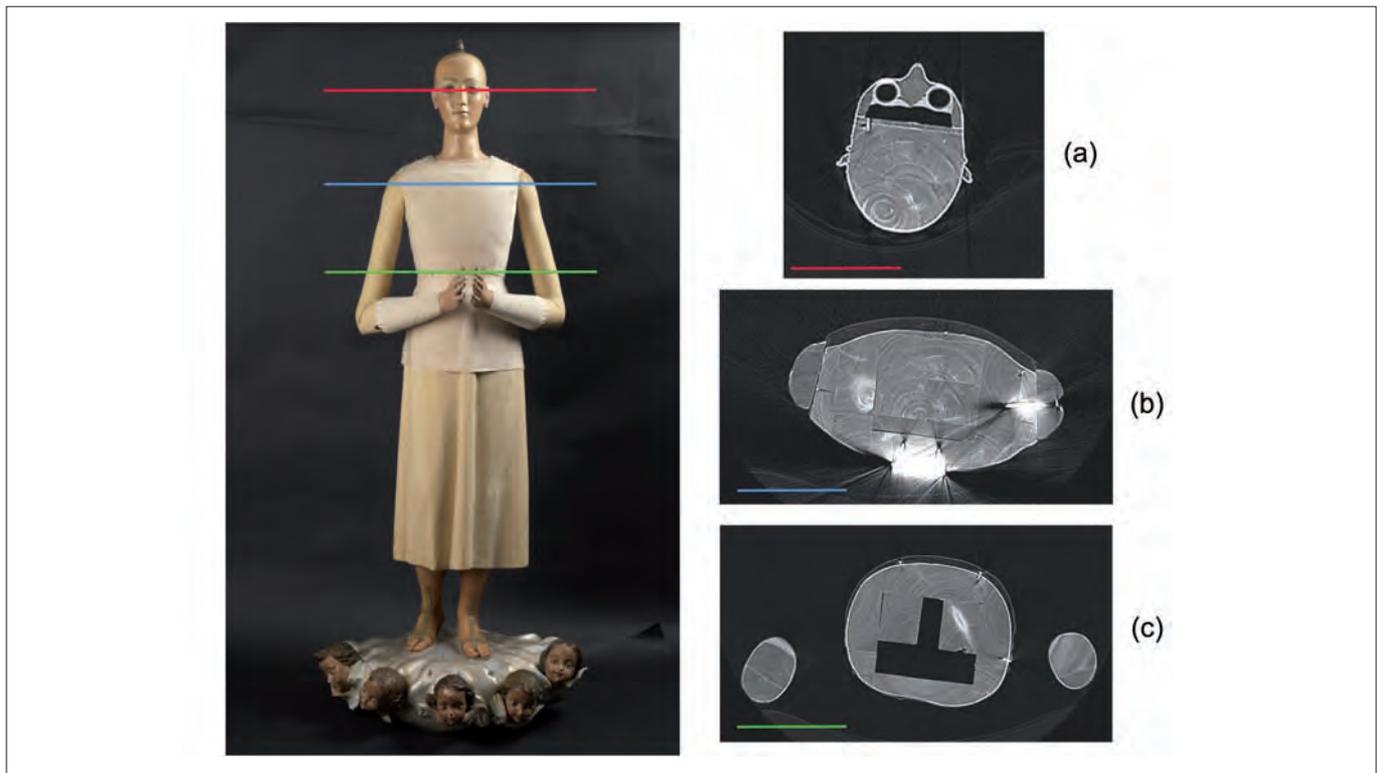


Figura 16. Análisis TAC de la Virgen de las Nieves. En la figura aparecen las imágenes axiales de la cabeza (a), hombros (b) y torso (c), y su posición sobre la imagen de la escultura.

40



Figura 17. Análisis TAC de la Virgen de las Nieves. En la figura aparecen las imágenes axiales de la falda (a), nube (b) y base (c), y su posición sobre la imagen de la escultura.

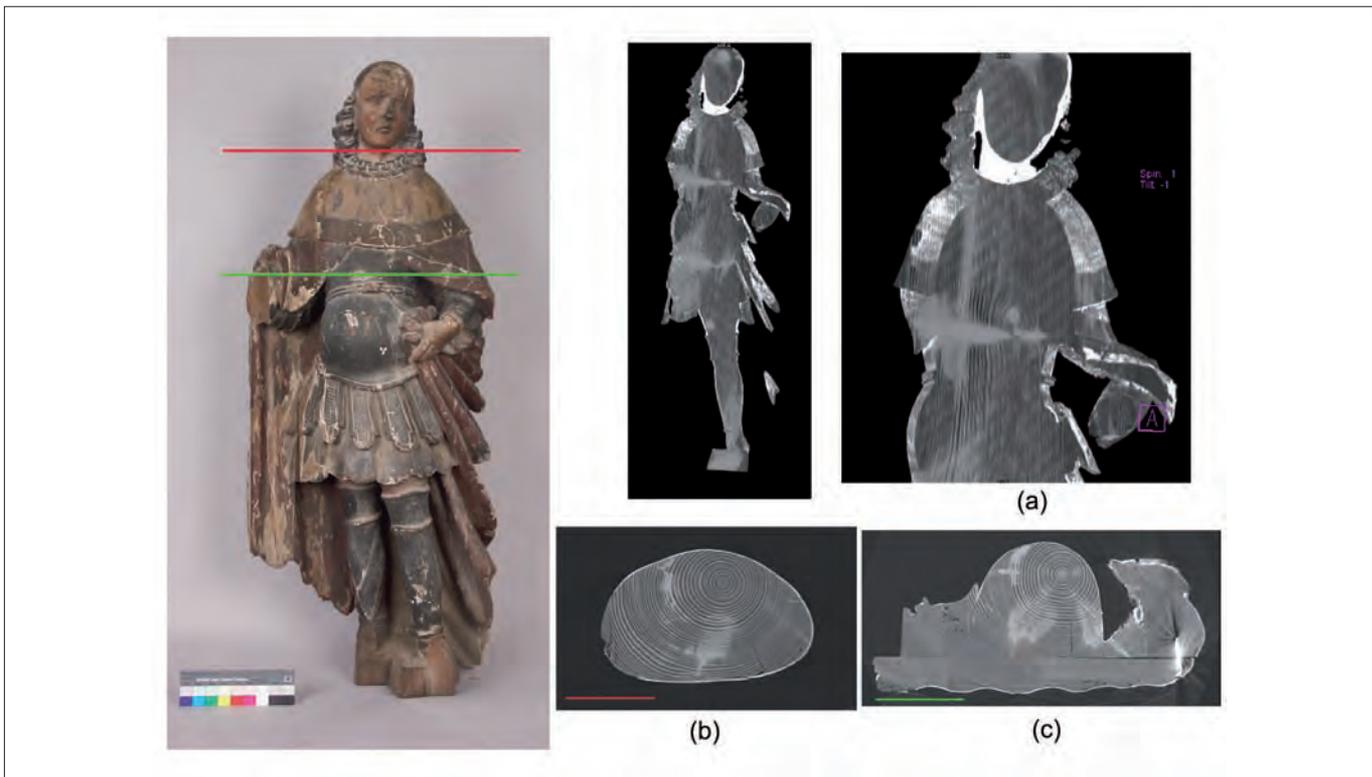


Figura 18. Análisis TAC de San Luis. En la figura aparecen las imágenes de un corte coronal (a) y de cortes axiales de la cabeza (b), y torso (c), y su posición sobre la imagen de la escultura.

utilizaron una gran cantidad de listones de madera (Fig. 17b). Las cabezas de los ángeles están talladas con dos fragmentos que se fijan a la nube mediante espigones de madera. Por último, la zona de la nube se fija al soporte con un vástago metálico y clavos de sujeción (Fig. 17c).

En este caso, las imágenes TAC nos han permitido estudiar la técnica de ejecución de la talla y comprobar que el estado de conservación es bueno ya que no se aprecian ni fisuras, ni grietas, ni ataques de xilófagos.

Estudio de *San Luis*

La talla se elaboró con una estructura central de madera de una pieza, como se desprende del corte coronal de la figura 18a y en la distinta sucesión de cortes axiales (Figs. 18b y 18c). En estas imágenes se puede observar la continuidad de los anillos de la madera a lo largo de la parte central de la escultura.

A la estructura central se le añadieron tabloncillos para esculpir los brazos, el torso y la capa (Fig. 18c). El número de tabloncillos varía en función del volumen llegando a un máximo de nueve. La unión de estas tablas con el cuerpo central se realizó siguiendo la veta para evitar la aparición de fisuras debidas a las dilataciones de la propia madera. Por último, se empleó algún adhesivo tipo cola para unir las tablas ya que sólo se han detectado dos elementos metálicos en las uniones situadas en la espalda (Fig. 18c).

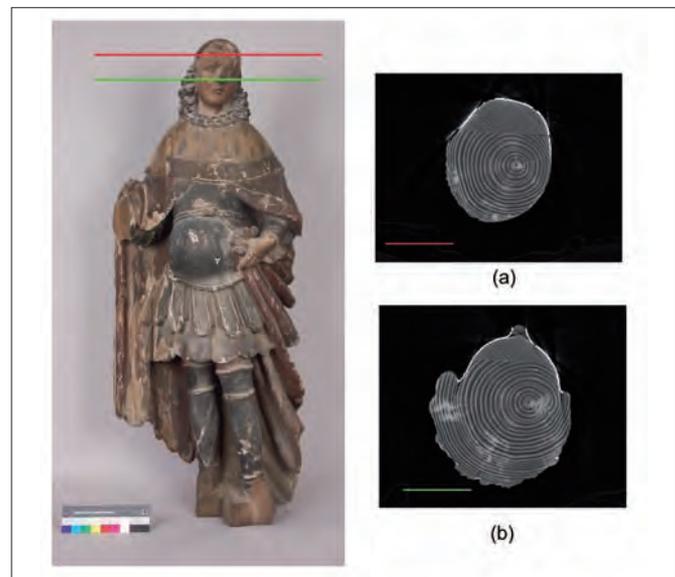


Figura 19. Análisis TAC de San Luis. En la figura aparecen las imágenes de cortes axiales de la cabeza y su posición sobre la imagen de la escultura.

En cuanto a la cabeza (Fig. 19) hay una zona de discontinuidad en la parte de la máscara en la que cambia la densidad de la madera y la estructura de los anillos, por lo que el rostro de *San Luis* fue tallado aparte con otro tipo de madera y después unido



Figura 20. Análisis TAC de San Luis. Reconstrucción 3D de volumen.

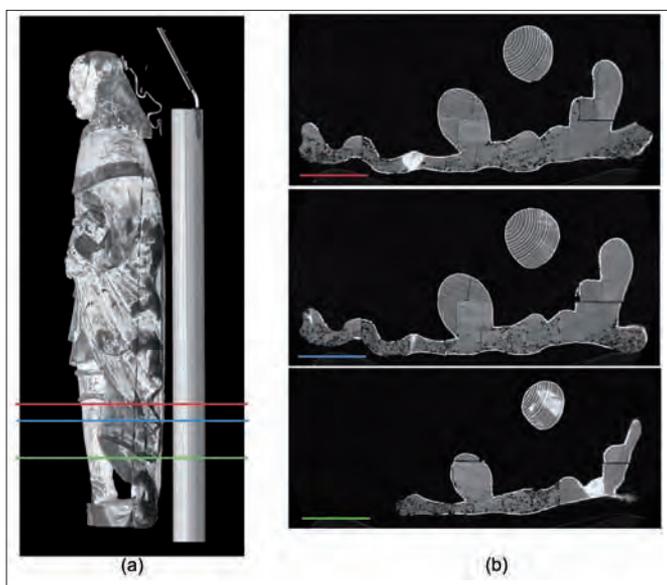


Figura 21. Análisis TAC de San Luis. (a) Reconstrucción 3D de volumen y (b) cortes axiales de las piernas y su posición sobre la reconstrucción 3D de la escultura.

al cuerpo. También se detecta una discontinuidad en la zona de la nariz lo que sugiere que fue añadida a posteriori.

La reconstrucción 3D de superficie nos aporta información sobre el estado de conservación de la policromía. Como se puede observar en la figura 20 existen zonas muy evidentes de falta de policromía que corresponden a las partes más oscuras de la imagen. En la frente, en la zona del cabello, en la vestidura y en los brazos apenas hay capa polícroma y el tono que se observa se

debe a la propia madera. En los cortes transversales también se ha podido comprobar que existe variación de espesor de la capa de policromía a lo largo de la escultura. Hay zonas donde las capas son muy espesas, de hasta 300 micras, y zonas donde la pérdida de capa policroma es total.

En cuanto al estado de conservación de la talla hay que destacar diversos aspectos. Existe una falta de unión de los tablones que forman la espalda con el resto de escultura, como se puede observar en la reconstrucción 3D de superficie de la figura 21a, donde se aprecia una línea oscura a lo largo de la escultura. Esta falta de unión también se observa en los cortes transversales de la zona del torso y piernas (Figs.18c y 21b).

Por último, se han detectado pérdidas de soporte en la zona inferior de la capa debido al ataque xilófagos (Fig. 21b). Las imágenes del TAC han permitido ver la distribución de las galerías internas producida por los xilófagos y como éstas han debilitado estas zonas de la pieza.

Conclusiones

Los tres ejemplos han mostrado las capacidades de la técnica TAC aplicada al estudio de la escultura en madera, teniendo en consideración que todos los estudios se han realizado con un equipo de diagnóstico médico. De los resultados obtenidos se desprenden una serie de ventajas y desventajas del TAC médico aplicado al estudio de las obras de arte.

Como ventajas cabe destacar las siguientes:

- Es una técnica no destructiva en la cual la obra no necesita ningún tipo de preparación para su análisis.
- Es rápida ya que la exploración se hace en cuestión de minutos. La reconstrucción de imagen es más lenta y se realiza a posteriori.
- Proporciona imágenes que permiten visualizar zonas de distintas densidades del interior del objeto sin que exista superposición de planos.
- Se pueden valorar ciertas alteraciones algo no factible con otros medios.
- Proporciona una buena resolución espacial para las necesidades de conservación en escultura de madera ya que permite localizar y medir las irregularidades o elementos que se quieran analizar de su interior.

Como toda técnica de análisis también tiene una serie de desventajas:

- Está adaptada a la ciencia médica por lo que es necesaria la adaptación de parámetros que se salen de los protocolos establecidos.
- El tamaño máximo de las piezas a estudiar está fijado por el diámetro de la garganta del TAC.

- No se pueden estudiar todos los materiales con los que están elaboradas las piezas ya que hay una limitación a la potencia del tubo de rayos X. Generalmente se pueden analizar aquellos objetos cuya densidad sea parecida a la del cuerpo humano.
- Es una técnica cara que requiere el traslado de las obras de arte al centro que disponga de este equipo.

Al igual que sucede en todos los ámbitos tecnológicos, hay una evolución del TAC que permite nuevas aplicaciones. Se están empleando TACs industriales para el estudio de piezas mecánicas metálicas cuyas aplicaciones a bienes culturales permitiría el estudio de materiales más densos como la piedra y los metales, sin embargo, los tamaños de las piezas analizadas son muy limitados. Recientemente, se está desarrollando un proyecto para el análisis de escultura en yeso en el que se utilizan TACs con diferentes energías de excitación que puede abrir una puerta a otro tipo de materiales (Badde, 2005).

La técnica TAC también se está empleando en el campo de los nuevos materiales y la electrónica. En este caso se analizan de forma tridimensional objetos muy pequeños como circuitos electrónicos, estructura materiales etc. con una técnica denominada μ -TAC. Esta técnica permite resoluciones espaciales del orden del micrómetro que se podría aplicar a objetos en los que se requiera este nivel de precisión, como el estudio de tejidos, estructura de papel, etc.

Agradecimientos

A los Servicios de Radiodiagnóstico del Consorcio Hospitalario Provincial de Castellón por su interés, ayuda y disposición a la hora de realizar los exámenes TAC de las piezas.

Fotografía IVC+R: A Pascual Mercé

Bibliografía

BADDE, A.; ILLERHAUS, B.: "3D- μ CT reveals the work processes of cast plaster statues, their internal structures, damages, and restorations". *Optical Methods for Arts and Archaeology*. Edited by Salimbeni, Renzo; Pezzati, Luca. Proceedings of the SPIE, Volume 5857, pp. :245-252 (2005).

COULAM CRAIG M.: *The Physical Basis of Medical Imaging*, Applton Century Crofts, New York, 1981

GUEROLA BLAY, V., GIRONÉS SARRIÓ, I., ESTEBAN HERNANDEZ, E.: "Tomografía axial computerizada (TAC) y de multicorte como sistema analítico aplicado a la exploración de obras de arte". *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation*, Valencia 2006, pp. : 499-513

HUBBELL, J. H., AND SELTZER S. M.: "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients", NIST *Standard Reference Database 126*, July 2004

HUGES, S.W., SOFAT, A., WHITAKER, D. BALDOCK, C. DAVIS, R. WONG, W., TONGUE, K and SPENCER, J.: "3-D CT reconstruction of an ancient Egyptian mummy". *Proceedings of the International Symposium on Computer Assisted Radiology*, pp.: 396-400, Berlin 1993

LANG J., MIDDLETON A.: *Radiography of Cultural Material*, Elsevier Butterworth-Heinemann, second edition. Oxford, 2005

RODRÍGUEZ, F., BROTO, M., I. LIZARRALDE, I.: "Densidad normal de la madera de las principales especies forestales de Castilla y León" Área I+D+i de Cesefor.http://www.cesefor.com/cubifor/descargas/Densidad_Madera.pdf, consultado el 21/09/2009

STROUHAL, E. KVICALA, V. and VYHANANK L.: "Computed tomography of a series of Egyptian mummified heads." In *Science in Egyptology* (Ed. A.R. David) Michael O'Mara books Limited, London (1986), pp.: 123-129

ZONNEVELD, F.W. SPOOR, C.F. and WIND, J.: "The use of CT in the study of internal morphology of hominid fossils". *Medicamundi*, (1989) 34, pp.: 117-128 #1

2.3. Métodos analíticos desarrollados en el IPCE para el estudio de bienes culturales basados en la Espectroscopia de Infrarrojos por Transformada de Fourier y Técnicas Cromatográficas

María Antonia García Rodríguez
Instituto del Patrimonio Cultural de España

Ruth Chércoles Asensio y Estrella Sanz Rodríguez
Instituto del Patrimonio Cultural de España - Universidad Complutense de Madrid

Introducción

La metodología científica aplicada en el Área de Laboratorios-Sección de Análisis de Materiales del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) para el estudio de los materiales presentes en los bienes culturales se realiza tanto durante las etapas de estudios previos, que comprenden la caracterización de materiales y diagnóstico del estado de conservación, como durante la fase de restauración y de seguimiento de la obra.

El objetivo principal es la identificación de la naturaleza de los materiales utilizados en la ejecución de la obra y la de los empleados en intervenciones posteriores. El orden de aplicación de las distintas técnicas de análisis utilizadas es secuencial, siguiendo el criterio de menor a mayor grado de complejidad, es decir, primero se parte de métodos más sencillos, que proporcionan un conocimiento general y morfológico de la obra, hasta llegar, cuando sea necesario, al empleo de métodos instrumentales para análisis específicos.

En algunos casos, la caracterización del material puede quedar resuelta con una técnica sin necesidad de confirmación con otra. Sin embargo, en otras ocasiones, debido a la complejidad de la muestra, es necesario utilizar distintas técnicas para obtener resultados concluyentes y certificar la composición del material.

Metodología de trabajo

La metodología de trabajo seguida en el Área de Laboratorios, Sección de Análisis de Materiales, del IPCE para la caracterización de los materiales presentes en los bienes culturales, se puede resumir en las siguientes etapas: a) estudio *in situ* de la obra; b) toma de muestras y etiquetado de las mismas; c) creación de fichas de seguimiento del laboratorio; d) examen bajo el microscopio estereoscópico; e) tratamiento previo de las muestras antes de la realización de los correspondientes análisis; f) aplicación de las diferentes técnicas de análisis; g) elaboración del informe de resultados; h) archivo de informes y muestras.

El primer paso consiste en el examen visual de la obra. Siempre que sea posible, es aconsejable realizar esta operación bajo la luz del día. A partir de la inspección ocular general se enumeran las alteraciones presentes en el bien cultural y con una inspección detallada se establecen los lugares para la toma de muestra. Para ello se procede a la extracción mediante un bisturí, tijeras o pinzas de un pequeño fragmento que se introduce en un tubo de vidrio perfectamente etiquetado. En algunas ocasiones, en la toma de muestras de recubrimiento se emplea un hisopo humedecido en disolvente.

Los criterios con los que se realiza la toma de muestras obedecen a que se escojan zonas de la obra con menor interés artístico, que se tome el menor número de muestras posibles y a que la cantidad extraída sea la mínima necesaria y reutilizable, pero siempre manteniendo un alto valor representativo. Empleando una fotografía del objeto y una ficha específica para la toma de muestra, se anota correctamente la localización de las muestras tomadas, así como su código, descripción, y cualquier otra observación que se estime oportuno registrar.

Una vez que las muestras llegan al laboratorio del IPCE se crean unas fichas de seguimiento donde se irán anotando las observaciones, análisis realizados, los archivos informáticos de éstos y los resultados de todas las actuaciones llevadas a cabo para cada muestra. A continuación, se observa bajo el microscopio estereoscópico donde se realiza un examen general de la muestra y se prepara para el análisis mediante otras técnicas.

El siguiente paso a seguir en esta metodología es el tratamiento de las muestras, que será diferente en función de su naturaleza y, por tanto, de la técnica de análisis que se va a emplear para su identificación. Una vez concluidos los análisis, se procede a la elaboración del informe correspondiente y su entrega al solicitante del mismo. Una copia del informe y las muestras tomadas quedan almacenadas en el archivo del Área de Laboratorios. Todos los datos incluidos en el informe, así como la localización de éste y las muestras se introducen en una base de datos para su posterior consulta.

Este trabajo está centrado en los métodos analíticos desarrollados en el IPCE basados en el empleo de la espectrometría de

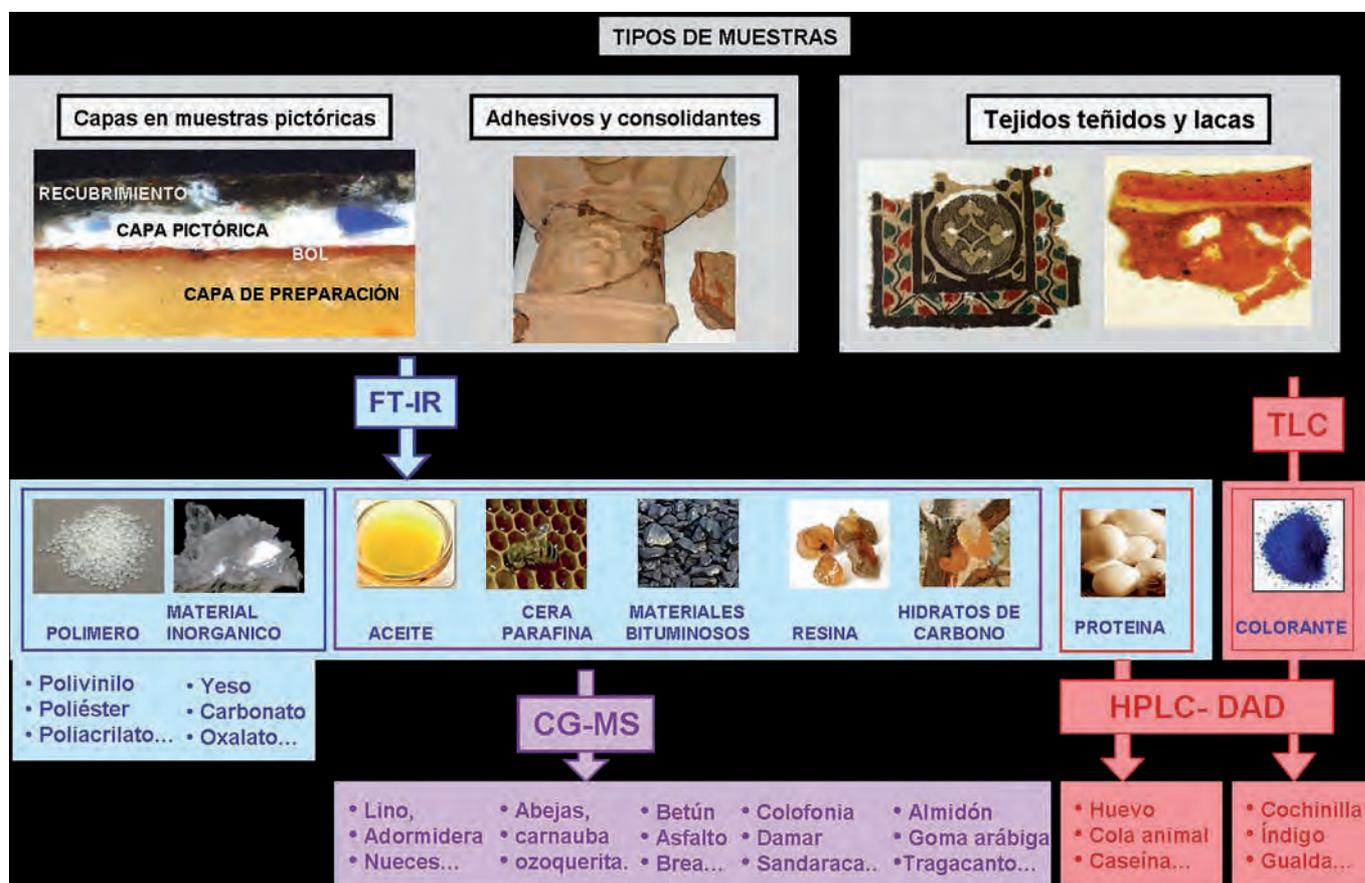


Figura 1. Esquema sobre las aplicaciones de las técnicas FT-IR, GC-MS, HPLC-DAD y TLC en función del tipo de muestras a analizar y de los materiales que las constituyen. FT-IR: Espectroscopia de Infrarrojos por Transformada de Fourier; GC-MS: Cromatografía de gases – Espectrometría de Masas; HPLC-DAD: Cromatografía líquida de alta resolución- Diodo array; TLC: Cromatografía en capa fina.

infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) y varias técnicas cromatográficas. Estos métodos son aplicaciones específicas de estas técnicas en la identificación de materiales, fundamentalmente, de naturaleza orgánica como aceites secantes, resinas, ceras, parafinas, hidratos de carbono, polímeros sintéticos, proteínas y colorantes naturales y, por tanto, el análisis de estos materiales constituye el núcleo de este trabajo. Sin embargo, la espectrometría de infrarrojos también aporta información muy valiosa en el estudio de los materiales inorgánicos por lo que también formará parte del contenido de este capítulo. La figura 1 muestra de forma esquemática las aplicaciones de cada una de estas técnicas en función del tipo de muestras a analizar y de los materiales que las constituyen. Este esquema sintetiza la información que cada uno de los métodos analíticos empleados en el IPCE ofrece en función de la técnica aplicada. En el siguiente apartado se desarrollarán los métodos analíticos a través de la presentación de los fundamentos sobre la técnica analítica en la que se basan, así como de los procedimientos específicos de tratamiento de muestra empleados en cada caso y su campo de aplicaciones.

Métodos analíticos desarrollados en el IPCE

Métodos basados en la Espectrometría de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía consiste en la medición e interpretación de fenómenos de absorción, dispersión o emisión de radiación electromagnética que ocurren en átomos, moléculas y otras especies químicas. La representación de la distribución de intensidad de la radiación absorbida o emitida por la muestra en función de su longitud de onda es lo que se conoce como espectro de absorción o emisión, respectivamente. Cuando la materia se sitúa entre una fuente de excitación radiante y un detector, éste mostrará que la intensidad de radiación obtenida es menor que la incidente y el resultado será un espectro de absorción. Pero si dejamos relajarse dicha materia desde el estado de energía excitado (de más energía) a otro más bajo, dicha transición energética da origen a una radiación cuya frecuencia será igual a la absorbida anteriormente, siendo detectada como el espectro de emisión.

Existen numerosas técnicas espectroscópicas específicas que utilizan estos principios fundamentales. Entre ellas destaca la espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) que es la técnica espectroscópica molecular más utilizada en el análisis de los materiales constitutivos de los bienes culturales. Esta técnica se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas. Dependiendo de la región del espectro en la que se trabaje y, por tanto, de la energía de radiación utilizada (caracterizada por su longitud o número de onda), esta interacción será de diferente naturaleza: excitación de electrones (espectros moleculares electrónicos), vibraciones moleculares (espectros moleculares de vibración) y rotaciones moleculares (espectros moleculares de rotación). Los espectros moleculares sólo pueden ser de absorción, ya que de otro modo se alterarían las moléculas al excitarlas a niveles energéticos superiores a los necesarios para obtener espectros de emisión.

Las moléculas no son asociaciones rígidas de átomos; a temperatura normal los átomos unidos por un enlace están en continuo movimiento vibratorio sobre sus posiciones de equilibrio, lo que determina unos niveles de energía vibracional en la molécula.

La radiación electromagnética infrarroja tiene una energía similar a las pequeñas diferencias energéticas entre los distintos estados vibracionales y rotacionales existentes en la mayoría de las moléculas. La absorción de la radiación infrarroja por una molécula se corresponde con un movimiento vibracional de los átomos de ésta¹.

Las vibraciones de enlaces existentes en las moléculas que se producen en el infrarrojo (IR) son de tensión y flexión (Fig. 2). Las vibraciones de tensión, también denominadas de estiramiento o elongaciones dan lugar a cambios en la distancia de enlace. Pueden ser simétricas y asimétricas. Las vibraciones de flexión (deformación), producen cambios en el ángulo de enlace. Se clasifican en vibraciones de deformación en el plano (de tijera y balanceo) y fuera del plano (cabeceo o sacudida y torsión). En las moléculas de más de tres átomos, además de las vibraciones descritas, pueden producirse interacciones o acoplamientos que dan lugar a cambios en las características de las vibraciones.

El espectro IR se extiende desde el visible hasta la región microondas. La región infrarroja se divide en tres zonas: IR cercano (NIR), IR medio (MIR o IR) e IR lejano (FIR). La mayoría de las aplicaciones analíticas de esta técnica, se sitúan en la región intermedia con número de onda de 4000 a 500 cm⁻¹ (o longitud de onda de 2.5 a 20 μm). La espectrometría de infrarrojos pone en evidencia los enlaces existentes en las moléculas orgánicas, permitiendo determinar los grupos funcionales por sus vibraciones características a determinadas longitudes de onda. En el IR se intensifica el movimiento de los átomos sin perturbar su interior.

Cuando la radiación electromagnética incide en la muestra, ésta puede sufrir diferentes fenómenos: absorción, transmisión

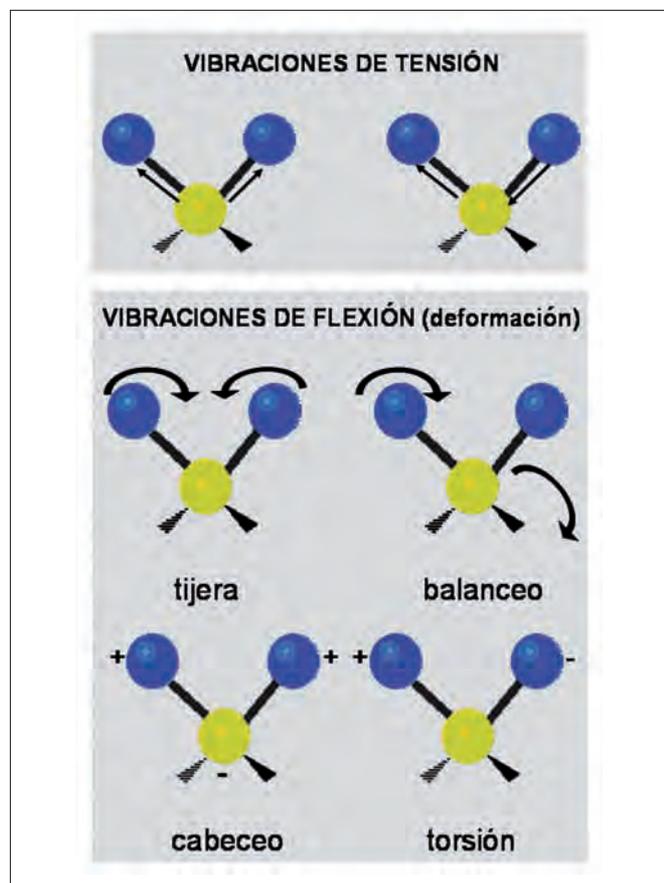


Figura 2. Tipos de vibraciones moleculares.

(+): indica movimiento desde el plano de la página hacia el lector.

(-): indica movimiento desde el plano de la página alejándose del lector.

y reflexión. La intensidad de la radiación transmitida a través de la muestra (I_t) es menor que la intensidad incidente (I_o). Una parte de esta intensidad incidente se refleja (I_r) mientras que otra es absorbida por la sustancia (I_a):

$$I_o = I_a + I_t + I_r$$

Según los fenómenos producidos las medidas en el infrarrojo pueden ser de distintos tipos. La medida más común en el infrarrojo es la que se basa en la absorción (o la intensidad transmitida), aunque también se han desarrollado espectroscopias basadas en el fenómeno de la reflexión, como son la reflectancia total atenuada (ATR) y la reflectancia difusa.

El análisis cualitativo se hace comparando el espectro de absorción de la muestra con patrones de referencia (mediante librerías de espectros comerciales o creadas por el propio analista). Para el análisis cuantitativo hay una relación lineal cuantitativa entre la absorbancia y la concentración de las moléculas absorbentes:

$$A = \epsilon bc = \log (I/I_0)$$

Ley de Lambert-Beer

Donde A = absorbancia, ϵ = coeficiente de extinción molar, b =longitud del paso de la muestra y T = transmitancia. La transmitancia se calcula como la fracción de radiación (I_t/I_o) transmitida a través de la muestra. Para el análisis cuantitativo los espectros se deben representar en unidades de absorbancia.

El principio de la reflectancia total atenuada (ATR) se fundamenta en el fenómeno de la reflexión total interna y la transmisión de la radiación a través de un cristal con un elevado índice de refracción. La radiación penetra unos micrómetros más allá de la superficie del cristal donde se produce la reflexión total, en forma de onda evanescente. Si en el lado exterior del cristal se coloca un material absorbente (la muestra), la radiación que viaja a través del cristal se verá atenuada y se puede registrar el espectro de la muestra. El ángulo de la radiación incidente y la geometría del cristal facilitan que se produzcan sucesivas reflexiones en sus caras internas. Para obtener medidas adecuadas es necesario que exista un contacto íntimo entre la muestra y el cristal, por lo que esta técnica se utiliza principalmente en líquidos o en sólidos que se puedan compactar contra el cristal aplicando presión. Por otra parte, el cristal debe estar limpio, tener una superficie pulida y ser transparente a la radiación infrarroja, los cristales empleados típicamente son el silicio, el germanio y diamante [2].

Otra medida que se basa en el fenómeno de la reflexión es la reflectancia difusa. Por un lado, cuando la radiación incide sobre una muestra opaca y no absorbente tiene lugar la reflexión especular. Por otro, al incidir sobre una superficie irregular, el efecto que se produce es una reflexión de la radiación a cualquier ángulo (reflectancia difusa).

La representación de la respuesta del detector en % transmitancia (%T) o absorbancia (A) frente a la frecuencia infrarroja (en número de ondas cm^{-1}) es lo que se denomina espectro de infrarrojos. Para la interpretación se divide el espectro en varias regiones de frecuencia. La presencia y ausencia de bandas en cada zona es lo que permite caracterizar la composición de la muestra. El espectro puede ser dividido de la siguiente manera:

- 4000-2600 cm^{-1} : Bandas de estiramiento (vibraciones de tensión) de los enlaces N-H, O-H. La ausencia de bandas en esta región indica que las muestras no contienen hidratos de carbono o proteínas.
- 3200-2800 cm^{-1} : Región de estiramiento (vibraciones de tensión) de los enlaces C-H. Aparecen bandas intensas para ceras, aceites y resinas naturales.
- 2800-1800 cm^{-1} : Bandas de absorción correspondiente al dióxido de carbono (CO_2) y triples enlaces.
- 1800-1500 cm^{-1} : Bandas de absorción de los enlaces carbonilo (C=O) y dobles enlaces.
- 1500-500 cm^{-1} : Bandas de absorción de enlaces sencillos. Se trata de una región característica para cada compuesto. Se denomina región de la huella dactilar y en algunos casos nos sirve para confirmar la presencia de una sustancia determinada.

Los componentes básicos de un espectrómetro de infrarrojos incluyen una fuente de radiación infrarroja, un monocromador para seleccionar el intervalo de longitud de onda de la radiación incidente, un soporte para la muestra, un detector de radiación, un procesador de señal y un dispositivo de lectura.

Se distinguen dos tipos de espectrómetros, el espectrómetro convencional de doble haz que corresponde a la técnica tradicional de espectrometría por dispersión de rayos IR y el método actual de espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR). En esta técnica se intercala un interferómetro entre la fuente de radiación y el compartimento de la muestra, que actúa como monocromador. El interferograma obtenido se convierte matemáticamente por medio de un proceso denominado "transformación de Fourier". La transformada de Fourier del interferograma es similar al espectro ordinario obtenido por aparatos convencionales IR. El interferómetro se compone de un sistema divisor del haz, de modo que la mitad de la radiación IR incidente se dirige hacia un espejo móvil, mientras que el resto es reflejada por un espejo estacionario. Una vez que ha incidido sobre ambos espejos, la radiación se recombina y llega de nuevo al sistema divisor. La mitad de la radiación obtenida se refleja y el resto se transmite, atravesando el compartimento de la muestra y llegando al detector. La diferencia de camino óptico entre las fracciones procedentes de los dos espejos hace que se produzcan interferencias constructivas y destructivas. Las ventajas de este método son su mayor poder de resolución y que todas las frecuencias son exploradas a la vez, durante el análisis espectral.

Existen distintos modos de efectuar los análisis, uno de ellos sería mediante bancada por transmisión, dispersando la muestra en bromuro de potasio, o con un dispositivo ATR. Otra forma de efectuarlo es mediante el acoplamiento de un microscopio óptico al espectrómetro de infrarrojo, denominándose microespectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (micro FTIR) (Fig. 3). En este caso se puede medir la transmisión, reflexión o la reflectancia total atenuada. Esta técnica contribuye a identificar y a su vez localizar, los componentes de la preparación microscópica. Mediante micro FTIR también se puede realizar el análisis directamente sobre determinados objetos pequeños.

Algunas aplicaciones especiales permiten hacer mediciones en el IR cercano y en el IR medio directamente sobre la superficie del objeto y en el lugar donde se encuentra (sin toma de muestra e *in situ*). Para ello se utiliza un espectrómetro de IR portátil provisto de un cable o sonda de fibra óptica.

El análisis de los bienes culturales mediante esta técnica permite, en primer lugar caracterizar los materiales constitutivos y la técnica de ejecución de una obra de arte, contribuyendo a distinguirla de intervenciones posteriores. En segundo lugar estudiar las alteraciones y determinar sus posibles causas. Finalmente, asesorar en las intervenciones de restauración, realizando análisis preliminares, comprobaciones analíticas y empleando métodos de envejecimiento con modelos de laboratorio que permitan reproducir el envejecimiento natural de un objeto.



Figura 3. Esquema de un microscopio acoplado a un espectrómetro de infrarrojos.

La espectrometría infrarroja identifica los grupos funcionales de los aglutinantes, barnices y adhesivos orgánicos naturales (aceites, resinas, ceras, proteínas y gomas) polímeros sintéticos (acrílicos, epóxidos, poliamidas, poliésteres, vinílicos, etc.) y aniones inorgánicos poliatómicos como los carbonatos, sulfatos, silicatos, oxalatos y nitratos existentes en morteros, preparaciones y capas pictóricas (por ejemplo la azurita, malaquita, albayalde, carbonato de calcio, yeso, etc.).

Mediante esta técnica es posible determinar los cambios químicos, así como evaluar y monitorizar el grado de deterioro de un material. En algunos casos, en el análisis por FTIR se han identificado productos de alteración de determinados materiales, como pueden ser los oxalatos presentes en las pátinas.

Es importante destacar que en ocasiones el análisis de los materiales constitutivos de los bienes culturales mediante esta técnica está limitado, debido a varios factores: 1) a veces sólo se dispone de muy poca cantidad de muestra y además la mayoría de los casos son mezclas complejas difíciles de caracterizar, 2) los materiales orgánicos naturales suelen ir acompañados de productos de degradación, por lo que es complicado determinar con exactitud la composición de los mismos, 3) algunas veces la identificación de los polímeros sintéticos no es muy precisa debido a que se trata de copolímeros y contienen aditivos difíciles de diferenciar.

A continuación, se describe la metodología que se sigue en el laboratorio del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), mediante FTIR:

El equipo empleado es un espectrómetro de infrarrojos por transformada de Fourier, modelo Equinox 55 de Bruker, acoplado a un microscopio Hyperion, provisto de un objetivo IR de 15X (para las medidas de reflexión y transmisión) y un objetivo ATR de 20X con cristal de germanio. La configuración del espectrómetro es la siguiente: detector DTGS con ventana de KBr ($7500 - 370 \text{ cm}^{-1}$). Los espectros se obtienen en modo absorbancia, número de scans 32, resolución de 4 cm^{-1} . El software empleado para procesar los espectros es Opus NT versión 5.5.

El equipo permite realizar el análisis de dos formas: a partir de la micromuestra extraída de una obra de arte y directamente sobre objetos de pequeño tamaño.

En el primer caso la medida se puede efectuar mediante bancada dispersando la muestra en bromuro de potasio y en

ocasiones se puede hacer el análisis por microespectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier sobre un fragmento extraído de la obra sin preparación previa a la medida o sobre una estratigrafía.

La preparación de las muestras para el análisis por FTIR es el aspecto más importante para la obtención de un buen resultado final. Una vez tomada la muestra del bien cultural, con ayuda del microscopio estereoscópico y un bisturí, se separa la capa que se quiere determinar lo más limpia posible, evitando la contaminación entre los distintos estratos de la muestra, puesto que pequeñas cantidades de otras capas pueden enmascarar el verdadero resultado. La cantidad de fragmento separado necesario es menor de 1 mg. Posteriormente, la micromuestra se muele en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino al que se le añade bromuro de potasio, moliéndose de nuevo hasta conseguir una mezcla homogénea, la cual se prensa para crear una pastilla transparente. Se emplea bromuro potásico ya que tiene la propiedad de no absorber en el IR. Una vez obtenida la pastilla se procede a su medida.

Cuando se toman hisopos en una zona determinada, los extractos de disolventes orgánicos de los mismos se preparan de la misma forma que en el caso de las muestras sólidas.

Se realizan distintos métodos de análisis de infrarrojo. Cuando la muestra está dispersa en una matriz de bromuro potásico, el análisis se realiza mediante bancada por transmisión, colocando la pastilla en el compartimento de muestra del espectrómetro.

En el laboratorio del IPCE el método que se aplica para el análisis de una muestra sin preparación previa y el de una estratigrafía es micro FTIR con objetivo ATR. Los objetos que presentan un formato compatible con el tamaño de la platina del microscopio son analizados directamente por micro FTIR con objetivo ATR, siendo éste un método eficaz para el análisis de capas finas superficiales como barnices, análisis de adhesivos, fibras, documentos gráficos y plásticos.

Métodos basados en técnicas cromatográficas

La cromatografía engloba a un conjunto de técnicas basadas en la separación de los componentes de una mezcla y su posterior detección. La característica que distingue a la cromatografía de otros métodos físicos y químicos de separación es que se ponen en contacto dos fases inmiscibles: una fase estacionaria y otra móvil. Una muestra que se introduce en la fase móvil, la cual consiste en un fluido (gas, líquido o fluido supercrítico), es transportada a través de la fase estacionaria que puede ser un sólido o un líquido fijado en un sólido. Los componentes de la muestra experimentan interacciones repetidas (repartos) entre la fase estacionaria y la fase móvil. Este reparto depende de las diferencias físicas y/o químicas de los componentes de la muestra. El componente que interacciona menos con la fase estacionaria emerge o eluye primero, mientras que aquel cuya interacción con la fase estacionaria es mayor,

eluye el último. Cuando ambas fases se han escogido adecuadamente, los componentes de la muestra se van separando gradualmente, incluso en mezclas cuyos componentes difieran muy poco en sus propiedades químicas y físicas. Las técnicas cromatográficas empleadas en el IPCE son la cromatografía de gases acoplada a un detector de masas (GC-MS), la cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector diodo array (HPLC-DAD) y la cromatografía en capa fina.

Cromatografía de gases (GC)

La cromatografía de gases es una técnica de análisis que permite identificar componentes orgánicos gaseosos o fácilmente transformables en compuestos volátiles. Como las restantes técnicas cromatográficas, se trata de un método de separación de mezclas de diferente composición mediante su distribución diferencial entre una fase móvil y una fase estacionaria. La figura 4 representa los componentes principales de un equipo de cromatografía de gases, donde la fase estacionaria se encuentra en el interior de una columna cromatográfica (1) que a su vez se dispone en el interior de un horno (2) en el que se alcanzan las temperaturas apropiadas o se le somete a una rampa de temperatura para conseguir la separación. La fase móvil -un gas- (3) se hace pasar a través de esta misma columna en la que previamente se ha inyectado la muestra volatilizada al encontrarse el sistema de inyección (4) a elevada temperatura.

La separación (elución) de los compuestos tiene lugar por la diferente afinidad de los distintos componentes de la mezcla por el material contenido en la columna (fase estacionaria). Aquellos que tengan menos afinidad por él, saldrán antes de la columna; aquellos más afines, saldrán después. Por último un detector (5) convierte en señal eléctrica la salida de los diferentes compues-

tos y mediante un sistema de adquisición de datos (6) se obtiene como resultado final un cromatograma.

Los equipos de cromatografía llevan asociados diferentes sistemas de detección, dependiendo de la naturaleza de los compuestos y la sensibilidad deseada. Los más utilizados son el detector de llama (FID), el de conductividad térmica, el de nitrógeno-fósforo (NPD) y el espectrómetro de masas (MS); este último es el empleado en el IPCE que identifica las sustancias moleculares una vez separadas en la columna cromatográfica. Esta técnica espectroscópica se fundamenta en la ionización de estas moléculas, la aceleración de los iones formados al pasar a través de un campo eléctrico y su posterior dispersión en función de la relación masa / carga. Finalmente estos iones son detectados y producen una señal eléctrica que es recogida en el espectro correspondiente. Esta técnica de detección resulta muy útil en la identificación de barnices naturales, cuyos componentes se han transformado por oxidación, así como en la caracterización de otros compuestos de naturaleza imprevisible.

Los materiales orgánicos presentes en los bienes culturales, que se determinan con la técnica de cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) en el laboratorio de materiales del IPCE, pueden ser de naturaleza lipófila e hidrófila.

Los primeros son:

Aceites secantes y grasas: compuestos que se encuentran en muestras de aglutinantes y recubrimientos en pinturas (aceites secantes), de restos de comida (en cerámica), de materiales de embalsamamiento, etc.

Ceras: componentes presentes en muestras de recubrimientos en pinturas, consolidantes, adhesivos, protectores de metales, barnices mates, etc.

Resinas: compuestos que se hallan en barnices, adhesivos, consolidantes, etc.

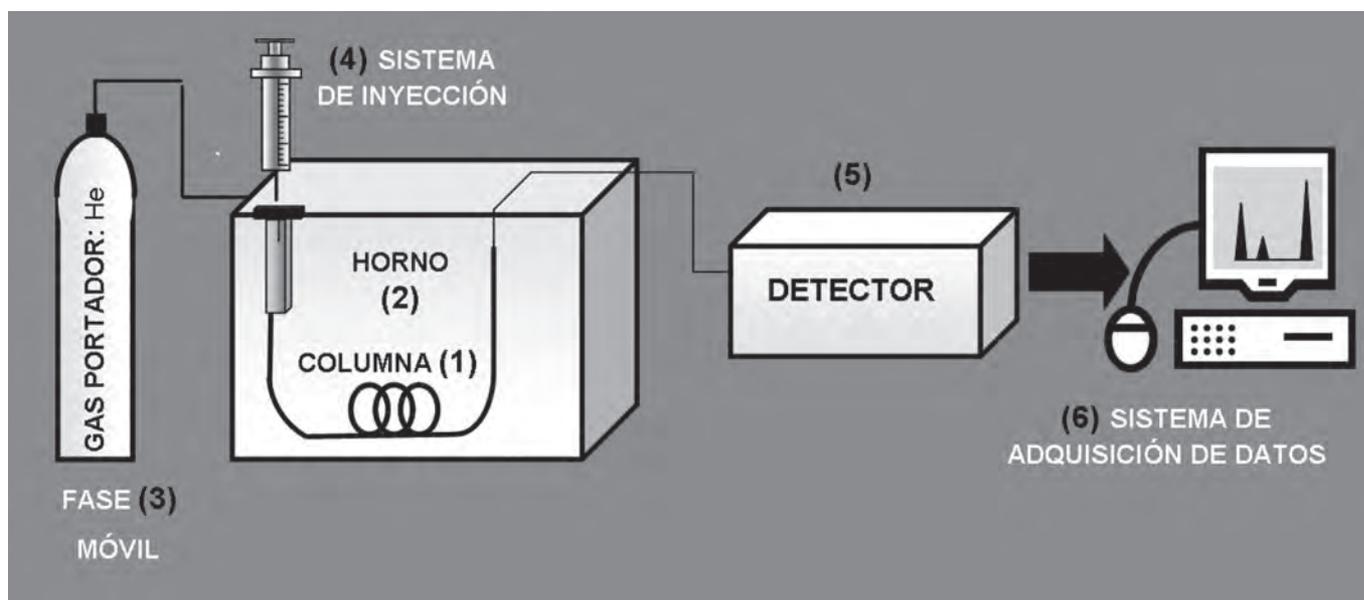


Figura 4. Principales componentes de un equipo de cromatografía de gases (GC).

Materiales bituminosos: compuestos localizados en muestras de impermeabilizaciones, de material de embalsamamiento, adhesivos, etc.

Al realizar el análisis GC-MS se determina el compuesto mayoritario que identifica el material orgánico lipófilo. Así pues, se identificarán aceites secantes, grasas, ceras, resinas o materiales bituminosos y posteriormente en base a la presencia y/o a la proporción de estos compuestos mayoritarios se determinará el tipo de material llegando a identificar el tipo de aceite (lino, nueces, adormideras), de resina (colofonia, almáciga.....) de cera (abeja, carnauba...) y de materiales bituminosos (asfalto, betún...).

En cuanto a los materiales de naturaleza hidrófila se tiene:

Hidratos de Carbono: presentes en muestras de adhesivos y soportes en textiles, madera y papel, aglutinantes en acuarela, etc.

Con el análisis de GC-MS se obtendrá información sobre la presencia de monosacáridos, disacáridos o polisacáridos en las muestras y a partir de ésta se llegarán a caracterizar las gomas vegetales, almidones y celulosas.

La identificación de estos compuestos (orgánicos lipófilos e hidrófilos) permite obtener información de los materiales utilizados por cada autor y su localización en una época, además de la técnica de ejecución y de los materiales añadidos en intervenciones posteriores. También es interesante caracterizar estos materiales para determinar las alteraciones producidas en los bienes culturales, siendo esto útil para proceder a su restauración y conservación.

50 Este tipo de muestras suele presentar mezclas complejas de los compuestos mencionados anteriormente; además los materiales originales suelen estar acompañados de productos de degradación o de anteriores intervenciones o, incluso, de materiales poliméricos procedentes de intervenciones recientes. Otro punto importante a tener en cuenta es que debido a que las muestras proceden de bienes culturales sólo se dispone de cantidades muy pequeñas de muestra. Aún teniendo en cuenta esta problemática, la GC-MS permite, en la mayoría de los casos, la identificación de estos materiales.

El IPCE cuenta con un equipo Shimadzu GCMS QP5050 de cromatografía de gases acoplado a un detector de espectrometría de masas (GC-MS) con analizador de cuadrupolo, ionización de impacto electrónico (EI) e inyector de muestras automático modelo AOC 20i, donde se ha optimizado un método analítico mediante el empleo de patrones de los materiales anteriormente indicados. La aplicación de este método permite obtener resultados al trabajar con pequeñas cantidades de muestra (alta sensibilidad) y separar sustancias diversas e identificarlas.

Se parte de extractos sólidos o extractos de disolventes orgánicos de hisopos. El protocolo seguido en el IPCE para la preparación de las muestras dependerá de la naturaleza de muestra.

Cuando la muestra llega al laboratorio se realiza el análisis espectroscópico FTIR, el cual dará información sobre la naturaleza del material presente en la muestra y a partir de

este momento se aplicarán otras técnicas si es necesario (tal y como se explicó en la figura 1). En algunos casos, debido a la pequeña cantidad de muestra disponible, se realiza directamente el análisis por GC-MS, generalmente en muestras pictóricas donde según la experiencia del restaurador y conocimiento del contexto histórico del autor se puede predecir el tipo de aglutinante utilizado. Para preparar la muestra para su análisis mediante GC-MS se procede a la separación de capas donde se encuentra el aglutinante, adhesivo o recubrimiento a analizar. Esto se realizará con ayuda de un microscopio estereoscópico y un bisturí. Una vez separado el extracto de muestra a analizar se realiza un tratamiento previo de la muestra, antes de proceder al análisis, para transformar los compuestos presentes en compuestos volátiles y que así puedan ser analizados por cromatografía de gases.

Este tratamiento consiste en un proceso de derivación, para lo que se utilizan reactivos de metilación (para sustancias lipófilas) y de sililación (sustancias hidrófilas), obteniéndose como resultado derivados volátiles. En algunos casos, como en la identificación de hidratos de carbono, es necesaria una etapa previa de hidrólisis donde los hidratos de carbono, con alto peso molecular, se fragmentan antes de proceder a la derivación.

En el caso de muestras de naturaleza lipófila, se deriva (metilación) empleando una sal de amonio cuaternario como agente de derivación, concretamente una disolución metanólica 0.2 M del m-trifluorofenil de trimetilamonio hidróxido (Meth-PrepII).

En el caso de muestras de origen hidrófilo, se procede a una hidrólisis en medio ácido y posteriormente a una derivación (sililación) utilizando como agente derivatizante una disolución 2:1 de trimetilclorosilano: hexametildisilazano (TMCS: HMDS).

Las condiciones cromatográficas, empleadas para la separación e identificación de compuestos lipófilos e hidrófilos, utilizadas en el IPCE se detallan en la tabla 1, donde la única variación entre ambas aplicaciones se encuentra en la rampa de temperatura (gradiente) aplicada. Además se incluye un cromatograma patrón de aceite de lino (lipófilo) y uno de una mezcla patrón de monosacáridos (hidrófilo), a modo de ejemplo.

El tiempo transcurrido entre la inyección de la muestra y la aparición del pico del compuesto en el detector es el tiempo de retención (T_R) y es característico para cada compuesto.

Como resultado del análisis se obtiene un cromatograma que será la representación de una función de la concentración del soluto frente al tiempo de retención. Aparecerán los picos cromatográficos correspondientes a cada compuesto separado de la mezcla inicial, a distintos tiempos según la afinidad de éste por la fase estacionaria (columna). Con el espectrómetro de masas, se obtiene un espectro de masas característico de cada compuesto orgánico separado.

La comparación de los T_R y de los espectros de masas de cada sustancia de la mezcla, con los resultados obtenidos al analizar los patrones se identifica cada sustancia. El estudio de los espec-

| | | MATERIALES DE NATURALEZA LIPÓFILA | | | MATERIALES DE NATURALEZA HIDRÓFILA | | |
|--|-----------------------------|---|------------------|--------------|---|------------------|--------------|
| GC | Columna | SGE. HT50.1 (L=25m, d=0.31mm, e=0.1µm) | | | | | |
| | Fase móvil (caudal) | HELIO (14.5 ml/min) | | | | | |
| | Temperatura inyector | 280°C, | | | | | |
| | Modo de inyección | SPLIT | | | | | |
| | Gradiente de Temperatura | Rampa (°C/min) | Temperatura (°C) | Tiempo (min) | Rampa (°C/min) | Temperatura (°C) | Tiempo (min) |
| | - | 100 | 50 | - | 120 | 5 | |
| | 15 | 150 | 1 | 2 | 200 | 0 | |
| | 7 | 300 | 20 | 15 | 285 | 5 | |
| MS | Temperatura de la interfase | 300°C | | | | | |
| | Intervalo de m/z | 60-550 | | | | | |
| | Modo de adquisición | SCAN | | | | | |
| Cromatogramas de patrones obtenidos en condiciones óptimas | | <p>Patrón de aceite de lino, mezcla de ésteres: dimetilsuberato, dimetilacetato, dimetisebacato, metilpalmitato, metiloleato, metilstearato</p> | | | <p>Mezcla patrón de monosacáridos: D-Arabinosa, L-Ramnosa, Fucosa, D-Xilosa, Ácido D-Glucurónico, ácido D-Galacturónico, Manosa, D-Galactosa, Glucosa</p> | | |

Tabla 1. Condiciones instrumentales empleadas en GC-MS para el análisis de materiales de naturaleza lipófila e hidrófila.

tros de masas de los compuestos desconocidos que no coincidan con los patrones analizados permite elucidar sus estructuras, ya que cada compuesto presenta un espectro de masas característico y único.

Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

La cromatografía de líquidos de alta resolución o HPLC utiliza una fase móvil líquida interactiva y una fase estacionaria sólida constituida por un sólido pulverizado empaquetado en una columna. La separación de los analitos o componentes de la mezcla se produce como resultado de las interacciones específicas de los analitos con ambas fases. Esta fase móvil interactiva, junto con la posibilidad de elegir entre una gran variedad de fases estacionarias y el hecho de que esta técnica no esté limitada por la volatilidad o la estabilidad térmica de la muestra, hacen que mediante HPLC se puedan separar una gran variedad de mezclas complejas de distintos productos. Adicionalmente, posee una elevada versatilidad para su acoplamiento con diferentes tipos de detectores, por lo que se puede considerar una técnica de separación indispensable en un laboratorio de análisis de materiales.

Los principales componentes de un cromatógrafo de líquidos son los que aparecen de forma esquemática en la figura 5: (1) contenedores para fases móviles; (2) suministrador de fase móvil: bomba de alta presión; (3) sistema de introducción de muestra: inyector; (4) fase estacionaria: columna; (5) detector; (6) sistema

de adquisición y tratamiento de datos. La fase móvil se bombea a través de todo el sistema al establecer el caudal de trabajo. En un momento determinado, se inyecta la muestra en el sistema y es arrastrada por la fase móvil hasta la cabeza de la columna cromatográfica. Aquí se produce la separación de los componentes de la muestra y, en base a las diferentes interacciones de cada uno de ellos, van eluyendo escalonadamente. A continuación, llegan al detector que registra un cambio en la señal respecto a la señal de la fase móvil lo que se representa mediante un pico. Al igual que en cromatografía de gases, la representación de la señal frente al tiempo de retención de cada compuesto es lo que se conoce como cromatograma. La señal eléctrica generada por el detector se transforma en información analítica mediante un sistema de adquisición y tratamiento de datos informático. Toda esta información será posteriormente estudiada e interpretada por el personal especializado en esta técnica.

Un sistema de HPLC puede tener acoplado detectores muy diversos, cada uno de los cuales nos dará diferente información estructural de cada compuesto separado. En el campo del estudio de los bienes culturales, los detectores para HPLC más empleados son los detectores basados en la absorción de radiación UV-vis y en particular el detector conocido como fotodiodo array o diodo array (DAD). Este tipo de detector trabaja simultáneamente a longitudes de onda en el intervalo entre 200 y 600-900 nm (el valor máximo de longitud de onda al que puede trabajar depende del modelo de diodo array), proporcionándonos de cada compuesto separado su espectro de absorción en el intervalo de

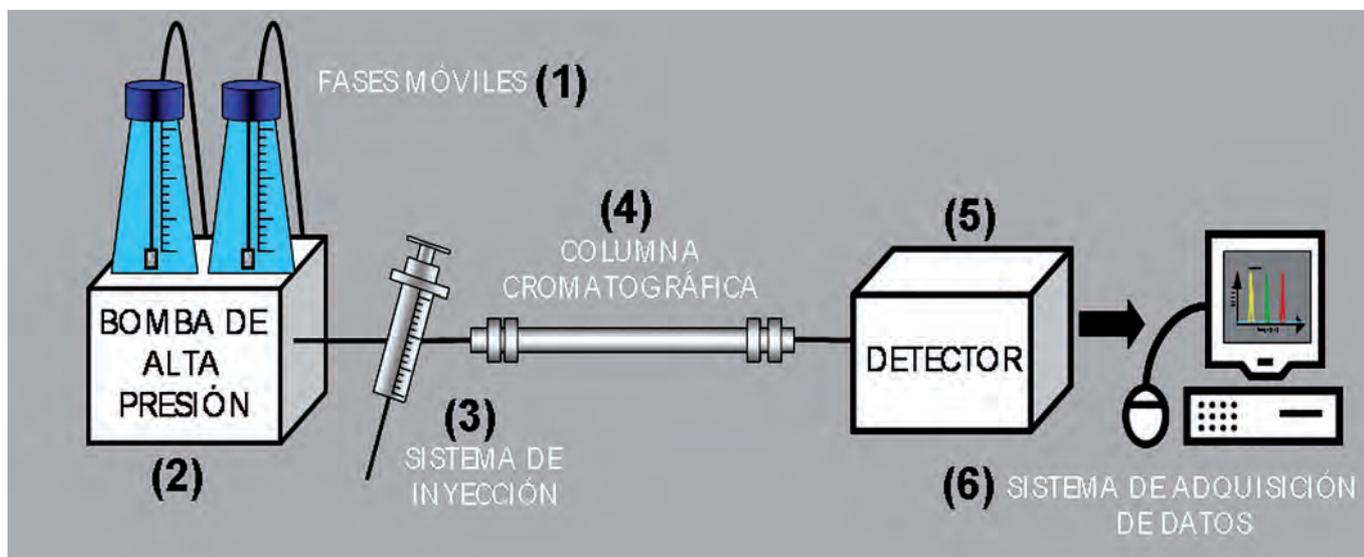


Figura 5. Principales componentes de un equipo de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

longitudes onda de trabajo. Actualmente, los equipos de HPLC también suelen tener acoplado en línea otro detector, un espectrómetro de masas, el cual proporciona el espectro de masas de cada compuesto separado. Este espectro de masas constituye la "huella dactilar" de cada compuesto lo que permite la identificación inequívoca de los compuestos presentes en la muestra y, como consecuencia, la identificación del material analizado.

52

El IPCE cuenta en sus laboratorios con un sistema de HPLC compuesto de una bomba (*Modelo 600E*) e inyector automático (*Modelo 717*), acoplado a un detector DAD (*Modelo 996*), todos de *Waters Chromatography* (USA). Las aplicaciones que esta técnica tiene en el estudio de los materiales que forman parte de los bienes culturales son fundamentalmente dos: (a) análisis de materiales proteicos [3,4] y (b) análisis de colorantes naturales [5-6789]. La identificación de estos materiales es importante no sólo por la información que ofrece para ayudar en la datación y localización del objeto, sino porque proporciona una información inestimable para la aplicación de los tratamientos apropiados de restauración y conservación. Igualmente, puede ayudar a establecer los posibles procesos de degradación que han sufrido las proteínas y colorantes, así como cuáles son los factores de riesgo para su deterioro.

Previamente al análisis de este tipo de muestras, en el IPCE se han puesto a punto los métodos de HPLC-DAD correspondientes para cada tipo de análisis mediante procesos de optimización de las variables implicadas. Los parámetros críticos a optimizar cuando se pone a punto un método de HPLC son el tipo de fase estacionaria de la columna cromatográfica y sus dimensiones, la composición de la fase móvil, la temperatura de la columna, el caudal aplicado y el modo de elución empleado. Este modo de elución puede ser isocrático, cuando la composición de la fase móvil permanece constante desde el momento de la inyección de la muestra hasta que ha pasado el tiempo necesario para que todos los componentes de la muestra se separen y eluyan de la

columna, o por gradiente cuando la composición de la fase móvil se va modificando de menor a mayor poder de elución durante el tiempo necesario para la separación. En la mayoría de los casos, al trabajar con muestras muy complejas, es necesario realizar el análisis en modo gradiente.

Para llevar a cabo estos procesos de optimización se han empleado patrones de los materiales que nos podemos encontrar en las muestras que nos ocupan. Los resultados obtenidos para estas muestras de referencia o patrones están incorporados a la base de datos del equipo cromatográfico, de forma que cada compuesto detectado viene caracterizado por dos parámetros: su tiempo de retención y su espectro de UV-vis. La comparación de los espectros de absorción obtenidos en el análisis de las muestras con los espectros de la biblioteca generada por el analista de aquellos compuestos cuyo tiempo de retención concuerde con el de los patrones, habitualmente, da una identificación efectiva de los componentes de la muestra. En otras ocasiones, esta comparación no da resultados positivos y hay que realizar una interpretación del espectro de UV-vis para elucidar la estructura del compuesto no identificado. Este estudio puede resultar complicado ya que compuestos similares dan espectros de UV-vis muy semejantes, de forma que en algunos casos solo se puede incluir al compuesto no identificado dentro de un grupo químico general sin poder realizar una identificación inequívoca.

Análisis de los materiales proteicos mediante HPLC-DAD

Los materiales que nos podemos encontrar en los bienes culturales formados por proteínas son habitualmente tres: cola animal, clara/yema o huevo entero y caseína. Se han empleado desde la antigüedad principalmente como aglutinantes aunque también se pueden encontrar como adhesivos, consolidantes o recubrimientos. Estos materiales se diferencian en la proteína mayoritaria que contienen. Cada proteína está formada por una secuencia propia

de aminoácidos, tanto en lo que se refiere a la proporción como al tipo de cada aminoácido constituyente. Por tanto, estos tres materiales se pueden identificar y diferenciar en base a los aminoácidos presentes y su proporción en la muestra.

La muestra a analizar por HPLC-DAD puede llegar derivada tras un análisis de FTIR que muestre la presencia de una proteína y se requiera la identificación de este material proteico, o puede llegar sin este análisis previo, si la información aportada por el restaurador/conservador hace sospechar de la presencia de un material proteico y no se dispone de cantidad de muestra suficiente para realizar más de un análisis. Cuando el objetivo sea conocer el material proteico presente como aglutinante en una capa pictórica, es necesario separar la capa en cuestión, operación que se realiza bajo el microscopio estereoscópico con la ayuda de un bisturí. En cambio si la muestra a analizar procede de un recubrimiento, adhesivo o consolidante, tras el raspado del mismo y una limpieza general bajo el microscopio estereoscópico, la muestra está preparada para su análisis mediante HPLC-DAD.

En primer lugar, se lleva a cabo un tratamiento previo que consiste, fundamentalmente, en su *hidrólisis* mediante vapor de ácido clorhídrico de forma que la proteína quede dividida en sus aminoácidos constituyentes, y en la *derivación* de los aminoácidos

hidrolizados. Este proceso de derivación es necesario porque los aminoácidos poseen una estructura no detectable con un detector diodo array como el que se emplea en el IPCE. Mediante la adición de un reactivo que absorbe en la región de UV-vis, normalmente PITC (fenilisotiocianato), el cual se une a un grupo químico de cada aminoácido, éstos se transforman en derivados, ahora sí, detectables por el diodo array. Tras este tratamiento disponemos de una mezcla de aminoácidos preparados para ser separados y detectados mediante HPLC-DAD. La separación cromatográfica de los posibles aminoácidos de la muestra se ha optimizado empleando una mezcla patrón con los 18 aminoácidos que nos podemos encontrar en este tipo de muestras y posteriormente se han analizado patrones de diferentes tipos de cola animal, yema de huevo, clara de huevo, caseína, para conocer la distribución de aminoácidos de cada uno de ellos. En la tabla 2 aparecen las condiciones experimentales óptimas empleadas en el IPCE para este tipo de análisis.

La identificación de los materiales proteicos se considera un análisis de rutina en el IPCE y es fundamental contar con estos resultados para cualquier proyecto de restauración o conservación. En determinadas ocasiones, no es posible llegar a resultados concluyentes debido esencialmente a las siguientes cuestiones: (1)

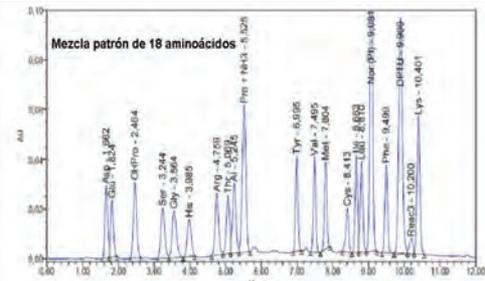
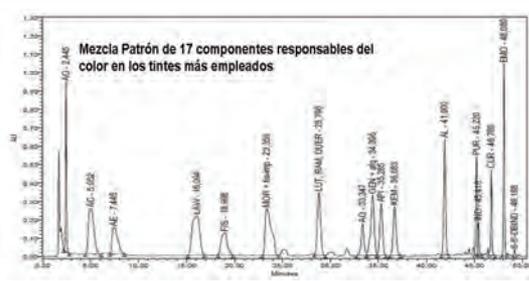
| | Materiales proteicos | Colorantes naturales |
|--|--|--|
| Columna | Picotag® (3.9 x 150 mm) | Luna C18(2)® (2.1 x 150 mm, 5 µm) |
| Caudal | 1 mL min ⁻¹ | 0.3 mL min ⁻¹ |
| Fases móviles | A = Tampón fosfato B = Acetonitrilo C = Agua | A = Ácido trifluoroacético al 0.1% B = Acetonitrilo |
| Modo de operación | Gradiente | Gradiente |
| Temperatura de la columna | 30 °C | 35 °C |
| Volumen de inyección | 10 µL | 10 µL |
| Condiciones detector (DAD) | Intervalo longitudes de onda Velocidad de escaneo Resolución | Intervalo longitudes de onda Velocidad de escaneo Resolución |
| | 200-400 nm 1 scan seg ⁻¹ 1.2 nm | 200-600 nm 1 scan seg ⁻¹ 1.2 nm |
| Cromatograma de una mezcla patrón obtenido en las condiciones instrumentales arriba indicadas |  <p>Mezcla patrón de 18 aminoácidos</p> <p>Asp: ácido aspártico; Glu: ácido glutámico; OHPro: hidroxiprolina, Ser: serina; Gly: glicina; His: histidina; Arg: arganina; Thr: treonina; Al: alanina; Pro: prolina; NH₃: amoniaco (residuo derivatización); Tyr: tirosina, Val: valina; Met: metionina; Cys: cisteína; Ile: isoleucina; Leu: Leucina; Nor (PI): norleucina (patrón interno), Phe: fenilalanina; DPTU + Rec 3: residuo derivatización; Lys: lisina.</p> |  <p>Mezcla Patrón de 17 componentes responsables del color en los tintes más empleados</p> <p>AG: Ácido gálico; AC: ácido carmínico; AE: ácido elálgico; LAW: lawsona; FIS: fisetina; LUT, RAM, QUER: luteolina, ramnetina y quercetina; AQ: ácido quermésico; GEN: genisteína; API: apigenina; KEM: kempferol; AL: alizarina; PUR: purpurina; IND: indigotina; CUR: curcumina; EMO: emodina; 6-6'-DBIND: 6-6'-dibromindigotina.</p> |

Tabla 2. Condiciones instrumentales empleadas en HPLC-DAD para el análisis de materiales proteicos y colorantes naturales.

en algunas circunstancias la concentración de los aminoácidos en la muestra, debido al pequeño tamaño de la misma, está por debajo de los límites de detección del método analítico; (2) la presencia de materiales degradados que dan una composición de aminoácidos distinta a la del material original; (3) posibles interferencias de algunos pigmentos, que influyen en la señal de algunos aminoácidos cambiando la distribución original del material; (4) empleo de mezclas de materiales que dan lugar a una distribución de aminoácidos muy complicada de elucidar.

Análisis de colorantes naturales mediante HPLC-DAD

Los materiales donde podemos encontrar colorantes orgánicos dentro del campo de los bienes culturales son los tintes empleados en tejidos históricos y las lacas utilizadas en capas pictóricas. Existen multitud de colorantes naturales empleados en los bienes culturales que pueden tener tanto un origen vegetal como animal. En función de su estructura química se pueden clasificar en carotenoides (anaranjados), antraquinonas (rojos), flavonoides (amarillos), antocianos (rojos y violetas), indigoides (azules y violetas) y taninos (marrones y negros). A modo de ejemplo, podemos mencionar algunos de los colorantes naturales más comunes: cochinilla, granza, gualda, índigo, palo de brasil, quermes, bayas persas, azafrán, arlera, agallas de roble o zumaque [10].

Las muestras a analizar pueden proceder de tejidos históricos o de capas pictóricas de pinturas o documentos gráficos. En el primer caso, tras la toma de muestra se realiza un examen bajo el microscopio estereoscópico para observar la composición de la fibra y detectar fenómenos de decoloración e impurezas. En el caso de las lacas, es necesario separar o raspar la capa en cuestión, operación que se realiza bajo el microscopio estereoscópico con la ayuda de un bisturí. Las muestras se tratan, sin examen previo mediante FTIR, para su análisis mediante HPLC-DAD y/o cromatografía en capa fina (TLC), técnica que expondremos en el siguiente apartado.

El tratamiento que se aplica en el IPCE incluye una etapa de hidrólisis y otra de extracción del colorante. La hidrólisis tiene como objeto liberar el colorante del tejido o del soporte empleado en la laca y, una vez liberado, el colorante se extrae en un disolvente adecuado antes de su inyección en el sistema cromatográfico. Concretamente en el IPCE se aplica un método de extracción para colorantes naturales presentes en tejidos históricos que incluye la hidrólisis con ácido fórmico al 5% en metanol durante 30 minutos a 45-50 °C y la posterior extracción del colorante en una disolución de dimetilformamida:metanol (50:50). El extracto se analiza siguiendo las condiciones experimentales detalladas en la tabla 2.

Cuando tengamos una muestra problema y la analicemos aplicando este método, tendremos distintos picos cromatográficos caracterizados por su tiempo de retención y su espectro de UV-vis. Algunos de ellos serán identificados por comparación con los resultados obtenidos al analizar los patrones, pudiendo así identificar el colorante. Asimismo, obtendremos

picos correspondientes a compuestos desconocidos, los cuales, tras el estudio de su espectro de UV-vis podrán ser englobados dentro de un grupo químico, antraquinonas, flavonoides, indigoides, etc., pero no ser identificados inequívocamente.

Las limitaciones que presenta este tipo de análisis están relacionadas, por un lado, con el pequeño tamaño de muestra, no detectándose ningún compuesto en el análisis por no tener concentración suficiente y, por otro, con la escasez o baja disponibilidad de patrones de colorantes naturales con los que comparar los resultados obtenidos para las muestras.

Cromatografía en Capa Fina (TLC)

La cromatografía en capa fina fue la primera técnica cromatográfica empleada para el análisis de colorantes naturales en el IPCE. En este caso la fase estacionaria es una placa cubierta de un material sólido finamente molido y fijado a la placa. La fase móvil es un disolvente o mezcla de disolventes (eluyente) que sube por la placa por capilaridad arrastrando los componentes de la muestra, pinchada en el inferior de la placa. La separación se produce por la distinta afinidad de cada componente por el eluyente y la fase estacionaria, obteniéndose diferentes manchas (compuestos) en la línea recorrida por cada muestra desde el inferior de la placa hasta el frente o punto de finalización de la elución. La detección se realiza directamente por el color o fluorescencia de las manchas al colocar la placa bajo una radiación UV. En ocasiones se requiere el uso de un revelador, que se pulveriza sobre la placa, para poder observar las manchas. En cada placa además de la muestra se pinchan una serie de patrones seleccionados en función del color y procedencia de la muestra. La identificación se realiza por comparación entre las manchas obtenidas para la muestra y las obtenidas para los patrones. Es una técnica rápida, de bajo coste y relativamente sencilla, aunque requiere personal especializado. Debido a que no ofrece información estructural sobre los compuestos separados y a que su poder de separación es bajo, su empleo en el IPCE se complementa con los análisis mediante HPLC-DAD.

Aplicaciones

A continuación se presentan varios ejemplos de los resultados obtenidos al aplicar algunos de los métodos analíticos expuestos en este trabajo.

Capa de preparación de una pintura sobre tabla

La espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier se utiliza para la identificación de las sales existentes en las capas de preparación. En este caso, no es necesario el análisis complementario mediante otra técnica para confirmar el resultado.

En el análisis de la capa de preparación blanca de una pintura sobre tabla procedente del Museo de Orense, se ha obtenido como resultado carbonato de calcio puro (Fig. 6). El carbonato

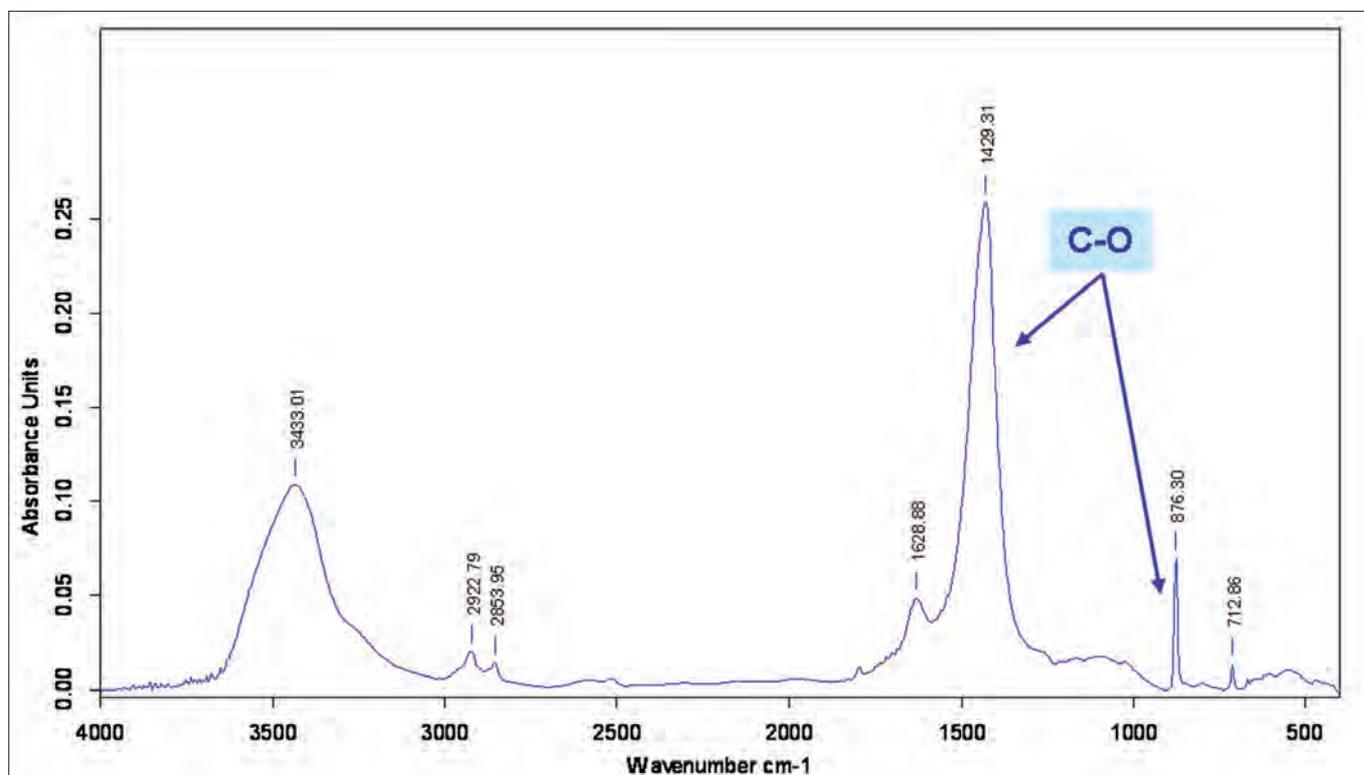


Figura 6. Espectro de FTIR de la capa de preparación blanca de una pintura sobre tabla procedente del Museo de Orense identificada como carbonato de calcio.

de calcio presenta una banda intensa entre 1550-1350 cm^{-1} (1430 cm^{-1}), correspondiente a las vibraciones de tensión de los enlaces C-O. Las bandas que aparecen a 870 cm^{-1} y 712 cm^{-1} se deben a las vibraciones de flexión de los enlaces C-O.

Recubrimiento de una reja de soporte metálico

Con el objetivo de determinar el recubrimiento de la reja del Coro de la Catedral de Albarracín, se tomaron varios hisopos en distintos barros. En primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis mediante FTIR. Las bandas de absorción que aparecen en el espectro de infrarrojos indican que se trata de una resina natural diterpénica (Fig. 7). En el espectro se aprecia una banda intensa entre 1715 - 1695 cm^{-1} debida a los enlaces del grupo carbonilo (C=O); por otro lado, las bandas situadas en la región de la huella dactilar (1500 - 500 cm^{-1}) presentan un perfil general característico de una resina del grupo de las coníferas. Sin embargo, este análisis no permite diferenciar la familia a la que pertenece. Por tanto, es necesario un segundo análisis mediante una técnica complementaria como la cromatografía de gases - espectrometría de masas para confirmar la familia y especificar su tipo. En la figura 7 se puede observar el cromatograma de GC-MS obtenido, donde se detectan los picos cromatográficos correspondientes al metil-dehidroabietato y al metil 7-oxodehidroabietato que corroboran la presencia de una resina del grupo de las coníferas. El pico cromatográfico con un tiempo de retención de 17,46 minutos correspon-

de a un compuesto identificado por su espectro de masas como ferruginol y/o totarol (isómeros) cuya presencia es característica de las resinas pertenecientes a la familia de las cupresáceas [11].

Recubrimiento sintético de una pieza de plata perteneciente a una custodia

En el laboratorio del IPCE, se analizó el recubrimiento de una pieza de plata, concretamente la Custodia de los Corporales de Daroca. Para ello, se analizaron los extractos de los hisopos correspondientes empleando como técnica general la espectrometría de FTIR. El espectro de infrarrojos obtenido muestra que las bandas de absorción son las vibraciones características del nitrato de celulosa (Fig. 8), donde también se observa la banda correspondiente al aditivo. Actualmente el análisis de polímeros sintéticos en el laboratorio del IPCE se realiza únicamente por espectrometría de FTIR. En el nitrato de celulosa destacan las siguientes bandas: 1653 cm^{-1} vibración de tensión del enlace N=O, 1279 cm^{-1} vibración de tensión del enlace N-O, 1070 cm^{-1} vibración de flexión del enlace C-O, 841 cm^{-1} vibración de flexión del enlace N-O. La banda a 1730 cm^{-1} se asigna a la vibración del enlace carbonilo (C=O) del aditivo [12].

La identificación de nitrato de celulosa se puede atribuir al uso del mismo como adhesivo, recubrimiento y consolidante de metales; en este caso es posible que se haya aplicado un producto nitrocelulósico como protector de la pieza de plata.

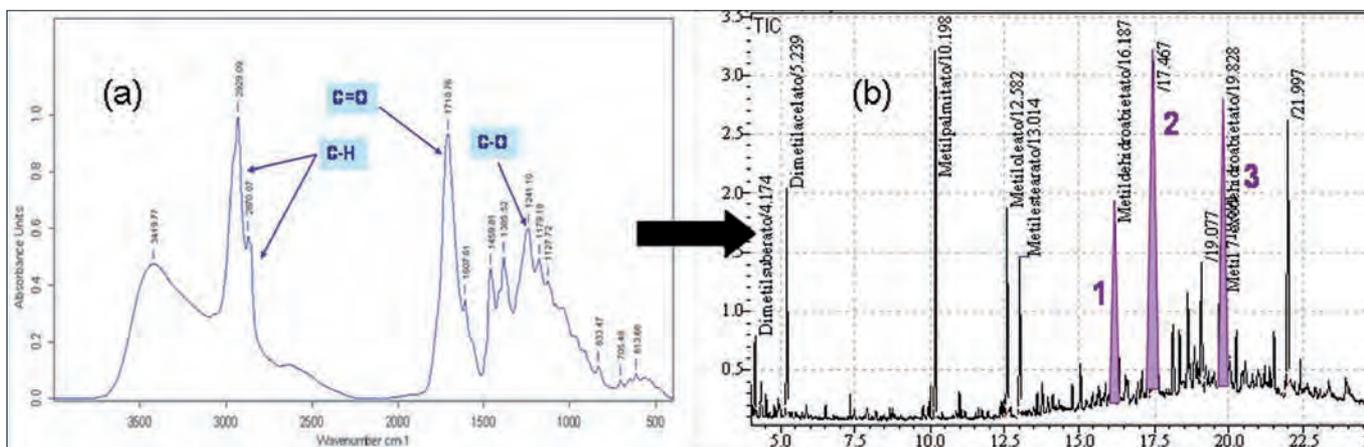


Figura 7. Análisis del recubrimiento de la reja del Coro de la Catedral de Albarracín. (a) Espectro de FTIR. Las bandas de absorción indican que se trata de una resina diterpénica. (b) Cromatograma CG-MS. Los picos cromatográficos indican que se trata de una resina diterpénica del grupo de las coníferas y de la familia de las cupresáceas. Compuestos identificados: 1= metildehidroabietato, 2 = ferruginol y/o totarol, 3= metil 7-oxohidroabietato.

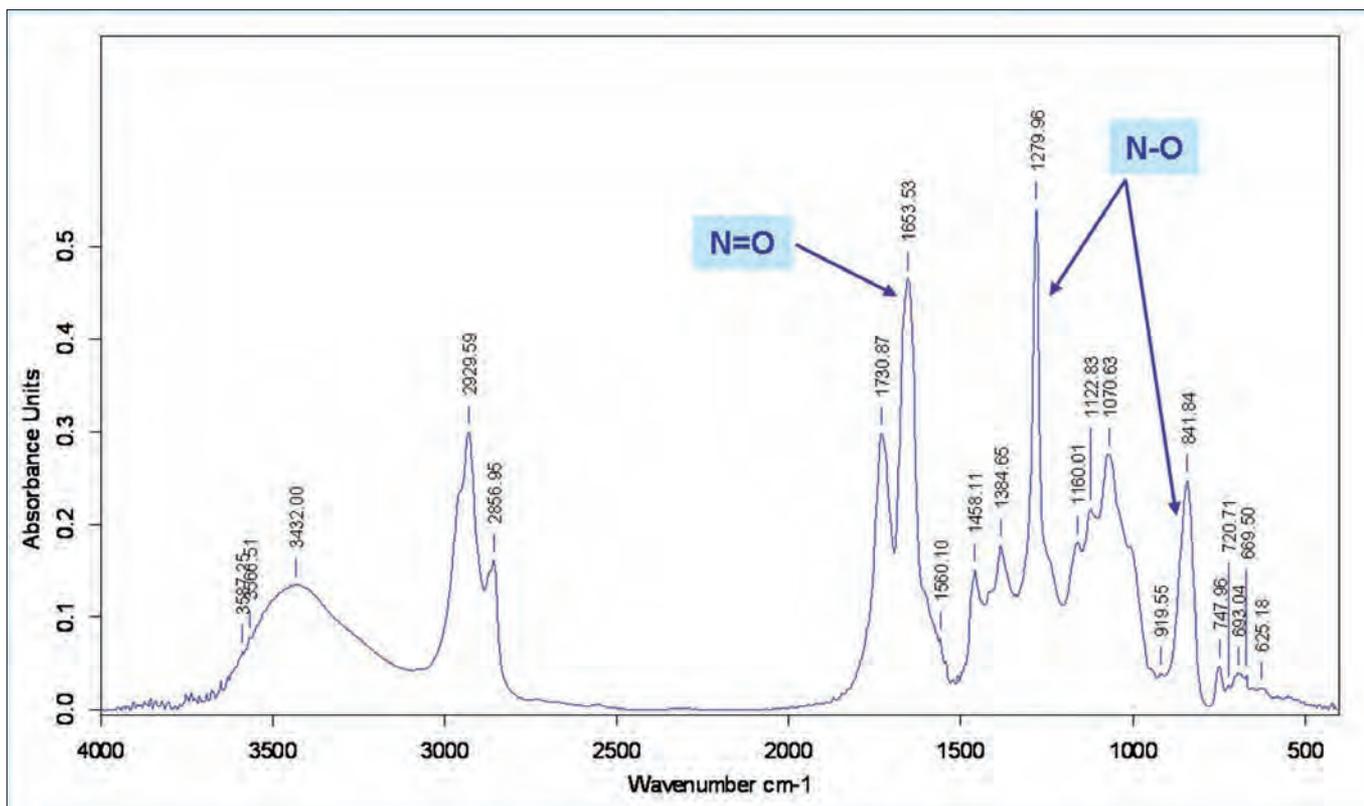


Figura 8. Espectro de FTIR del recubrimiento aplicado sobre la Custodia de los Corporales de Daroca. Las bandas de absorción observadas indican que se trata de un producto nitrocelulósico.

Pieza de indumentaria de un ajuar mortuorio

Un ejemplo de análisis de colorantes mediante HPLC-DAD corresponde al análisis de una muestra de una cinta roja perteneciente al ajuar mortuorio, datado en el s. XIV, de Doña Teresa Gil (Conven-

to del Santi Spiritus, Zamora). El análisis (Fig. 9) revela la presencia de un compuesto mayoritario identificado por su tiempo de retención y espectro de UV-vis como ácido quermésico; además se detectan otros compuestos minoritarios identificados como ácido gálico, ácido flavoquermésico, indigotina y un compues-

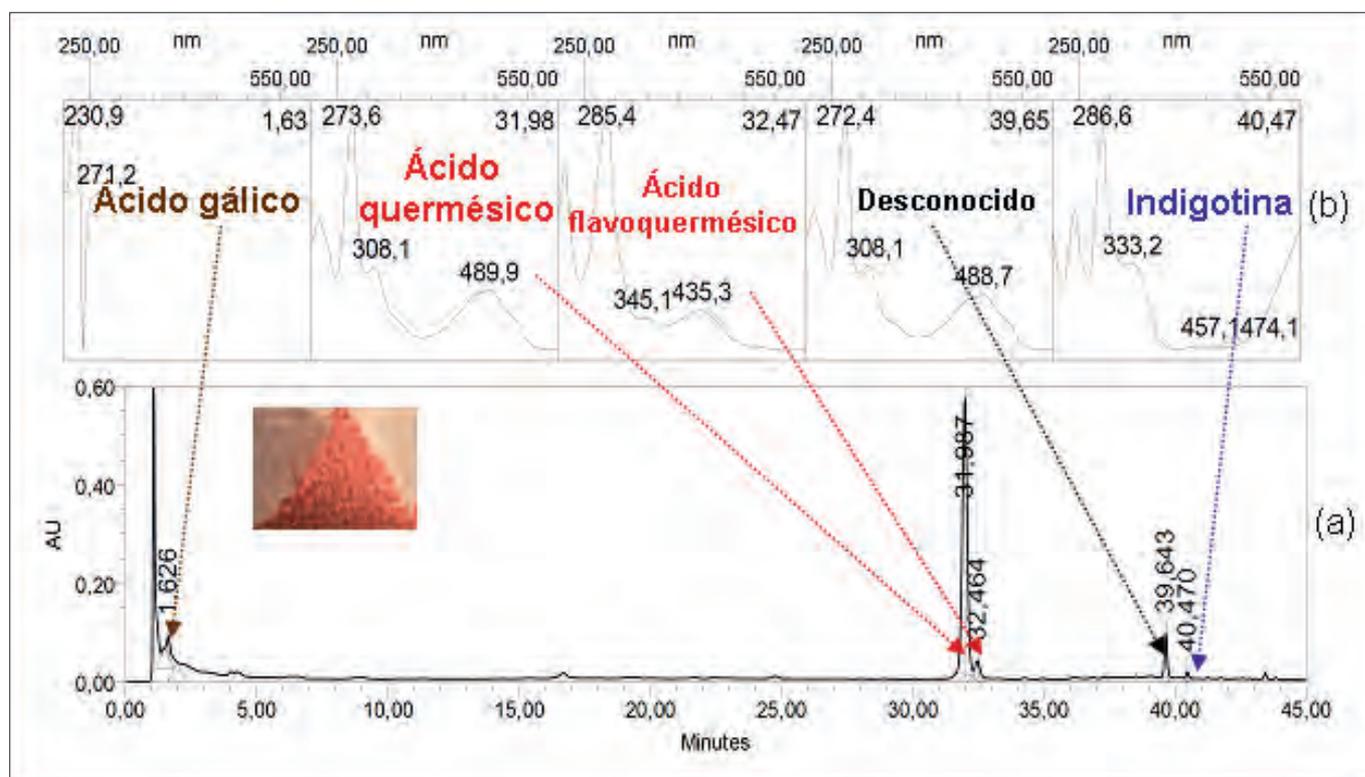


Figura 9. (a) Cromatograma obtenido mediante HPLC-DAD en el análisis de una muestra de una cinta roja, perteneciente al ajuar mortuario de Doña Teresa Gil (Convento del Santi Spiritus, Zamora, s. XIV). (b) Espectros de UV-vis para cada compuesto detectado en el cromatograma y su identificación.

to desconocido. El ácido quermésico y el ácido flavoquermésico son los componentes principales del tinte quermes, que se obtiene de las hembras secas del insecto *Kermes vermilio*. El quermes fue un tinte muy importante, de coste elevado, empleado desde la antigüedad hasta el s. XVI, momento en que comienza a ser sustituido paulatinamente por la recién descubierta cochinilla americana, con un color rojo más brillante y mayor contenido de tinte, lo que se traduciría en un menor coste del mismo. El ácido gálico es un componente de los taninos hidrolizables, compuestos presentes, entre otros materiales, en las agallas de roble [10]. Según la bibliografía, las agallas se empleaban como mordientes y para el “engorde de la seda”. Asimismo, está documentado que las agallas también se utilizaban en el proceso de tinción con quermes para, además de engordar la seda, ayudar en la fermentación del insecto. La indigotina es el componente mayoritario en tintes azules como el índigo procedente de distintas especies de *Indigofera* sp., originarias de la India, África, Asia y Latino América, o como la hierba pastel procedente de la *Isatis tinctoria* L., originaria de Europa, norte de África, Turquía, Indochina, China, Corea y Japón [13], no pudiendo discernir de que especie procede el tinte empleado. En esta muestra la indigotina se detecta en concentraciones muy pequeñas lo que hace pensar que sólo se ha aplicado con objeto de ofrecer una tonalidad más violácea u oscura. Finalmente, el compuesto desconocido presenta un espectro de UV-vis correspondiente a una antraquinona,

familia de compuestos químicos con estructura similar y en la que están incluidos el ácido quermésico y flavoquermésico, por lo que es lógico pensar que este compuesto proceda del tinte quermes. Como puede observarse, la información obtenida con un sólo análisis de HPLC-DAD permite obtener datos valiosos y útiles, que ayudan en la datación de la obra, en el conocimiento y constatación de las técnicas de teñido empleadas en cada lugar y época y sobre la composición de los tintes naturales.

Conclusiones

Con la metodología analítica basada en la espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier y las técnicas cromatográficas aquí descritas el Área de Laboratorios – Sección de Análisis de Materiales del IPCE resuelve, en la mayoría de los casos, la caracterización de barnices, recubrimientos, adhesivos, aglutinantes, preparaciones, tintes y lacas, presentes en muchos de los bienes culturales estudiados en las distintas áreas de conservación y restauración del IPCE.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y la colaboración de todo el personal del Área de Laboratorios – Sección de Análisis de Materiales para la elaboración de este capítulo.

Bibliografía

58

SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.: *Análisis Instrumental*, Mexico: Mc Graw Hill, 1989.

DERRICK, Michele R.; STULIK, Dusan; LANDRY, James M.: *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*, Los Angeles (California): The Getty Conservation Institute, 1999.

CHECA-MORENO, Ramón; MANZANO, Eloisa; MIRÓN, Gloria; CAPITAN-VALLEY, Luis Fermín: "Comparison between traditional strategies and classification technique (SIMCA) in the identification of old proteinaceous binders", *Talanta*, 2008, 75 (3), pp.: 697-704.

HALPINE, Susan M.: "Amino acid analysis of proteinaceous media from Cosimo Tura's 'The Annunciation with saint Francis and Saint Louis of Toulouse'", *Studies in Conservation*, 1992, 37, pp.: 22-38.

HALPINE, Susan M.: *An improved dye and lake pigment analysis method for high-performance liquid chromatography and diode array detector*, *Studies in Conservation*, 1996, 41, pp.: 76-94.

FERREIRA, Esther S.B.; HULME, Alison N.; McNAB, Hamish; QUYE, Anita: "The natural constituents of historical textile dyes", *Chemistry Society Reviews*, 2004, 33, pp.: 329-336.

ZHANG, Xian; LAURSEN, Richard: "Development of mild extraction methods for the analysis of natural dyes in textiles of historical interest using LC-Diode array detector-MS", *Analytical Chemistry*, 2005, 77 (7), pp.: 2022-2025.

SUROWIEC, Izabella: "Application of high-performance separation techniques in archeometry", *Microchimica Acta*, 2008, 162: pp.: 289-302.

ZHANG, Xian; LAURSEN, Richard: "Application of LC-MS to the analysis of dyes in objects of historical interest", *International Journal of Mass Spectrometry*, 2009, 284 (1-3), pp.: 108-114.

HOFENK DE GRAAFF, Judith: *The Colourful Past. Origin, Chemistry and Identification of Natural Dyestuff*, Switzerland: Abegg-Stiftung, London: Archetype Publications Ltd., 2004.

MILLS, John J.; WHITE, Raymond: *The Organic Chemistry of Museum Objects*, London: Butterwoths, 1987.

SOCRATES, George: *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*, England: John Willey and Sons, Ltd., 2005.

CARDON, Dominique: *Natural Dyes: Sources, tradition, technology and science*, London: Archetype Publications Ltd., 2007.

2.4. Las pinturas murales de la Casa de Ariadna en Pompeya: Un ejemplo de estudios e investigaciones científicas aplicados en el proyecto de conservación y restauración

Carmen Pérez, Livio Ferrazza, Marga Doménech, Fanny Sarrió
Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales

Albert Ribera
Sección Arqueológica Municipal de Valencia

Desde el 2004, la Sección Arqueológica Municipal (SIAM), dependiente del Servicio de Patrimonio Histórico de la Delegación de Cultura del Ayuntamiento de Valencia, viene desarrollando un proyecto para la realización de excavaciones arqueológicas en la Casa de Ariadna en Pompeya (Figs 1, 2), en colaboración con la Universidad de Innsbruck (Austria), el Museo de Prehistoria de la Diputación de Valencia y el Museo de Arqueología (MARQ) de la Diputación de Alicante.

También han participado en colaboraciones más específicas, investigadores y profesores de la Universidad Politécnica de Valencia, de los Departamentos de Arqueología de las universidades de Valencia, Alicante, Cádiz y Murcia y de la Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma, del CSIC. La *Soprintendenza Archeologica di Pompei*, entidad pública que gestiona el yacimiento, ha autorizado y supervisado estos trabajos.

El objetivo de este proyecto, y la razón de ser de la intervención de la Sección de Arqueología Municipal, entidad que coor-



Figura 1. Casa de Ariadna. Vista del peristilo.

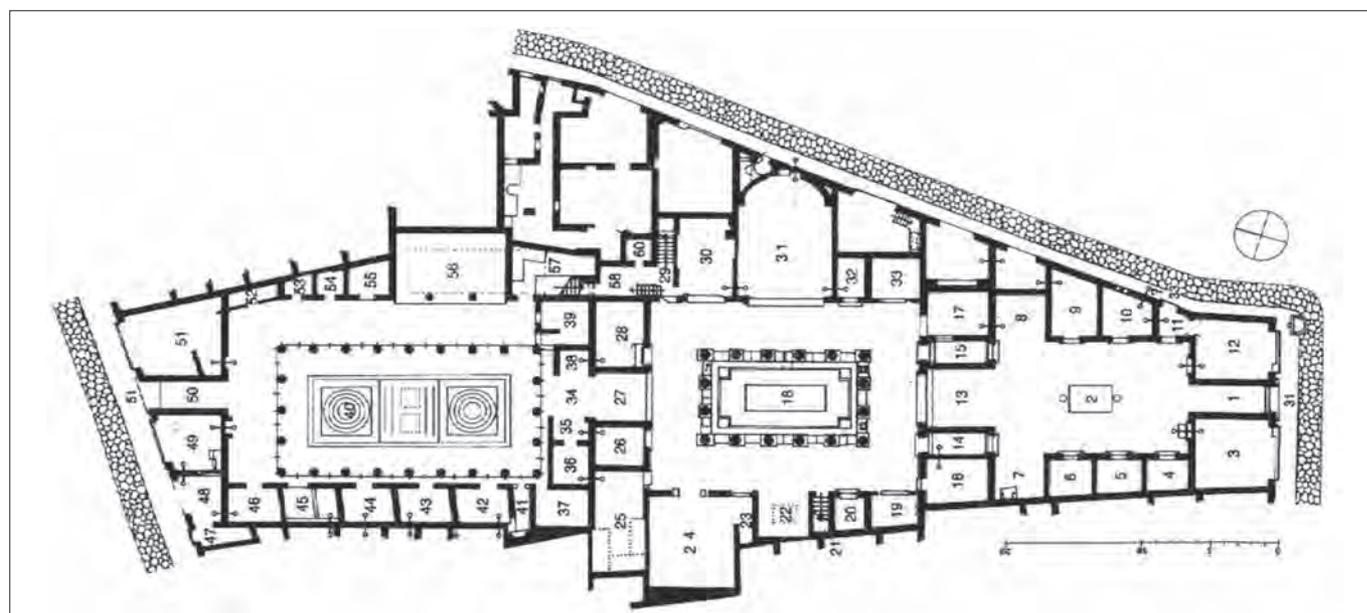


Figura 2. Plano de la Casa de Ariadna.

dina dicho proyecto, ha sido comparar los numerosos hallazgos arqueológicos del período de la fundación de Valencia, con los de Pompeya de la misma época. Ésta no es una actuación aislada sino que está enmarcada en un gran proyecto general que, desde 2003, está centrado en investigar la Pompeya que había antes, por debajo de la que se ve ahora.

La Casa de Ariadna

La casa de Ariadna es una de las más grandes mansiones de Pompeya, ya existente en el periodo samnita. Fue excavada entre 1832 y 1835 y durante el siglo XIX fue una de las más visitadas de Pompeya, cayendo posteriormente en el olvido. En las décadas de los 70 y 80, por parte de un equipo australiano, fue objeto de varias campañas de estudio que han proporcionado bastante información importante, pero fraccionaria, y que aun deben culminar en un prometido volumen de la serie “Häuser in Pompeji”.

La Casa de Ariadna, también conocida con el nombre de *Casa dei Capitelli Colorati*, se encuentra en la “Regio” VII, insula 4, a menos de 100 metros del foro. Presenta dos entradas opuestas, una desde la *Via della Fortuna Augusta* y otra sobre la *Via degli Augustali*, atravesando, por tanto, toda la insula de sur a norte. En conjunto es uno de los mayores complejos de la edilicia privada pompeyana, con sus 1700 m² de extensión, lo que la convierte en una de las más grandes *domus* señoriales.

La Casa de Ariadna se compone de un atrio toscánico, que se abre al sur, a la *Via degli Augustali* cerca de su unión con el *Vicolo Storto*, y de dos peristilos de grandes dimensiones, el último de los cuales se abre por el norte a la *Via della Fortuna*. Su orientación es totalmente diferente a las casas circundantes, indicio de alguna anomalía arquitectónica y urbanística que aún no se sabe explicar. La misma insula 4, donde se encuentra la Casa de Ariadna en su lado oriental, es la más grande de la “Regio VII” y también presenta evidentes anomalías urbanísticas nada ortogonales, con abundantes tramos irregulares típicos del tejido urbano de la *Altstadt* y bien diferentes de la ordenada sistematización de la “Regio VI” al norte.

A través de la técnica constructiva y de algunos restos de decoración parietal del I Estilo, se había deducido que la casa fue levantada hacia el s. II a.C.. Se debió redecorar con elementos del II Estilo en la época de la instalación de la colonia silana (80 a.C.). La casa sufrió graves daños con el terremoto del 62 d.C. y se supone que a partir de esta fecha no fue habitada sino que se transformó, al menos en parte, en un edificio de carácter agrícola y productivo, como parece indicar la aparición de una prensa en el peristilo. Hay que destacar que se desconoce si toda esta gran vivienda fue fruto de un proyecto constructivo unitario y sincrónico o si, por el contrario, fue el resultado de toda una serie de añadidos englobados en una unidad de habitación a lo largo del tiempo.

De la espléndida decoración pavimental y pictórica de la Casa de Ariadna, en su mayor parte perteneciente a la última fase, previa a la erupción, con mosaicos de teselas bícromos, en blanco

y negro, emblemas de *vermiculatum* y pinturas del III y IV estilo con cuadros mitológicos, quedan algunas buenas trazas, bastante significativas. Muchas de sus pinturas, entre ellas, las que representan el mito de Ariadna que le da nombre, fueron trasladadas al “Museo Nazionale” de Nápoles tras su descubrimiento.

Durante las excavaciones arqueológicas de 2006, dentro de este proyecto coordinado por el SIAM y subvencionado por el Ministerio de Cultura y la empresa Estudio Métodos de Restauración, se hizo más que evidente el avanzado estado de alteración que presenta toda la casa, situación que, por otra parte, está generalizada en toda el yacimiento. Las partes más deterioradas son las pinturas murales, enlucidos, y las columnas del peristilo central.

A raíz de esta situación, se ha planteado preparar un proyecto para la consolidación y restauración de la vivienda. Es en este momento cuando el Ayuntamiento de Valencia solicita la colaboración del Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales para realizar un estudio exhaustivo sobre el estado de conservación de las pinturas murales de la casa de Ariadna, así como para desarrollar un programa de conservación, protección y mantenimiento.

El desarrollo de este proyecto se basa en estudios científicos fundamentales tanto para la caracterización de materiales originales, del estado de conservación y descripción de los parámetros medioambientales responsables de la situación actual, así como para la evaluación y seguimiento de tratamientos de limpieza, consolidación y biocida. En este último caso las técnicas analíticas permiten obtener datos importantes sobre la eficacia de cada tratamiento, observando, por ejemplo, la penetración en la estructura del mortero de un específico consolidante a ensayar, o los eventuales cambios colorimétricos que la superficie policromada puede sufrir con la aplicación de los distintos productos. De esta manera, y gracias a esta información, se pueden tomar decisiones tanto para las intervenciones indirectas (cambio de coberturas, etc.), como las directas (limpieza, consolidación, etc.).

Primera evaluación del estado de conservación y desarrollo del Proyecto

En 2007 se lleva a cabo una primera toma de contacto que confirmó el avanzado estado de deterioro de las pinturas murales. De hecho, muchas zonas de las pinturas estaban muy pulverulentas presentando peligro de desprendimiento. Otras zonas ya estaban totalmente perdidas.

También se apreció durante esta visita la presencia de eflorescencias así como de sub-eflorescencias salinas que están destruyendo las pinturas mediante procesos cíclicos de cristalización y re-cristalización de sales (Fig. 3).

Uno de los factores decisivos del actual estado de conservación de las pinturas, hay que buscarlo en los primeros descubrimientos en el siglo XVIII y XIX, desde su exposición repentina a la intemperie, pasando por expolios, arranques incontrolados y métodos y materiales de conservación que en su momento se aplicaron con

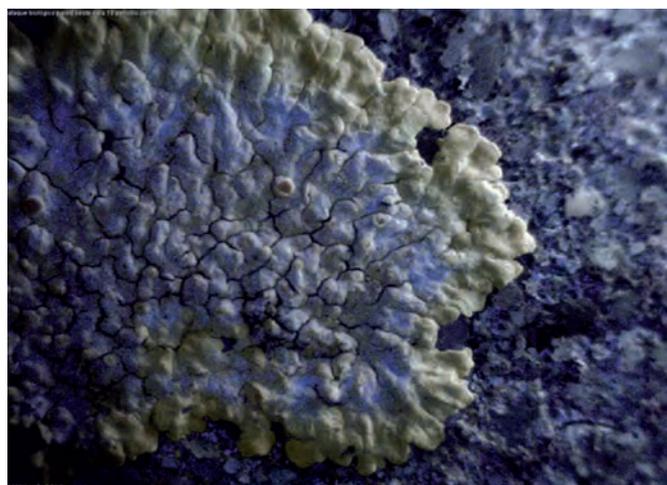
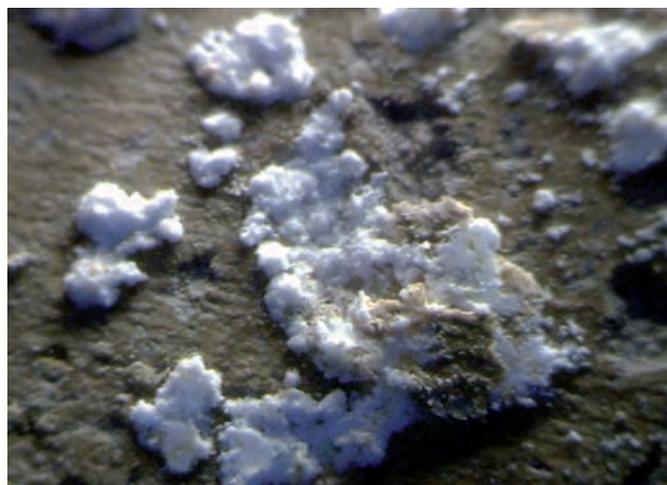
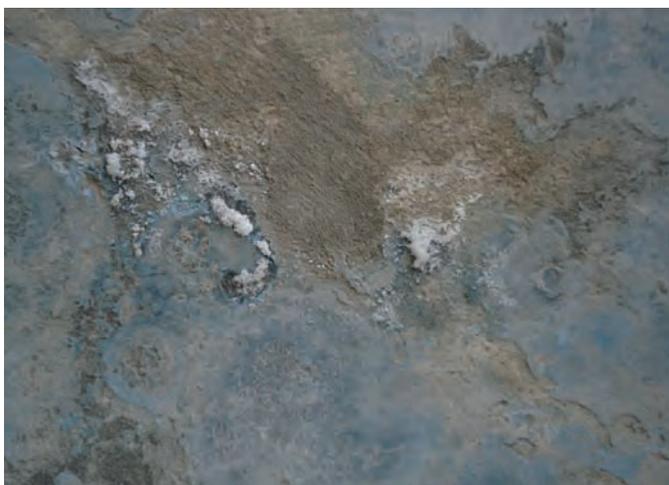


Figura 3. Imágenes que registran el estado de conservación y algunos factores de alteración. a-b) Grietas, abolsamientos, y pérdidas de pintura y mortero, de origen estructural. c-d) Procesos de cristalización y recristalización de sales. e-f) Alteración físico-química por agentes biológicos.

la mejor intención, y de hecho gracias a ellos ha llegado a nuestros días parte de este Patrimonio, pero que en la actualidad se sabe que no son los más idóneos para la conservación de las pinturas.

A partir de esta primera evaluación sobre el estado de conservación de las pinturas murales, se decidió que era imprescindible realizar un estudio exhaustivo de las patologías presentes



Figura 4. Casa de Ariadna, se observa el Larario 7. Este departamento presenta un sistema de cubierta en policarbonato transparente para la protección de las superficies decoradas.

así como los factores responsables. Con este primer objetivo, se eligieron las cuatro estancias de la casa más significativas, recogiendo zonas con cobertura y sin cobertura (Figs 4-6).

El Proyecto de estudio e investigación

El estudio de los materiales utilizados en los revestimientos de las paredes, de su estado de conservación, de las condiciones climáticas y del medio ambiente, representa una posibilidad de intervención para el control de los procesos que actualmente son responsables del deterioro de las superficies arqueológicas (figura 7).

Por tanto no es aconsejable una intervención directa de las superficies decoradas, si no se toman medidas preventivas en el entorno, a fin de eliminar o reducir los efectos de los distintos problemas observados.

El proyecto iniciado por el IVC+R, se divide en una serie de actividades complementarias con grupos de trabajo interdisciplinarios organizados en las siguientes fases:

62



Figura 5. Exedra 22.



Figura 6. Oecus 17.



Figura 7. Casa de Ariadna, técnicos del Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales durante la fase del estudio de los materiales y del estado de conservación de las pinturas murales.

1. Estudios científicos de los materiales que constituyen las superficies arqueológicas, y seguimiento del microclima en el interior y exterior de las habitaciones. Los estudios permiten evaluar la relación existente entre los materiales y las condiciones climáticas ambientales, el estado de conservación de las estructuras murales y de las pinturas alteradas por los distintos procesos físico-químicos y biológicos.

2. Pruebas y análisis *in situ* y en laboratorio sobre diferentes metodologías de intervención y productos para la conservación y restauración de las pinturas murales (consolidantes, biocidas, productos para la limpieza, etc.). Evaluación de los efectos del clima y de las coberturas, sobre la exposición de muestras de ensayo elaboradas con materiales pétreos artificiales en las cuales se ha intervenido con los tratamientos específicos.

3. Intervenciones directas e indirectas sobre las áreas arqueológicas y de las superficies decoradas. Esta fase es necesaria para eliminar o limitar la influencia de los factores ambientales en los procesos de degradación. Esta fase incluye también las intervenciones de conservación y protección de las estructuras arqueológicas y de las decoraciones.

Fase I: Estudio e investigación científica

Los estudios realizados en esta primera fase son:

- Estudio microclimático de las distintas habitaciones con decoraciones parietales, con o sin sistema de cobertura. El control del microclima permite la evaluación del impacto de los diferentes parámetros climáticos con los materiales, y la dinámica de filtración y evaporación de humedad en la estructura de la pared con su conexión directa en los procesos de degrada-

ción de los materiales. Este estudio es realizado por el doctor Fernando García Diego del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia, en julio de 2008 con la colocación de sensores de medición que registran de forma continua los parámetros ambientales (Fig. 8).

- Estudio termográfico de las estructuras arqueológicas necesario para determinar las características de construcción, la presencia de humedad, fracturas, uso de diferentes materiales, etc. Este trabajo ha sido realizado por el doctor José Luis Lerma García del Departamento de Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia (Fig. 9).
- Estudio del efecto de la radiación solar sobre las pinturas murales para evaluar la eficacia de los sistemas de filtrado sobre los UV por parte de las cubiertas de policarbonato transparente actuales. El estudio ha sido realizado por Pablo D'Antoni del IVC+R (Fig. 10).
- Estudio de los materiales y del estado de conservación de las pinturas murales. Los estudios científicos se llevaron a cabo en los laboratorios del IVC+R, con la colaboración de la Universidad Jaume I de Castellón y la Universidad de Valencia. Estos tienen como objetivo profundizar en el conocimiento de los materiales utilizados. Además, permiten estudiar los fenómenos de degradación físico-química y biológica. (Figs. 11, 12). De gran importancia ha sido el estudio de laboratorio con las técnicas de Microscopía Óptica y de Microscopía Electrónica de Barrido con Microanálisis (MEB-EDX), con la preparación de las muestras en sección transversal, que permite las observaciones y los análisis químicos elementales de la secuencia estratigráfica, tanto pictóricas como de morteros, así como las observaciones del aspecto, textura, granulometría, espesor, etc., de cada capa (Fig. 13).

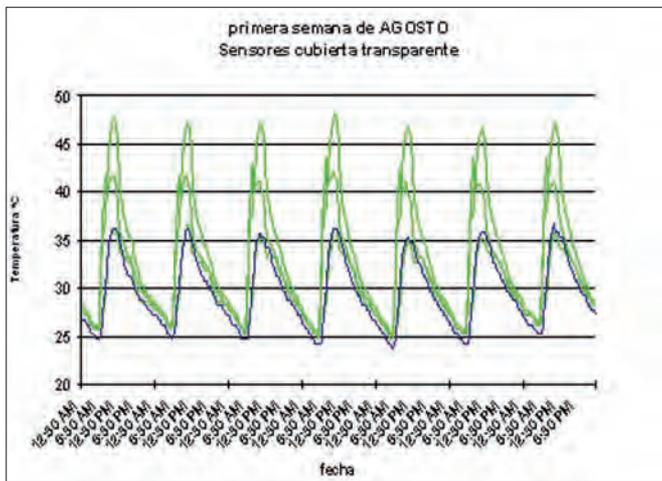
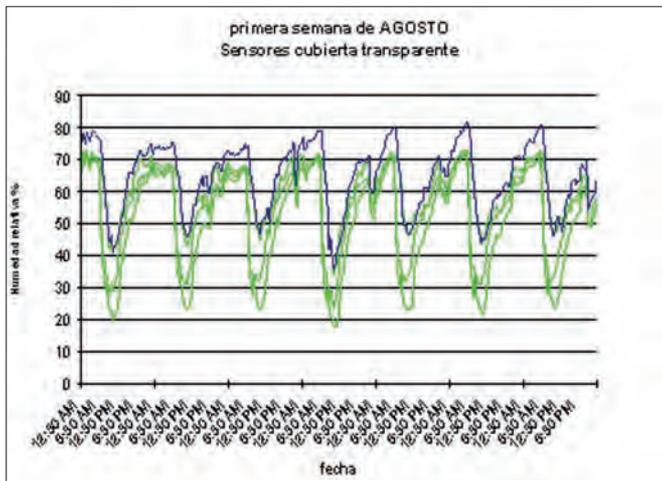


Figura 8. Estudio microclimático: en los gráficos de temperatura y humedad se aprecian las variaciones termohigrométricas registradas en una habitación con sistema de cubierta (en verde), respecto a las variaciones registradas al exterior.

Las investigaciones han sido necesarias también para evaluar el estado de conservación de las pinturas a nivel microscópico. El estudio se ha centrado sobre todo en comprobar los factores químico-físicos que han determinado el desprendimiento de amplias áreas de policromías, debido sobre todo al fenómeno de las eflorescencias y sub-eflorescencias salinas, y de las alteraciones mecánicas y químicas producidas por agentes biológicos.

Los estudios analíticos, también sirven para caracterizar los productos utilizados en intervenciones anteriores.

Fase II: pruebas y ensayos

En la actualidad, el proyecto sobre el estudio de las pinturas murales de la Casa de Ariadna se encuentra en la segunda fase, que permite la ejecución de pruebas y ensayos en laboratorio e *in situ*.

El estudio se centra en la evaluación de las distintas metodologías de limpieza y consolidación, con vistas a identificar los



Figura 9. Casa de Ariadna: a) Exedra 22 con pintura mural y mosaicos en el suelo con el emblema en opus vermiculatum; b) Estudio termográfico de las estructuras y de las superficies.

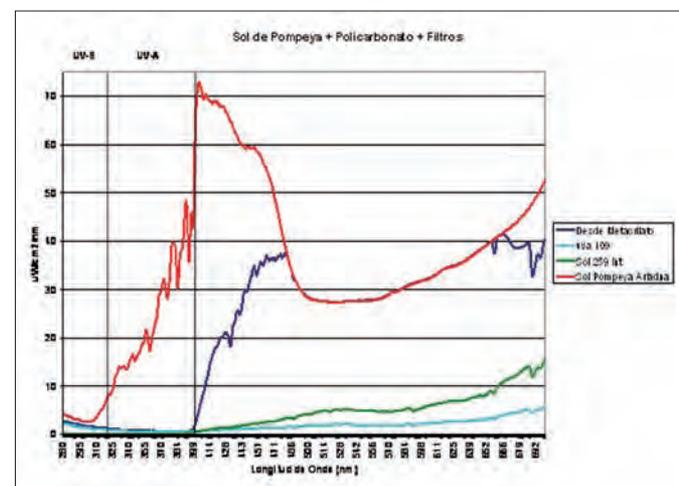
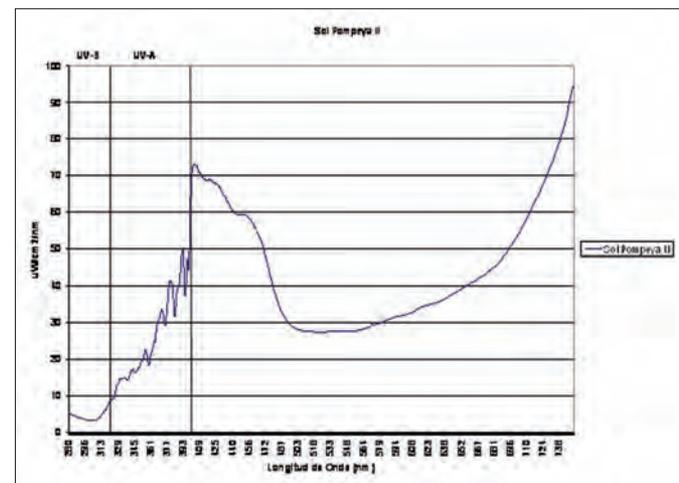


Figura 10. a) Gráfico sobre la medición de la radiación ultravioleta. Como se puede observar en el gráfico, la cantidad de radiación ultravioleta es de 7 uw/cm²/nm en el UV-B y de 50 uw/cm²/nm en el UV-A.; b) En el gráfico se puede apreciar la cantidad de energía que es filtrada por el policarbonato instalado en los departamentos, que disminuye aún mas agregando otros filtros.

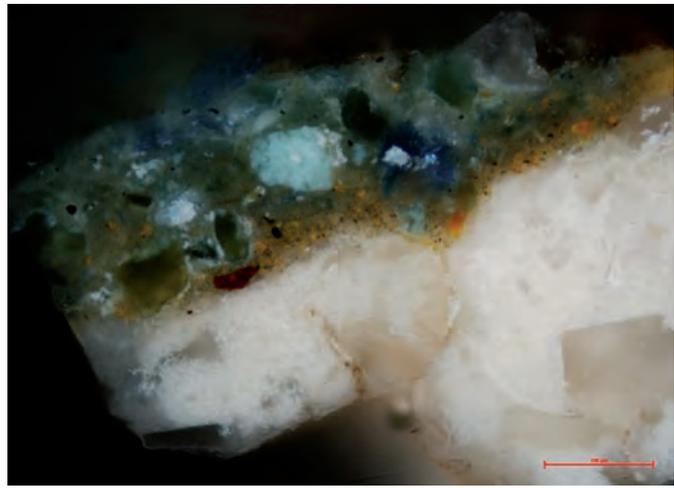
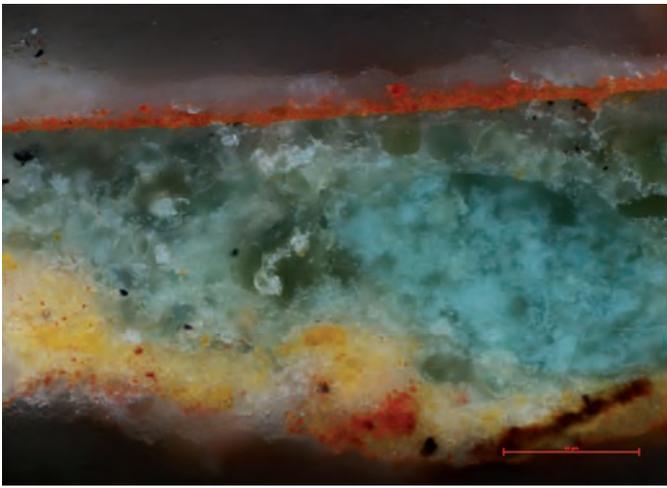


Figura 11. Estudio sobre la técnica de ejecución y de los materiales que constituyen las pinturas murales: imágenes de microscopía óptica de secciones transversales de una muestra de las pinturas de la Casa de Ariadna.



Figura 12. Pintura mural en la Oecus 17. Se observa el grave estado de alteración de la superficie decorada debido fenómeno de desprendimiento de la capa pictórica provocado por procesos de cristalización y recristalización de las sales.

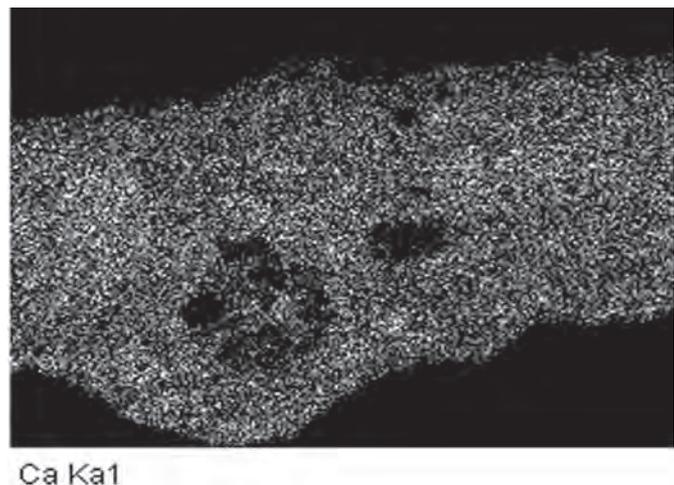
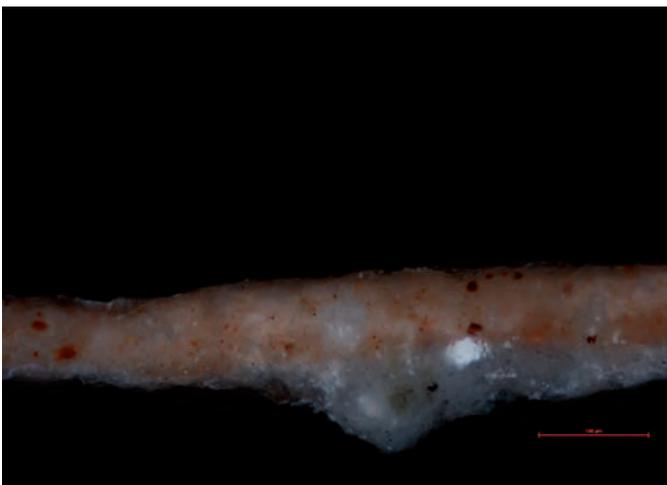


Figura 13. Imagen en microscopía óptica y mapa RX de la sección estratigráfica de una muestra de pintura mural. En el mapa se aprecia la distribución del calcio y del azufre. Este último elemento debido a la presencia de sales.

sistemas más apropiados para la futura intervención en las pinturas. Esto también permitirá evaluar los diferentes tipos de mortero necesarios en la reintegración volumétrica, así como testar los nuevos consolidantes inorgánicos elaborados con nano partículas.

Se evaluará también los efectos de la interacción entre los factores ambientales y los materiales pétreos, evaluando la eficacia de la cobertura con respecto a la agresividad de los agentes ambientales.

Las pruebas prácticas descritas se realizan mediante una serie de probetas de distintos morteros tratados con los diferentes productos de consolidación o tratamiento biocida a ensayar. Estas probetas se han colocado tanto en el exterior como en el interior de las habitaciones con coberturas de protección, a fin de proporcionar, a través de un seguimiento continuo y con los análisis científicos oportunos, una serie de índices útiles para evaluar:

- Cambios de las características cromáticas superficiales.
- Cambios de las características físico-mecánicas.
- Alteraciones químicas.
- Eventuales productos de neo formación.
- Contaminación biológica.
- Erosión superficial.

En el presente trabajo son de gran utilidad las técnicas analíticas como las microscópicas (Microscopía óptica y la Microscopía Electrónica de Barrido con sistema de Microanálisis a Dispersión de Energía de rayos-X), y las espectrofotométricas, como en el estudio de las superficies policromadas con la técnica de Colorimetría.

Estudios con técnicas microscópicas

En esta primera fase de seguimiento de los ensayos, a través de las técnicas de microscopía óptica y de microscopía electrónica, ha sido posible evaluar la eficacia del método de limpieza y de consolidación.



Figura 14. Técnico del IVC+R durante la observación de la superficie policromada con microscopio óptico portátil.

La evaluación de los métodos de limpieza se puede observar en las imágenes de las Figuras 15 y 16. En este ejemplo se ha evaluado la limpieza con resina de intercambio iónico OH⁻ de una pequeña área de la pintura mural con la presencia, a nivel superficial, de una capa grisácea a base de silicatos y carbonato de calcio. La imagen del microscopio óptico portátil (Fig. 14), ha permitido examinar la superficie antes y después del tratamiento y así, poder evaluar la eficacia del mismo.

Los ensayos de consolidación se han realizado en una serie de probetas y en pequeñas catas realizadas directamente en la pintura mural.

Con estos análisis hemos podido evaluar de forma exhaustiva la eficacia de penetración de los distintos consolidantes. Como se observa en el ejemplo mostrado por las imágenes de microscopía óptica en luz ultravioleta y por los estudios de microscopía

66

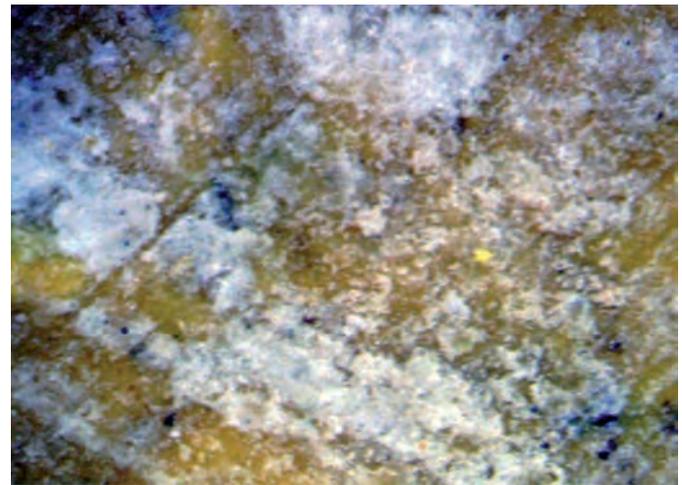


Figura 15. a) Imagen de la cata seleccionada para la evaluación de la metodología de limpieza con resina de intercambio iónico; b) Imagen con microscopio óptico portátil de la superficie donde se aprecia la capa grisácea.

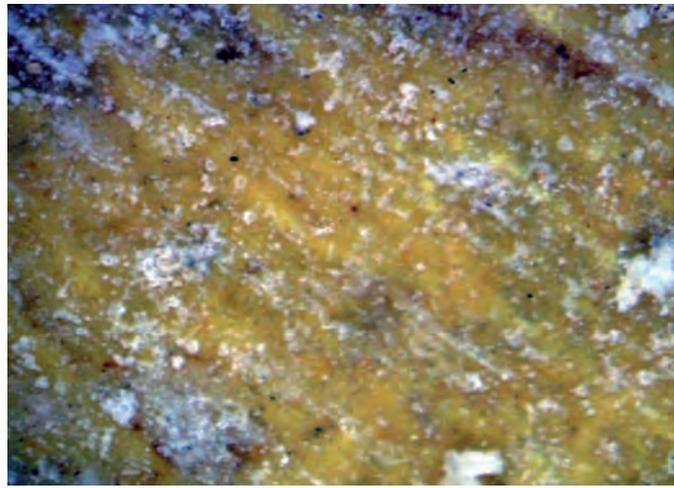


Figura 16. a) Imagen de la cata después de una primera fase de limpieza con resina de intercambio iónico; b) Imagen con microscopio óptico portátil de la superficie policromada en esta primera fase de limpieza.

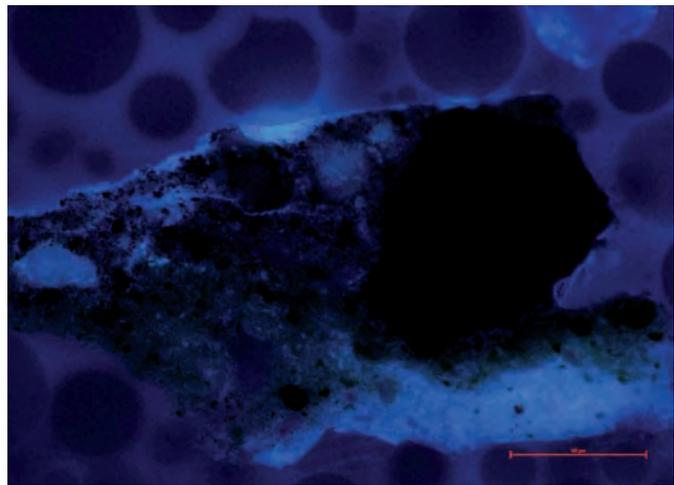
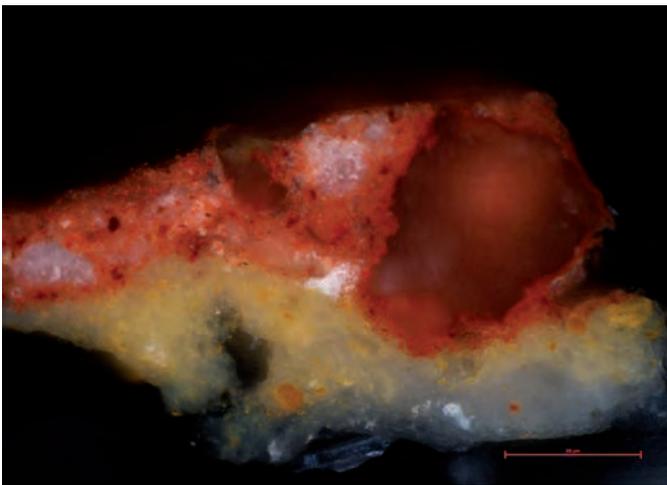


Figura 17. Estudio de microscopía óptica sobre la eficacia de la consolidación con nano partículas. En las imágenes se observa la sección transversal de una muestra de pintura mural en luz visible y en fluorescencia UV, donde se aprecia la formación de la capa superficial del consolidante.

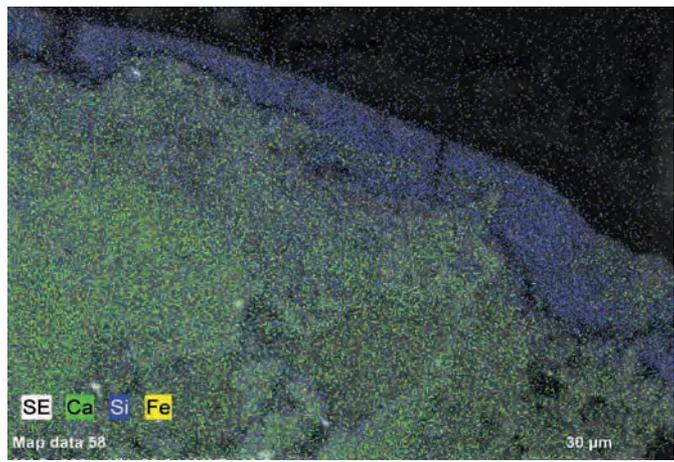
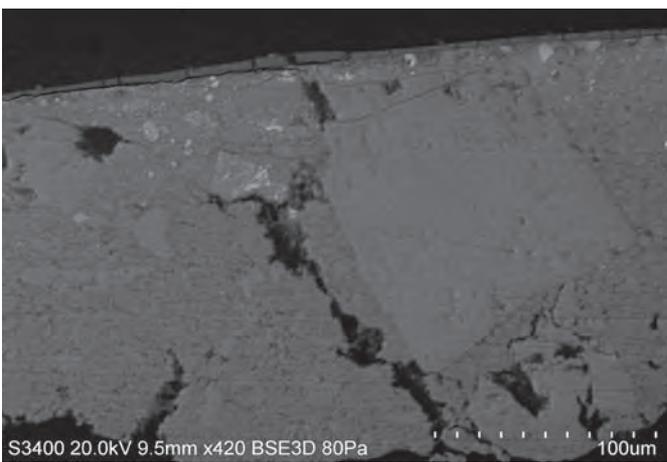


Figura 18. Estudio de microscopía electrónica en modalidad BSE de la sección transversal de una muestra de pintura mural consolidada. Se observa la capa de consolidante depositado a nivel superficial de la policromía.

Figura 19. Mapa RX de la sección transversal de una muestra de pintura mural con el test de un consolidante inorgánico. Se aprecia la formación a nivel superficial de una capa de silicio.

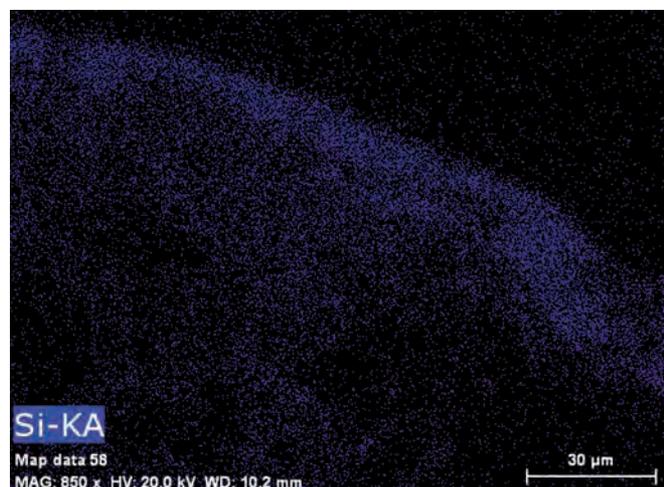
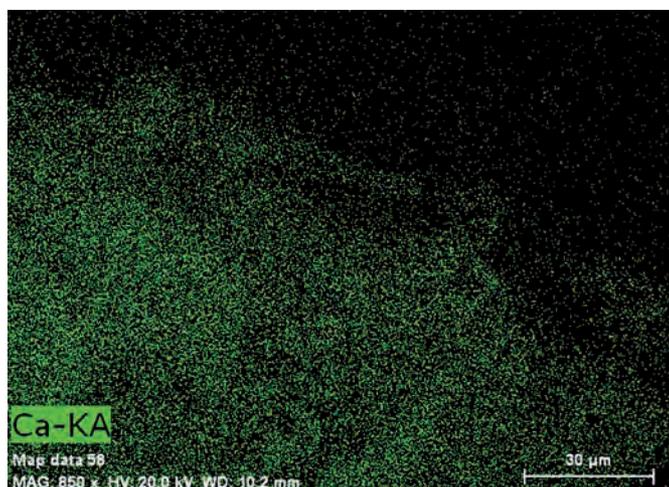


Figura 20. Mapa RX que permite apreciar la distribución del calcio y del silicio en la estratigrafía de la muestra de pintura mural. La capa de silicio superficial se debe al consolidante aplicado durante el test de los productos de consolidación.

electrónica, se ha detectado la formación, a nivel superficial, de una capa de consolidante (Figs 17-20). Esto nos permite obtener informaciones útiles sobre los eventuales cambios que son necesarios adoptar en la metodología de aplicación.

Estudio de colorimetría

El estudio colorimétrico ha sido efectuado sobre la superficie de las probetas y de las catas realizadas en la pintura mural, antes y después de ser oportunamente tratadas con la específica metodología de limpieza y de consolidación. Los datos obtenidos en la Tabla 1, se refieren a la policromía roja de las catas realizadas para los

ensayos (Fig. 21); en la tabla han sido aportados los valores de variación del color (ΔE). Estos valores son necesarios para cuantificar, en forma numérica, las variaciones de color en el área medida.

Para representar gráficamente los parámetros colorimétricos de las áreas analizadas, ha sido utilizado el espacio colorimétrico CIEL*a*b*76 propuesto por la CIE en el 1976. En el espacio CIEL*a*b* se consideran los parámetros de: color, luminosidad (estimula acromático que pasa de negro a blanco) y de saturación (que define la pureza de un color, cuanto más intenso nos aparece una determinada tinta). Estos parámetros viene visualizados mediante tres coordenadas: el eje a^* se refiere a el estímulo cromático rojo y verde, mientras el de b^* representa los estímulos amarillo y azul, el eje L^* representa la luminosidad.

68

| Área 1 | L^* | a^* | b^* |
|--|-------|--------|--------|
| Rojo antes de la limpieza | 46,03 | +14,74 | +12,66 |
| Rojo después de la limpieza | 44,69 | +16,95 | +13,46 |
| Rojo después de la consolidación con nano partículas | 46,25 | +16,29 | +12,64 |
| $\Delta E= 1,56$ | | | |

| Área 2 | L^* | a^* | b^* |
|--|-------|--------|--------|
| Rojo antes de la limpieza | 46,26 | +11,55 | +11,54 |
| Rojo después de la limpieza | 45,74 | +13,57 | +12,19 |
| Rojo después de la consolidación con nano partículas | 55,48 | +9,24 | +6,92 |
| $\Delta E= 10,57$ | | | |

Tabla 1. Medidas colorimétricas de la primera fase de evaluación de los consolidantes.

El grado de nivel de diferencia ΔE que se está mirando es:

$\Delta E < 1$ Imperceptible, $\Delta E < 2$ Mínima, $\Delta E < 3$ Aceptable, $\Delta E < 5$ Casi inaceptable, $\Delta E = 5$ Inaceptable.



Figura 21. Imágenes de microscopio óptico portátil. Esta técnica permite evaluar la eficacia de la metodología de aplicación del consolidante.



Figura 22. Imágenes de microscopio óptico portátil. Se aprecia la cristalización superficial del consolidante.

Fase III: propuesta de intervención

Basándose en los resultados obtenidos hasta ahora con las campañas de estudios, la propuesta de intervención tiene en cuenta la complejidad de las cuestiones relacionadas con la conservación de las pinturas murales, sin abandonar el criterio de actuación a la hora de eliminar o minimizar los procesos de degradación que afectan a la zona arqueológica.

Como intervención específica, se propone sustituir las viejas cubiertas de policarbonato, reemplazándolas con nuevos sistemas de protección que reduzcan al mínimo los cambios termohigrométricos y la influencia de los factores ambientales en contacto con las superficies. En previsión de la construcción de los nuevos sistemas de cubiertas, son necesarias una serie de medidas para la conservación y protección de las pinturas murales, así como la aplicación de sistemas de protección física de esas zonas. Las intervenciones directas son los tratamientos con biocidas, la elimi-

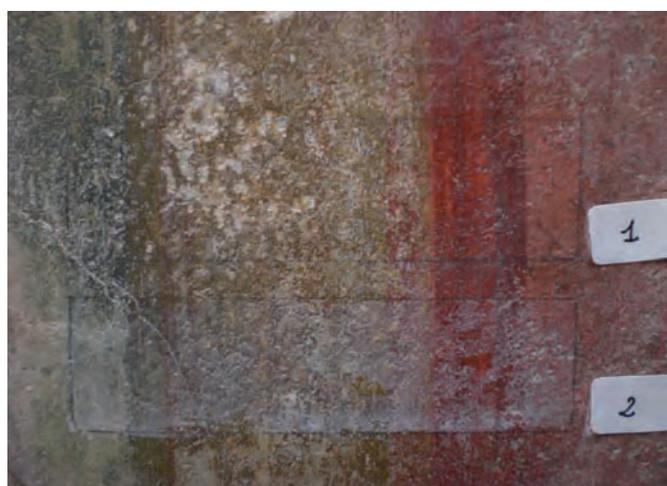
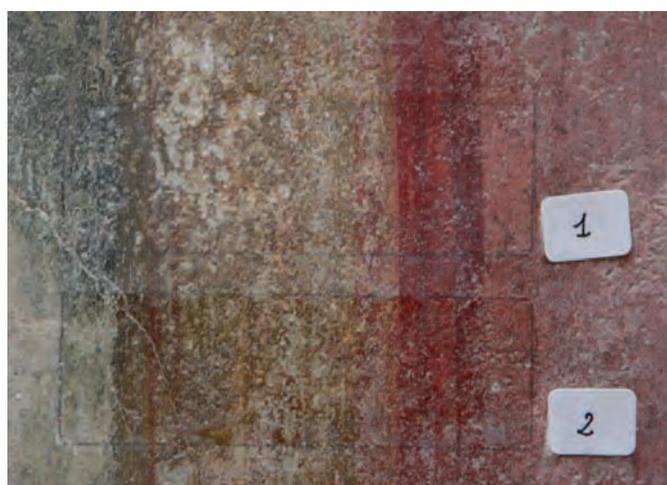


Figura 23. Detalle de la pared pintada de la Oecus 17. Las superficies están afectadas por eflorescencia salina y desprendimiento de la policromía. Las áreas seleccionadas han sido previamente desengrasadas con alcohol etílico, desaladas y se les ha eliminado la concreción superficial con resina de intercambio iónico OH⁻. En las dos áreas se están ensayando distintos consolidantes a base de nano partículas.

nación de las sales solubles cristalizadas, la consolidación de las capas de mortero, de la capa pictórica de las pinturas etc.

Conclusiones

Los estudios científicos llevados a cabo han sido indispensables para el desarrollo de un proyecto de intervención de las pinturas murales, dentro del ámbito de la conservación preventiva.

Gracias a la información obtenida con estos estudios, se puede comprender la interrelación de los diferentes factores de deterioro responsables, su intensidad y la sinergia de su actuación. Se describe, así, un sistema complejo en el que las pinturas murales

participan como un material que refleja las más mínimas fluctuaciones ambientales y muestra que cualquier intervención indirecta o directa en ellas, como por ejemplo, la instalación de cubiertas, no puede decidirse sin un análisis previo sobre los materiales empleados, sistemas de anclaje etc.

Por este motivo, vemos fundamental el trabajo interdisciplinar entre diferentes ámbitos científico tecnológicos porque cada uno de ellos, de forma aislada, daría una visión parcial de la situación real.

Así, consideramos que el apoyo que nos ofrecen las nuevas tecnologías y el avance científico deberían ser el hilo conductor durante todos los trabajos desarrollados en un proyecto de conservación en Patrimonio Cultural.

Bibliografía

J.P. DESCOEUDRES y F. SEAR: "The Australian Expedition to Pompei", en *Rstud Pomp*, I, 1987, pp: 11-36.

J.P. DESCOEUDRES *et alii*: *Pompeii Revisited: The Life and Death of a Roman Town*, Sidney 1994.

J. P. DESCOEUDRES: VII, 4, 31-51. *Casa dei Capitelli* Colorati, I. BALDASSARRE ed., *Pompei. Pitture e Mosaici VI*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Roma, 1996, pp.: 996-1107

F. PESANDO: *Domus. Edilizia privata e società pompeiana fra III e I secolo a.C.*, "L'Erma" di Bretschneider, Roma 1997.

F. PESANDO, "La Casa de Ariadna de Pompeya: redescubrimiento de una domus", en A. RIBERA, M. OLCINA y C. BALLESTER, *Pompeya bajo Pompeya. Las excavaciones en la Casa de Ariadna*, Valencia 2007, pp.: 21-26.

A. RIBERA, M. OLCINA y C. BALLESTER (eds.), *Pompeya bajo Pompeya. Las excavaciones en la Casa de Ariadna*, Valencia ,2007.

.F. SEAR: "Cisterns, drainage and lavatories in Pompeian houses, Casa dei Capitelli Colorati (VII.4.51)", Casa della Caccia Antica (VII.4.48), Casa dei Capitelli Figurati (VII.4.57)", en *Papers of the British School at Rome* 74, 2006, pp: 163-201.

El Museo Arqueológico de Alicante (MARQ) y el Museo de Prehistoria de Valencia.

VV.AA., "Roman wall painting characterization from Cripta del Museo and Alcazaba in Mérida (Spain): "chromatic, energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopic, X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopic analysis", en *Analytica Chimica Acta*, ELSEVIER, 2001, pp.: 331-345.

VV.AA: "Roman wall painting materials, techniques, analysis and conservation", en *International Workshop on Roman wall painting*, Fribourg, 1997.

VV.AA.: "Estudio de materiales y técnica de ejecución de los restos de pintura mural romana hallados en una excavación arqueológica en Guadix (Granada)", en *Espacio, Tiempo y Forma, Serie I, Prehistoria y Arqueología*, 13-2000, pp.: 253-278.

VV.AA.: "Analysis of Roman wall paintings found in Porde none, Trieste and Montegrotto", en *Talanta* 64, ELSEVIER, 2004, pp.: 732-741.

SELIM. A , *I colori pompeiani*, Roma, 1967.

BEARAT,H: "Quelle est la gamme exacte des pigments romains? Confrontation des resultats d'analyse et des textes de Vitruve et de Pline", en *Roman Wall Painting – Materials, Techniques, Analysis and Conservation, International Workshop*, Fribourg, 1996, pp.: 11-34.

CNR, ICR, *Raccomandazioni NORMAL-1/188 Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: Lessico*.

C. OLEARI: *Misurare il Colore. Spettrofotometria, Fotometria, e Colorimetria, Fisiologia e Percezione*, Hoepli Editore, Milano, 1998, pp.: 219-233.

D'ALCONZO P: *Picturae Excisae Conservazione e restauro dei dipinti ercolanesi e pompeiani tra XVIII e XIX secolo*, L'Erma de Bretschneider, Roma, 2002.

FINOTTI F, ZANDONAI F., "I colori degli affreschi della villa romana di Iseria", en *Annuario del Museo Civico di Rovereto*, volume 21, 2005, pp.: 137-152.

DE LA BARRERA ANTON: *La decoración arquitectónica de los foros de Augusta Emerita* L'ERMA de Bretschneider, Roma, 2000.

ROZENBERG S.: "Pigments and fresco fragments from Herod's palace at Jericho", en *International Workshop on Roman Wall Painting*, Fribourg, 1996, pp.: 63-72.

SAMPAOLO V.: Bragantini I., *La pittura pompeian* , Electa, Napoli, 2009.

Capítulo 3

Casos de aplicación: los bienes culturales como objetos científicos

3.1. Aplicación de los estudios físicos en el campo de la restauración

Pilar Ineba

Museo de Bellas Artes de San Pío V

Desde hace algunos años, la relación entre ciencia y arte ha cobrado gran importancia ya que cuando se comienza una intervención: restauración, conservación, investigación histórica o estudio de la técnica artística, es útil y necesario contar con los máximos datos posibles. Esta documentación la conseguimos a través de unos análisis que pueden ser tan amplios como medios científicos se tengan. Dentro de las diversas técnicas con las que hoy en día contamos, los análisis físicos tienen un apartado importante.

Como hace referencia el *Departamento Científico de Conservación. Análisis Físicos* del Instituto del Patrimonio Cultural de España: Tomás Antelo, Araceli Gabaldón, Miriam Bueso y Carmen Vega, en la anterior edición de *La Ciencia y el Arte: son técnicas de análisis que se basan en la física cuántica y que tienen una especial relevancia en el estudio de los bienes culturales*.¹

Refiriéndonos en particular a dos técnicas concretas, la Radiografía y Reflectografía de Infrarrojos, se está comprobando que los resultados proporcionados por dichos estudios nos aportan datos importantes sea cual sea el tipo del bien cultural de nuestro patrimonio que se estudie. Ejemplo de las áreas donde se pueden aplicar son: pintura, escultura, textil, papel, artes decorativas, etnología, arqueología, etc.

Ahora bien, antes de realizar cualquier tipo de análisis se deben tener en cuenta determinadas premisas como son: qué tipo

de obra se va a estudiar y qué datos buscamos realmente. Hay que tener muy claras estas ideas pues de ellas se derivará la calidad de los resultados o el tiempo invertido en buscarlos.

Por lo tanto, podríamos citar los siguientes puntos:

- Relación interprofesional: técnico laboratorio-restaurador-historiador. Es necesario conocer cual es la finalidad del estudio, qué datos necesita el restaurador para su intervención y qué queremos conseguir: estudio de técnica, materiales, intervenciones anteriores, etc.
- La relación entre los diversos campos y el intercambio de necesidades a buscar, desde el punto de vista de la restauración o investigación histórica, tendrá como resultado aplicar el análisis adecuado.
- Otra premisa a tener en cuenta es la de conocer las técnicas de manufactura de la obra a estudiar por ambas partes.
- Finalmente, los resultados que se consigan tienen que ser interpretados por un técnico experimentado en este campo pues de lo contrario se puede incurrir en errores de interpretación de los mismos.

Enumerados de una manera concisa los criterios y, descritos en la primera edición de las Jornadas “La Ciencia y el Arte” los principios y bases de los análisis físicos, en ésta se describirá su aplicación específica al campo de la restauración y al estudio de las técnicas artísticas.

Con la radiografía, se atraviesa el objeto, pudiendo observar su interior. ¿Qué conseguimos con esto? Mayor conocimiento

¹Antelo,T., Gabaldón , A., Bueso, M. y Vega,C. “Un espacio para lo invisible”. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio Histórico. Instituto del Patrimonio Histórico Español. Ministerio de Cultura. Madrid. 2008. pp. 25



Figura 1. Radiografía. Pintura. Detalle de unión y refuerzo con clavija metálica.

de los materiales y de la manufactura de la pieza estudiada, así como del estado de conservación o de las posibles intervenciones que presenta actualmente. También el estudio de la técnica y sus materiales ayudan a clarificar la autoría de las obras o escuelas así como si es realmente auténtica o una falsificación o copia.

La aplicación de la radiografía en las pinturas sobre tabla nos aportará datos tanto de la técnica pictórica como del estado de conservación.

Sobre el primer aspecto, la técnica artística, podemos conocer con el estudio del soporte, la técnica de ejecución o, en el caso de un retablo, de su construcción, el conocimiento de elementos internos, número de piezas de madera que componen la tabla, diferentes tipos de uniones o ensamblajes, material interno usado en su refuerzo, la factura y la forma de encuadrar el dibujo dentro del espacio compositivo y los sistemas empleados. Todos los datos nos ayudan a poder identificar y diferenciar entre sí las escuelas pictóricas. Como ejemplo de lo dicho, vemos en esta imagen radiográfica de una pintura sobre tabla (Fig. 1) el tipo de unión y el refuerzo por medio de un listón de madera y la pieza metálica que se ve; también se puede observar tela por toda la superficie



Figura 2. Radiografía. Pintura. Detalle de dibujo por incisión.

en la capa de preparación. Los puntos oscuros que aparecen en la radiografía corresponden a pequeñas faltas de capa pictórica. En esta figura y en la Figura 2, observamos que las líneas rectas blancas son incisiones con las que el artista ha realizado el dibujo de la composición, concretamente en las zonas de los pliegues de vestidos, aureola o dibujo arquitectónico. En la segunda imagen (Fig. 2) también se puede observar la veta de la madera, el estado de conservación en la unión de las piezas de madera y de la capa pictórica (puntos negros); en la zona superior izquierda vemos una mancha blanca que corresponde a uno de los clavos cuya cabeza está en el interior.

La radiografía nos permite estudiar con mayor nitidez la pincelada, su dirección, o tamaño (grosor, largura). En ocasiones, comprobaremos que el soporte ha sido reutilizado por los pintores; estos soportes podían ser de otros artistas o simplemente de obras ya usadas y vueltas a reutilizar.

Como vemos, podemos contar con una serie de datos invisibles al ojo humano que no se pueden observar con claridad y seguridad a simple vista.

Con los estudios radiográficos, obtendremos otros datos de los ya descritos que pueden servir para poder distinguir las diversas escuelas europeas por la sistemática del trabajo; la influencia de artistas extranjeros en los pintores locales que seguían las pautas aprendidas de éstos o cuyo éxito artístico llevaba a su imitación. En ocasiones el conocimiento del tipo de madera o de la composición de la capa de preparación nos ayuda a conocer que el artista era foráneo por su estilo pictórico, pudiendo emplear materiales exportados de su país o bien de la zona en donde el artista se había instalado o de donde había recibido el encargo.

Otro aspecto fundamental para realizar un estudio radiográfico es conocer el estado de conservación en que llega a nuestras manos y los elementos ajenos superpuestos. Las obras de arte, suelen tener numerosas intervenciones. Algunas de ellas han sido realizadas para paliar su progresivo deterioro. En estos casos, pueden ser respetuosas, siguiendo prácticas innovadoras de su época, o destructivas para la pieza por emplear materiales o sistemas demasiado agresivos y no tener un criterio claro de restauración-conser-

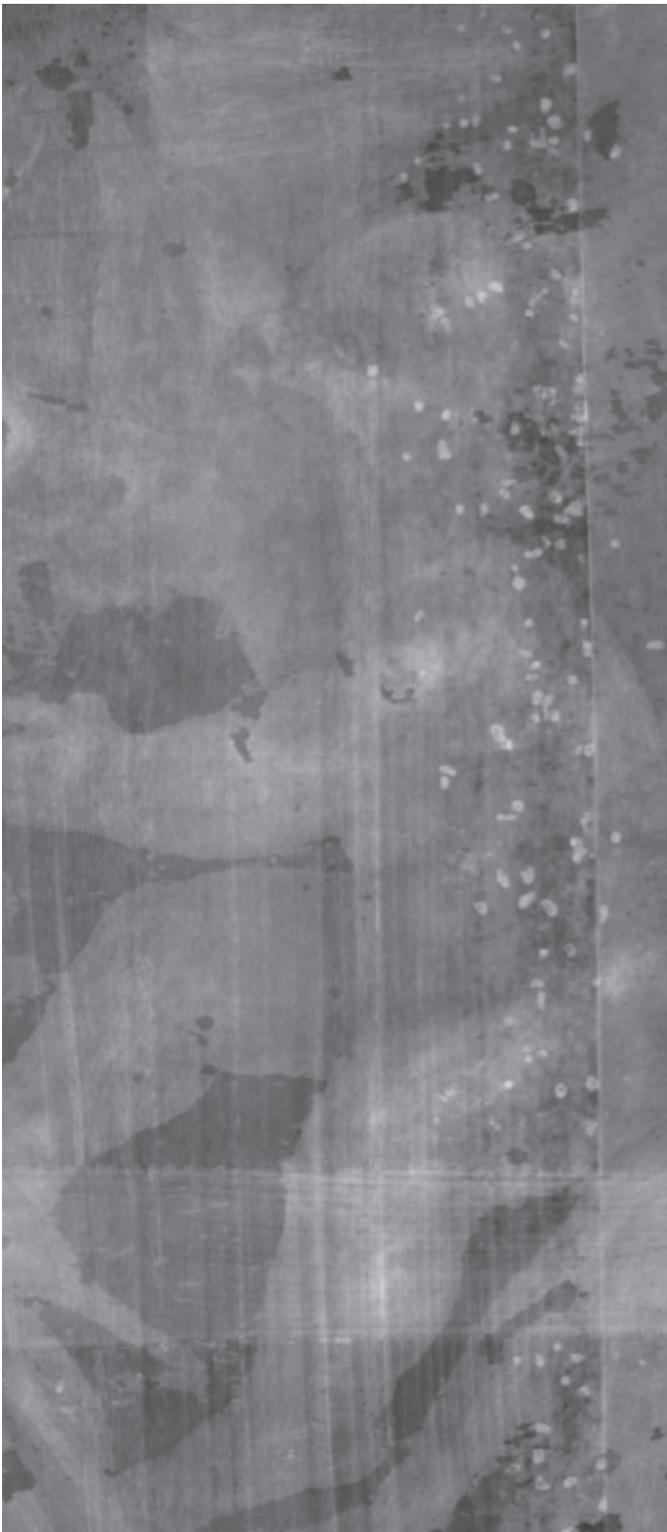


Figura 3. Radiografía. Pintura. Detalle de soporte de madera con ataque de insectos xilófagos.

vación. En otros casos, las intervenciones pueden ser consecuencia del cambio estético de la sociedad o por querer emplear la obra existente como base para una reinterpretación arbitraria.



Figura 4. Radiografía. Talla de madera. Detalle de cabeza de Niño.

Con la visión que nos proporciona la radiografía obtendremos otros datos más de los ya descritos, como pueden ser las reintegraciones o variaciones de composición por cambios de gusto estilístico, limpiezas excesivamente agresivas, faltas de las diversas capas, si el soporte es de madera podremos verificar su grado de consolidación (por ejemplo, ataques de insectos xilófagos) (Fig. 3). Como vemos, estos datos son los que interesan particularmente para su aplicación a la restauración

Si nos referimos a la pintura sobre lienzo, y como consecuencia de un criterio antiguo donde se pensaba que el reentelado de la obra se debía realizar sistemáticamente pues reforzaba el soporte original aumentando su durabilidad, podremos conocer el tipo de tela original, pues el citado proceso impide observar el lienzo o tela al estar oculta por este proceso. Estos datos como el que citamos suelen ser importantes, ya que ayudan a ampliar el conocimiento sobre un artista o escuela.

Descritos a grandes rasgos las múltiples posibilidades que tiene el uso de la radiografía en el estudio de la pintura, describiremos su ayuda aplicada a otros Bienes Artísticos.

En la escultura, conoceremos el interior, uniones, ensamblajes, elementos metálicos, materiales empleados, etc. En las Figuras 4 y 5 se observa la manera constructiva de esta talla de madera que representa a una “Virgen con Niño”. La veta de la madera, la forma de trabajar la materia, los clavos que se encuentran en la cabeza del Niño y el estado de conservación de su policromía.



Figura 5. Radiografía. Talla de madera. Macro mostrando el estado de conservación.

Las Figuras 6 y 7 corresponden a una Clave de madera. Con la radiografía observamos que el soporte está compuesto de varias piezas ensambladas entre sí, vemos la dirección de la veta de la madera en cada una de ellas y el refuerzo interno en donde se han empleado piezas metálicas. Podemos comprobar el defectuoso estado de conservación que presentaba antes de su restauración, principalmente en las caras de los ángeles, con las faltas en capa pictórica e imprimación.

También el mobiliario puede obtener datos ventajosos de estos estudios. La radiografía de una banqueta de madera, nos permite comprobar el mal estado de conservación interna en que se encontraba la parte correspondiente a una pata de las patas debido a un ataque de insectos xilófagos. (Fig. 8)

Sin embargo, dicho campo de aplicación es más abierto, ya que es factible su uso tanto en obras realizadas con diferentes técnicas, como sobre diferentes materiales. Ejemplo de lo dicho son los actuales estudios que se realizan sobre pergaminos, códices iluminados, textil, etc. (Fig. 9).

Aplicado al campo de la arqueología vemos que los objetos encontrados en los yacimientos presentan una problemática interesante para estudiar radiográficamente. En la cerámica o porcelana la aplicación de la radiografía nos proporcionará datos importantes no sólo en la restauración, sino también para el estudio de su manufactura. Por ejemplo, si la cerámica es una pieza que

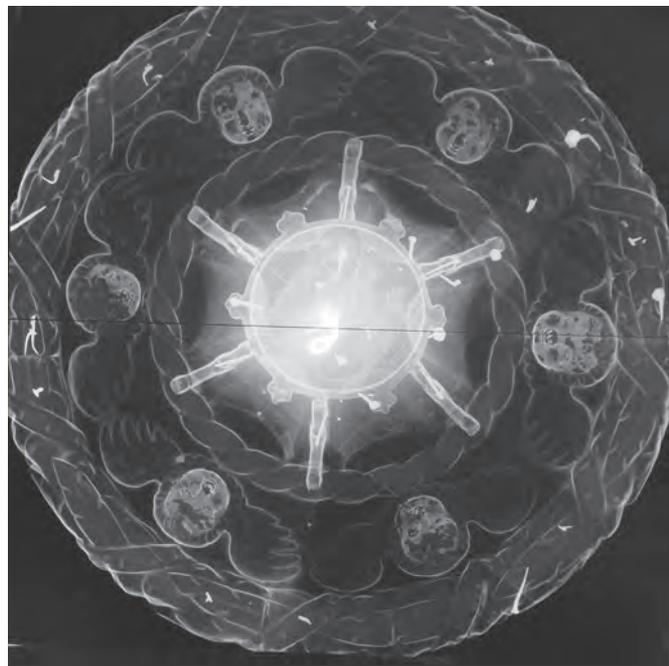


Figura 6. Radiografía. Clave, realizada en madera. Se puede ver la técnica de ensamblaje y el estado de conservación.

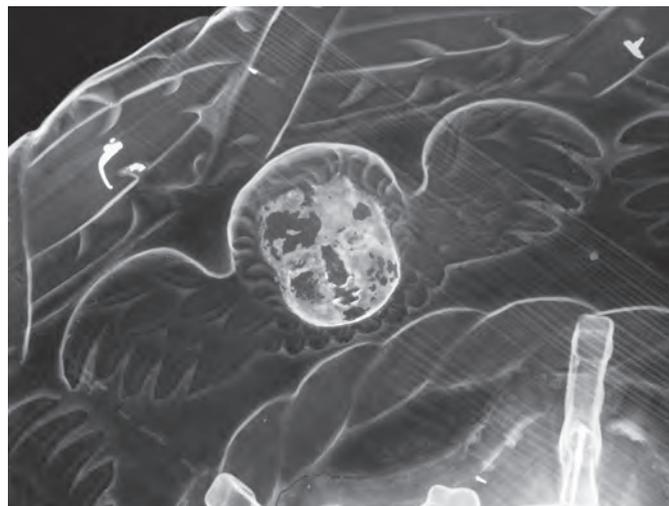


Figura 7. Radiografía. Clave. Detalle estado de conservación y de elementos metálicos.

proviene de un yacimiento arqueológico, podremos conocer si hay objetos o no en su interior, datos que son de gran importancia para su clasificación y conocimiento en costumbres o usos en su época, también nos puede proporcionar datos de la fábrica.

En el caso de los metales, los objetos que se sacan de una excavación pueden presentar serios problemas a la hora de su identificación pues suelen tener un alto grado de degradación que deforma su forma externa ya sea porque estén recubiertos por otros elementos ajenos a él o bien por el grado de corrosión que presentan. Para ello, un examen radiográfico nos ofrecerá la imagen real del objeto (interna y externa) pudiendo proceder



← **Figura 8.** Radiografía. Mobiliario. Estado de conservación: ataque de insectos xilófagos.



↑ **Figura 9.** Radiografía. Textil. Detalle en donde se puede observar la manufactura empleada.

a intervenir con mayor seguridad o como ayuda en el estudio y clasificación de la misma. Otros datos que podremos observar con mayor claridad son las marcas, punzones, cincelado, soldaduras; en resumen, datos que ampliarán el historial de la pieza.

Respecto a su aplicación al estudio del papel o material gráfico, observaremos con mayor claridad detalles que ayudaran a su clasificación o conservación como pueden ser las marcas de agua o distribución de la fibras del papel, datos que ayudaran a corroborar su autenticidad o falsedad ya que dependiendo de la fecha en que se realizó el papel a estudiar y su calidad podremos comprobar su pureza, en ocasiones y sobre todo para clasificar la fecha o autenticar la obra. Estos datos pueden ser de gran utilidad en el campo del grabado por la reutilización y sucesivas “tiradas” que se suelen hacer de una misma plancha

Con lo dicho, podemos comprobar que la radiografía puede ser un medio muy útil para los restauradores o historiadores dando, en ocasiones, unos datos indispensables en el conocimiento del estado de conservación de las obras, proporcionando datos para poder ayudar en la identificación de las piezas, a qué grado de reconstrucción se debe o puede llegar.

Respecto a la Reflectografía de I.R, generalmente se piensa en su aplicación al estudio del dibujo subyacente de las pinturas, pero también la imagen que nos proporciona nos ayudará a conocer mejor el estado de conservación de la obra.

Actualmente, los sistemas de toma de imágenes han mejorado ostensiblemente. Ejemplo de ello, son las investigaciones que se están realizando actualmente por parte de Araceli Gabaldón y Tomás Antelo (proyecto VARIM) del *Departamento Científico de Conservación. Unidad de Estudios físicos* del Instituto del Patrimonio Cultural de España o por Duilio Bertani de la Universidad de Milán.

En estos momentos y por medio de una colaboración realizada entre el Instituto de Conservación y Restauración de la Comunidad Valenciana (I.V.A.C.O.R.), la Universidad de Milán y el Museo del Prado, contamos para realizar este análisis el Prototipo diseñado por Duilio Bertani, empleado en la realización de la exposición



Figura 10. Reflectografía de I.R. Pintura. Se observan cambios de composición y la factura del dibujo.

El Trazo Oculto. Dibujos Subyacentes en Pinturas de los Siglos XV y XVI del Museo del Prado.² Las características de dicho Reflectógrafo aparecen detalladas en el capítulo del catálogo realizado con motivo de esta exposición.³

Con él, se están estudiando un conjunto de tablas pertenecientes a la escuela valenciana de los siglos XV y XVI. La idea de este

²“La Reflectografía Infrarroja”. *El Trazo Oculto Dibujos Subyacentes en Pinturas de los Siglos XV y XVI*. Museo Nacional del Prado. Ministerio de Cultura 2006 Museo del Prado.

³Bertani, D. “La Reflectografía Infrarroja”. *El Trazo Oculto Dibujos Subyacentes en Pinturas de los Siglos XV y XVI*. Museo Nacional del Prado. Ministerio de Cultura 2006 Museo del Prado.

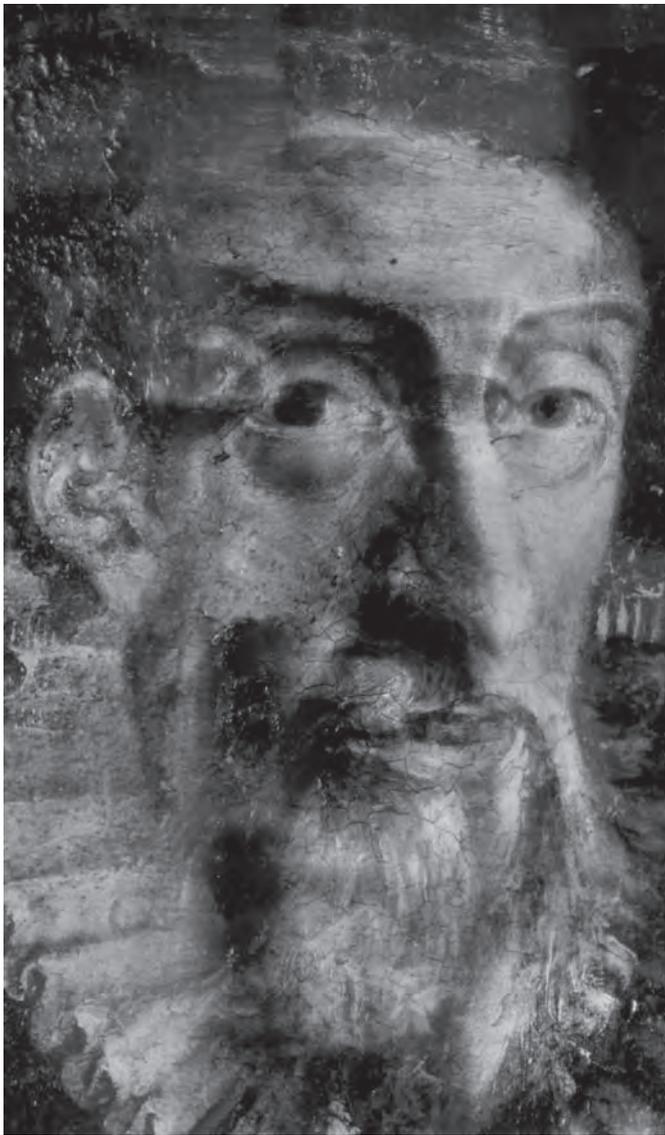


Figura 11. Reflectografía de I.R. Pintura. Se observan cambios de composición y la factura del dibujo.

estudio surgió debido al interés desde el IVACOR por realizar una correcta restauración de las obras que llegan a sus departamentos y lograr un mayor conocimiento de las técnicas y los materiales empleados por los artistas que realizaron dichas obras.

Igual que con la radiografía, la aplicación de la Reflectografía de infrarrojos se puede emplear en una serie de campos en donde podemos conseguir buenos resultados, uno de ellos es la restauración, en donde hallaremos algo más que un mapa de intervenciones antiguas. También podemos aplicarla a obras realizadas sobre diferentes materiales como son códices iluminados, escultura policromada, pintura mural, etc. Con ello estudiaremos y llegaremos a conocer más datos sobre la realización y técnica empleada por los artistas.

Los datos que obtendremos por medio de este sistema son una posibilidad de estudiar mejor el dibujo subyacente y las posi-



Figura 12. Reflectografía de I.R. Pintura. Con esta imagen se puede observar la dirección de pincelada, estado de conservación.



Figura 13. Reflectografía de I.R. Pintura. Mapa de reintegraciones antiguas.

3.2. Estudio de las condiciones microclimáticas y lumínicas. Metodología y práctica en la sede del Instituto del Patrimonio Cultural de España

Guillermo Enríquez de Salamanca, María Teresa Gil Muñoz

Instituto del Patrimonio Cultural de España

Introducción

El seguimiento de las condiciones climáticas del edificio del Instituto del Patrimonio Cultural de España (en adelante IPCE) tiene un historial que se remonta a la década de los 90. Sin embargo, el estudio de las condiciones lumínicas que afectan a los distintos espacios, ya sea de forma natural o artificial, se ha empezado a abordar en detalle en el año 2007. En curso se encuentra la adquisición de un equipo de seguimiento de contaminantes que en un ambiente urbano como en el que nos hallamos influyen en el deterioro de las obras de arte, además de los gases que pueden emitir otros elementos como mobiliario, etc.

El conocimiento de las condiciones ambientales (humedad, temperatura, iluminación y contaminación), junto con otros factores de deterioro, nos va a servir para ir centrando las bases de lo que será el Plan de Conservación Preventiva de la sede del IPCE.

Este estudio se centrará, exclusivamente, en el seguimiento de las condiciones microclimáticas y lumínicas del IPCE.

Sirva de agradecimiento a Juan A. Herráez, artífice y generador de todo el trabajo que actualmente se desarrolla en la Sección de Conservación Preventiva del Área de Laboratorios del IPCE, del cual somos partícipes en el día a día y sin el cual este artículo no hubiera tenido lugar.

Características del edificio.

Instalaciones para el control ambiental

El edificio del Instituto del Patrimonio Cultural de España es declarado Bien de Interés Cultural, por Real Decreto 1261/2001 de 16 de noviembre (BOE de 30 de noviembre de 2001, nº 287).

Ubicado en la Ciudad Universitaria de Madrid, junto a la zona centro, es un edificio exento, de forma circular en planta, cuya distribución radial gira en torno al vestíbulo en las plantas primera y segunda y biblioteca, bajo el vestíbulo, en la entreplanta y planta baja. Por lo tanto, es un edificio que dispone de todas las orientaciones posibles frente a los condicionantes climáticos y de iluminación del exterior.

Se trata de una estructura de hormigón armado y particiones interiores de fábrica de ladrillo, con montante de vidrio en algunos casos. La disposición radial de los espacios se corresponde con sectores (a modo de gajos) de encendido y apagado de la calefacción e iluminación.

El acristalamiento es doble en carpintería de aluminio, practicable mediante corredera.

Desde la Sección de Conservación Preventiva se lleva a cabo un control pasivo de la humedad en todos los talleres y departamentos, con humedad relativa media anual del 30 %, que puede oscilar entre el 25-55 % a lo largo del año. Se dispone de humidificadores o equipos móviles para cuando sea requerido por la obra en su depósito o intervención a ejecutar en talleres.

La excepción la constituyen las dos salas acondicionadas, ya que la Sala Acondicionada 1 (en la planta 1ª) tiene un aparato humidificador con suministro automático de agua, que nos permite establecer unas condiciones del 30-60 % de humedad relativa; y la Sala Acondicionada 2 (en la planta 2ª) en donde hay instalados dos climatizadores con control automatizado de humedad relativa y temperatura, pudiendo fijar unas condiciones estables que oscilan entre el 30-75 % de humedad relativa.

El sistema de calefacción es autónomo, con control de temperatura independiente, de tubo radiante en suelo y termostato de control por sectores.

No existe un sistema de extracción o renovación del aire del edificio. Los talleres de restauración disponen de equipos móviles de extracción de contaminantes del aire por el uso de productos químicos, así como de campanas de extracción ubicadas en diferentes talleres y laboratorios. A excepción de la Sala Acondicionada 2 que tiene un sistema entálpico de renovación de aire. En curso hay un estudio de viabilidad de climatización del edificio. (Figs. 1, 2 y 3).

La iluminación natural es filtrada en parte del edificio mediante estores (en algunos talleres de las plantas baja, primera y segunda) y persianas de PVC enrollables de caja (plantas primera, segunda y tercera), ambos con sistemas de accionamiento manual. La iluminación artificial general se debe principalmente a lámparas de tubos fluorescentes, controlados en su encendido y apagado de forma sectorizada. En todos los departamentos se dispone de lámparas de apoyo portátiles, mesas de luz en su caso, etc.

Hay un seguimiento continuo de iluminancia en la Sala Acondicionada 2 desde enero de 2008 que, además, tiene una caja de servicios a la entrada de la sala para control de la electricidad de la misma.



Figuras 1 y 2. Interior de la Sala Acondicionada 2. En ambas imágenes se puede ver el sistema de climatización, a modo de torres, y el sistema entálpico de renovación de aire con bocas de aspiración localizada.



Figura 3. Sala Acondicionada 1. En la parte inferior derecha se puede ver el humidificador por evaporación.

La Conservación Preventiva. El Plan de Conservación Preventiva

La definición, el concepto de prevención, de preventiva está ligada a la idea global de pérdida del final y de inalterabilidad de los acontecimientos (en su presente y futuro) mediante la creación de una serie de mecanismos, herramientas y decisiones que así lo permitan. La “prevención” está tratando de generar un espacio de seguridad. Si se intensifica la interpretación del concepto de prevención, o mejor se mal interpreta, se llega como diría Gaël de Guichen a propósito de la conservación preventiva a la radicalidad absoluta, al extremismo, a la “Conservación Talibán”. El equilibrio deberá pasar por encima del dogmatismo.

La definición de conservación preventiva, que se viene dando y que se está abriendo hacia vías de acción más o menos modernas,

siguiendo las corrientes de estudios de riesgo, pasa por conceptos como el de tiempo, el de control, el de método, el de cadena¹

La creación de métodos de aplicación al procedimiento de la conservación preventiva² es de un tiempo a esta parte uno de los focos de investigación en el ámbito de la conservación. La metodología es desde luego la herramienta de esta disciplina, es la que debe asegurar la conservación preventiva en su ámbito de aplicación en el a priori, en el a posteriori y en el recorrido.

El Plan, el programa, son vocabulario común en cualquier intento organizativo y de intervención. De este modo, la conservación preventiva, como disciplina práctica de intervención, utiliza estos conceptos, y concretamente en su planteamiento teórico-conceptual, utiliza la palabra “Plan” para desarrollar el mapa cognitivo sobre los factores de riesgo del bien cultural y su posterior aplicación.

El Plan de Conservación Preventiva no es sólo el mantenimiento, no es sólo medir la temperatura, la humedad relativa, la iluminación, hacer un plan de emergencias, etc. El Plan de Conservación Preventiva es el todo. Es el análisis sistemático de los posibles riesgos y la elaboración y toma de medidas y decisiones a lo largo del tiempo.

En el IPCE se viene desarrollando conservación preventiva por todo el personal del centro y en particular, de una manera más exhaustiva, por parte de la Sección de Conservación Preventiva, que ha ido más allá elaborando un Plan de Conservación Preventiva como herramienta global.

¹ Es recomendable repasar el artículo de TAYLOR, J.; BLADES, N. y CASSAR, M. (2006): “Dependency modelling for cultural heritage”. Proceedings of Safeguarded Cultural Heritage - Understanding & Viability for the Enlarged Europe. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of Czech Republic, Praga, ya que trabaja en esta dinámica y aporta bibliografía interesante.

² En la primera reunión internacional sobre conservación preventiva de París en 1992 se ponen de manifiesto los problemas a la hora de definirla, que se caracteriza más por un método de trabajo que por unos contenidos específicos: GUILLERMARD, D. (1992): “La Conservation Préventive”: Colloque International de l'ARAAFU sur la Conservation Restauration des Biens Culturels, París.

El Plan necesita de unos puntos de apoyo que se mueven en parámetros de espacio y de tiempo. De modo básico, ya que no es el cometido del presente artículo, comentar que este Plan está formado por:

Una fase de documentación e informes previos (la idea de curriculum de los bienes culturales) que daría paso a la fase de evaluación de riesgos de conservación aplicados a los mismos (donde entraría el análisis de los riesgos catastróficos como el incendio, inundaciones o sismos, los riesgos relacionados con la seguridad ante conductas antisociales como el robo y el vandalismo, riesgos de daños físicos relacionados con la manipulación y disposición de objetos y colecciones en exhibición, almacenamiento o transporte, riesgos ocasionados por condiciones ambientales inadecuadas relacionados con diferentes parámetros del microclima, la iluminación o la contaminación y riesgos de biodeterioro relacionados con la presencia de plagas)³. Tras el desarrollo de las fases anteriores se estaría en disposición de planificar una actuación o Proyecto de Conservación Preventiva, que puede tener muy diversos objetivos para anular o minimizar los problemas detectados y estabilizar la situación que permita desarrollar posteriormente un trabajo sistemático de seguimiento y control eficaz del riesgo de deterioro. La cuestión fundamental es siempre la utilización de medios y recursos con la proporción adecuada a la probabilidad de la incidencia de dicho riesgo. Estas actuaciones se basan generalmente, de forma aislada o complementaria, en el diseño e implantación de instalaciones y en la programación de procedimientos de seguimiento y control, pero también en la propuesta de modificación de uso del objeto, colección o inmueble y, evidentemente, en la aplicación de tratamientos directos de estabilización de materiales y objetos, siempre que sea necesario, y en intervenciones puntuales y complementarias más cercanas a los tratamientos de restauración.

La Sección de Conservación Preventiva lleva desarrollando en esta fase muchas acciones en colaboración con los distintos técnicos del Instituto: restauradores, conservadores, arquitectos, personal de mantenimiento, personal de seguridad, etc. Cabría destacar como trabajos desarrollados: la ejecución de planos para la evacuación de obras de arte ante una emergencia, creación y acondicionamiento de espacios habilitados microclimáticamente para albergar bienes culturales con características especiales, protocolos de movimiento para bienes culturales de tipologías específicas, e informes sobre los espacios utilizados para la restauración de bienes culturales desde una perspectiva de la conservación preventiva con motivo de su posible modificación en el edificio, etc. (Figs. 4, 5 y 6).

³ El trabajo de Michalski en su mayoría habla sobre este campo, sobre la capacidad de dotar al técnico de la visión global sobre los riesgos, es decir, de generar un criterio. Con una perspectiva bastante sistemática, Michalski relaciona las distintas sensibilidades de los bienes culturales con los posibles riesgos de éstos en su contexto y así intentar crear un criterio en el técnico para que puede ejecutar y gestionar acciones de manera rápida, ágil, eficaz y económica. MICHALSKI, S. (2009): "Evaluación de riesgos medioambientales en las colecciones: ¿se aclimatan los objetos?", Grupo Español IIC, Grupo de Trabajo de Conservación Preventiva del GEIIC, Madrid 7 y 8 de mayo 2009.

La elaboración, planificación y aplicación de un Plan de Conservación Preventiva consistiría en diseñar e implantar una serie de medidas sistemáticas que permitan desarrollar la estrategia de conservación preventiva que debieran tomarse como cuerpo legal de aplicación. En este sentido, desde el IPCE se lleva trabajando desde hace ya tiempo en ese documento y que está aún pendiente de su conclusión.

La última etapa para la elaboración de un Plan de Conservación Preventiva trata del seguimiento del proyecto y comprobación de la eficacia, implantación de mejoras, corrección de pautas inadecuadas y acciones de cambio, además de la difusión y comunicación del trabajo realizado.

Como vemos, el Plan es una herramienta basada en distintas fases que tiene como base el documento final de aplicación. Ese documento no deja de ser eso, un texto que pone por escrito todo el proceso que debe tener una Institución en el ámbito de la protección de los bienes culturales que custodia, utilizando la conservación preventiva como herramienta. Como texto, como documento, se debe poner en marcha. Como vemos, volvemos a la comprensión de la disciplina de la Conservación Preventiva como proceso, como metodología.

Sí es importante tener en cuenta que en cualquier adaptación de un sistema de trabajo para y por la conservación preventiva el criterio es un elemento determinante y, así, habría que mantener como obligaciones para obtener un criterio acertado de actuación las siguientes premisas: por una parte se debe tener un enfoque integral del conjunto que forman los bienes culturales, del edificio que constituye su protección, de las distintas actividades de exhibición, estudio, de las condiciones ambientales que los bienes culturales soportan, y finalmente, se deberá tener un enfoque multidisciplinar en el análisis de los datos

Seguimiento microclimático

Como se ha planteado y han planteado distintos autores, la idea principal para el seguimiento de las condiciones ambientales, donde estaría incluido el estudio de las condiciones microclimáticas, se rige por el principio de sistema. Bajo el farragoso campo de la teoría de sistemas que se da como vía de investigación y de puesta en marcha en otros campos de las ciencias, la conservación preventiva, como muy bien ha explicado Herráez, guarda relación en su funcionamiento con un ecosistema. Así, Herráez se refiere a cómo los bienes culturales viven en un ecosistema donde los factores del medio físico, biológico y humano son determinantes. La parte que nos interesa, aquí y ahora, es como los bienes culturales se encuentran en distintos sistemas, como son el sistema externo, el edificio-contenedor o cualquier elemento constructivo que constituya una protección de las condiciones externas, el sistema interno u otros. Evidentemente, el análisis que realiza Herráez es mucho más pormenorizado y desde luego transmite muchos más detalles que los aquí expuestos.

En definitiva, lo que nos concierne a la hora del seguimiento de las condiciones ambientales es como el medio físico, que es el

ASESORAMIENTO SOBRE PROTOCOLO DE MOVIMIENTOS DE NEGATIVOS DE LAURENT DEL ARCHIVO RUIZ VERNACCI (IPHE)

1. Introducción

Se redacta el presente informe para solucionar los problemas generados por el traslado de los negativos de Laurent pertenecientes al Archivo Ruiz Vernacci (entrepantalla del) a la sala de la fototeca digital (2ª planta del edificio) para su digitalización.

Ante la problemática suscitada en torno a la conveniencia del movimiento de estos BBCC se le pide asesoramiento a la sección de Conservación Preventiva para que evalúe y proponga un protocolo de tan significativas piezas que debido a su "fragilidad" debe contener unas determinadas características en su movimiento y traslado.

De este modo este documento se inicia por esta sección debido al conocimiento sobre las características del edificio (condiciones ambientales, temperatura, iluminación, vías de circulación, etc.) y debido también a que le corresponde la creación de este tipo de documentos, ya que el movimiento de BBCC se encuentra en el ámbito de aplicación de la Conservación Preventiva.

Habría que considerar que el IPHE posee, además del Archivo Ruiz Vernacci, otros archivos de documentación histórica de gran valor en sí mismos, y con fondos fotográficos de similares características y por tanto, sujetos a riesgos de deterioro parecidos, por lo que, aunque el presente informe está enfocado expresamente al Archivo Ruiz Vernacci por una cuestión coyuntural, sería recomendable que el presente trabajo se ampliara y extrapolara a los diferentes archivos fotográficos del IPHE. Todo ello redundaría en un mejor control de los riesgos de deterioro de estos bienes culturales aplicando criterios actualizados de conservación preventiva como le corresponde a una institución como el IPHE en la responsabilidad de conservación del patrimonio que tiene custodiado. Lo ideal sería que esta iniciativa puntual se extendiera y ampliara a los demás archivos, llegando a elaborar un necesario plan de conservación preventiva que contemplara diferentes aspectos de la adecuación o mejora de espacios y procedimientos de control y seguimiento de los riesgos de deterioro, y se elaborara, asimismo, un procedimiento de aplicación en situaciones de emergencia.

3. Observaciones realizadas

Según la situación del archivo, dentro de las dependencias del edificio del IPHE y por tanto, compartiendo espacio común con la sección de Conservación Preventiva, se ha tenido a una información bastante aproximada a la realidad del problema del movimiento de los citados BBCC. Esta información se basa en los siguientes aspectos:

1. El seguimiento de las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura y diferentes parámetros relacionados con la iluminación) del Archivo Ruiz Vernacci (Anexo1) y desde este mes de septiembre, también de la fototeca digital.
2. Evaluación de los riesgos de deterioro de los fondos del archivo.
3. Conocimiento de las vías de circulación del edificio IPHE.
4. Conocimiento e inspección del espacio, medio y método de trabajo que se realiza en el archivo Ruiz Vernacci.
5. Conocimiento e inspección del espacio, medio y método de trabajo que se realiza en la fototeca digital a la hora de su digitalización.
6. Protocolo de movimiento realizado por Carlos Teixidor, conservador del archivo fotográfico Ruiz Vernacci. (Anexo2)

5. Protocolo de movimiento (piezas del Archivo de Ruiz Vernacci)

Asumiendo la digitalización como procedimiento necesario para la conservación de los fondos se recomienda, de forma general, el menor movimiento de estas piezas debido a su fragilidad. Ello implica, según las instalaciones actuales del IPHE el movimiento de las citadas piezas, ante lo cual se especifican a continuación una serie de recomendaciones que se consideran imprescindibles.

1. **Documentación.** Siguiendo unos principios de seguridad se deberá anotar las piezas que son movidas: número, número de registro, características y estado de conservación. Dicho movimiento quedará reflejado en la base de datos correspondiente o en una nueva si así fuera necesario. De este modo se deberá anotar en un campo de localización topográfica de los fondos del Archivo Ruiz Vernacci la localización de dicho bien en el edificio del IPHE cuando no esté en su lugar original.
2. **Manipulación.** La manipulación deberá tener en cuenta los principales factores de deterioro generados por la manipulación de fotografías (huellas dactilares, manchas de grasa, de comida, de bebidas, falta de cuidado en la manipulación que puede provocar cantos dañados, abrasión, estallidos de cristales o rayados). De este modo se recomienda:
 - a. La utilización de guantes para la manipulación de estos BBCC. De este modo se podrán hacer uso de guantes de látex natural 100% sin polvo de talco, o bien guantes de poliamida. Para evitar la sudoración se recomienda la utilización de los guantes de poliamida bajo los de látex.

Figura 6. Extracto de un informe donde a partir del seguimiento de las condiciones microclimáticas se ha podido establecer el protocolo de movimiento interno de BBCC de alta sensibilidad del Archivo Ruiz Vernacci en el IPCE.

que fundamentalmente influye en los distintos territorios donde se encuentran los bienes culturales, y la disposición de membranas o capas, puede permitir un control de las condiciones ambientales que garanticen la durabilidad del bien. Es decir, como bien explica Michalski poniendo un símil bastante simple, el de las muñecas rusas, según vamos avanzando dentro de las distintas muñecas rusas, que serían nuestras membranas, nuestros muros del edificio por ejemplo, nuestros armarios, nuestras vitrinas, vamos obteniendo estabilidad y control de las condiciones microclimáticas y de otros factores de deterioro (Fig. 7).

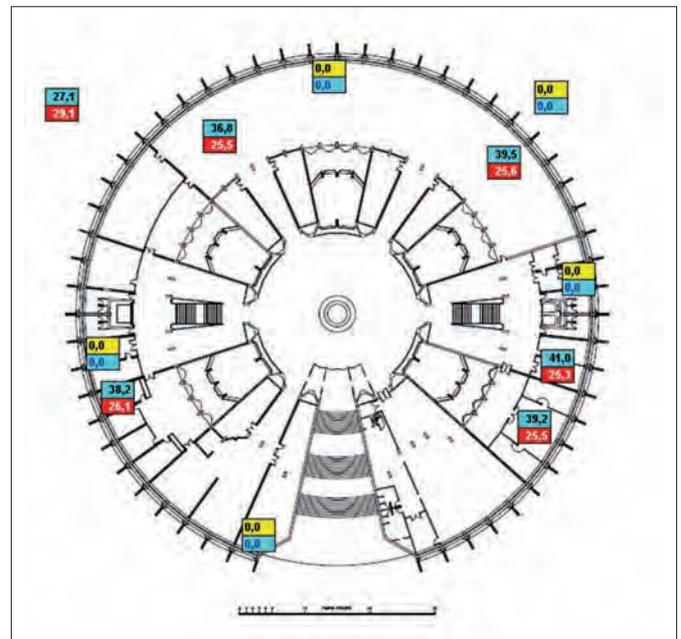
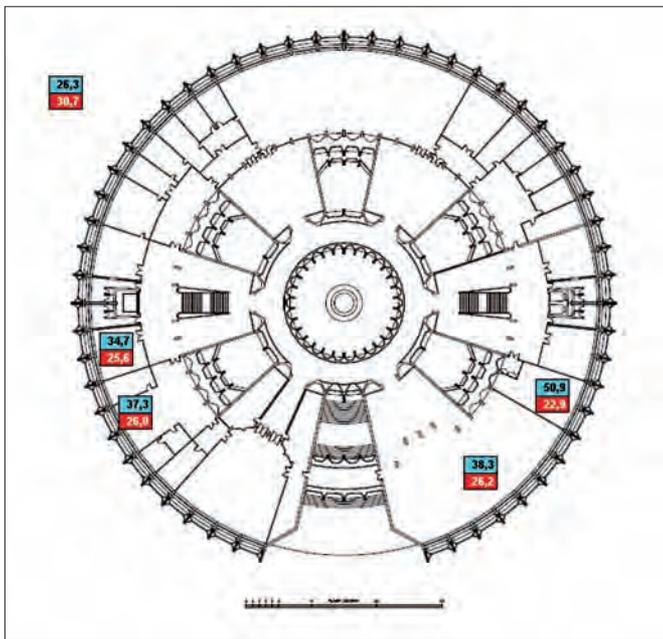
La relación que esto tiene con el seguimiento de las condiciones microclimáticas en el IPCE es notable ya que se debe tener presente a la hora de elegir espacios para el seguimiento, para la determinación de los tiempos, de los medios humanos, de los factores económicos, etc.

Pero, vamos por partes. Hay que tener ciertos factores en cuenta para el estudio y seguimiento de las condiciones microclimáticas.

Por una parte habría que evaluar para qué queremos los datos: para saber si el ambiente es positivo para determinados materia-



Figura 7. Esquema sencillo propuesto por Stefan Michalski. MICHALSKI, Stefan (2007): "Preservación de las colecciones", Cómo administrar un museo: Manual práctico, pp. 51-90.



Figuras 9 y 10. Imagen extraída del panel de control de la aplicación de software del equipo de radio-logger que se encuentra instalado en el IPCE. En las imágenes se pueden ver, situado en el plano del edificio y en distintas plantas, donde se encuentran los sensores y los datos a tiempo real, pudiendo detectar posibles fallos y señales de alarma, además de mantener un sistema de proceso de los datos bastante sencillo y eficaz.



Figura 11. Ejemplo de instalación de los sensores en los distintos puntos de la sede del IPCE.

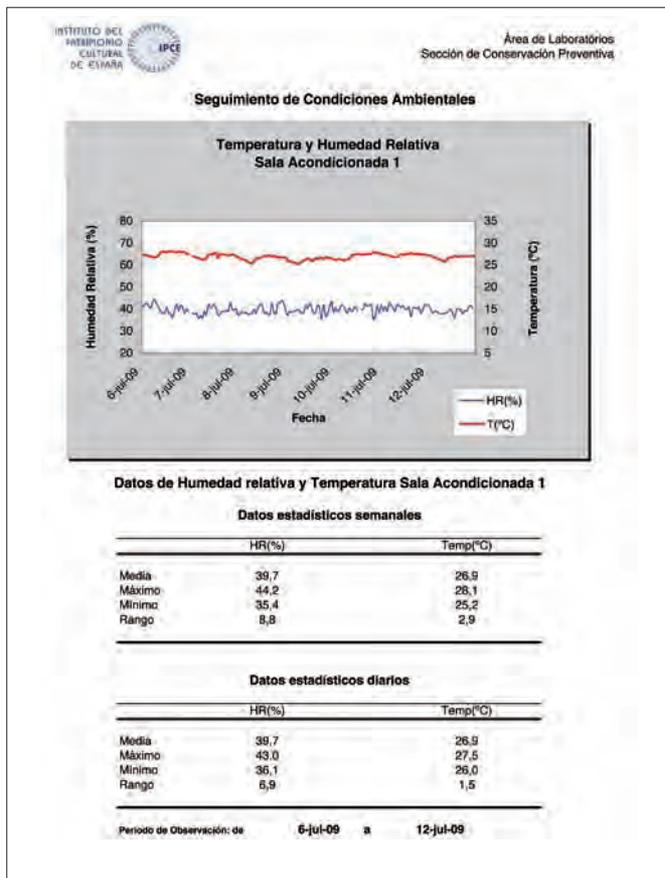
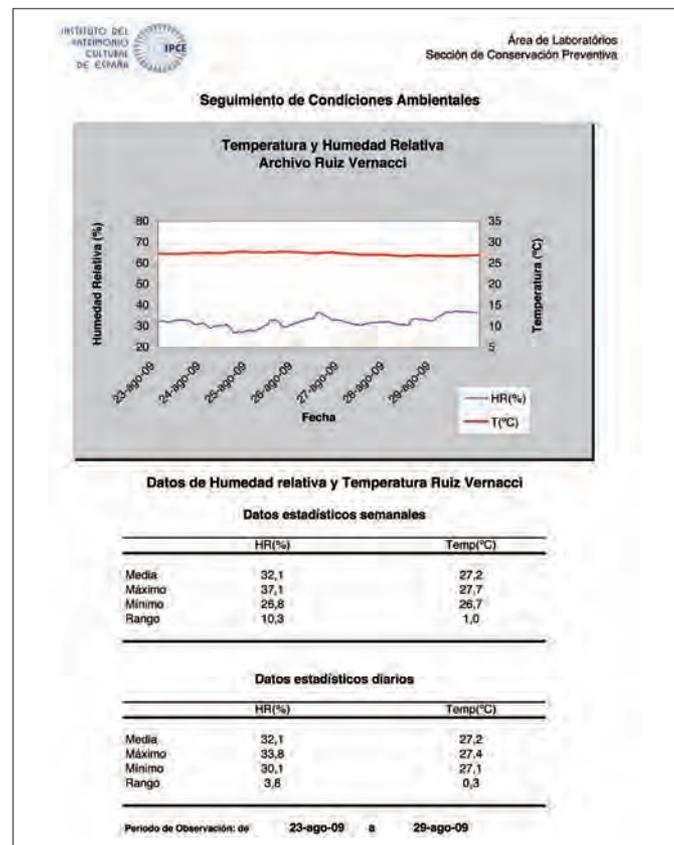
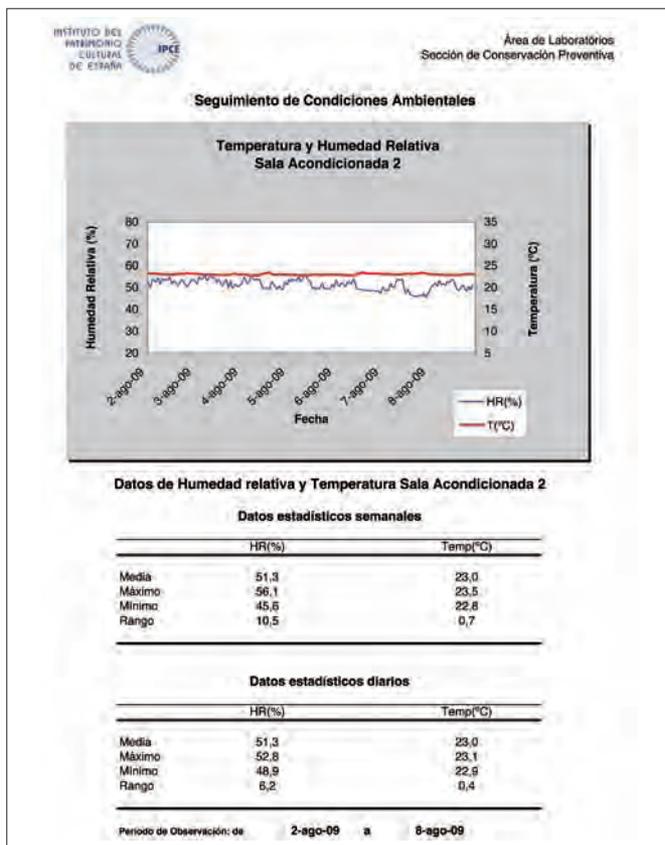
na se elabora a partir de la exportación de los datos en Excel, un análisis de los datos, para que el resto de técnicos implicados en el trabajo de la casa sepan las condiciones microclimáticas que mantienen los bienes que se encuentran depositados, y poder valorar con criterio las actuaciones sobre los bienes culturales. (Figs. 13, 14 y 15).

Dentro de esta política de seguimiento de las condiciones ambientales el Instituto se tiene un histórico de datos desde 1998.

Como ya hemos comentado, todos estos datos nos van a servir para la interpretación y toma de decisiones teniendo en cuenta:



Figura 12. Al igual que la figura anterior (Fig. 11), se puede ver un sensor de seguimiento por radio-frecuencia de humedad relativa y temperatura, en la Sala Acondicionada 2, y un data-logger de iluminancia.

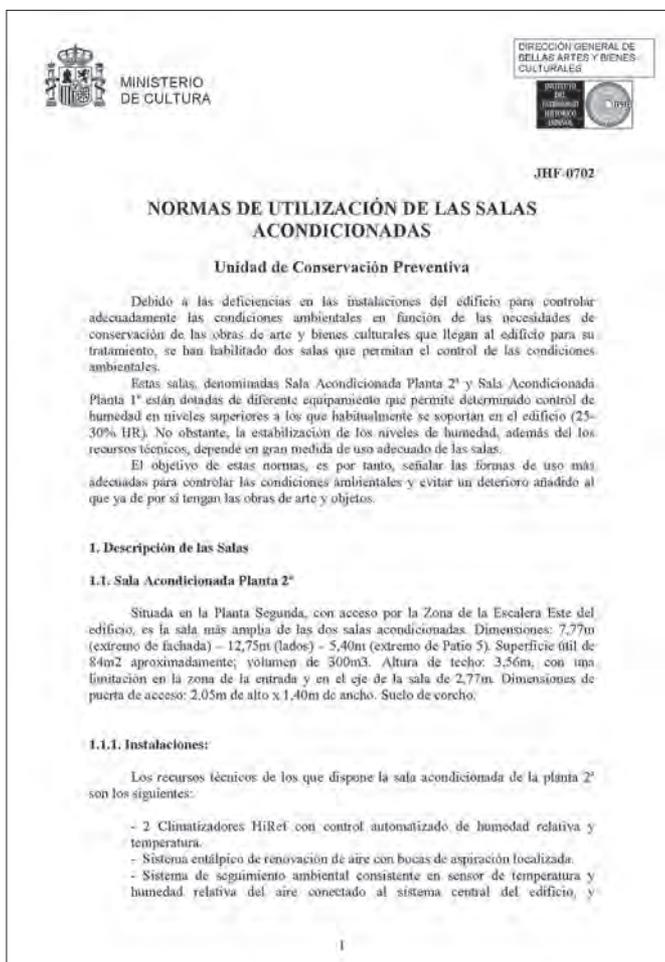


Figuras 13, 14 y 15. Ejemplos de informes semanales que se realizan por la Sección de Conservación Preventiva y que se ponen a disposición del personal en el servidor del IPCE.

el histórico de datos que comentábamos, las condiciones climáticas del exterior, las características del espacio y las condiciones de uso. Así, dependiendo del propósito de la decisión (restauración, movimiento, depósito), del curriculum del espacio y de los bienes culturales, y confiando en el criterio y el curriculum de los profesionales, el seguimiento consigue que este trabajo sea provechoso.

Con el motivo de restauraciones de bienes culturales con condiciones ambientales muy especiales y teniendo en cuenta su estimable utilización a posteriori desde la Sección se inició la creación de un conjunto de salas acondicionadas que permitía el control de las condiciones microclimáticas y que, según los datos que habíamos obtenido en el seguimiento microclimático, se hacía absolutamente necesario para el cumplimiento de determinados trabajos en el IPCE.

Una vez ejecutadas, se realizó un documento de normas de utilización de esas salas acondicionadas del que extractamos los puntos que guardan relación con el seguimiento de las condiciones microclimáticas y que resumen perfectamente estos espacios y suponen un ejemplo, claro y práctico, de cómo la utilización de los datos extraídos del seguimiento microclimático sirven para la toma acertada de decisiones para el control de la condiciones ambientales. (Fig. 16 y 17).



Figuras 16 y 17. Tras el seguimiento de las condiciones microclimáticas, y teniendo en cuenta los datos y las necesidades, se crearon dos salas acondicionadas. Para el buen funcionamiento de estas se generó un documento, de libre acceso por el personal para que supieran del conocimiento y de las capacidades de funcionamiento de estas.

- Cerramientos mediante tabique de fábrica de ladrillo, 2 ventanas al exterior en orientación este, con doble acristalamiento y cámara de 12 mm, tabique de paneles de aglomerado contiguo al departamento de escultura, cerramiento de vidrio fijo en el extremo contiguo al Patio Interior 5.
- Puerta de doble hoja con dimensiones de 2,06 x 1,40 m.
- Ventanas: 2 ventanas de tres elementos móviles de corredera. Dimensiones: ancho 3,75 x alto 1,92 m. Dotadas de persianas de caja y de estores enrollables.
- Tomas de corriente a 220V en el zócalo bajo las ventanas y en el zócalo del cerramiento al Patio 5.
- Toma de red informática.
- Toma de teléfono.

Con este equipamiento, los niveles máximos que de forma estable se podrían alcanzar, con un uso muy estricto de la sala, se sitúa alrededor del 70% HR.

1.2. Sala Acondicionada Planta 1ª.

Situada en la Planta Primera, con acceso por la Zona de la Escalera Este del edificio, es la más pequeña de las dos salas acondicionadas, con una superficie útil de 25 m² aproximadamente (3,80 m en el extremo de fachada, 7,10 m de lado y 3,20 m en el extremo de la puerta) y volumen de 88 m³. Altura de techo de 3,55 m. La puerta de acceso de doble hoja tiene unas dimensiones de 2,02 x 1,38 m, con el inconveniente de un listón inferior que dificulta el uso de carros, caballotes y plataformas con ruedas. Suelo de corcho. Bajo la ventana discurren 2 tuberías del aire acondicionado que da servicio a la cafetería, suponen cierto entorpecimiento y disminución de la superficie útil.

1.2.1. Instalaciones:

Los recursos técnicos de los que dispone la Sala Acondicionada de la planta 1ª son los siguientes:

A continuación referimos algunos puntos de este documento:

1. Descripción de las Salas.

1.1. Sala Acondicionada Planta 2ª.

Situada en la Planta Segunda, con acceso por la Zona de la Escalera Este del edificio, es la sala más amplia de las dos salas acondicionadas. Dimensiones: 7,77 m (extremo de fachada) – 12,75 m (lados) – 5,40 m (extremo de Patio 5). Superficie útil de 84 m² aproximadamente; volumen de 300 m³. Altura de techo: 3,56 m, con una limitación en la zona de la entrada y en el eje de la sala de 2,77 m. Dimensiones de puerta de acceso: 2,05 m de alto x 1,40 m de ancho. Suelo de corcho.

1.1.1. Instalaciones:

Los recursos técnicos de los que dispone la Sala Acondicionada de la planta 2ª son los siguientes:

- 2 climatizadores HiRef con control automatizado de humedad relativa y temperatura.
- Sistema entálpico de renovación de aire con bocas de aspiración localizada.
- Sistema de seguimiento ambiental consistente en sensor de temperatura y humedad relativa del aire conectado al sistema central del edificio.
- Seguimiento de los niveles de iluminancia global en la sala.

- Humidificador Defensor PH26 con suministro automático de agua.
- Sistema de calefacción por hilo radiante general del edificio pero con termostato de control de temperatura situado bajo la ventana de la sala.
- Sistema de seguimiento ambiental consistente en sensor de temperatura y humedad relativa del aire conectado al sistema central del edificio.
- Cerramientos mediante tabique de fábrica de ladrillo en lateral derecho con montante de cristal desde los 2,10 m; ventanal con las características descritas más adelante, en el extremo de fachada con orientación este; panelado de madera con montante de cristal en lateral izquierdo y cierre de entrada.
- Puerta de doble hoja con dimensiones de acceso útil 2,02 x 1,38 m, con el inconveniente mencionado del listón inferior.
- Ventana de tres elementos móviles de corredera. Dimensiones: ancho 3,75 x alto 1,92 m. Dotadas de persianas de caja y de estores enrollables.
- Tomas de corriente a 220V en el zócalo bajo la ventana.
- Toma de red informática.
- Toma de teléfono.

Con este equipamiento, los niveles máximos que de forma estable se podrían alcanzar, con un uso muy estricto de la sala, se sitúa alrededor del 60% HR, siendo prácticamente imposible alcanzar niveles estables superiores al 65% HR. En esta sala se puede establecer un buen control de la humedad en niveles medios, pero el contrarrestar niveles altos originados por tiempo lluvioso en el exterior requeriría el control manual de la temperatura mediante el termostato del sistema de calefacción.

2. Normas de Utilización de las Salas.

El uso de estas salas se restringirá al tratamiento de obras de arte y bienes culturales con requerimientos de humedad estable en niveles superiores al 30% HR, teniendo como límite máximo con los recursos técnicos actuales 65% HR para la Sala Acondicionada Planta 1ª y 75% para la Sala Acondicionada Planta 2ª. Puesto que el espacio disponible en las salas y las posibilidades de fijar diferentes niveles de humedad son limitados, es necesario establecer una coordinación para el uso de las mismas.

Por otra parte, el mantenimiento de niveles de humedad muy diferentes a los que se dan de forma habitual en el interior del edificio exige una utilización especializada de los recursos técnicos disponibles y un control de las actividades que se desarrollan en las salas, lo que implica respetar ciertas normas de utilización y mantenimiento de estos espacios.

2.1. Coordinación.

A efectos de coordinación es imprescindible la comunicación anticipada mediante nota interna, por parte de cada jefe de departamento, indicando las fechas previstas de entrada y

salida de las obras y objetos a tratar, las condiciones ambientales de referencia, así como el/los técnico/s responsable/s de las obras. Esta nota será remitida al Área de Laboratorios – Sección de Conservación Preventiva, que en función de las obras, las condiciones de humedad relativa necesarias y los periodos de tratamiento de dichas obras, coordinará la programación de uso de la sala.

Los criterios de aceptación de piezas se basarán exclusivamente en:

- Compatibilidad de los requerimientos de humedad.
- Disponibilidad de espacio
- Programación en el tiempo de entrada y salida de piezas para su tratamiento.

2.2. Manejo de los recursos técnicos.

Las salas están dotadas de los recursos técnicos e instalaciones descritas anteriormente. La programación, ubicación y uso de los aparatos y del espacio se fijará en el inicio de cada tratamiento entre el restaurador responsable del tratamiento y la Sección de Conservación Preventiva, y no se modificará sin conocimiento de ambos.

Esto afecta a:

- Manipulación de los aparatos humidificadores, climatizadores, etc.;
- Manipulación de los aparatos de medición y registro;
- Ubicación de los aparatos;
- Rutinas de ventilación de las salas;
- Procedimientos para la utilización de productos químicos;
- Control de las tareas de mantenimiento de las salas.

2.3. Determinación del nivel de humedad.

Para la determinación de los niveles de humedad, y otros parámetros relacionados con las condiciones ambientales en general (temperatura, iluminación, etc.) se estudiarán previamente las referencias existentes sobre las obras a tratar junto con los responsables del tratamiento de las mismas. Los niveles de humedad y otras medidas de control que finalmente se establezcan en las salas acondicionadas dependerán de este estudio y de las posibilidades de control de las propias salas.

2.4. El seguimiento de las condiciones ambientales.

Independientemente de los medios de control es imprescindible realizar un seguimiento de las condiciones ambientales. La Sección de Conservación Preventiva, mediante el sistema de seguimiento de condiciones ambientales de las instalaciones del edificio, realizará un seguimiento continuo elaborando gráficos y análisis estadísticos básicos con periodicidad semanal y mensual. Esta información estará accesible a los interesados en la red informática del IPCE. No obstante el seguimiento se realizará diariamente con la supervisión de las condiciones en la sala de forma remota en el ordenador ubicado en la Sección de Conservación Preventiva o directamente, en cada sala con la observación de los data-loggers que permitirán un seguimiento continuo a los técnicos que trabajen en las salas. Estos últimos requieren una calibración periódica.

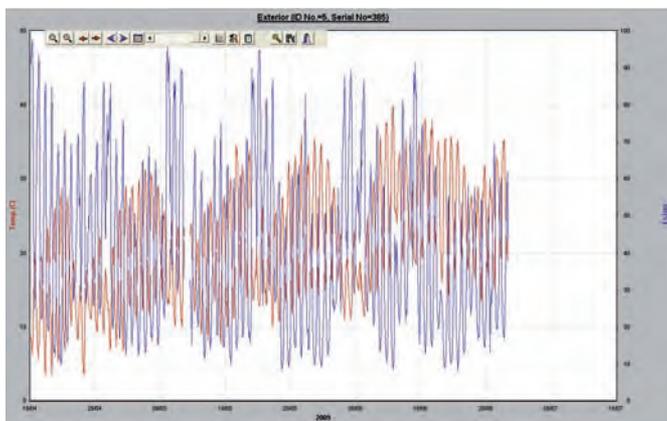


Figura 18. Gráfica tomada por el sensor en el exterior, sensor muy importante a la hora de valorar las condiciones microclimáticas, donde se ven las tremendas oscilaciones en cuanto a temperatura y humedad que se dan a lo largo del día.

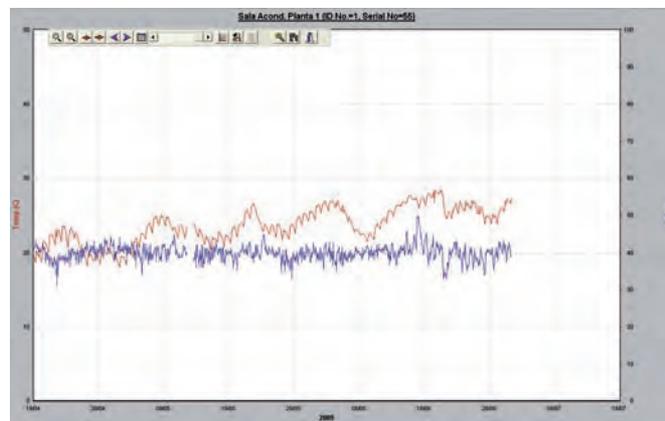


Figura 19. Gráfica del interior del IPCE, concretamente de la Sala Acondicionada 1, donde se puede ver claramente como y gracias a los humidificadores se mantiene un cierto control de la humedad relativa, pero que en cuanto a temperatura, en invierno aún teniendo un sistema de calefacción por hilo radiante, y debido al déficit del aislamiento del edificio, no se tiene toda la estabilidad térmica deseada pero sí de la recomendable. En verano, como se ve en la gráfica, al no tener un sistema de impulsión de aire frío central o parcial, la temperatura sufre variaciones que pueden llegar a ser aceptables si se realizan rutinas de ventilación y de apantallamiento de la insolación directa.

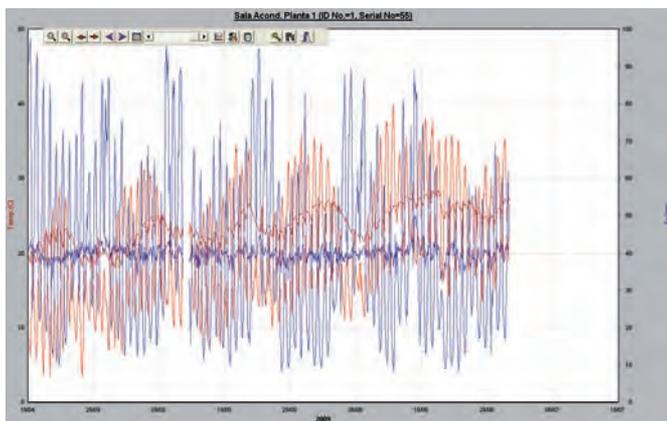


Figura 20. Gráfica de superposición del sensor en el exterior y el sensor de la Sala Acondicionada 1, donde se ve claramente la importancia de la membrana del edificio (relación del sistema externo con el sistema interno) y de como con un sistema de control y una cierta compartimentación se puede crear una cierta estabilidad. El seguimiento, por ejemplo aquí, es determinante para saber si lo hemos conseguido y cómo se puede conseguir.

Cuando se detecten anomalías reseñables deberán ponerse en conocimiento de todos los técnicos implicados para establecer el procedimiento de control a seguir.

2.5. La ventilación de las salas.

Las rutinas de ventilación son procedimientos importantes para la renovación del aire y la ventilación dentro de las salas acondicionadas, sin embargo, suponen una perturbación de la estabilidad de las condiciones ambientales. Por ello es importante seguir las indicaciones que a continuación se detallan para cada una de las salas.

Para la Sala Acondicionada Planta 2ª es recomendable conectar el sistema de extracción a diario durante 5 ó 10 minutos a una potencia media. Para la Sala acondicionada Planta 1ª la ventilación y renovación del aire se hace con la apertura de las ventanas a diario durante 5 ó 10 minutos, dependiendo de las

condiciones ambientales del exterior y siguiendo las especificaciones preestablecidas para cada proyecto.

2.6. Control de acceso y apertura de puertas.

El acceso a estos espacios debe ser restringido en el sentido de evitar aglomeraciones o aperturas y cierres de puerta frecuentes o excesivos.

La puerta de acceso se mantendrá siempre cerrada excepto en los procedimientos de entrada y salida de personal y obras. En la sala de la planta 2ª, es importante que la apertura de una puerta sea seguida de su cierre para después abrir la posterior, evitando oscilaciones en las condiciones ambientales de la sala. En la sala de la planta 1ª no se dispone de la compuerta de entrada, por lo que es más importante aún que para el acceso y salida de obras y personas, la puerta se mantenga abierta el menor tiempo posible.

2.7. La limpieza del espacio

La limpieza de las salas es imprescindible, y debe ser hecha de forma controlada, programándose con el/los técnico/s responsable/s de la obra de arte o bien cultural y coordinándose con el servicio de limpieza.

En definitiva, como se ve en el documento, el seguimiento de las condiciones ambientales, microclimáticas en este caso, es una parte del proceso. En el IPCE este seguimiento no sólo permite a los técnicos de la casa tomar decisiones a la hora de la intervención o depósito, y tomar medidas mientras estas tuvieran lugar, sino que también han servido para conocer exactamente las necesidades de control de las condiciones microclimáticas, las deficiencias, y por tanto la necesidad de climatización de dos espacios para asegurar la conservación de los bienes culturales desde que entran en el IPCE (Figs. 18, 19, 20, 21, 22)

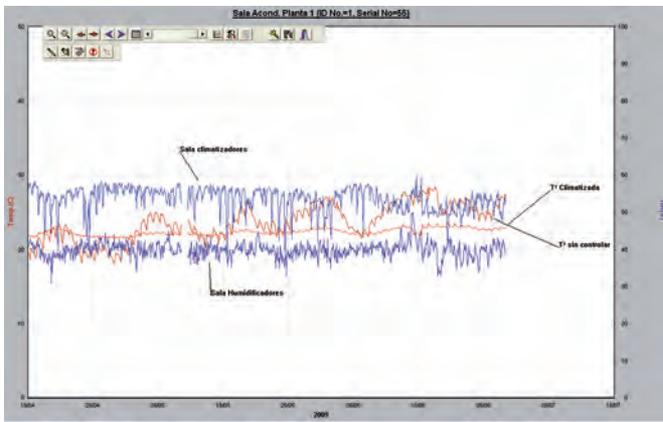


Figura 21. En esta gráfica se ha superpuesto la Sala Acondicionada 1 con la humedad controlada y la temperatura ligeramente controlada y la Sala Acondicionada 2 que tiene un control preciso de humedad y temperatura. Como se ve en la gráfica la humedad en ambas salas está controlada, con la gran diferencia de que en la Sala Acondicionada 2 se está obteniendo una humedad de entre 50-55% mientras que en la Sala Acondicionada 1 la humedad está obteniendo un 40%, una clara diferencia de control que necesita una equitación más precisa y un control de la temperatura especializado.

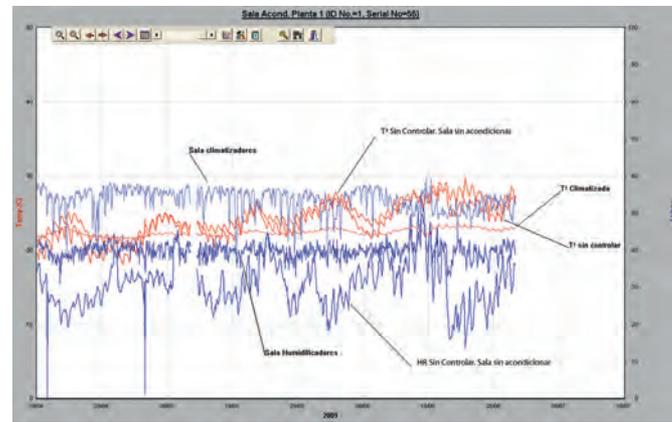


Figura 22. A la gráfica anterior (Fig. 21) se le superpone una sala normal del centro, que no tiene control de la humedad ni de temperatura en verano. Es interesante esta gráfica ya que gracias al seguimiento del control de las condiciones microclimáticas se puede ver las distintas membranas que se pueden obtener en un edificio y como, con una adecuada intervención y seguimiento, se llega a controlar la temperatura y la humedad de una manera acertada sin la necesidad de grandes inversiones económicas.

Seguimiento de las condiciones lumínicas

En los talleres de restauración, salas acondicionadas, archivos y depósitos se ha llevado a cabo un seguimiento continuo anual de tomas puntuales de distintos parámetros de iluminación: iluminancia, radiación UV, coordenadas de cromaticidad y temperatura de color correlacionado.

El nuevo equipo monitorizado incorpora cinco sensores que miden la iluminancia y radiación UV, tanto en el interior del edificio según las cuatro orientaciones como en el exterior.

El control de las condiciones lumínicas viene determinado por el factor de deterioro o fotodegradación, que se debe a los parámetros de exceso de iluminancia y presencia de radiación UV, así como por el factor de iluminación en talleres y circulaciones, archivos y depósitos.

Los instrumentos de medición in situ, convenientemente calibrados, que se han utilizado son un colorímetro y un radiómetro con receptor de respuesta espectral entre 360 y 480 nm. Con el colorímetro se han obtenido datos de iluminancia, coordenadas de cromaticidad y temperatura de color correlacionado y con el radiómetro se ha medido la radiación ultravioleta.

La radiación ultravioleta es una radiación electromagnética con una longitud de onda menor (380 – 10 nm) que la del espectro visible (380 – 780 nm). Determinadas lámparas emiten radiación UV, como los tubos fluorescentes siendo ésta la principal fuente de iluminación de la sede del IPCE.

Los niveles de iluminación dependen de la naturaleza de los materiales y su estado de conservación y de si estos permanecen en lugares de exposición o en lugares de trabajo de restauración de obras de arte.

Hay unos niveles mínimos de iluminación en la utilización de los lugares de trabajo establecidos en la Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos, elaborado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo en cumplimiento del Real Decreto 486/1997.

Los niveles mínimos recomendados según exigencia de la tarea y su categoría quedan establecidos por las normas UNE 72 - 163 - 84 y UNE 72 - 112 - 85, y recogidos en este Real Decreto.

Los parámetros que establece la norma europea EN 12464-1 según lugar o actividad, se adjuntan en este mismo Real Decreto y se refieren al nivel medio de iluminación mantenido sobre el área de trabajo, índice unificado de deslumbramiento, índice de rendimiento en color de las fuentes de luz y temperatura de color de las fuentes de luz.

Se recomienda eliminar la radiación con una longitud de onda menor de 400 nm. y el nivel máximo de irradiancia que se maneja es de 75 $\mu\text{W}/\text{lm}$ (Thomson, 1998), ó 50 $\mu\text{W}/\text{lm}$ según la bibliografía actual o incluso menor según la vulnerabilidad de los objetos (Michalski, 1997).

Las distintas fases a seguir para la toma de datos in situ han sido:

- Elección de los espacios (presencia de bienes culturales: talleres, archivos, depósitos y almacenes).
- Estudio de los condicionantes de cada espacio: puesto de trabajo o depósito.
- Elaboración de tablas para la recogida de datos.
- Toma de datos in situ (fotometría: iluminancia; radiometría: irradiancia; colorimetría: coordenadas de cromaticidad y temperatura de color correlacionado). Es conveniente tener en cuenta la hora solar: de marzo a octubre con 2 horas de adelanto, de octubre a marzo con 1 hora de adelanto.

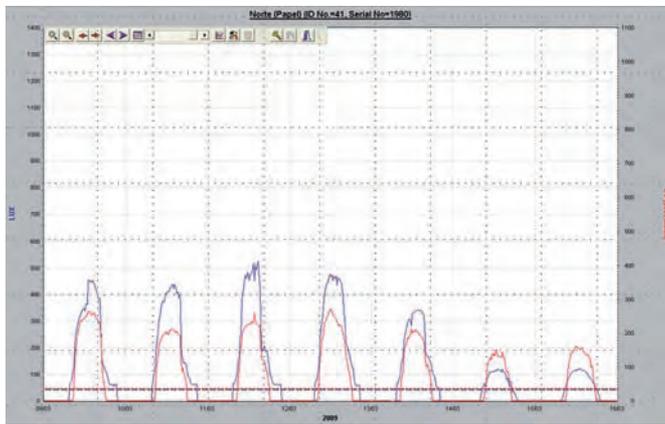


Figura 23. Gráfica obtenida del equipo monitorizado, correspondiente a un sensor ubicado en un taller con orientación norte.

- Procesado y evaluación de la toma de datos, según los requerimientos de cada espacio y orientación.
- Elaboración de gráficas e informes.
- Interpretación de los datos.
- Diagnóstico.
- Propuesta de actuación.

Para el desarrollo del Plan de Conservación Preventiva del edificio del IPCE, siendo previo el estudio de las condiciones ambientales que se dan en el mismo, se encuentra en marcha un seguimiento ambiental, en el que parte lo forma el sistema de iluminación que contempla tanto la iluminación natural como la artificial.

El equipo monitorizado de toma de datos se ha ampliado en junio de 2008, de tal manera que incluye unos sensores de iluminación y radiación UV tanto al interior como al exterior: cuatro al interior según los cuatro puntos cardinales y en una misma planta y otro al exterior en la orientación más desfavorable.

Del mismo modo a como se procede desde la Sección de Conservación Preventiva en el seguimiento de las condiciones ambientales existentes en cada Departamento, con recogida de los datos y elaboración de plantillas, a las que tiene acceso todo el personal del edificio a través de la red, se realiza el mismo trabajo en cuanto a las condiciones lumínicas y en concreto de iluminación y radiación UV.

En la figura 23 vemos como se representan los datos registrados. La línea horizontal discontinua se corresponde con 50 lux y 50 $\mu\text{W}/\text{lm}$, que es sobrepasada la mayor parte del año, con lo que la obra necesita ser protegida de la luz una vez se ha concluido el tratamiento.

Desde julio de 2007 a julio de 2008 se ha llevado a cabo por parte de esta Sección, un seguimiento continuo de toma de datos in situ en determinados puestos de trabajo o depósitos, cada uno de éstos con unos condicionantes concretos.

Las tablas de recogida de datos muestran los siguientes aspectos:

- Condiciones climáticas del día: fecha, hora y cielo (soleado o nublado).

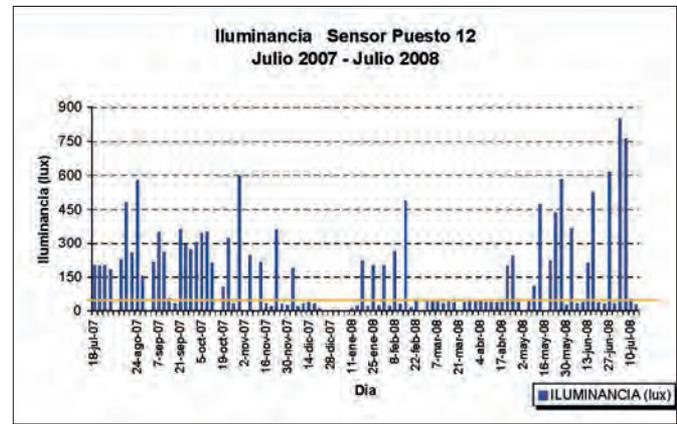


Figura 24. Gráfica de iluminación, correspondiente a la Sala Acondicionada 2 del IPCE, con valores puntuales registrados durante un ciclo anual.

- Ubicación de los distintos puntos de medición: planta, área de trabajo, posición del plano de trabajo (vertical u horizontal).
- Condiciones de trabajo en el lugar de medición.
- Se procuró tomar datos siempre en el mismo tramo horario, el que suponemos más desfavorable. También es necesario registrar la época del año y la hora solar en el momento de realizar la medición.

Los condicionantes de trabajo de cada espacio que se han tenido en cuenta para la recogida de datos vienen determinados por la presencia de:

- Portalámparas: número, estado (encendidas o apagadas), condiciones (fundidas, etc.) y tipo de lámpara.
- Persianas: situación (levantadas o bajadas).
- Estores: si existen y situación (levantados o bajados).
- Protección del vidrio: si existe y características.
- Lámpara auxiliar de trabajo: estado (encendida o apagada) y tipo de lámpara.
- Mesa reflectante: estado (encendida o apagada), número de tubos y tipo de lámpara.

La toma de datos se ha efectuado colocando los sensores de cada aparato en la posición del plano de trabajo en que se desarrolla cada actividad: horizontal o vertical. La medición se hizo con la luz natural y artificial existente en cada momento.

Los parámetros que se han medido son:

- Niveles de iluminación.
- Radiación UV.
- Coordenadas de cromaticidad.
- Temperatura de color correlacionado.

De esta manera, la interpretación de las gráficas que se elaboran en base a estos datos nos permite tomar decisiones para posteriormente intervenir.

Los datos de iluminación y radiación UV se han registrado en una tabla y gráficas mensuales. Una muestra de ello es la figura 24 en donde se expone el modo de procesar estos datos, que se corresponde con los datos de iluminación de la Sala Acondicionada 2. Una línea horizontal marca el límite de 50 lux, lo recomenda-

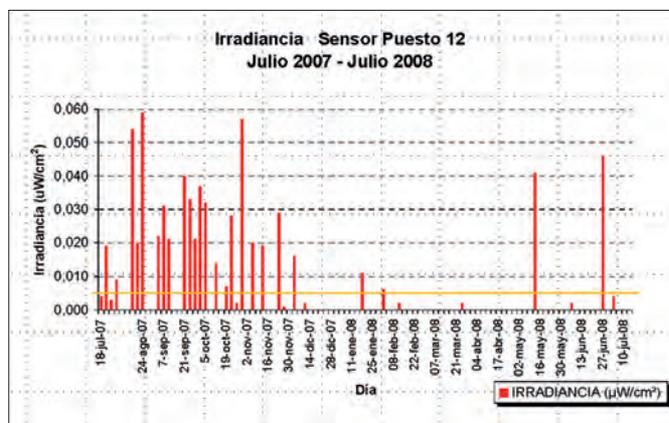


Figura 25. Gráfica de radiación UV, correspondiente a la Sala Acondicionada 2 del IPCE, con valores puntuales registrados durante un ciclo anual.

ble para materiales sensibles a la luz, pero esta no es una sala de exhibición sino de trabajo que necesita de unos niveles de iluminación en torno a unos 2000 lux sólo cuando se está interviniendo en la obra.

En la figura 25 se muestran valores de radiación UV de esta misma sala. La línea horizontal marca el límite de 50 $\mu\text{W}/\text{lm}$, que se sobrepasa con frecuencia a lo largo del año, siendo un factor de riesgo para determinados materiales.

Por lo tanto, primero se ha elaborado una gráfica mensual con unos datos estadísticos (media, máximo, desviación estándar) y después un histograma que cuenta la frecuencia con que se dan los datos en unos intervalos establecidos.

Las lámparas y luminarias deben estar sujetas a diferentes requerimientos, según el área de trabajo en que se encuentran y actividad que se desarrolla.

Se han establecido dos ámbitos de trabajo básicos, acotando el número de lámparas y luminarias necesarias para dar servicio al conjunto del edificio. Estos ámbitos de trabajo van asociados a las lámparas que se consideran más idóneas. Se ha determinado como un ámbito de trabajo los espacios de: talleres, archivos, depósitos, almacenes y zonas de circulación, ya que en todos ellos puede encontrarse o circular bienes culturales, y otro ámbito de: administración, despachos y zonas de servicio, en los que no se hallan bienes culturales.

La elección de las lámparas para el primer ámbito de trabajo ha estado condicionada por unas premisas básicas: reducción de emisión de ultravioletas, índice de reproducción cromática y temperatura de color. Como para el segundo ámbito de trabajo la reducción de ultravioletas no es premisa indispensable, puesto que no se trabaja físicamente con obras de arte, tampoco es necesario un índice de reproducción cromática de 90, siendo mayor de 80 ya sería suficiente. En cualquier caso se ha optado para este segundo ámbito por unas lámparas que permiten un mayor ahorro energético por su mayor vida útil y menor coste de la lámpara.

La radiación UV existente en el interior del edificio procede de la radiación exterior, aunque es necesario el control de las lámparas, o tubos fluorescentes en nuestro caso, para reducir esa

emisión de ultravioletas que influye en el deterioro de las obras.

Parece que la envoltura de protección de ultravioletas es la que encarece el precio de la lámpara con respecto al resto de las características y éste no es factor necesario en el segundo ámbito de trabajo, por eso se ha optado por otra lámpara más económica. Interesante hubiera sido que la vida útil de la lámpara fuera mayor en ambos modelos aunque no ha sido posible puesto que son prioritarios los términos ya descritos.

Se puede limitar el exceso de iluminancia con estores de tejido de distinta densidad, según la orientación, y el exceso de irradiancia con filtros adheridos a los vidrios, sin alterar el índice de reproducción cromática y la temperatura de color.

Se ha buscado que la temperatura de color sea la misma en los dos ámbitos de trabajo, aunque en este segundo ámbito se podría hacer uso de una temperatura más fría.

En este caso es recomendable que la red eléctrica existente tenga un cambio paulatino respecto al control de encendido y apagado según espacios, manteniendo el tipo de lámpara pero modificando sus características acordes con el área a iluminar y el trabajo que se desarrolla. De la misma manera se procedería con las luminarias y el equipo auxiliar.

Además, se ha hecho una selección de tubos existentes en el mercado, con especificaciones acordes a la utilidad de los espacios, para certificar en la cámara de envejecimiento los distintos parámetros. Y ver si se considera necesario modificar los tubos que quedan recogidos en las fichas de mantenimiento.

Para mejorar las condiciones de iluminación de cada uno de los espacios se tienen datos de la iluminancia media en el plano de trabajo a tenor de la actividad que se desarrolla y filtrado de la luz natural según: orientaciones, altura de las lámparas y distancia entre estas, atendiendo a la radiación de ultravioleta, la insolación a que puede estar expuesta la sala, deslumbramientos (producidos por la luz solar, fuentes de luz de alta luminancia o superficies reflectantes), etc. Quizás la exigencia visual de cada zona obligaría a modificar la disposición de las lámparas según la tarea a desempeñar.

Se ha estudiado la posibilidad de introducir unas láminas adheridas al vidrio que cumplan como filtro de la radiación UV exterior, pero que no alteren los índices de reproducción cromática. Hoy ya ofrecen una garantía aceptable. Sólo hay que tener en cuenta que siempre se va a alterar el porcentaje de radiación IR que va a atravesar el vidrio y que también se va a reducir el paso del espectro visible.

Mantenimiento del sistema de iluminación

Básicamente se pretende dar unas pautas de actuación ante la reposición y mantenimiento de las lámparas que forman parte de unas luminarias y una instalación ya existentes en un edificio que es BIC y en donde se trabaja con bienes culturales.

Por lo tanto, se han elaborado unas fichas en las que sólo se atiende a las características de lámparas y luminarias que han de

dar servicio a distintos ámbitos de trabajo, recomendaciones de uso (manipulación), así como su conservación y mantenimiento (reposición y limpieza). Estas fichas van dirigidas al personal encargado del mantenimiento del sistema según lo expuesto.

Una de las fichas de mantenimiento se refiere a las lámparas de cada ámbito de trabajo establecido, uno para talleres, archivos, depósitos y circulaciones y otro para administración, despachos y servicios.

En el primero se busca una reducción de emisión de UV, un buen índice de reproducción cromática y una temperatura de color concreta. Y en el segundo prima una mayor vida útil y menor coste de la lámpara.

Se parte de una instalación eléctrica existente, cuyo control se debe a un sistema centralizado de gestión manual, según tramos. La elección de las luminarias se debe fundamentalmente a tres aspectos como son protección de la lámpara, estética y balasto electrónico. De la misma manera estos datos quedan recogidos en unas fichas de mantenimiento de las luminarias, referidas a los ámbitos de trabajo ya descritos.

En un esquema se ubican los dos ámbitos de trabajo que llevan asociados una lámpara y luminaria concreta. Estas áreas son: talleres, archivos, depósitos y circulaciones así como administración, despachos y servicios.

Conclusiones

Las características de los espacios que albergan bienes culturales, referidas a cerramientos, estanqueidad y accesos, es algo prioritario a tratar cuando se habla de conservación preventiva. Y ya en este campo no se ha de pasar por alto ninguno de los siguientes parámetros: condiciones ambientales, biodeterioro, filtraciones de humedad, seguridad (robo, vandalismo, circulaciones, incendio), etc.

Para determinar los valores de los parámetros ambientales de las salas es necesario disponer de valores de referencia de las condiciones del lugar de procedencia de las obras. Y establecidas las condiciones en las salas no sólo es suficiente el seguimiento de estos parámetros sino que es necesario un control de las condiciones que se dan en las mismas ya sea de forma remota o in situ.

El objetivo que se persigue es establecer un control de las condiciones microclimáticas, de iluminación y contaminantes y desarrollar un Plan de Conservación Preventiva en el que poder apoyarnos en la toma de decisiones e intervención en el edificio del IPCE.

Bibliografía

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2000): *Heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment 2008 ASHRAE handbook*, Atlanta. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

CARRIER CORPORATION (2008): *Manual de aire acondicionado*, Marcombo, Barcelona.

CASSAR, M. y HUTCHINGS, J. (2000): *Relative humidity and temperature pattern book: a guide to understanding and using data on the museum environment* Museums & Galleries Commission, London.

DE GUICHEN, G. y DE TAPOL, B. (1998): *Climate control in museums*, ICCROM, Rome.

DERBYSHIRE, A.; PRETZEL, B. y ASHLEY-SMITH, J. (2002): «Continuing development of a light policy for the V&A», *ICOM-CC Triennial Meeting*, Rio de Janeiro: 3-8.

FEILDEN, B. M. (2003): *Conservation of historic buildings*, Butterworth Heinemann, London.

GUILLERMARD, D. (1992): *La Conservation Préventive: Colloque International de IARAAFU sur la Conservation Restauration des Biens Culturels*. París.

HERRÁEZ FERREIRO, J. A. y RODRIGUEZ LORITE, M. A. (1989): *Manual para el uso de aparatos y toma de datos de las condiciones ambientales en museos*, Ministerio de Cultura, Madrid.

MICHALSKI, S. (2007): «Preservación de las colecciones», en *Cómo administrar un museo: Manual práctico*: 51-90.

MICHALSKI, S. (2000): *Guidelines for humidity and temperature for Canadian archives*, Canadian Conservation Institute, Ottawa.

MICHALSKI, S. (1997): *Normas vigentes sobre iluminación: Un equilibrio explícito de visibilidad vs. vulnerabilidad*, Canadian Conservation Institute, Ottawa.

Osram (2008): *Catálogo general de luz 2008*, Osram, Madrid.

TAYLOR, J.; BLADES, N. y CASSAR, M. (2006): «Dependency modelling for cultural heritage». *Proceedings of Safeguarded Cultural Heritage - Understanding & Viability for the Enlarged Europe*. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of Czech Republic, Praga.

THOMSON, G. (1998): *El museo y su entorno*, Akal, Madrid.

Normativa de referencia

Asociación Española de Normalización y Certificación (2005): *UNE-EN 60598-1: luminarias. Parte 1, Requisitos generales y ensayos*, Madrid: Aenor.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2004): *UNE-EN 12464-1:2003: iluminación: iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1, Lugares de trabajo en interiores*, Madrid: Aenor.

España. Ministerio de Ciencia y Tecnología y Asociación Española de Normalización y Certificación (2004): *Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias (ITC) BT 01 a BT 5: Real decreto 8422002, de 2 de agosto*, Madrid: Aenor.

España Ministerio de la Vivienda (2007): *Código técnico de la edificación (CTE)*, Madrid: Boletín Oficial del Estado.

Instituto Español de Normalización (1985): *Tareas visuales: clasificación: norma española UNE 72-112-85*, Madrid: Instituto Español de Normalización.

Instituto Español de Normalización (1984): *Niveles de iluminación: asignación a tareas visuales: norma española UNE 72-163-84*, Madrid: Instituto Español de Normalización.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (1999): *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo: Real Decreto 4861997, de 14 de abril BOE n° 97, de 23 de abril*, Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

3.3. Metodología de análisis físico-químicos en obras policromadas de gran formato

Marisa Gómez y Margarita San Andrés

Técnicos del Instituto del Patrimonio Cultural de España

Introducción

La secuencia metodológica aplicada al estudio de conjuntos artísticos de grandes dimensiones, no puede considerarse como una mera extensión de la aplicada a una pintura de caballete o a un simple relieve, una escena o una imagen policromada de bulto redondo. Dentro de este contexto, cuando el objetivo del estudio se centra en la caracterización analítica de los materiales, no resulta exagerado afirmar que los problemas se incrementan de forma exponencial con la magnitud de la obra y la variedad de elementos constructivos. En estos casos, la complejidad y la diversidad en el repertorio de las técnicas artesanales que llegamos a encontrar hacen que nuestro estudio resulte muy arduo. Por otra parte, este tipo de obras, normalmente, forman parte de la arquitectura de un edificio histórico o están en íntimo contacto con él. Esta circunstancia es otra dificultad añadida para efectuar un diagnóstico eficaz, puesto que exige evaluar la posible influencia del medio ambiente y, además, establecer la probable relación entre éste, las alteraciones que se detectan y su localización. A todo lo anterior hay que añadir que, en numerosas ocasiones, las hipótesis de partida se rechazan o se modifican a lo largo del trabajo, siendo reemplazadas por otras nuevas, que pueden llegar a diferir considerablemente de las iniciales.

Por tanto, en este tipo de estudios, resulta más indispensable si cabe, la intervención de profesionales con formaciones y cometidos muy diferentes que deben intercambiar y compartir información muy variada. Este planteamiento de trabajo “interdisciplinar” se menciona sistemáticamente en torno al estudio de los bienes culturales y, sin embargo, en la práctica a menudo surgen problemas para optimizar su desarrollo y resultados. La principal razón es que los conocimientos y las áreas de interés de cada miembro del equipo condicionan, no solo su visión, sino también su función dentro del trabajo y los momentos en los que intervienen; en este sentido, es importante que estas intervenciones se realicen sin estorbar o dificultar la actuación de los demás.

Qué duda cabe que el trabajo conjunto de historiadores, químicos, físicos, biólogos, geólogos, restauradores y arquitectos, propicia el mejor conocimiento de las obras monumentales. Sin embargo, en estos casos es muy difícil alcanzar un equilibrio que determine el papel que juega cada uno de los especialistas y que éstos ejerciten el máximo respeto hacia los demás profesionales con los que, al mismo tiempo, tienen que establecer un diálogo fluido (BERNARD, 1994).

Este planteamiento, denominado actualmente “proyecto transdisciplinar”, supone un paso adelante sobre los trabajos

“interdisciplinares” mencionados abundantemente en el discurso de conservación y restauración de las últimas décadas del siglo XX (RUIZ DE LACANAL, 1999; MACARRÓN, 2002). Dicha actitud resulta esencial para mejorar de forma cualitativa y cuantitativa el desarrollo del proyecto. Dentro de esta filosofía son varias las premisas que hay que considerar. En primer lugar es imprescindible tener en cuenta que, para la buena marcha de los trabajos, debe prevalecer el espíritu de equipo a cualquier deseo de investigación individual. Otro punto a tener en cuenta es que todos sus miembros han de usar la misma nomenclatura, en lo que respecta a la distribución de los elementos que describen la obra, su iconografía, su historiografía y las técnicas y materiales presentes. Si esto es así será posible establecer una relación fluida entre los profesionales implicados y además, lograr una correcta interpretación del conjunto de los resultados obtenidos. Además de lo anterior, es indispensable una comunicación inmediata, tanto de las preguntas que vayan surgiendo, como de los nuevos datos aportados que afecten al desarrollo de la restauración; por todo lo cual, es conveniente agilizar las reuniones de trabajo de los profesionales implicados. Por último, no hay que olvidar, aunque no priorizar, la burocracia administrativa y los informes escritos que es preceptivo presentar, al finalizar el proyecto o las distintas etapas que se han contemplado en el cronograma inicial.

Si nos centramos en el trabajo propio del laboratorio, es evidente que no debemos basarnos en un planteamiento puramente teórico. Es decir, no debemos pensar que vamos a seguir de forma estricta un organigrama y un cronograma, definidos previamente a partir de las técnicas analíticas disponibles para identificar los materiales orgánicos e inorgánicos existentes en la obra objeto de estudio. Como en cualquier otro tipo de trabajo de investigación, antes de iniciar la aplicación de estas técnicas o en paralelo a su uso, es necesario llevar a cabo la correspondiente búsqueda de información. Esta tarea se ve reforzada por los avances del último tercio del siglo XX y los comienzos del siglo XXI que nos permiten acceder a una documentación colosal y, a su vez, transmitirla fácil y rápidamente a través de las nuevas redes de comunicación vía Internet. También se ha acrecentado el número de técnicas con las que contamos actualmente para estudiar cualquiera de los materiales que constituyen los recubrimientos, aglutinantes y pigmentos, además de los soportes y estructuras internas. Estas técnicas son cada vez más sensibles, específicas y precisas, habiéndose publicado recientemente bibliografía específica que facilita su aplicación dentro del contexto del Patrimonio (STUART, 2007; DOMÉNECH-CARBÓ, DOMÉNECH-CARBÓ y COSTA, 2009).

Pese a todo, cualquier planificación preconcebida, aunque científicamente sea impecable, puede resultar excesivamente generalista. Si esto es así, sucumbirá al simple hecho de que olvidemos que, cuando se trata de un objeto de interés patrimonial, debemos establecer antes que nada, las prioridades que tomen en consideración sus valores individuales y el contexto en el que se desarrollan los análisis. En este sentido, una de las particularidades de los análisis de obras de gran formato es que se maneja un número muy elevado de datos, por lo que, necesariamente, hay que sintetizar y centrarse en responder a las cuestiones esenciales.

Por tanto, nuestros objetivos deben adaptarse a unas necesidades muy específicas y, podríamos llegar incluso a decir que, exclusivas de la obra objeto de estudio. Solo de esta forma la interpretación de los resultados es eficaz y responde a las necesidades y a las cuestiones planteadas, tanto inicialmente como en el transcurso de los trabajos de conservación y restauración. A este respecto, a menudo surgen nuevas preguntas y hay que seguir investigando e incluso modificar el discurso inicial y el rumbo de los análisis¹. Por otra parte, el estudio material no debe limitarse a la aportación de datos analíticos que sirvan para documentar la historia de la policromía. Además de esto, tiene que facilitar el diagnóstico previo del trabajo de restauración y poner de manifiesto las posibilidades, limitaciones o contraindicaciones de los métodos y productos a emplear; todo ello en función de los materiales identificados o de las condiciones ambientales.

De manera general, los objetivos más comunes de los análisis del laboratorio se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Identificar los materiales existentes en las áreas analizadas *in situ* mediante técnicas sin toma de muestra.
- Identificar los materiales y la superposición de las capas presentes en las muestras seleccionadas que, a su vez, son aquellas que se consideran representativas del conjunto de la obra.
- Distinguir los repintes de los estratos que asignamos a las pinturas o policromías originales.
- Estudiar las alteraciones producidas.
- Comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los aportados por los otros profesionales que analizan la superficie de la obra mediante estudios físicos. En su caso, responder a las cuestiones planteadas tras la interpretación de las imágenes obtenidas con las fotografías visible e infrarroja y la radiografía.
- Determinar los problemas que puedan ir asociados a la presencia o al uso de ciertos materiales y su relación con las condiciones climáticas o sus variaciones.
- Asesorar sobre aquellos aspectos materiales que puedan condicionar la intervención del restaurador.

La importancia relativa de cada uno de los objetivos mencionados varía en cada caso particular, ya que cada proyecto de estudio tiene una casuística propia a la que hay que adaptarse y que incluye, desde las funciones culturales o de culto a las que se halla destinada una determinada obra monumental, hasta los intereses de la comunidad autónoma o institución responsable de su conservación.

Independientemente de los objetivos perseguidos, el estudio físico-químico realizado en los laboratorios resulta cada vez más un acompañante obligado de los trabajos de restauración y de la Historia del Arte. En el caso concreto de las obras monumentales, los resultados de estos estudios contribuyen, en mayor o menor medida, tanto a su caracterización material, frecuentemente incompleta o mal planteada, como a ser un trabajo más dentro del proceso de cualquier restauración, cuyo fin sea recuperar parte del primitivo esplendor de las obras de gran formato (GÓMEZ, 2006).

Fases o etapas del trabajo

Todos los profesionales responsables de la conservación del patrimonio artístico son conscientes de que cada obra de arte es única e irrepetible. Por otra parte, aunque ciertos análisis pueden realizarse directamente sobre la superficie de la obra, otros necesitan la toma de una pequeña micromuestra. En todos los casos, antes de proceder a la aplicación de cualquier técnica de análisis es absolutamente imprescindible disponer de una información suficientemente amplia y precisa, que facilite las decisiones a tomar en cuanto a la toma de muestras o a la selección de las zonas en las que se van a realizar los análisis.

Por tanto, siguiendo una metodología de trabajo científica, las etapas a desarrollar serían las siguientes:

Documentación previa. La investigación de los aspectos materiales de una obra policromada no puede concebirse de forma aislada y, especialmente, cuando pretende plasmar algún aspecto histórico de la misma, o contribuir al diagnóstico y seguimiento en torno a su restauración. El conocimiento básico de la obra requiere un trabajo previo de consulta documental, histórica, gráfica, fotográfica y verbal. El conjunto de esta información nos servirá para conocer su contexto histórico, las partes que la componen, las técnicas artesanales presentes y los avatares que haya sufrido. Todo ello contribuirá a su mejor descripción y a comprender las posibles causas responsables de las alteraciones que observemos.

Inspección visual y trabajo *in situ*. Solo después de una inspección ocular *in situ* y de estudiar y discutir la documentación previa suministrada por el resto de los profesionales implicados, se puede hacer una selección apropiada de las micromuestras, de manera que éstas sean representativas de las diferentes estratificaciones de policromías, coloraciones y grados de alteración. Siempre que sea posible, será conveniente realizar el muestreo en presencia del restaurador, para poder cotejar estos resultados con las observaciones e incluso los ensayos y catas que éste haya efectuado. De esta manera será factible diagnosticar el grado de deterioro y su extensión y extrapolar conjuntamente los resultados.

¹ Como ocurrió en el Retablo de San Pablo de Zaragoza donde se identificaron tres tipos distintos de lacas con diferente sensibilidad a los disolventes empleados en la limpieza.



Figura 1. a) Toma de muestra - El Cielo de Salamanca; b) Toma de muestra con hisopo - extracto reja de la Capilla Real; c y d) Micromuestras vistas con microscopio estereoscópico a diferentes aumentos.

La observación detallada de la superficie del objeto de gran formato es parte del trabajo *in situ*, que incluye, además, la adquisición de datos de gran interés, como pueden ser los aportados por los encargados de su custodia o por otros profesionales. A esto hay que añadir, por supuesto, el muestreo y los análisis directos sin toma de muestra. Esta fase está muy condicionada por los medios auxiliares disponibles (escaleras, torretas, andamios, etc.).

Lógicamente el acierto en la selección de las zonas o puntos objeto de análisis, la toma de micromuestras y su localización, van a determinar el valor y la profundidad del trabajo, así como la extrapolación de los resultados obtenidos.

Uno de los impedimentos que debe superar cualquier laboratorio especializado en la aplicación de análisis físico-químicos en el contexto del patrimonio artístico, está relacionado con el tamaño y número de muestras disponibles. Deben ser de dimensión muy reducida, ordinariamente inferior a 1mm, en cantidades ínfimas pero, al mismo tiempo, suficientes para ser estudiadas por técnicas complementarias. Algunas son muestras tomadas de manera que contengan todas las capas, mientras que otras son

más superficiales, es decir, presentan una sola capa o son extractos en determinados disolventes (Fig. 1). El rigor del muestreo y la toma de datos deben contemplar su etiquetado, su localización en el conjunto de la obra y su tipología; respecto a esta última, es imprescindible hacer las correspondientes anotaciones en cuanto a su aspecto, color y su correspondencia a la policromía original o bien si se trate de repinte, repolicromía, recubrimiento, material alterado, etc.

Cada vez adquieren mayor importancia, las técnicas de análisis superficiales, para cuya aplicación no es necesaria la toma de muestra (Fig. 2). Tal es el caso del videomicroscopio y la fluorescencia de rayos X (XRF) o ciertas técnicas de espectroscopía molecular que pueden ser aplicadas *in situ*, mediante el uso de una sonda externa, como por ejemplo, la espectroscopía IR en el infrarrojo próximo (NIR) y medio (MIR) o la espectroscopía Raman. Estas técnicas complementan los estudios tradicionales y minimizan la extracción de muestras.

Cuando se trata de conjuntos ornamentales concebidos para el culto, la contemplación y el disfrute del espectador, un proble-

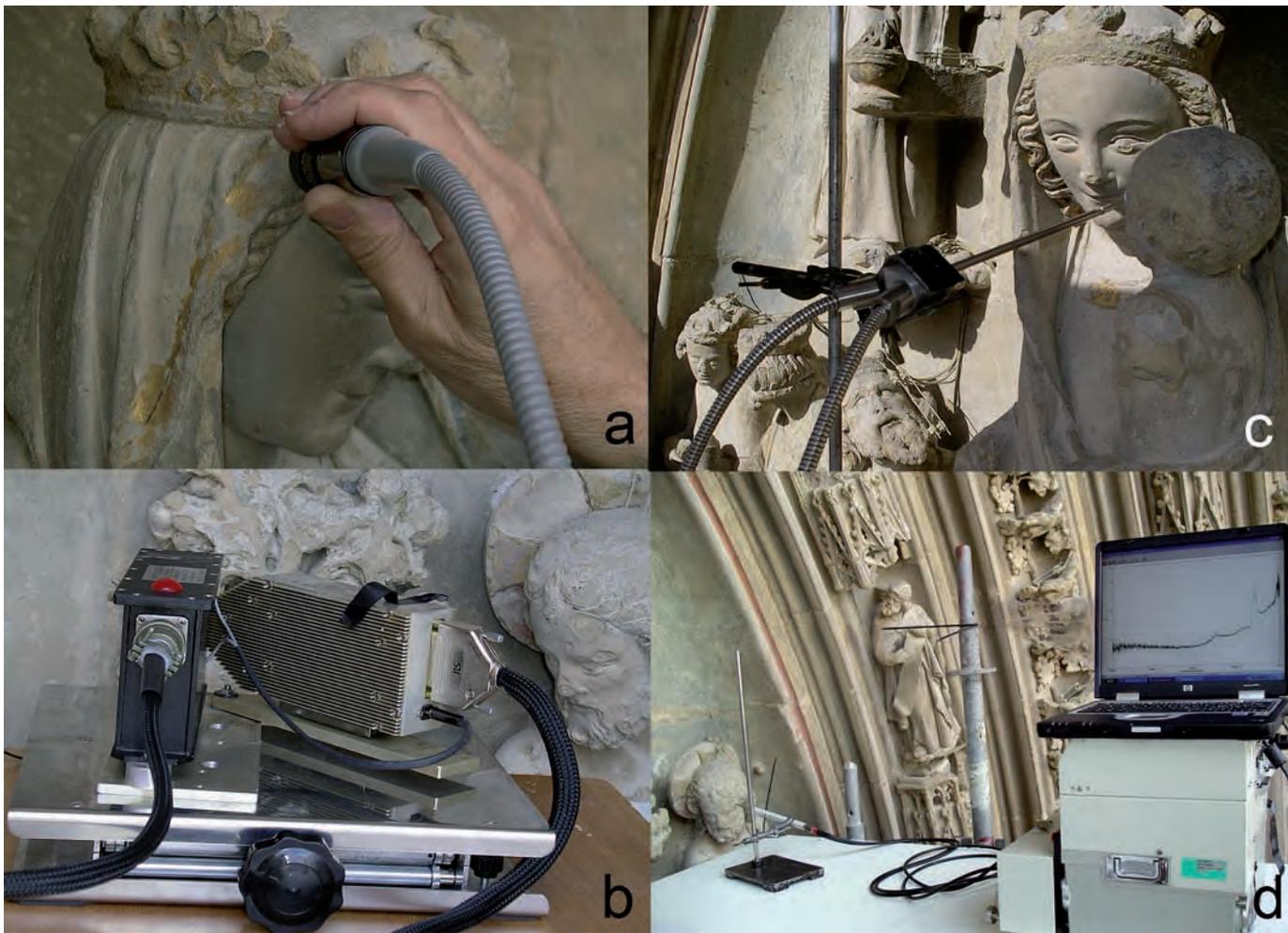


Figura 2. Técnicas de análisis superficial en la portada de la Catedral de Huesca: a) Examen con videomicroscopio; b) Análisis por XRF; c) Análisis por MIR con sonda; d) Análisis por NIR con sonda - equipo completo.

ma añadido es que rara vez permiten un acercamiento directo, e incluso la simple aproximación. En el caso de piezas de altar, frecuentemente se apoyan sobre una tarima y están protegidas por una balaustrada y, a veces, el recinto en el que se encuentran se cierra con una reja monumental. Sin embargo, también existen soluciones constructivas que facilitan el acceso a la obras (Fig. 3) (DALMAU, 2002; BRUQUETAS, CARRASSÓN Y GÓMEZ ESPINOSA, 2003; CARRASSÓN, 2006). Por ejemplo, los artífices de los grandes retablos, habitualmente pensaban en las labores de mantenimiento. Con esta finalidad la trasera solía estar a una distancia del muro suficiente para ser accesible, diseñando para ello alguna escala o sistema por el que pudiera trepar el operario encargado de llevar a cabo la reparación de los elementos más importantes. En numerosos retablos del Barroco, a media altura de su arquitectura, existe un camarín de la Virgen que dispone de una entrada posterior para vestir y engalanar fácilmente a la imagen de Nuestra Señora.

Asimismo, las techumbres de madera policromada y las pinturas murales de las bóvedas de las iglesias y palacios suelen disponer de una balconada que rodea a todo el edificio o, al menos, las

partes más relevantes, y a la que se llega a través de una escalera interior, oculta tras una puerta. En estos casos normalmente existe una segunda cubierta protectora (Fig. 3), de nuevo accesible a través de una escala o escalera y que permite el paso de una persona, trepando o reptando. Es indudable, además, que estas grandes obras se construyeron y apearon disponiendo de sistemas de andamiaje y, de la misma forma actualmente, para acometer los trabajos de restauración, se pueden emplear escalas, grúas, torretas, plataformas o andamios.

Sin embargo los medios de que suele disponerse en un estudio preliminar no son los mismos que los que existen durante el proceso de restauración. Por tanto, en la mayoría de las situaciones reales, el acceso a la obra es muy limitado y el muestreo y los ensayos *in situ* que se realizan resultan muy escasos, comparados con la magnitud de la obra a estudiar o en su caso restaurar.

Realización de los análisis. El estudio mediante técnicas de análisis físico-químicos, normalmente sigue una secuencia que parte de métodos morfológicos y finaliza con métodos analíticos instrumentales más sensibles y de mayor precisión y especifici-

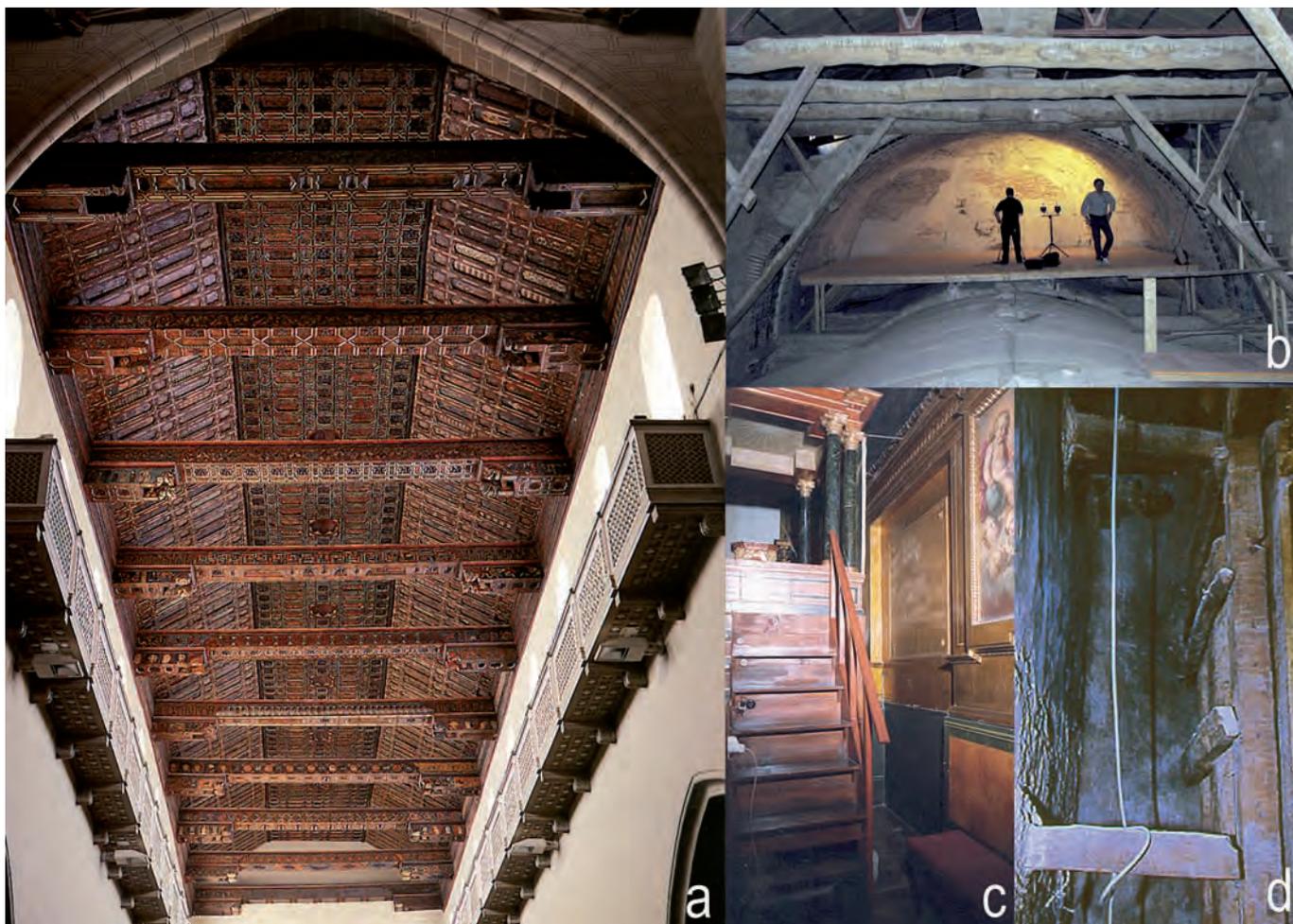


Figura 3. Ejemplos de zonas de acceso a las obras: a) Balconada de la Catedral de Teruel; b) Vista general del espacio entre las dos bóvedas donde se ubica la pintura mural original del Cielo de Salamanca; c) Escalera de subida a un camarín de la Virgen; d) Escala trasera de acceso a un retablo.

dad. Los primeros incluyen las técnicas microscópicas (microscopía óptica - MO, de fluorescencia con UV - FMO y electrónica) y sirven para establecer los materiales a estudiar, su significado, así como la valoración de su localización en las diferentes estructuras posibles. Mediante los segundos, se caracterizan analíticamente dichos materiales. Existe una amplia variedad de técnicas instrumentales de análisis (SKOOG y WEST, 1990), y muchas de ellas tienen una dilatada trayectoria de uso en el estudio del Patrimonio (GÓMEZ, 1998; V.V.A.A., 2008).

Algunas de estas técnicas proporcionan información sobre la composición elemental de los materiales, tal es el caso de los métodos de emisión de rayos X: XRF, SEM-EDX y microsonda electrónica. Estas técnicas son especialmente apropiadas para la identificación de materiales inorgánicos. Se pueden aplicar sobre una preparación microscópica o un pequeño fragmento (SEM-EDX y microsonda electrónica) (SCHREINER, MELCHER y UHLIR, 2007) o bien directamente sobre la superficie del objeto (XRF) (FERRERO *et al.*, 2002). Otras proporcionan información a nivel de estructura molecular, tal es el caso de la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) (DERRICK, STULIK y LANDRY, 1999), la

espectroscopia Raman (EDWARDS y CHALMERS, 2005). Estas últimas pueden ser aplicables a materiales orgánicos e inorgánicos y el análisis se puede realizar sobre pequeños fragmentos aislados o sobre la superficie de la obra (en este caso con el uso de la correspondiente sonda o microscopio acoplado). Existen ciertas técnicas especialmente apropiadas para la identificación de materiales orgánicos (aglutinantes, adhesivos, barnices, colorantes); las más utilizadas son las técnicas cromatográficas (WALLACE, 1997), como por ejemplo cromatografía en capa fina (TLC) (STRIGEL y HILL, 1996), cromatografía de gases-espectroscopía de masas (CG-MS) (ERHARDT, *et al.*, 1988) y cromatografía líquida de alta presión (HPLC) (HALPINE, 1992; SANJOVA, 2000). Por último, la determinación de las fases en los materiales cristalinos se hace por difracción de rayos X o por microscopía electrónica de transmisión en modo difracción de electrones.

Interpretación de los datos y exposición de los resultados. Como ya se ha indicado, los análisis están directamente relacionados con lograr alcanzar los objetivos planteados inicialmente y, además, dar respuesta a las múltiples cuestiones que se vayan planteando en el curso de los trabajos de restauración en los que

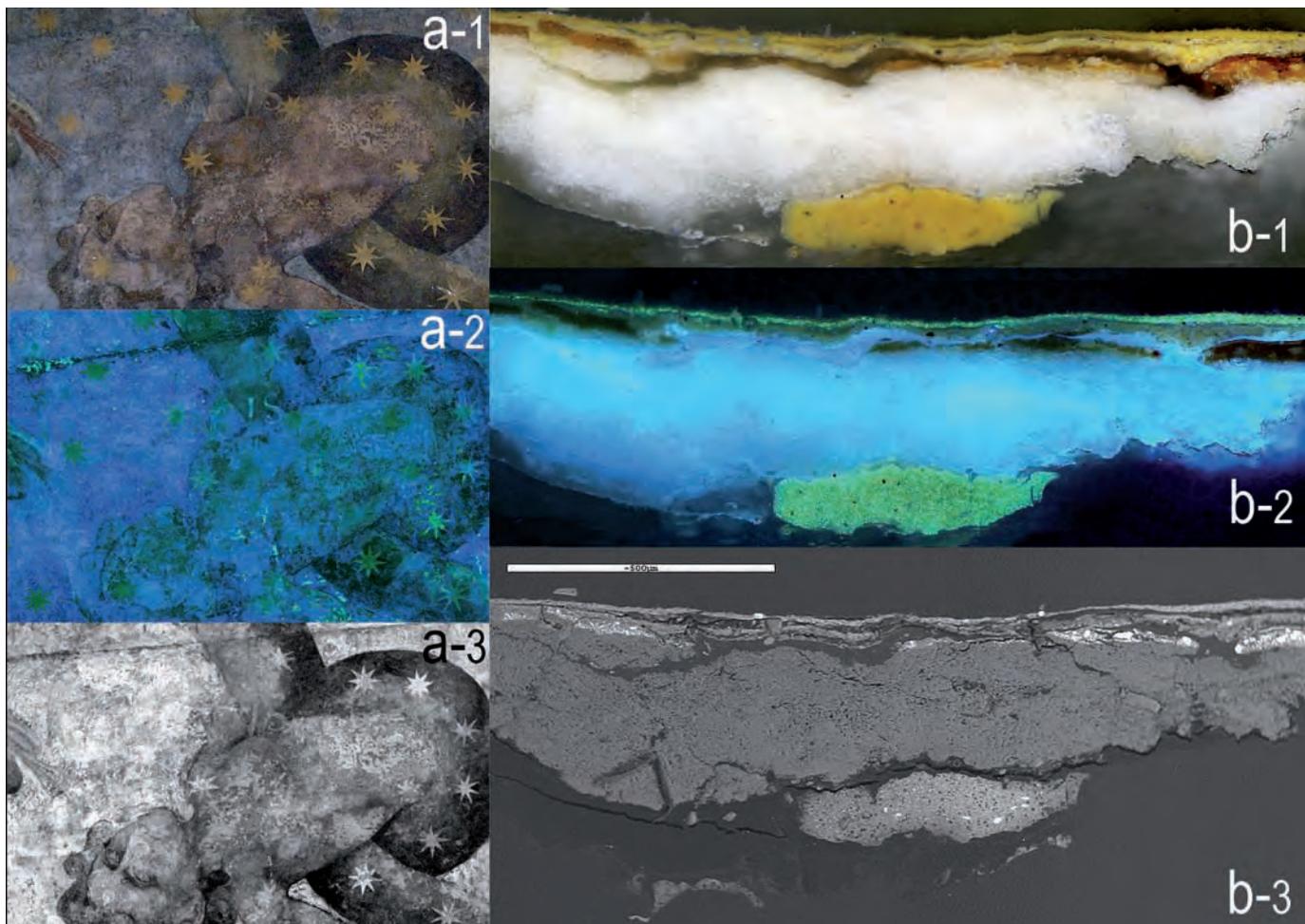


Figura 4. Cielo de Salamanca – Sala de las Escuelas Menores de Salamanca. Estrellas amarillas en el serpentario: a-1) Visible; a-2) Fluorescencia con UV; a-3) Infrarrojo; b) Superposición accidental de dos escamas: b-1) MO; b-2) FMO; b-3) BSE.

se enmarcan. Unas veces se hacen específicamente con vistas al diagnóstico y otras tienen como principal función asesorar a los otros profesionales implicados – restauradores e historiadores –. En cualquier caso el informe que da cuenta de los resultados debe presentarlos en función de su localización y siguiendo la estructura cronológica de la obra, desde el soporte hasta la superficie.

Las técnicas de análisis empleadas y su secuenciación están relacionadas con los materiales a estudiar junto con las diferentes tipologías que podemos encontrar en superficies policromadas de gran formato. Las tablas de clasificación de las muestras y de las tomas de datos pueden seguir diferentes criterios. Los más habituales son los relacionados con el color, la localización en el conjunto, las técnicas de ejecución, la historia material, la tipología de las alteraciones o la localización estratigráfica de éstas. Es muy importante reflexionar sobre los aspectos que deseamos priorizar en cada obra en particular, para optimizar la interpretación de los análisis y su eficacia para cumplir con los fines previstos. No hay que olvidar que la información aportada debe resultar comprensible para los otros profesionales que intervienen en el proyecto.

El orden seguido en la interpretación de cada muestra en particular se refiere esencialmente a la técnica de ejecución, la detección de adiciones y de alteraciones, así como las consecuencias derivadas de todos estos aspectos. Normalmente la secuencia de elaboración y de las sucesivas transformaciones es del interior al exterior, aunque ocasionalmente se observan intervenciones o “accidentes” que llegan a alterar esta secuencia (Fig. 4).

Aunque la exposición del conjunto de los resultados puede seguir el orden numérico asociado al muestreo o análisis superficial, hay que señalar que, en las obras de gran formato, está supeditado a cuestiones de acceso y, por tanto, la numeración tiene relación con el momento cronológico de la obtención. Por tanto es mejor elegir otro criterio. Así, podemos considerar la localización en el conjunto, por ejemplo, de izquierda a derecha y de arriba abajo o viceversa, seguir la iconografía de las escenas representadas, establecer tipologías de más sencilla a más compleja, considerar un orden histórico de ejecución, grados relativos de alteración, etc. El criterio puede variar en función de las prioridades, pero hay que incidir primero en aquellos datos que explican cuestiones generales y finalizar con los ejemplos que denoten ciertas particularidades o

excepciones. Aunque no sea el objetivo principal de este trabajo, es necesario conocer el soporte de la obra ya que éste va acondicionar las técnicas de la policromía y las alteraciones que puedan sufrir.

Estudios de obras policromadas de gran formato

Según su tipología, las obras policromas monumentales pueden clasificarse en:

- Policromía sobre soportes pétreos o materiales inorgánicos porosos en general: portadas de piedra, conjuntos decorativos de piedra policromada en paramentos exteriores e interiores, retablos y pinturas murales.
- Policromía sobre materiales inorgánicos no porosos (metales y aleaciones): rejas monumentales.
- Pintura y policromía sobre soportes orgánicos (madera y tela): techumbres en madera, pinturas sobre tela adheridas al muro y, especialmente en España, retablos de escultura policromada y de pintura sobre madera y sobre tela.

Son numerosos los proyectos de restauración relacionados con obras policromadas de gran formato, en los que ha participado el servicio de laboratorios del Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE). De entre todos ellos se han seleccionado algunos casos de policromías sobre soportes inorgánicos por su especial peculiaridad. En los siguientes apartados, se exponen los resultados más significativos y las aportaciones más relevantes suministradas por los análisis físico-químicos en cada caso.

Retablos de alabastro policromado

Un interesante conjunto de policromías sobre piedra que adquiere una monumentalidad inusitada en España, son los retablos de alabastro policromado, todos ellos datados en el curso de los siglos XV y XVI. La mayoría de éstos se localizan en la comunidad de Aragón, aunque hay ejemplos aislados, como el de El Paular, en la actual comunidad de Madrid. Entre 1994 y 2005 el IPCE llevó a cabo el estudio de los Retablos Mayores de la Catedral del Salvador (La Seo) y la Basílica del Pilar de Zaragoza y de la Iglesia de la Cartuja de El Paular de Madrid, además del retablo de la capilla de Santa Ana y del relieve de la Epifanía de la Catedral de Huesca. Todo ello a través de acuerdos con la correspondiente Comunidad².

Algunos son de grandes dimensiones y compiten con los grandes retablos ejecutados en madera, si bien la policromía del alabastro es notablemente distinta a la de las tallas en madera y las decoraciones realizadas sobre otros soportes inorgánicos. La técnica pictórica es muy elaborada, aunque no revista totalmente la escultura, dado que el alabastro originalmente fue policromado de forma parcial, aprovechando de esta manera la nobleza del soporte como fondo (Fig. 5). Las capas de pintura suelen ser muy delgadas y se aplican directamente sobre el alabastro, es decir, sin una capa intermedia de preparación, salvo cuando haya sido necesario resanar algún defecto de la talla. Los dorados son mates

y hechos “a la sisa”³ y llevan a menudo veladuras rojas, verdes y pardas. La mayoría de los panes de oro y plata de los retablos renacentistas de los siglos XV y XVI, están fijados a través de una sisa de color pardo-anaranjado, que forma una capa muy delgada y translúcida, que resalta la delicadeza de los motivos parciales sobre el retablo. Esta última característica se cumple en todos los alabastros aragoneses, a excepción de los dorados aplicados sobre una capa de sisa en los nervios de las portadas inferiores insertadas en el retablo del Pilar, donde la sisa es más gruesa y opaca, semejante a una decoración mural

El fondo decorado con relieves y totalmente dorado, característico del bajo medioevo, va desapareciendo en los retablos renacentistas españoles, en los que el alabastro juega un papel más importante y la talla muestra también una mayor variedad de texturas que armonizan con la policromía. La excepción es el retablo de El Paular, donde coexisten los fondos dorados goticistas de escenas interiores, con paisajes cuyas arquitecturas son de alabastro visto.

Todas las carnaciones de los retablos renacentistas españoles están policromadas con una capa cubriente, de color rosado en las figuras femeninas y más oscuro en las masculinas. Esta forma de proceder es más acorde con el naturalismo de la época que la pátina transparente con realces coloreados puntuales, característica de los citados retablos medievales

El retablo mayor de El Paular fue el primero y el único en el que se llevó a cabo un estudio preliminar exhaustivo⁴ en 1994, anterior a los trabajos de restauración y, dentro de los que se recogen en este apartado, fue el último que se restauró (en el año 2005). Gran parte de los análisis y de las muestras extraídas datan de ese primer momento, mientras que las últimas supusieron la verificación de algunos datos y la resolución de ciertas dudas que surgieron poco antes de finalizar la intervención.

Hay que señalar que una de las mayores dificultades de los trabajos realizados sobre este conjunto derivó de la ley de contratos del Estado, que no permite que la empresa contratada en

² El Monasterio de El Paular pertenece administrativamente al Ministerio de Cultura, mientras que los retablos aragoneses están tutelados por la Comunidad de Aragón

³ En el dorado a la sisa el pan de oro se aplica sobre aceite de linaza mezclado con pigmentos que aceleran su proceso de secado; generalmente son pigmentos de plomo o de cobre (Kroustallis, 2008).

⁴ Este estudio sirvió para redactar finalmente el Proyecto de Restauración en 1997 (Cantos y Laborde, 2003).

⁵ Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas (aprobado por Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre, BOE del día 26) (corrección de errores 19 de diciembre de 2001 BOE nº 303 y 8 de febrero de 2002 BOE nº 34) Entrada en vigor: 26 de abril de 2002. Capítulo II Anteproyectos, proyectos y expedientes de contratación Artículo 123. Aprobación de los anteproyectos:

1. Los anteproyectos y los estudios informativos deberán ser aprobados por el órgano de contratación.

2. Al aprobarse un anteproyecto o un estudio informativo quedará autorizada la redacción del proyecto o proyectos que en el mismo se indiquen que deberán ser objeto de contratación y ejecución independientes.



Figura 5. Detalles de policromía parcial en retablos de alabastro: a) El Paular; b y c) La Seo de Zaragoza; d) Santa Ana de la catedral de Huesca.
Figura 6.- Retablo de El Paular. Superposición de “sisas” - microfotografías: a) MO; b) FMO.

el anteproyecto de estudios previos se presente al proyecto de restauración⁵. Esta circunstancia alargó, tanto el proceso de documentación, como la comprensión de la policromía primitiva, que presentaba numerosas pérdidas y alteraciones, sufridas a lo largo de su historia.

Su interpretación tuvo la ventaja adicional de poder comparar el aspecto y la composición de la policromía con la de otros alabastros de épocas anteriores y posteriores, también estudiados y restaurados en el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)⁶ (GÓMEZ ESPINOSA y GÓMEZ GONZÁLEZ, 2007) y con otros datos procedentes de los retablos medievales ingleses y normandos de Rouvray (V. V. A. A., 1998) y del Retablo de la Vida de la Virgen del Museo Arqueológico Nacional (CIRUJANO, GÓMEZ y GAYO, 2001).

Gracias a la gestión de un estudio previo a la restauración, pudo estudiarse con más detenimiento la policromía del retablo mayor de El Paular y relacionarla con algunas de las manipulaciones documentadas⁷ en su historia material. Desafortunadamente, hasta ahora no hemos logrado encontrar referencias analíticas que determinen el origen histórico del retablo. A este respecto, el detalle más relevante proporcionado por los análisis, es que la sisa

más interna es más clara que la identificada en los retablos aragoneses y parece deberse a un taller fuera de las órbitas de Aragón o Inglaterra. La segunda capa de sisa es semejante a las aragonesas, aunque no tiene una localización precisa, ni cubre todos los elementos decorativos de la primera (Fig. 6). Debió aplicarse una vez montado el retablo y en cualquier caso no puede tratarse de una repolicromía más tardía, ya que sobre ambas sisas se ha identificado laca de kermes, que es característica de los siglos XV y XVI y que cae en desuso más allá de estas fechas, al ser sustituida por la laca de cochinilla. Por tanto, la segunda policromía no era lejana en el tiempo de la primera, que correspondía a la época en que se construyó el retablo, y ambas serían de principios del siglo XVI. Respecto a la tercera capa de policromía, ésta correspondía al último tercio del siglo XVIII. Parece que en los siglos posteriores se realizaron repolicromías parciales y repintes, generalizados o puntuales, habiendo constancia, además, de la eliminación de policromías en algunas imágenes en 1956.

⁶ Anterior denominación del IPCE.

⁷ Fue repolicromada al menos en dos ocasiones.

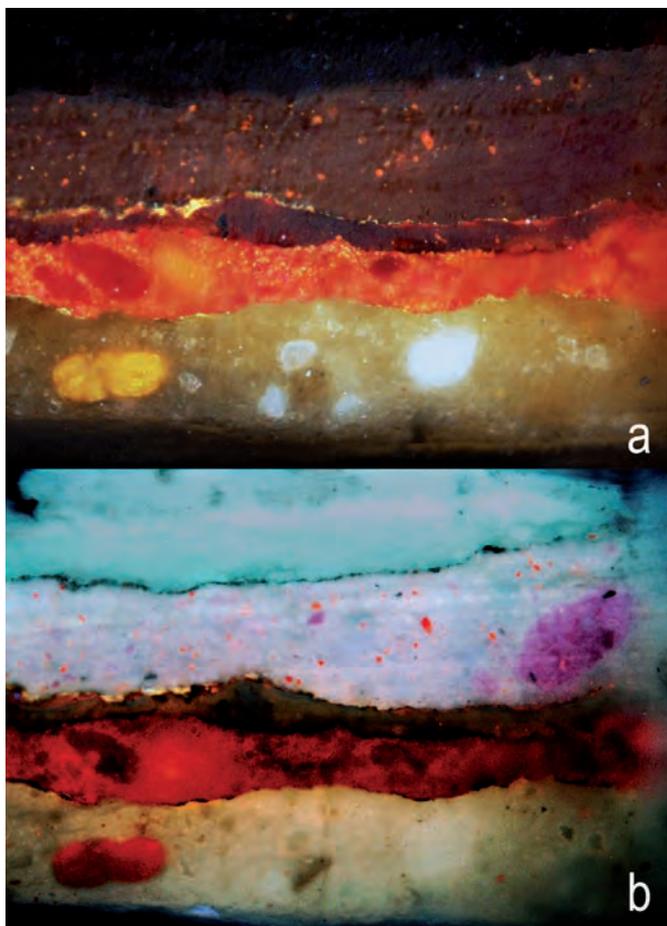


Figura 6. Retablo de El Paular. Superposición de "sisas" - microfotografías: a) MO; b) FMO.

Los retablos mayores de la Basílica del Pilar y de la Seo de Zaragoza fueron restaurados *in situ* y la documentación recogida no fue muy numerosa, pero afortunadamente pudo completarse con la procedente del retablo de la capilla de Santa Ana y el relieve de la Epifanía de la Catedral de Huesca, de menores dimensiones y cuyas figuras en alabastro fueron íntegramente trasladados al Instituto. En este caso se pudo comparar la elaboración de un conjunto de obras de cierta homogeneidad, por estar realizadas sobre un mismo soporte, remontarse a un periodo histórico definido y presentar características muy particulares en su ejecución (GÓMEZ, GAYO y LÓPEZ., 2000).

Portada policromada de la Catedral de Huesca

El estudio de esta portada constituye un interesante ejemplo de proyecto de estudio preliminar que surgió a partir de un convenio suscrito entre el Ministerio de Cultura y el Gobierno de Aragón para su restauración. La comisión de control y seguimiento corrió a cargo de la Dirección General de Patrimonio Cultural de Aragón y del Instituto del Patrimonio Cultural de España y la dirección técnica recayó en este último. Todos estos Organismos unieron

sus esfuerzos para gestionar el desarrollo de los trabajos, que comenzaron a principios de noviembre de 2004. Se estipularon cuatro meses de plazo de estudio hasta redactar el proyecto de intervención y ocho meses para los trabajos de restauración. En una primera visita con la directora del proyecto⁸, se realizó la inspección y toma de muestras, todo ello desde una torreta situada en la parte central de la portada. El objetivo era diagnosticar el alcance de la patología, así como las causas y agentes que la provocaron. Durante el seguimiento del proceso de restauración estas operaciones se tuvieron que realizar nuevamente con el fin de dar respuesta a los problemas que fueron surgiendo. Este es un caso donde las reuniones de trabajo entre los responsables de la empresa, el personal implicado del IPCE y el comisario de la Dirección General de Aragón fueron especialmente fluidas y enriquecedoras para todas las partes implicadas.

A diferencia de otras portadas románicas y góticas, también policromas, la portada de la Catedral de Huesca no ha pasado a formar parte del interior del templo. En este caso ha sido la protección del tejero y especialmente los recubrimientos exteriores que con el transcurso del tiempo se han ido depositando sobre la policromía original, los que han evitado la descamación por los cambios extremos de temperatura y el efecto de lavado del agua de lluvia. No obstante ha resultado inevitable la pérdida de ciertas partes del material pétreo; estas alteraciones son muy extensas de las esculturas de las jambas.

Los objetivos de los análisis se centraron en determinar los materiales de las distintas capas y su estado actual (GARCÍA, GÓMEZ y ALGUERÓ, 2005). La extracción de las muestras siguió dos criterios: por un lado la variedad cromática y riqueza de la policromía y, por otro, la exposición a las inclemencias climáticas y sus consecuencias (desgastes, disgregación, pérdidas y alteraciones del color). En la realización de los análisis superficiales y en la toma de muestras se distinguieron por un lado el rosetón, las arquivoltas y las jambas, y por otro el tímpano por su mayor complejidad. También se consideraron las zonas menos protegidas por el tejero, donde el deterioro era mayor.

La aparente monocromía de la portada se debía a que la policromía existente se ocultaba bajo un revestimiento de color pardo claro, constituido por una mezcla de productos de depósito y de alteración (yeso, tierras y oxalatos) que imitaba el aspecto superficial del resto de la fachada. En unas zonas, esta capa era dura y en otras, pulverulenta; estas diferencias se relacionaron con una consolidación parcial efectuada en una intervención anterior. Esta hipótesis se confirmó al detectar áreas específicas de la policromía que habían sido fijadas mediante una sustancia proteica y un polímero acrílico deteriorado.

En la mayoría de las muestras analizadas existe una imprimación blanca de albayalde aplicada sobre el soporte pétreo. Esta capa blanca está presente tanto en las policromías más sencillas, como en las más complejas del tímpano en las cuales estaba ligeramente

⁸ Concha Cirujano restauradora del IPCE.

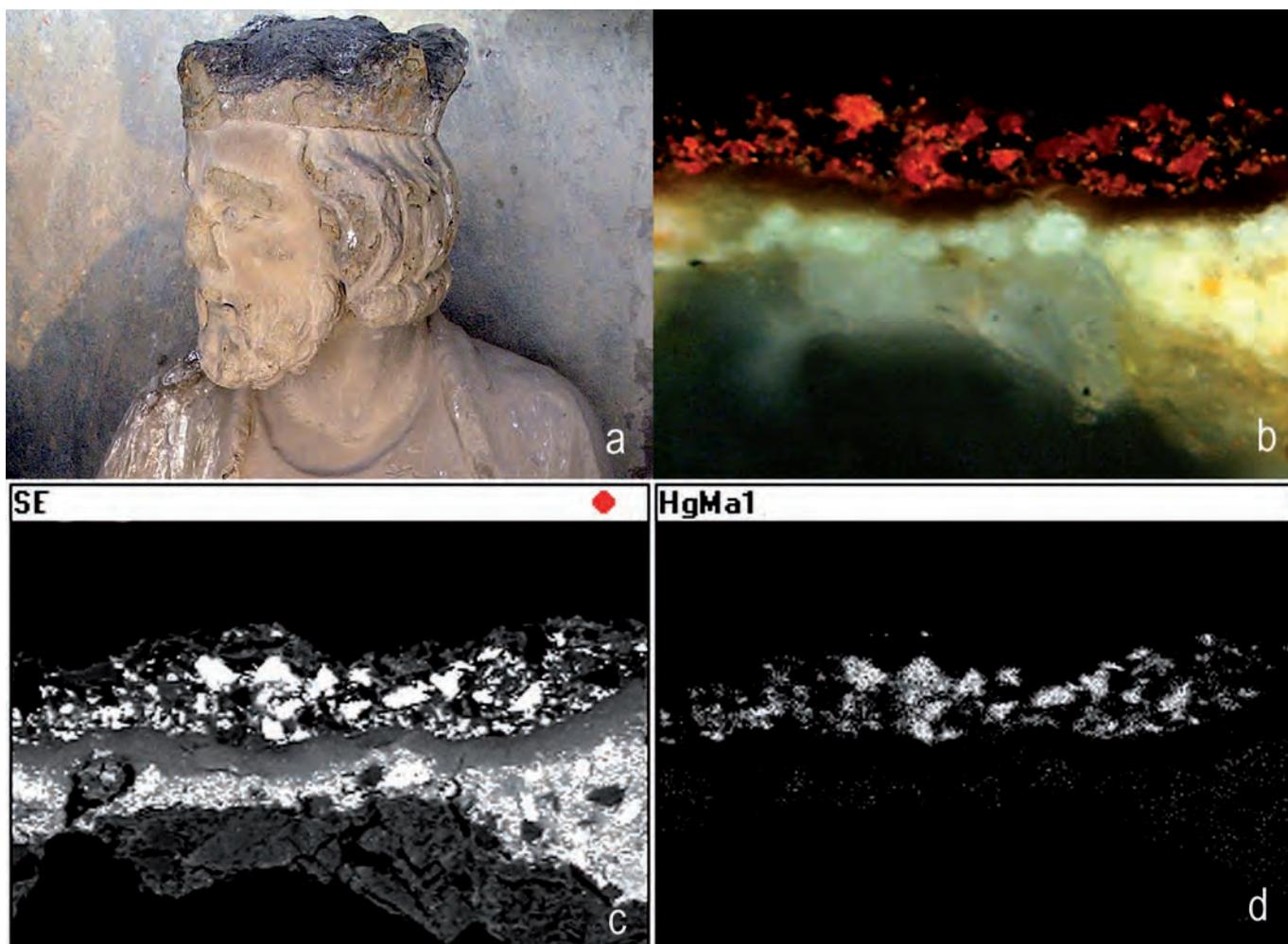


Figura 7. Portada de la Catedral de Huesca: a) Detalle de la cabeza del rey Gaspar; b) Sección transversal del cabello – luz visible; c) BSE; d) Mapa de distribución del mercurio.

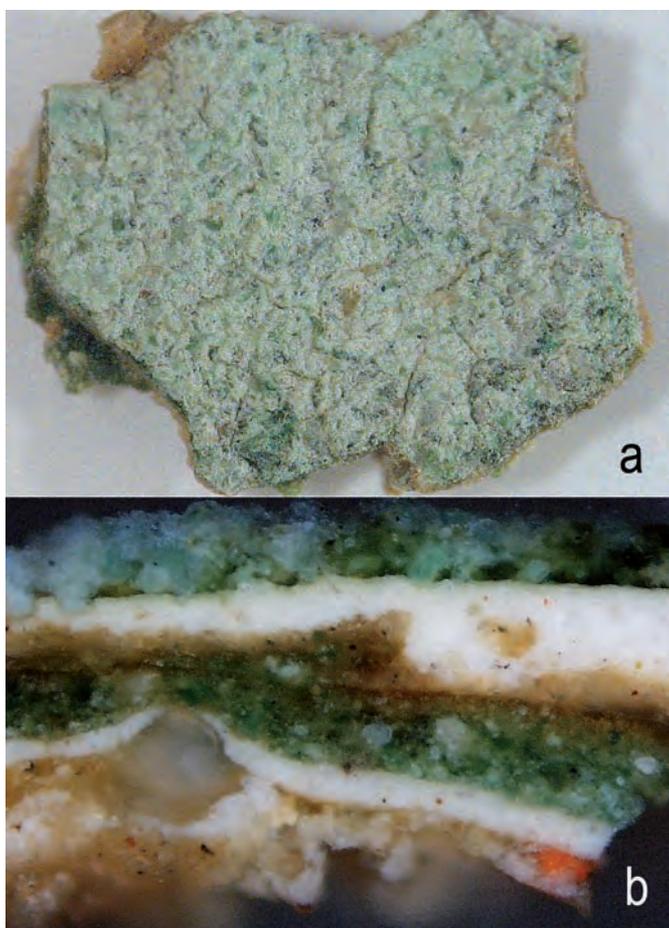
matizado con minio o con negro carbón, dando lugar a tonalidades anaranjadas o grises, respectivamente. El aglutinante de la policromía original era aceite de lino y los pigmentos identificados fueron: albayalde, cinabrio, minio, azurita, verdigrís, ocre y negro carbón.

En relación a la policromía, se constataron ciertas diferencias entre los distintos elementos de la puerta. Así, la sucesión de capas en las arquivoltas era menor que en el rosetón, por ser mayor su exposición a las inclemencias de los agentes externos. Otro tanto ocurría con la policromía de las jambas y, además, la que se conservaba se encontraba oculta con el mencionado revestimiento. Asimismo, las molduras interiores del arco central del tímpano conservaban vestigios originales cubiertos por una repolicromía de tierra roja, aplicada al temple y restos del revestimiento.

La intensidad del color azul de la azurita utilizada en el tímpano para la representación de la bóveda celeste que rodea la escena, se acentuaba con una imprimación gris de albayalde y negro carbón. Las encarnaciones eran muy claras y estaban matizadas con varias capas de albayalde y trazas de cinabrio o de negro carbón. En los cabellos oscuros se detectó una capa aislante, de naturaleza

orgánica, bajo la capa pictórica propiamente dicha, compuesta por cinabrio y negro carbón (Fig. 7). Asimismo, este último era el pigmento de las capas negras del calzado y los contornos de la arquitectura, las vestiduras, los motivos de los escudos, la vegetación y los fondos de los pliegues. La mayoría de las vestiduras eran blancas. Muchas de ellas iban bordeadas con cenefas negras, rojas o doradas y el envés se resaltaba alternando colores intensos verdes y rojos, o con decoraciones rojas y negras.

Los dorados mates de oro fino “a la sisa” aparecían también en los nimbos, sobre una capa pardo-anaranjada de albayalde, tierra roja y minio, aglutinados con aceite de lino. En un escudo se observó pan de plata sobre el mismo tipo de sisa. En algunas zonas se detectaron repolicromías cuya sisa difería de la primitiva. En estos casos, la sisa de la primera policromía estaba constituida por carbonato de calcio mezclado con minio y verdigrís como secativos del aceite de lino; y en la segunda se identificaron, tierras, carbonato de calcio y aceite de nueces. Los verdes de la repolicromía eran más claros y azulados que los de la original y estaban compuestos por albayalde y un pigmento de cobre (Fig. 8).



104

Figura 8. Portada de la Catedral de Huesca – Verde de zona vegetación con superposición de dos policromías: a) Micromuestra observada con microscopio estereoscópico; b) Sección transversal – MO.

También se han detectado ciertos deterioros de la policromía. Por ejemplo la alteración superficial de las capas verdes originales se debía al contacto de un pigmento poco estable con una atmósfera oxidante, mientras que el ennegrecimiento en los plateados estaba ocasionado por la formación de cloruro y sulfuro de plata. Sobre algunas capas rojas originales ejecutadas con cinabrio natural, se ha detectado una línea negra en la que se han identificado plomo, mercurio y cloro. Sabemos que esta alteración se ha producido en otras portadas sometidas a un clima extremo como el de Huesca (FURLAN y PANCELLA: 1981: 13-20). Por último, la presencia de elementos ajenos a la policromía como el antimonio se debe a posibles depósitos de artefactos empleados en las fiestas que se celebran en el entorno de la catedral.

Teniendo en cuenta la ubicación de la portada y, la consiguiente acción agresiva y continuada de las condiciones ambientales, la comisión de seguimiento planteó realizar un tratamiento que conservara los recubrimientos y que, además fuera compatible con los materiales de la policromía primitiva de la portada. Respecto al tratamiento de limpieza se adoptó el criterio de respetar el recubrimiento protector de oxalatos. La ablación fotónica con láser (dYAG Q-Switch; $\lambda = 1064 \text{ nm}$) fue satisfactoria en las

áreas no policromadas, aunque tenía que ser aplicada con precaución en las partes de policromía que contenían albayalde para evitar un agrisamiento⁹. Asimismo, la limpieza mecánica en seco efectuada con brochas, debía realizarse sin levantar los revestimientos más disgregados y evitando dejar a la intemperie policromías solubles en medio acuoso.

La consolidación se limitó a sellar los levantamientos más pronunciados que afectaban a la policromía. Se realizaron pruebas con silicato de etilo y con agua de cal. Este último producto se aplicó con precaución en las áreas con policromía original oleosa por el peligro de saponificación, sin traspasar los bordes de la policromía y evitando endurecer la repolicromía y los recubrimientos y dificultar su futura eliminación, si llegara el caso.

Puesto que la mayor parte de la policromía de la fachada seguía permaneciendo oculta, tanto para el espectador como para los historiadores se consideró oportuno profundizar en la documentación material de la obra. Con esta finalidad se aprovechó un proyecto MOLAB entre España e Italia para realizar análisis sin toma de muestras. Para ello se emplearon diferentes equipos de análisis portátiles y que permitían realizar un análisis superficial *in situ* (ver Fig. 2); estos equipos fueron: un videomicroscopio, un espectrómetro de fluorescencia de rayos X y dos espectrómetros de Infrarrojos, medio (MIR) y cercano (NIR), ambos provistos de una sonda. Los resultados obtenidos confirmaron la presencia de algunos materiales identificados en los análisis anteriores y demostraron que, si bien no precisaban su localización estratigráfica, servían para complementar los primeros resultados en puntos donde la toma de muestra no era posible, para no ocasionar daños en puntos relevantes de la policromía. Entre otros, se confirmó la existencia de azurita ya identificada en la bóveda celeste en la niña del ojo de la Virgen. Sin embargo, el análisis directo requería tiempos de adquisición muy altos. Especialmente en los espectros de NIR y MIR el ruido de fondo frente a las bandas de absorción de los materiales analizados dificultaba muchas veces la interpretación de los resultados.

Pintura mural: “El Cielo” de la Universidad de Salamanca

Se trata de una obra esencial del Renacimiento Español. Fue realizada hacia 1480 y está atribuida a Fernando Gallego (1440 – 1507). Representa el universo sideral, constelaciones y signos del zodiaco, todo ello siguiendo la iconografía de la época. Originariamente decoraba la bóveda de la iglesia de la Universidad de Salamanca. En el siglo XVIII y con motivo de la transformación de ésta en Biblioteca, se construyó una falsa cúpula ocultando la pintura del Cielo. Mucho más tarde, concretamente en 1952, se procedió a su arranque y traslado a una sala de las Escuelas Menores de esta misma Universidad y en la que se encuentra expuesta al público. A consecuencia de esta intervención, en la antigua bóveda de la Biblioteca quedan vestigios de la pintura original. Se encuentran en estado fragmentario y en ellos se adivinan los motivos muy desgastados y con amplias lagunas. A su vez, la parte ubicada en las Escuelas,



Figura 9. El Cielo de Salamanca - Estudios superficiales: a) XRF - bóveda de la Biblioteca; b) XRF - Escuelas Menores; c) Examen con radiación IR - Escuelas Menores.

representa una escenografía completada por numerosos repintes y reintegraciones, que muestra importantes exfoliaciones y un oscurecimiento desigual. En el año 2005 la Universidad salmantina se planteó la necesidad de establecer las mejores condiciones para conservar las pinturas expuestas al público y, además, diseñar un sistema de acceso a los especialistas a la pintura original de “El Cielo”. Con esta finalidad se solicitó el asesoramiento del IPCE¹⁰.

A partir de ese momento se hicieron viajes sucesivos para estudiar la obra *in situ* y tomar una serie restringida de micro-muestras de ambas pinturas. El acceso más complicado es el que corresponde a la ubicada en la bóveda original de la antigua Iglesia, donde hubo que colocar un tablón a modo de pasarela, sobre la falsa cúpula (ver Fig. 3b). De esta manera, se pudo realizar el estudio de los restos de pintura que quedaban en el enclave original. Respecto a la que se encuentra en la nueva sede, se dispuso una torreta móvil cuya altura llegaba hasta la base de la superficie pintada.

Fueron varias las técnicas empleadas para llevar a cabo un análisis superficial previo a la toma de muestras (Fig. 9). La termografía

realizada en la pintura¹¹ que se encuentra en las Escuelas, se usó para hacer el desglose de los sectores arrancados y unidos de nuevo sobre bastidores. Las imágenes de las fotografías visible, infrarroja y ultravioleta y los resultados de la fluorescencia de rayos X, determinaron globalmente la extensión relativa del original, repintes y alteraciones en la superficie pictórica de ambas sedes. Esta información complementaria contribuyó a minimizar la toma de muestras, al establecer las distintas tipologías, orientar en la selección de los puntos y cotejar los análisis estratigráficos con los obtenidos anteriormente por fluorescencia de rayos X (GARCÍA, *et al.*, 2009).

Siguiendo el planteamiento que se hace en ciertos casos, una muestra de cada grupo contenía todos los estratos, mientras que las otras eran superficiales o correspondían a una capa determinada para ser analizadas con métodos más específicos. En los

¹⁰ El restaurador de pintura mural encargado de evaluar cualquier posible intervención fue Leandro de la Vega y el especialista en Conservación Preventiva Juan Antonio Herráez.

¹¹ El trabajo “*in situ*” fue llevado a cabo por David Juanes y Pedro Pablo Pérez.

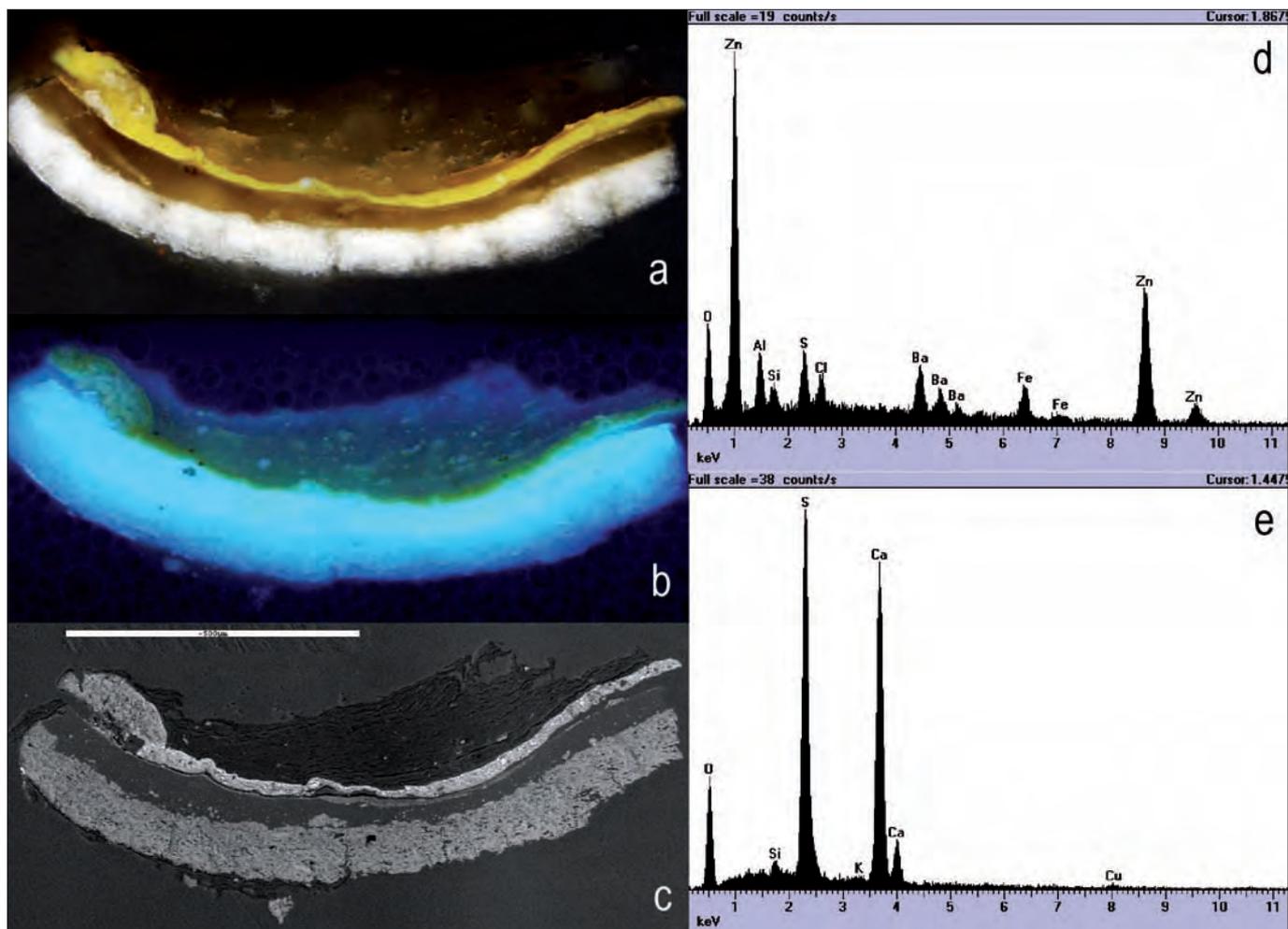


Figura 10. El Cielo de Salamanca – Microfotografías de una sección transversal de una exfoliación y microanálisis por EDX: a) MO; b) FMO; c) BSE; d) EDX – repinte amarillo; e) EDX –enlucido original.

restos de pintura de la bóveda de la Antigua Biblioteca, se tomaron muestras de los dorados de las estrellas, del azul del cielo y de los puntos representativos (colores, encarnaciones, cabellos, decoraciones doradas) de las escenas representadas.

Los objetivos planteados en este trabajo fueron: estudiar la técnica original de las pinturas, distinguirla de las adiciones, proponer las condiciones ambientales más idóneas para su conservación y la metodología de intervención en función de los materiales identificados.

La interpretación y exposición de los resultados se fundamentó en las características técnicas, adiciones y alteraciones observadas, independientemente de la tipología¹² indicada en la toma. En ambos enclaves se encontraron vestigios del original y de antiguas intervenciones. En la nueva sede se estudiaron los estratos preparatorios, gasas y adhesivos añadidos en el “arranque”,¹³ así como las masillas coloreadas de relleno, repintes, y reintegraciones cromáticas de las lagunas. Se detectaron recubrimientos que manchaban la superficie y exfoliaciones que explicaban su falta de adhesión (Figs. 10 a, b y c).

En las muestras procedentes de la bóveda de la Biblioteca se observan restos del enlucido blanco, compuesto por yeso mezclado con pequeñas cantidades de tierras (ver Fig. 10e). Esta capa existe en muy pocas muestras de la pintura de las Escuelas. El dibujo subyacente consiste en una capa muy fina y discontinua de color negro, esencialmente negro carbón, y se aprecia en numerosas muestras de la sede original y en pocas de la actual (Figs. 11b y figura 12).

El proceso de arranque y posterior adhesión a un nuevo enlucido han provocado importantes modificaciones en la pintura mural que se encuentra en las Escuelas. Después del arranque, el enlucido original fue sustituido o suplementado, según las zonas, con una nueva preparación de carbonato de calcio, aplicada sobre el reverso de la pintura, empleando como aislante una gasa embutida

¹² Pintura original en buen estado, repinte, mancha superficial, exfoliación, masilla de relleno, etc.

¹³ Estos son los materiales añadidos a la parte posterior de la pintura, una vez realizado el arranque.

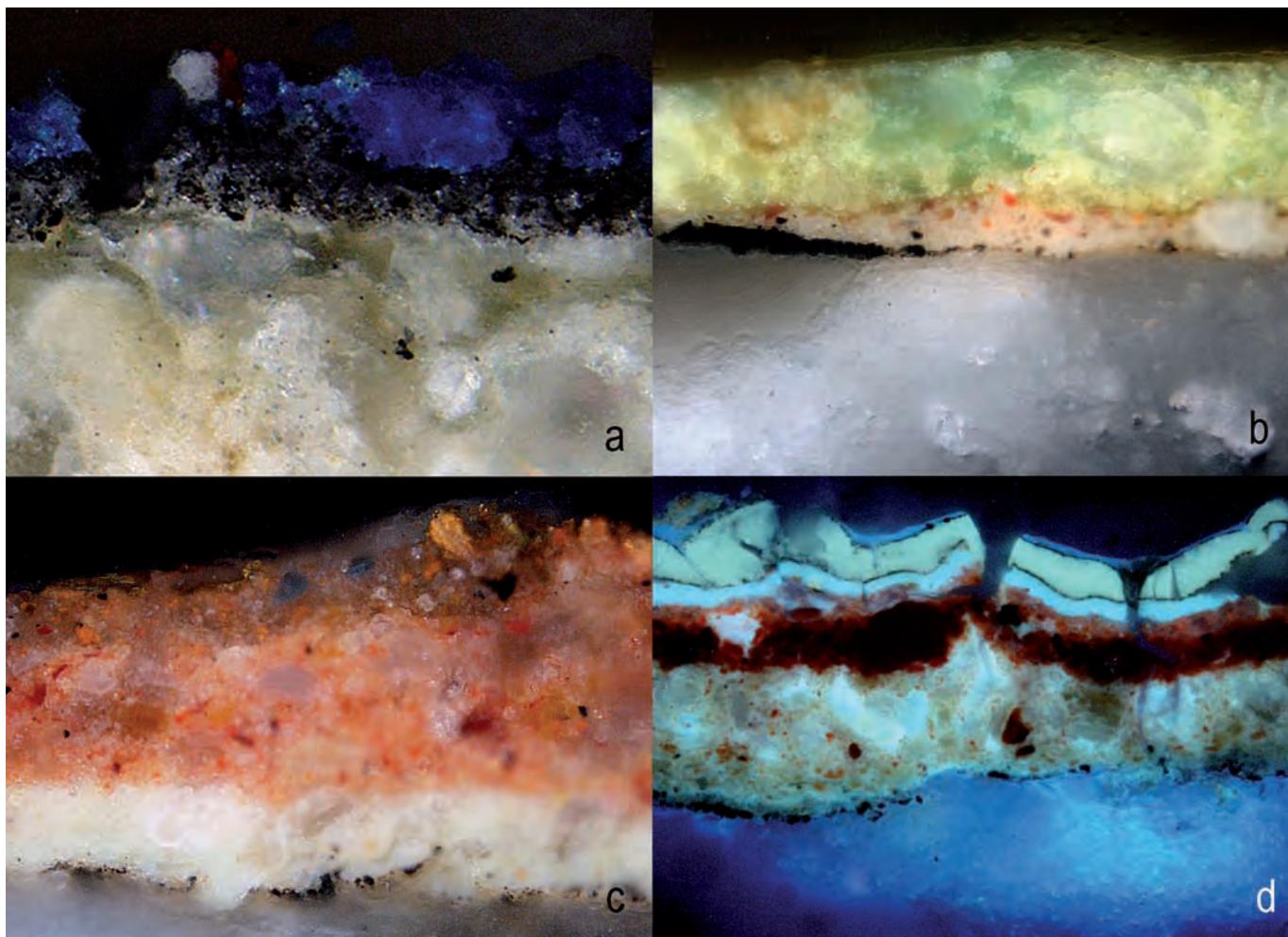


Figura 11. El Cielo de Salamanca – Ubicación original. Microfotografías sección transversal: a) MO Azul de la bóveda celeste; b) MO Verde vestidura con dibujo subyacente; c) MO Dorado a pincel de una cenefa; d) FMO de restos de cola y recubrimientos de una intervención sobre una capa roja.

en el interior de la capa. La pasta coloreada que simula el color de fondo de la superficie pictórica, rellenando amplias lagunas, está compuesta por mezclas complejas de diversos colores finamente molidos y de origen industrial. Se trata de pigmentos modernos: ultramar artificial, blanco de bario, blanco de cinc, litopón, etc. Esta masilla está aglutinada con una parafina o cera microcristalina y su grosor aumenta de forma considerable en la unión de los paneles. Otro tipo de cera identificada ha sido la cera de abejas que, posiblemente, ha sido empleada simultáneamente como recubrimiento y adhesivo de la superficie pictórica arrancada (Fig. 13).

Respecto a las capas de pintura, en general la información obtenida de las muestras tomadas en la ubicación original (figura 11) y en la actual (Fig. 4 y Fig. 10) ha resultado complementaria. Por ejemplo, en la pintura existente en la Biblioteca se ha constatado que, bajo la capa de azurita utilizada en la representación del cielo, hay un estrato negro que intensifica el color azul de este pigmento (Fig. 11a). Sin embargo, son escasas las muestras de las Escuelas que conservan el azul aterciopelado oscuro del cielo pintado por Fernando Gallego; su color es a menudo más

claro y los granos azules son más finos que en los identificados en el enclave original. Estas diferencias pueden deberse al uso de azurita artificial (azul verditer), tal vez empleada en una antigua intervención. En la pintura de las Escuelas hay capas azules hechas con azul de Prusia, que datan del siglo XVIII, y que también se han detectado en la Biblioteca. Por último, hay capas muy removidas y descohesionadas de repintes que contienen blanco de cinc, litopón, barita, azul cobalto y violeta de cobalto en las Escuelas.

El pan de oro de los dorados mates de la sede original, se aplica de dos formas distintas: sobre bol rojo en las estrellas dispuestas de forma diseminada en el arco y sobre una “sisa” anaranjada mordiente traslúcida en otros motivos. Un tercer tipo de dorado ha sido aplicado “a pincel” con oro fino (ver Fig. 11c). En el color amarillo de las nuevas estrellas opacas de las Escuelas se ha empleado un amarillo orgánico mezclado con litopón y blanco de cinc y ocasionalmente con ocre (ver Fig. 10 d).

Los rojos llevan cinabrio en los tonos más intensos, matizado con una laca roja para los oscuros, albayalde en los claros y minio

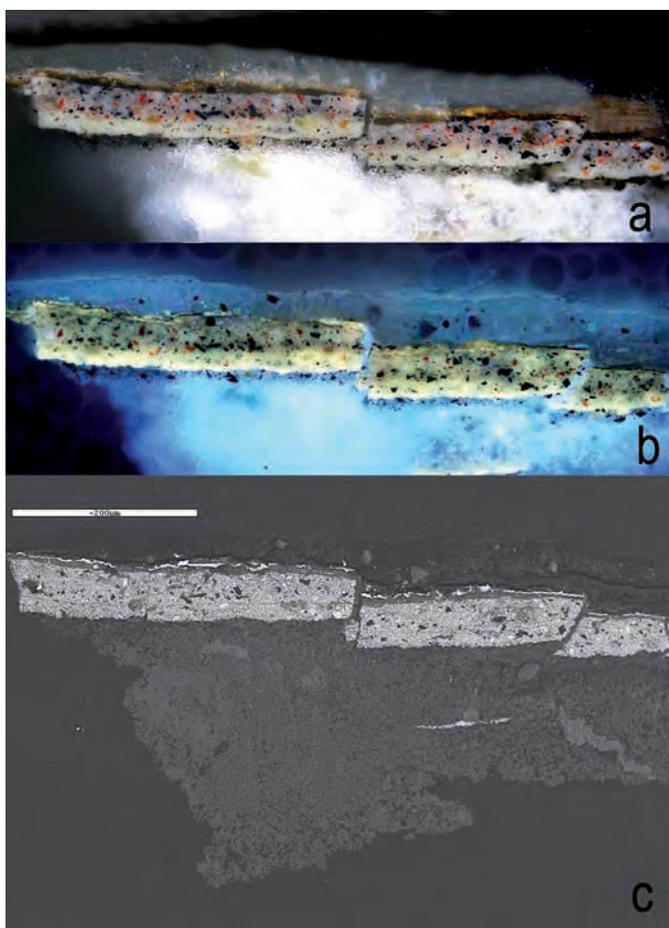


Figura 12. El Cielo de Salamanca – Escuelas Menores. Escalonamiento de estratos. Microfotografías de una sección transversal: a) MO; b) FMO; c) BSE.

en los anaranjados. En los repintes que datan del siglo XX, el color rojo se obtiene a partir de rojo de cadmio, barita, litopón y blanco de cinc. El verdigrís y el amarillo de plomo y estaño originales (Fig. 11b) se han reemplazado por un pigmento verde orgánico sintético y por amarillo de cadmio.

Los pigmentos identificados en los repintes demuestran que ha habido, al menos, dos reintegraciones cromáticas de diferente amplitud en las Escuelas Menores. La primera fue realizada por los hermanos Gudiol en el año 1952 después del “arranque”, y ha sido detectada en las numerosas lagunas del cielo, las estrellas y las figuras de la Bóveda Celeste. Hay otras capas pictóricas aplicadas sobre ésta, de fecha más reciente y el aglutinante identificado en estos últimos es el aceite de nueces o una mezcla de linaza y adormideras.

Ciertos materiales orgánicos identificados en las muestras son especialmente sensibles a las condiciones ambientales y sus variaciones. Se trata de cola animal y ceras (de abeja, parafina o microcristalina). Han sido identificados restos de la primera, tanto en la Antigua Biblioteca como en las Escuelas, y tiene su origen en la cola animal utilizada como adhesivo en el arranque de la pintura. A veces, se encuentran en la superficie externa y son muy gruesos,

y otras están atrapados en capas intermedias (ver Fig. 10 a, b y c; Fig. 12d). Con los cambios de humedad, esta cola se separa y arrastra las capas superficiales sobre las que se adhiere, provocando graves exfoliaciones. La cera de abejas mancha la superficie y aglutina los pigmentos de las espesas masillas. Su escasa adhesividad es responsable de la separación de estas últimas. Pese a su inercia química y su capacidad de impermeabilizar una superficie y protegerla ante los cambios higrométricos, su presencia conlleva ciertos inconvenientes. Estos derivan de su bajo punto de fusión, responsable de su reblandecimiento al aumentar la temperatura; las consecuencias son que se adhiera el polvo superficial y difunda hacia capas interiores. En ciertos casos, la presencia de nitratos demuestra una actividad biológica, y estas sales pueden tener su origen en deyecciones animales.

Las filtraciones de humedad procedentes de la cubierta de la bóveda del enclave original y las tensiones originadas en proceso de “arranque” han provocado numerosas faltas, tanto del enlucido como de la capa pictórica original. Las pérdidas de adhesión y de cohesión debidas a fenómenos de contracción. La dilatación y la fragilidad de las capas han originado pulverulencias, disgregaciones en ambos enclaves, rupturas transversales e incluso escalonamiento de la superficie con la consecuente pérdida de adhesión de la pintura en las Escuelas Menores.

Después del “arranque” se fijaron algunos levantamientos originados en el proceso o generados posteriormente, por el efecto de los cambios climáticos sobre los productos utilizados por los Gudiol. Respecto a éstos, hay que señalar que su elección no fue acertada y sólo se justifica porque, tanto la técnica de “arranque de la película pictórica” (*strappo*) como los materiales empleados, eran los comúnmente aceptados en la primera mitad del siglo XX. Afortunadamente, el progreso actual de la restauración ha desechado dichos métodos. El adhesivo aplicado con calor, para fijar las exfoliaciones que fueron apareciendo después del traslado a las Escuelas Menores ha alterado la superposición de estratos y los ha ablandado. Como consecuencia de ello, han perdido su definición original e incluso han llegado a mezclarse materiales utilizados en la restauración y los originales.

Teniendo en cuenta la naturaleza de muchos de los materiales orgánicos identificados, y su sensibilidad a las temperaturas elevadas, es primordial que, en la sala de exposición actual, ésta se mantenga por debajo de ciertos límites e impedir cambios bruscos que hagan que la cera adhiera polvo, se movilice y difunda hacia áreas más internas o inferiores. Por la misma razón, hay que evitar focos de iluminación y otras fuentes de calor en las proximidades de la pintura. Igualmente hay que minimizar la acumulación del polvo y la suciedad en todo el recinto, extremar la limpieza de la moqueta y controlar el acceso de visitantes. Asimismo, las variaciones bruscas o amplias de humedad relativa provocan cambios dimensionales en los materiales higroscópicos; este efecto es especialmente importante en las espesas capas de cola animal. A lo anterior hay que añadir su incompatibilidad con las capas impermeabilizadas con cera, que no se adaptan a los fenómenos de contracción – dilatación de la cola.

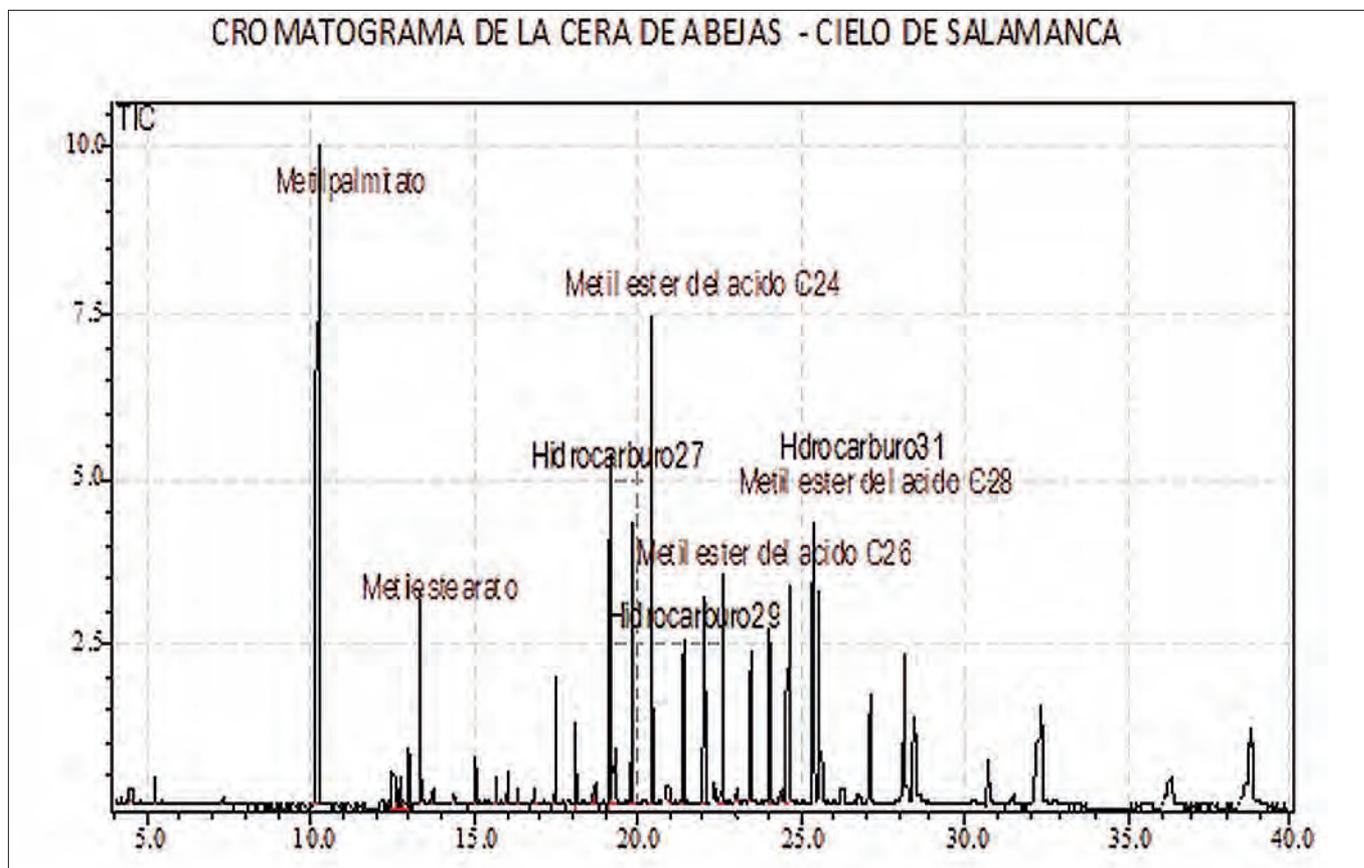


Figura 12. El Cielo de Salamanca – Escuelas Menores. Cromatograma de gases de un recubrimiento de cera de abejas.

Por tanto, dadas las especiales características de esta obra, resulta imprescindible llevar a cabo una detallada revisión periódica de la misma, con el fin de detectar las posibles exfoliaciones, desprendimientos, manchas, oscurecimiento y otros cambios que afectan a su adecuada conservación. Cuando la situación lo requiera será necesario llevar a cabo la correspondiente restauración, que deberá ser siempre puntual y atendiendo de forma específica a los problemas detectados.

Reja Mayor de la Capilla Real de Granada

Esta reja monumental cierra la nave del crucero de la Iglesia Catedral de Granada y protege el espacio de su Capilla Real, en la que se albergan los restos de los Reyes Católicos. Es una obra maestra de la rejería española del siglo XVI, fue realizada por el Maestro Bartolomé¹⁴, que la terminó en el año 1520. Está elaborada en chapas de hierro repujado y estructurada de forma semejante a los retablos. En sentido horizontal consta de tres cuerpos y un remate o crestería, mientras que en sentido vertical de cinco calles, siendo la central de doble anchura. La reja, en su conjunto, presenta una abundante y espléndida ornamentación de escudos (Fig. 14a), escenas y elementos simétricos que decoran con una suntuosa policromía ambas caras de los frisos y el remate, especialmente en el ático y la calle central. Aunque no se ha encontrado documen-

tación con respecto a la ejecución, sabemos que los “*maestros de fazer rexas*” solían entregar la obra una vez estañada y empavonada con aceite. Las tareas relacionadas con su dorado y policromado corrían a cargo de los pintores y doradores de los retablos. La obra fue restaurada en el año 1776.

En el 2003 el Instituto del Patrimonio Cultural de España dirigió su restauración¹⁵. Antes de esta intervención el colorido original se hallaba oculto por repintes, repolicromías con colores opacos y recubrimientos oscurecidos.

Con motivo de este proyecto se hicieron dos visitas para su inspección visual y toma de muestras, siempre en estrecha colaboración con los restauradores. La primera al comienzo de la restauración y la segunda en el curso de los trabajos. Fueron los propios restauradores los que aprovecharon el acceso a las zonas ocultas y el desmontaje de ciertas piezas, los que enviaron las más representativas al laboratorio (Fig. 14b), convenientemente etiquetados y localizados. Esta actuación facilitó el estudio al contribuir al muestreo. Posteriormente dichos fragmentos se devolvieron a su lugar.

¹⁴ No hay duda de la autoría del constructor de la reja “MAESTRE BARTOLOME ME FECI.

¹⁵ Paz Ruiz se encargó de la dirección técnica y la empresa Ágora ejecutó la restauración.

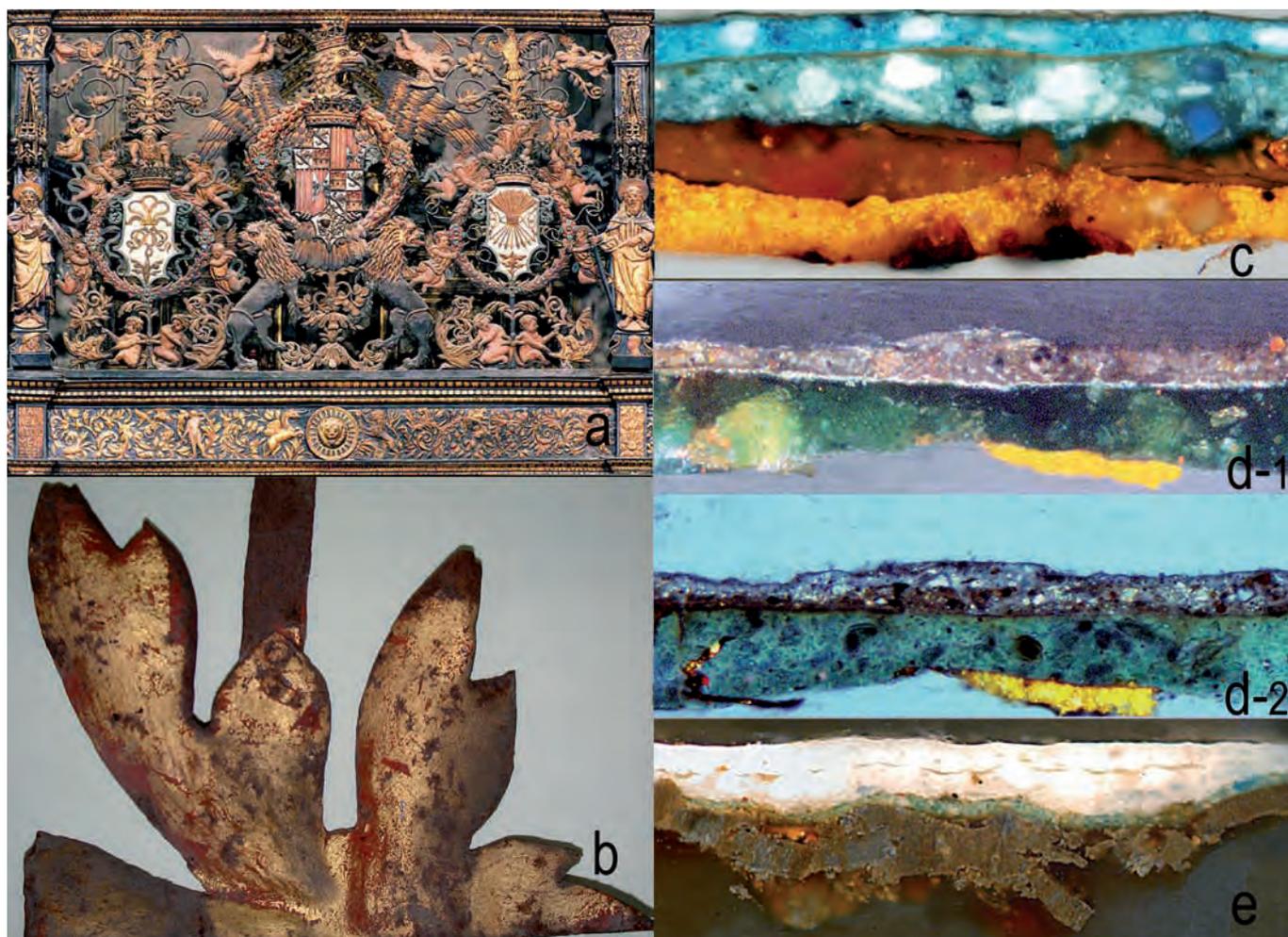


Figura 14. Rreja Mayor de la Capilla Real de Granada: a) escudo de los Reyes Católicos; b) Pieza decorativa original del remate; c) Repolicromías azules sobre veladura roja sobre oro; d-1) Sección transversal - Recubrimiento sobre veladura verde original; d-2) Lámina delgada de la sección anterior; e) Repinte blanco sobre policromía original azul aplicada directamente sobre el hierro de la rreja.

Los objetivos fundamentales del estudio analítico del soporte fueron la caracterización estructural y composicional del metal, así como conocer su tecnología de fabricación, incluyendo los tratamientos térmicos y mecánicos empleados para la elaboración de cada uno de los elementos constructivos. Otro objetivo importante fue determinar su estado de alteración y discernir entre elementos originales y otros añadidos en restauraciones posteriores. Respecto a la policromía, los análisis realizados han tenido como finalidad identificar los materiales presentes en la policromía del siglo XVI y distinguirlos de aquellos incorporados en el siglo XVIII y en otras actuaciones (GÓMEZ, *et al.*, 2008).

Dada la naturaleza metálica del soporte, su estudio se llevó a cabo mediante el correspondiente análisis metalográfico. Las muestras procedentes de los barotes y la de las chapas de los cerramientos de los frisos originales, presentaban una estructura monofásica de ferrita, con numerosas inclusiones y bajo contenido en carbono. Según se deduce de la observación de las metalografías para la construcción de cada elemento, las barras de hierro se

calentaban y forjaban hasta conseguir la forma deseada, cuadrada o torcida; mediante este proceso se lograba que el hierro fuera fibroso y tenaz. Finalmente, se aplicaba una capa de estaño en caliente para, de esta manera, protegerlas de la oxidación. Actualmente el estañado se presenta en forma dispersa sobre la superficie de los barotes. Los elementos de menor importancia, como cuñas o remaches, no tenían esta protección final. Las láminas de hierro que adornan la rreja fueron repujadas hasta alcanzar el relieve deseado. No están estañadas sino empavonadas, ya que iban a ser doradas y policromadas. Por último se devolvieron a su lugar la composición y estructura metalográfica de las figuras decorativas no originales. La estructura metalográfica era distinta, concretamente, bifásica, sin inclusiones y con mayor contenido en carbono.

La suntuosa policromía de la rreja se localizaba en elementos simétricos que decoraban ambas caras, aunque los colores opacos que se apreciaban al comienzo de la restauración enmascaraban gran parte de la decoración original. Los dorados se habían torna-

do verdosos debido a la corrosión del latón empleado en 1776 o amarillos y mates al ser sustituidos por repintes ocres posteriores. Los motivos verdes y rojos metalizados de paños y ornamentos vegetales eran opacos, llegando a modificar incluso su color inicial (Fig. 14 c y e). Por último, gran parte de la policromía se hallaba oscurecida y en menor grado en estado lagunar. La crestería, los escudos centrales y las pilastras, que separan las calles habían sido dorados originalmente “a la sisa” y, ciertos elementos, habían sido realzados con veladuras rojas, verdes y pardas (Fig. 14 d-1 y d-2). El oro intensificaba el color de las veladuras rojas de frutos, ropajes y matices en los flameados. Las veladuras verdes y pardas se aplicaban sobre plateados hechos con estaño, metal que se empleó en sustitución de la plata y que, además, protegía los elementos sustentantes. El color de las encarnaciones originales era generalmente rosado claro.

Los resultados de los análisis realizados demuestran la gran calidad de los materiales utilizados y la destreza y profesionalidad de todos aquellos que intervinieron en la manufactura de esta reja: maestro rejero encargados de su decoración.

Conclusiones

Los análisis aplicados a una obra, al igual que su restauración, no pueden plantearse en función de los metros cuadrados de la superficie policromada. Tampoco es posible partir de ideas preconcebidas, ya que una investigación se puede abordar desde ópticas muy diferentes, como hemos visto en los ejemplos descritos en este capítulo. Los datos obtenidos de la obra “virgen” y su interpretación, deben confrontarse con los de la obra “ya tratada”, tanto como referencia científica como para asesorar en las tareas de restauración.

En la restauración llevada a cabo por el IPCE para la conservación del retablo de El Paular se decidió respetar en lo posible la sucesión de repolicromías y el análisis del laboratorio brindó la oportunidad de estudiar ciertas características materiales y técnicas de la compleja y singular policromía subyacente.

Tanto en el estudio preliminar, como durante el seguimiento de la restauración de la portada de la Catedral de Huesca, hubo una íntima colaboración con los restauradores, en la que se discutieron las posibilidades y limitaciones de los métodos y productos a emplear en la limpieza y la consolidación, así como en el mantenimiento posterior de la fachada.

El estudio de los aspectos materiales evidenció las graves alteraciones, faltas y problemas que presenta la pintura del Cielo de la Universidad de Salamanca, que desaconsejan abordar una restauración profunda en ambas sedes. Es mejor ir resolviendo de forma puntual los nuevos problemas que desafortunadamente puedan aparecer a lo largo del tiempo debido a la incompatibilidad de los materiales añadidos en las distintas actuaciones sobre la obra, especialmente en la sala de las Escuelas Menores. Además, en la exposición actual se favorece la integración visual de la obra, dada la lejanía del espectador y los bajos niveles de iluminación.

El interés de los resultados obtenidos en el estudio de la reja de la Capilla Real de Granada y la novedad de sus aportaciones, puso de manifiesto la conveniencia de realizar este tipo de análisis previos en otras rejas monumentales.

Existe una gama muy amplia de técnicas instrumentales. Las más numerosas son plenamente vigentes y otras están en proceso de experimentación. La aproximación metodológica varía en función de los medios económicos, el personal y su formación. En este sentido, hay además laboratorios especializados en ciertos temas, materiales o procedimientos, dependiendo de su entorno geográfico, cultural y administrativo. Su ubicación es un componente esencial a tener en cuenta y sus objetivos varían, en función de que estén ligados a la Universidad, un Centro de Investigación, un Centro de Restauración o un Museo.

Cualquier planteamiento debe seguir un discurso crítico y proponer alternativas, exponiendo los logros, a la vez que las incógnitas que permanecen sin resolver. Es necesario revisar y recapacitar sobre lo que se ha hecho hasta ahora, para modificar y mejorar futuras actuaciones. La ciencia se apoya en la comprensión de los errores e inexactitudes y sus causas, porque los avances se logran encontrando nuevos datos, que habían pasado desapercibidos, y dejando atrás teorías anticuadas o equivocadas.

Agradecimientos

Aunque todos aquellos que han participado en el estudio y restauración de estas obras ya han sido mencionados en este trabajo, queremos de forma expresa agradecer su contribución.

Bibliografía

- BERNARD, M. (1994): "Editorial", *Techne*, 1, 3 – 6.
- BRUQUETAS, R., CARRASÓN, A., GÓMEZ ESPINOSA, T. (2003): "Los Retablos. Conocer y Conservar", en *Bienes Culturales*, 2, pp.: 13 – 44.
- CANTOS, O.; LABORDE, A. (2003): "Proyecto de restauración del retablo mayor del Monasterio de Santa María de El Paular, Rascafría (Madrid)", *Bienes Culturales. Revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, nº 2, pp.:135 – 147.
- CARRASÓN, A. (2006): "Construcción y ensamblaje de los retablos en madera", en *Retablos: Técnicas, materiales y procedimientos*, Publicación digital en CD Rom, Ed. GEIIC
- CIRUJANO, C., GÓMEZ, M., GAYO, L. (2001): "Retablo de la Vida de la Virgen. Estudio e intervención", *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, 19, pp.: 257 – 263.
- DALMAU, C. (2002): "Carpintería estructural del retablos", en *Curso de restauración y tratamiento de soporte de madera en Obras de Artes*, Ed. Dirección General del Patrimonio y Promoción Cultural. Junta de Castilla y León, pp.: 57 – 65.
- DERRICK, M.R., STULIK D., LANDRY J.M. (1999): "Infrared Spectroscopy" in *Conservation Science. Scientific Tools for Conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles
- DOMÉNECH-CARBÓ, A.; DOMÉNECH-CARBÓ, M.T.; COSTA, V. (2009): *Electrochemical Methods in Archaeometry, Conservation and Restoration*, Ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- EDWARDS, H.G.M., CHALMERS, J.M. (EDS.) (2005): *Raman Spectroscopy in Archaeology and Art History*, Ed. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- ERHARDT, D. HOPWOOD, W., BAKER, M. and VON ENDT, D. (1988): "A systematic approach to the instrumental analysis of natural finishes and binding media" Preprints of Papers presented at the 6th Annual Meeting, American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, New Orleans, p.:67.
- FERRERO, J.L., ROLDÁN, C., JUANES, D., ROLLANO, E., MORERA, C. (2002): "Analysis of pigments from Spanish works of art by portable EDXRF spectrometer", *X-Ray Spectrometry*, 31, pp.: 441-447.
- FURLAN, V., PANCELLA, R., HERMANÈS, T.A. (1981), "Portail peint de la Cathédrale de Lausanne. Analyses pour une restauration", *Chantiers*, 12, Lausanne, pp: 13-20.
- GARCÍA, M.A., GÓMEZ, M., JUANES, D., VEGA, C. (2009): "The Sky of Salamanca. an example of experimental methodology applied to a singular work of art", en *Actas 3rd Symposium Lasmac 2009 & The Archaeological and Art Issues in Material Science*, Cancún (Mexico), 16th – 21st August, (pendiente de publicación)
- GARCÍA, M.A., GÓMEZ, M., ALGUERÓ, M. (2005): "Portada de la Catedral de Huesca. Análisis de la policromía", en *Actas II Congreso del GEIIC, Investigación en Conservación y Restauración*, Barcelona 9 al 11 de noviembre, pp.: 147-154.
- GÓMEZ ESPINOSA T., GÓMEZ GONZÁLEZ, M. (2007): "La Policromía", en *Retablo Mayor de Santa María de El Paular, Restauración e Investigación*, Ed. Secretaría General Técnica, Ministerio de Cultura, Madrid, pp.: 141-163.
- GÓMEZ, M.L. (1998): *La Restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*, Ed. Cátedra, Madrid.
- GÓMEZ, M. (2006): "Los materiales de la policromía: empirismo y conocimiento científico", en *Retablos: Técnicas, materiales y procedimientos*, Publicación digital en CD Rom, Ed. GEIIC.
- GÓMEZ, M., GAYO, L., LOPEZ, A. (2000): «Albâtre polychrome des XVème et XVIème siècles en Espagne. Caractérisation des Matériaux » en *Art et Chimie. La couleur*, International Congress on Contribution of Chemistry to the Works of Art, Ed. CNRS, París, pp.:80 – 87.
- GÓMEZ, A., GÓMEZ, M., ALGUERÓ, M., GARCÍA, M.A. (2008): "Estudio analítico de la reja Mayor de la Capilla Real de Granada", *Bienes Culturales. Revista del Instituto del Patrimonio Cultural de España*, 8, pp.: 233 – 246.
- HALPINE SUSAN (1992): "Amino acid analysis of proteinaceous media from Cosimo Tura's The Annunciation with Saint Louis of Toulouse", *Studies in Conservation*, pp.: 37, 22 - 38.
- KROUSTALLIS, S.F. (2008): *Diccionario de materias y técnicas*, Ed. Secretaría General Técnica, Ministerio de Cultura, Madrid.
- MACARRÓN MIGUEL, A. (2002): *Historia de la Conservación y la Restauración. Desde la antigüedad hasta el siglo XX*, Ed. Tecnos, Madrid.
- RUIZ DE LACANAL, M.D. (1999): *El Conservador-Restaurador de Bienes Culturales: historia de la profesión*, Ed. Síntesis, Madrid.
- SANJOVA J. (2000): "Étude des pigments organiques préparés à partir des racines des rubiacées européennes" *Art et Chimie, Actes du Congrès*, pp. : 14-18.
- SCHREINER, M., MELCHER, M., UHLIR, K. (2007); "Scanning electron microscopy and energy dispersive analysis: applications in the field of cultural heritage", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387, (3), pp.: 737-747.
- SKOOG, D.A., WEST, D.M. (1990): *Análisis Instrumental*, Ed. McGraw-Hill, Mexico
- STRIEGEL, M.F., HILL, J. (1996): *Thin-Layer Chromatography for Binding Media Analysis*, *Scientific Tools for Conservation*, Ed. The Getty Conservation Onstitute, Los Angeles.
- STUART, B. (2007): *Analytical Techniques in Materials Conservation*, Ed. John Wiley & Sons, West Sussex.
- V.V.A.A. (1998): "La polychromie des fragments du retable de Rouvray" en *D'Angleterre en Normandie, sculptures d'albâtre du Moyen Age*, Catálogo de la Exposición en Rouen-Evreux, pp. : 99-100
- V.V.A.A. (2008): *La Ciencia y el Arte. Ciencias experimentales y conservación del Patrimonio Histórico*, Ed. Secretaría General Técnica, Ministerio de Cultura, Madrid.
- WALLACE, S.L. (1997): "Applications of Chromatography in Art Conservation: Techniques used for the analysis and identification of proteinaceous and gum binding media", *Analyst*, pp.: 144, 75R-81R.

3.4. Analizando residuos de limpieza. Potencial analítico de los materiales eliminados durante la restauración

José V. Navarro Gascón

Laboratorio de Análisis de Materiales. Instituto del Patrimonio Cultural de España

Introducción

La analítica de los bienes integrantes del Patrimonio Histórico encuentra uno de sus principales obstáculos en la propia naturaleza del objeto a estudiar, imponiéndose restricciones severas en los aspectos relativos al número y volúmenes de muestras a extraer, siendo frecuentes los casos donde la restricción es total y las posibilidades de obtener información quedan reducidas al uso de técnicas de análisis directo, sin toma de muestra.

El debate en torno a la validez de uno u otro sistema de análisis, con o sin toma de muestra, es un tanto artificial ya que la calidad de la información proporcionada en los análisis basados en la extracción de muestras no encuentra sustituto, siempre y cuando se minimice el impacto de su extracción.

En el presente artículo focalizaremos la atención en una tercera vía, no siempre utilizada, explorando algunas de las posibilidades analíticas que ofrecen los materiales que se eliminan durante los procesos de limpieza o analizando aquellos materiales que por su elevado grado de alteración no pueden ser reintegrados en la obra. Son diversos los argumentos que pueden esgrimirse a favor de estos análisis, algunos de los cuales emanan de las propias condiciones que deben regir un proceso de limpieza (IPCE, 2009):

- En un proceso de limpieza es necesario conocer tanto la naturaleza del material que se elimina como la del soporte sobre el que se asienta.
- Es necesario conocer el grado de interacción, tanto desde un punto de vista físico como químico, entre el método de limpieza utilizado y el soporte sobre el que se aplica.
- En los productos eliminados durante un proceso de limpieza está contenida parte de la historia del objeto, en particular aquella que refleja las interacciones y respuestas ante el medio en el que se inserta, incluidas las intervenciones realizadas para su conservación.
- Buena parte de la información analítica necesaria para el correcto conocimiento del objeto puede obtenerse de los productos eliminados durante la limpieza, evitando muestreos agresivos. En muchas ocasiones esta información puede proceder del estudio de materiales que, como sucede en muchos objetos procedentes de enterramientos arqueológicos, como consecuencia de su estado de alteración no pueden reintegrarse en la obra.

Para documentar este artículo se han escogido una serie de ejemplos prácticos de obras restauradas y/o estudiadas en el IPCE durante los últimos años:

- El primero de los ejemplos corresponde a la Dama de Elche, escultura en la que las posibilidades de toma de muestras se encuentran muy restringidas. Su principal peculiaridad reside en la presencia de restos de suciedad procedentes del periodo enterramiento arqueológico que podemos estudiar hoy día con técnicas inexistentes en épocas anteriores. El hallazgo más notable procede de una muestra obtenida barriando con un pincel los pliegues del tocado.
- Los ejemplos nº 2 y 3 corresponden a metales arqueológicos en los que, como alternativa a la caracterización metalográfica convencional, para la que sería preciso obtener una sección completa de la chapa metálica, se recurre a la búsqueda y análisis de granos metálicos inalterados entre los productos de corrosión que suelen acompañar este tipo de hallazgos.
- En el último de los ejemplos se exponen las incidencias detectadas en los procesos de limpieza realizados mediante láser sobre algunos objetos de oro, plata y dorados. Como metodología novedosa, el proceso analítico se inicia identificando el material eliminado durante el proceso de fotoablación y se completa mediante un examen de las superficies afectadas.

La técnica analítica básica utilizada en los análisis que se describen ha sido la microscopía electrónica de barrido, acoplada con un sistema de microanálisis mediante espectrometría de dispersión de energías de rayos X (MEB-EDX). Esta técnica nos permite obtener información textural y composicional a partir de volúmenes mínimos de muestra; en el caso de algunos objetos metálicos pequeños (monedas, joyas, etc.) su análisis es directo sin ninguna manipulación. La información facilitada por esta técnica se ha completado, cuando el volumen de las micromuestras extraídas lo permitía, con otras técnicas como la difracción de rayos X (DRX), cromatografía de gases-espectrometría de masas, cromatografía líquida de alta resolución, etc.

Identificación de restos de láminas de oro en la Dama de Elche

Desde su descubrimiento en la Alcudía de Elche en el año 1897, la Dama de Elche ha sufrido numerosos avatares. Ese mismo año es vendida y trasladada a París, donde permanecerá expuesta en el Museo del Louvre hasta el año 1939 en que, tras el comienzo de la Segunda Guerra Mundial, es llevada a Toulouse para su protección. Su regreso a España, en el marco de un intercambio de obras de arte con Francia, tiene lugar en el año 1941, permaneciendo



Figura 1. Dama de Elche. Detalle de los encostramientos existentes en la zona posterior del busto.

expuesta en el Museo del Prado hasta que en 1971 es trasladada a su ubicación actual en el Museo Arqueológico Nacional. A este largo periplo viajero deben añadirse dos retornos temporales a Elche, su lugar de origen, en 1965 y 2006.

La Dama de Elche, además de ser uno de los grandes iconos de la arqueología nacional, presenta un rasgo que podemos considerar de un valor inestimable desde un punto de vista analítico ya que en ningún momento de su azarosa vida viajera ha sido sometida a una operación sistemática de limpieza en profundidad o a tratamientos para su conservación, tal y como hubiese sido previsible en una obra tan singular, y hoy día podemos encontrar entre los recovecos de la talla restos originales del periodo de enterramiento arqueológico.

Durante el año 2006, como fase previa a su traslado temporal a Elche, donde presidiría la inauguración del Museo Arqueológico y de Historia de la ciudad, se abordó desde los laboratorios del Instituto del Patrimonio Cultural de España (entonces Instituto del Patrimonio Histórico Español) un conjunto de estudios multidisci-

plinarios destinados a conocer en profundidad las características y estado de conservación de la obra.

En los temas concernientes al estudio del soporte pétreo y sus alteraciones se realiza un muestreo 'periférico', altamente restrictivo en los aspectos relativos al número y volúmenes de muestras a extraer. La práctica totalidad de las micromuestras recogidas proceden de los diversos encostramientos existentes en la zona posterior del busto (espalda, rodetes, diadema) y hornacina, así como de pequeños depósitos superficiales existentes entre los relieves de la talla (Fig. 1).

A partir de este tipo de micromuestras se constata la presencia generalizada de una costra yesífera constituida por cristales lenticulares bien desarrollados que, en muchas de las ocasiones, muestran orientaciones preferentes, mientras que en otras se disponen formando enrejados (Fig. 2). Adheridos a las mismas suelen aparecer fragmentos de roca disgregada en los que pueden distinguirse los rasgos texturales característicos de la roca sobre la que se ha ejecutado la talla: una matriz de calcita micrítica con

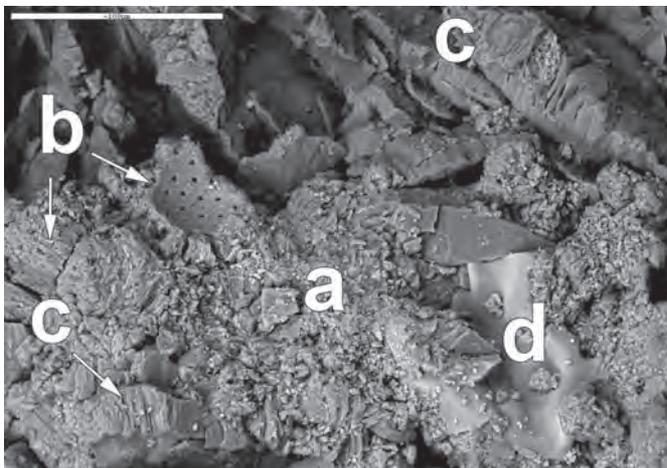


Figura 2. Dama de Elche. Imagen BSE de detalle de la zona interna de una costra en la que se observan restos de la matriz micrítica de la roca (a), bioclastos de foraminíferos (b), cristales de yeso lenticular enraizados en la roca (c) y depósitos de cloruro sódico (d).

un contenido relativamente elevado de nanofósiles (coccolitofóridos) y una importante presencia de bioclastos correspondientes a foraminíferos planctónicos, pudiendo catalogarse la roca como una biomicrita de globigerinas. Dentro de este tipo de muestras se observan, asimismo, pequeñas concentraciones de sales solubles (cloruro sódico), formas de biodeterioro (hifas de hongos) y partículas de bermellón (cinabrio) procedentes de la degradación de la capa de policromía roja presente en el busto.

La presencia de estos encostramientos de yeso, cuya textura responde a procesos de neoformación, plantea algunos interrogantes con respecto a su origen ya que su desarrollo, en condiciones normales, debería haber generado daños severos en la epidermis de la escultura.

Aunque el yeso de neoformación existente en las costras podría tener su origen en una precipitación directa producida en el medio de enterramiento, la hipótesis más verosímil debe considerar la removilización y recristalización del yeso empleado en la capa de preparación bajo la policromía. De hecho, aunque las muestras extraídas para estudio de la misma son muy superficiales y la presencia de pigmentos tiene carácter lagunar, en todas ellas se observa una gran desestructuración de las capas, removilización, degradación intensa y práctica ausencia de vestigios de preparación¹.

De todas las muestras estudiadas la que ha proporcionado una información más sorprendente e inesperada corresponde a la que en el informe original aparece cifrada con el nº 10 (Navarro y Pérez, 2006). Dicha muestra está constituida por un depósito granular adherido en el interior del pliegue del manto en la zona posterior del cuello. Inicialmente la muestra fue recogida con objeto de obtener información del medio de enterramiento. En la práctica, el depósito analizado está constituido, de forma mayoritaria, por partículas del soporte pétreo del busto, restos de policromía y encostramientos de yeso que, tras desprenderse como consecuencia de los procesos de deterioro sufridos, han quedado retenidos en el interior del pliegue.

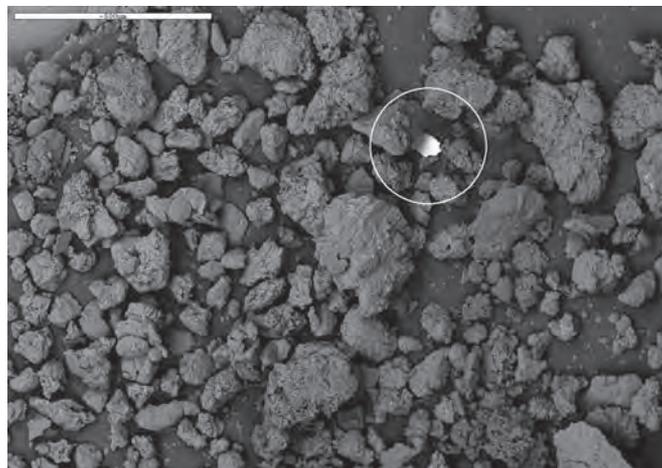


Figura 3. Dama de Elche. Imagen BSE del conjunto de la muestra nº 10 en la que se observa el marcado contraste composicional existente entre uno de los fragmentos de lámina de oro localizados y el resto de las partículas retenidas en los pliegues.

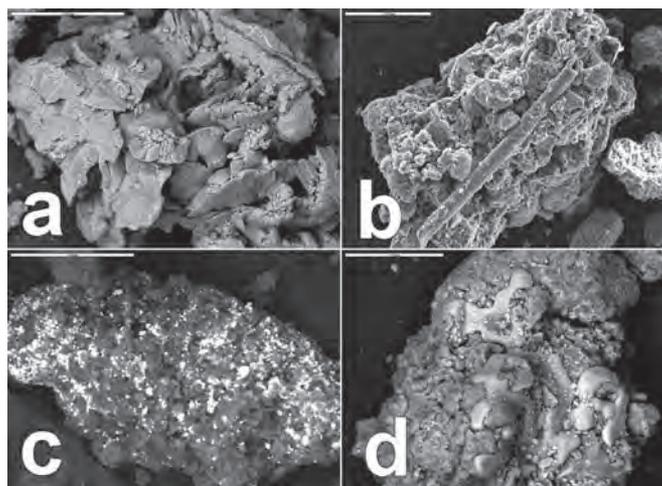


Figura 4. Dama de Elche. Imágenes BSE de algunas de las partículas de la muestra nº 10: (a) costra de yeso lenticular, (b) restos vegetales (c), restos de soporte pétreo con cloruro sódico, y (d) restos de policromía (bermellón).

Las distintas partículas fueron preparadas para un estudio convencional mediante MEB-EDX, a través de su fijación directa sobre un disco adhesivo conductor de carbono (Fig. 3), procediéndose a la realización de un barrido pormenorizado a partir de imágenes de contraste composicional obtenidas mediante la señal de electrones retrodispersados (imágenes BSE), que permitió identificar los siguientes tipos:

- Fragmentos de costras, constituidas por agregados de cristales lenticulares de yeso (Fig. 4a). Al igual que en el resto de las costras estudiadas en otros puntos de la escultura, se observan

¹ En el estudio de muestras de otras esculturas ibéricas policromadas (Dama de Baza) se identifica la presencia de una capa de preparación de yeso bien conservada (Gómez et al., 2008).

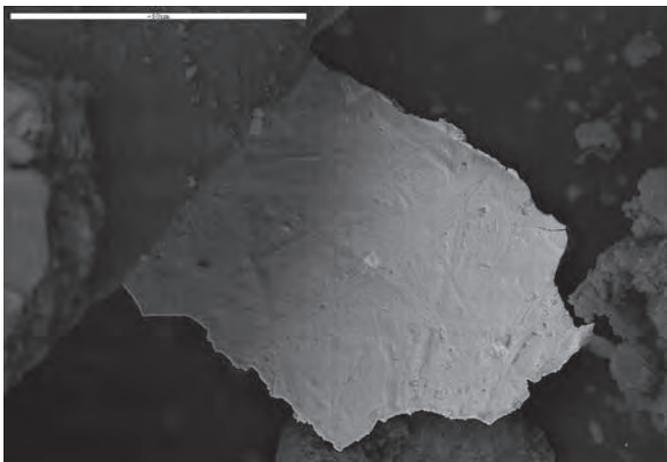


Figura 5. Dama de Elche. Imagen BSE de detalle de una de las láminas de oro detectadas en la muestra nº 10.

fragmentos de la roca soporte adherida al yeso e, incluso, partículas policromadas con restos de bermellón.

- Fragmentos de la roca soporte en cuyo análisis se identifican, además de los elementos propios de la roca, restos vegetales (Fig. 4b) o pequeñas concentraciones de cloruro sódico (Fig. 4d).
- Bioclastos de fósiles de caparazón calcítico.
- Partículas con restos de policromía roja (bermellón) (Fig. 4c).
- Granos detríticos, de origen externo: cuarzo, circón, óxidos de hierro.
- Partículas laminares metálicas (Fig. 5). A pesar de su pequeño tamaño, este tipo de partículas es fácilmente detectable como consecuencia del elevado contraste composicional que presenta con respecto al resto de las partículas descritas. Por el interés excepcional que presentan hay que señalar la identificación de varias partículas laminares de oro que pueden ser relacionadas con restos de decoración superficial de la que no quedan vestigios visibles. Es preciso señalar a este respecto que en los análisis sin toma de muestra realizados mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X también se han identificado trazas de oro.

116

Aunque la presencia de estos restos de láminas de oro no constituye por sí misma un certificado de autenticidad, resulta muy difícil justificar otra procedencia que no sea la propia degradación de elementos decorativos existentes en la escultura. Debe recordarse a este respecto que en los estudios que, de forma simultánea, se realizaron sobre la Dama de Baza, revisando muestras con preparaciones estratigráficas estudiadas en la época de su descubrimiento, se pudo constatar el empleo de láminas de estaño en la decoración del tocado (Gómez, M., Navarro, J.V., Martín de Hijas, C., Del Egido, M., Alguero, M., González, E. y Arteaga, A. (2008).

Queda fuera de estas líneas la valoración de este hallazgo debiendo centrarnos en el tema de fondo de este artículo: el material objeto de interés habría desaparecido si la Dama de Elche hubiese recibido una limpieza a fondo durante su estancia en alguno de los museos que la han exhibido.



Figura 6. Estuche médico romano procedente de la necrópolis oriental de Mérida.

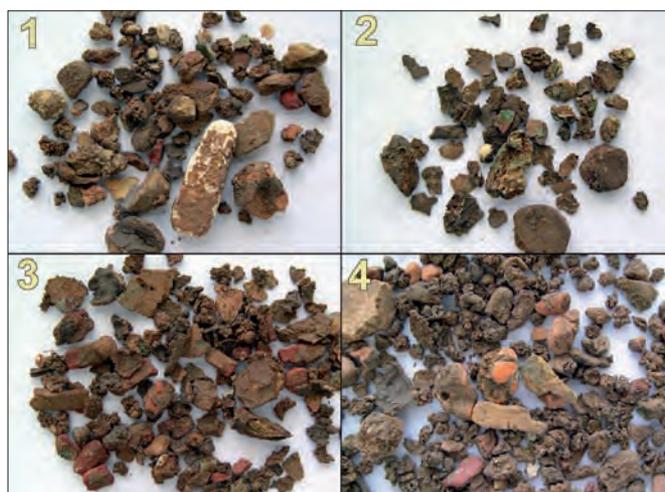


Figura 7. Detalles de la fracción gruesa contenida en los compartimentos del estuche médico. La mayor parte de los granos medicinales aparecen recubiertos por una envuelta arcillosa de color ocre.

Caracterización de materiales en un estuche médico romano

La segunda de las piezas cuyos análisis presentamos (Navarro, 2007-a, b) corresponde a un pequeño estuche metálico romano, realizado con chapa de bronce, procedente de las excavaciones en la Necrópolis oriental de Mérida. Esta pieza, recibida para su estudio en los laboratorios del IPCE en 2007 a través del Museo Arqueológico Regional de la Comunidad de Madrid, presenta cinco compartimentos interiores (uno de ellos perdido por corrosión) dotados cada uno de ellos de su propia tapa, quedando el conjunto cerrado por una tapa exterior (Fig. 6).

El interés del estuche radica, esencialmente, en el contenido de los compartimentos, en los que aparecen un conjunto de granos minerales y depósitos detríticos catalogados como componentes de uso médico, circunstancia excepcional en este tipo de hallazgos (Fig. 7). Algunos de estos granos presentan formas que

| | Compartimento | | | |
|--|---------------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Cerusita + cuarzo | ● | | ● | ● |
| Cerusita + hematites | | | | ● |
| Hidrocerusita | ● | | | ● |
| Hidrocerusita + cuarzo + calcita | | | | ● |
| Hematites + cuarzo | ● | | ● | ● |
| Hematites + cerusita + hidrocerusita | ● | | | |
| Hidrocerusita + cerusita + hematites + calcita | ● | | | |
| Hidrocerusita + cerusita + cuarzo + anglesita | ● | | | |
| Calcita + cuarzo + hematites | | | | ● |
| Minio + cerusita + hidrocerusita + calcita + cuarzo | | | | ● |
| Cerusita + jarosita + alunita + calcita + cuarzo | | ● | | |
| Jarosita + alunita + calcita + cuarzo + hematites | | | ● | |

Tabla 1. Mineralogía de los granos analizados

nos indican que fueron moldeados; en otros casos se observan pequeñas perforaciones cilíndricas, originales, realizadas para extracción de pequeñas dosis del producto.

A pesar de la protección ejercida por la propia estanqueidad de los compartimentos, el contenido aparece mezclado y, sobre todo, afectado por la invasión de materiales ajenos. Así, el contenido principal de todos ellos está constituido por arcillas de color ocre oscuro que, por su textura, parecen corresponder a un depósito de inundación que ha debido penetrar y sedimentar en el interior de los compartimentos. En algunos casos estas arcillas se presentan laminadas, con delgadas intercalaciones limoarcillosas, mientras que en otros casos actúan como agente aglutinante de granos detríticos (cuarzo, plagioclasas) y carbonatos, siendo frecuente encontrar en ellas pequeñas inclusiones de partículas de sales de cobre procedentes de la corrosión del metal del estuche. Es, asimismo, habitual que los granos considerados como componentes médicos aparezcan cubiertos por una envuelta arcillosa que dificulta su observación al uniformizar texturas, formas y colores. La composición de estas arcillas es muy uniforme siendo las esmectitas su componente principal, acompañadas por pequeñas proporciones de caolinita, micas e interestratificados clorita-esmectita.

El análisis de los “granos medicinales” no plantea especiales dificultades, dada la abundancia de material disgregado, recurriéndose a la extracción de micromuestras (5-10 mg) que son sometidas a una batería de análisis mediante difracción de rayos

X, microscopía electrónica de barrido, cromatografía de gases-espectrometría de masas y cromatografía líquida de alta resolución, con objeto de identificar tanto los compuestos inorgánicos como orgánicos (aceites, proteínas) presentes.

Los materiales analizados hacen referencia a un reducido número de especies minerales:

- Cerusita - PbCO_3 -
- Hidrocerusita - $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ -
- Hematites - Fe_2O_3 -
- Minio - (Pb_3O_4) -
- Calcita - CaCO_3 -
- Cuarzo - SiO_2 -
- Jarosita - $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ -
- Alunita - $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ -

La composición de alguno de los granos puede ser considerada monomineral; tal es el caso de los granos de color blanco, constituidos casi exclusivamente por hidrocerusita (con impurezas de cuarzo) o algunos granos de hematites de color rojo ocre, aunque lo habitual ha sido encontrar una mezcla de cerusita y/o hidrocerusita con cualquiera de los otros compuestos. Las mezclas identificadas aparecen reflejadas en la tabla 1 (se han marcado en negrilla los componentes mayoritarios de cada mezcla).

Además de los minerales citados, en alguno de los compartimentos han aparecido pequeñas concentraciones de láminas

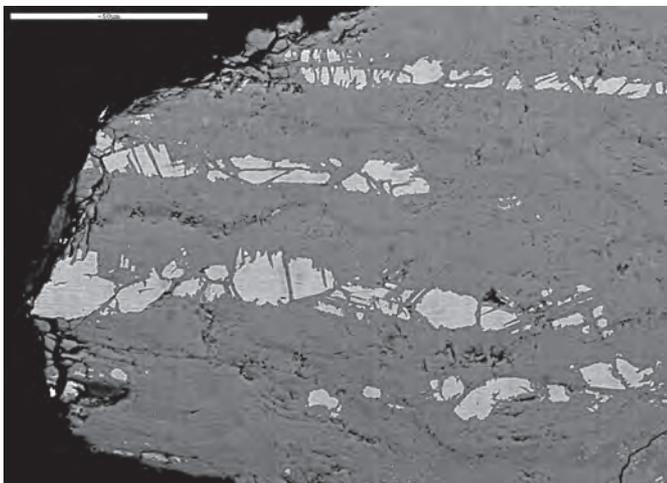


Figura 8. Imagen BSE de una partícula de bronce corroído en la que se observan alineaciones con restos de metal inalterado inmersos en una matriz de cuprita.

micáceas (moscovita) que al no estar aglutinadas por las arcillas permiten suponer que no se trata de un componente accidental. También han aparecido algunas partículas carbonosas y frecuentes partículas y concreciones verdosas procedentes del deterioro del metal del estuche.

Para la identificación de la aleación de cobre de la chapa utilizada en la elaboración del estuche se optó por no recurrir a la preparación metalográfica convencional, la cual exigiría un muestreo agresivo para poder obtener una sección de metal inalterado. Como alternativa a dicho método se decidió explorar las posibilidades que ofrecían los restos de metal corroído detectados entre los granos medicinales, procedentes de la corrosión de la tapa exterior del estuche o del tabique del compartimento desaparecido.

Los fragmentos seleccionados (con dimensiones inferiores a 1 mm), fueron incluidos en resina y rebajados mediante pulido en busca de posibles restos del núcleo inalterado. En la práctica totalidad de los casos la corrosión había hecho desaparecer todos los restos metálicos y el material se encontraba totalmente mineralizado en forma de sales de cobre, entre las que se identificaron cuprita, brocantita, malaquita y atacamita.

Tan sólo en uno de los fragmentos examinados se observaron restos de metal que, por su tamaño y ausencia de alteración, podían permitir la realización de análisis fiables. Sobre la superficie de la probeta pulida preparada con esta muestra se aplicó un sombreado conductor de carbono y se procedió a su análisis mediante MEB-EDX.

Del examen realizado se deduce que la corrosión afecta a la práctica totalidad de la sección de la chapa, identificándose cuprita como producto principal de la misma, así como una serie de granos de metal inalterado que se distribuyen según alineaciones paralelas a la superficie, guardando relación con el trabajo mecánico de la chapa (Fig. 8). Localmente, se observan zonas donde la corrosión selectiva de los elementos de los granos de

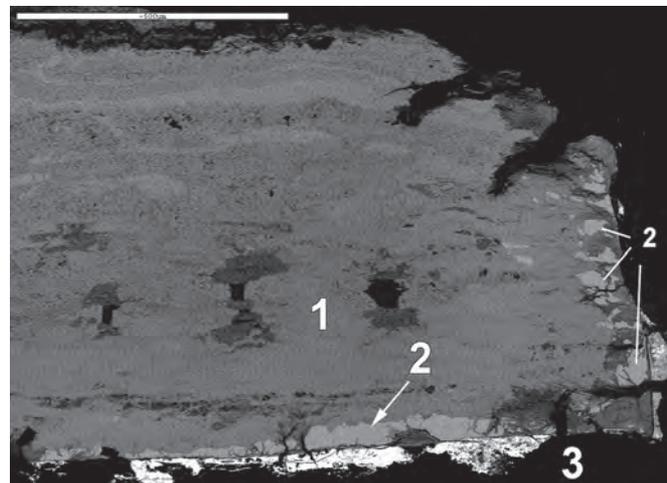


Figura 9. Otro detalle de la sección de metal corroído estudiada donde se ha señalado: la corrosión primaria en forma de cuprita (1), restos metálicos inalterados (2) y la envuelta de cerusita/hidrocerusita (3) que aparece sobre la superficie original.

aleación pone de manifiesto la presencia de un maclado mecánico producido durante la elaboración de la pieza.

En los microanálisis puntuales realizados sobre los granos metálicos que permanecen inalterados se identifica una aleación correspondiente a un bronce cuya composición media es $\text{Cu}_{88,0}-\text{Sn}_{10,8}-\text{Fe}_{0,1}$, con una baja dispersión en los resultados obtenidos en los análisis puntuales (tabla 2).

| | Cobre | Estaño | Hierro |
|---|-------|--------|--------|
| 1 | 89,56 | 10,29 | 0,15 |
| 2 | 88,99 | 10,77 | 0,24 |
| 3 | 88,53 | 11,47 | - |

Tabla 2. Resultados obtenidos en los análisis puntuales realizados.

Exteriormente, la muestra presenta una envuelta constituida por malaquita, con niveles delgados y discontinuos de óxidos de hierro; de forma localizada aparece un depósito exterior (Fig. 9) constituido por cerusita/hidrocerusita que, aunque podría proceder de la alteración de una posible segregación de plomo en la aleación, se ha interpretado como un depósito de material ajeno a la composición original del metal (en los análisis del córtex que envolvía algunos de los granos medicinales también se encontraron capas de cerusita/hidrocerusita)

Con objeto de contrastar la composición de la aleación identificada en los granos metálicos residuales se optó por realizar análisis directos sobre una de las tapas de los compartimentos del estuche en la que, tras ser examinada mediante microscopía electrónica de barrido, se habían localizado diversos puntos microscópicos donde la pérdida de la pátina verde superficial en zonas de perforaciones originales y bisagras permitía acceder a zonas internas de la chapa metálica (tabla 3).

| | Cobre | Estaño | Hierro |
|---|-------|--------|--------|
| a | 91,35 | 8,53 | 0,12 |
| b | 89,40 | 10,60 | - |
| c | 91,30 | 8,70 | - |

Tabla 3. Análisis puntuales realizados sobre la tapa.

En estos análisis se identifica una composición media de $\text{Cu}_{90,7}\text{-Sn}_{9,3}\text{-Fe}_{0,04}$ que comparada con los valores obtenidos sobre los granos inalterados muestra un leve enriquecimiento en cobre y la consecuente pérdida en estaño que se interpreta en relación directa con la composición de la pátina; los análisis realizados directamente sobre la misma en el área circundante a los puntos de análisis permiten justificar estas variaciones, observándose una superficie muy craquelada y de composición compleja en la que el cobre es el elemento principal, aunque se encuentra notablemente enriquecida en estaño y, en mucha menor medida, en plomo y cinc. Se identifican, además, oxígeno y bajas proporciones de silicio, aluminio, fósforo, hierro y cloro. En algunos de los puntos analizados los porcentajes de estaño presentes son superiores a los de cobre.

Análisis de monedas del tesoro “Plaza Arias Gonzalo” de Zamora

El tesoro “Plaza Arias Gonzalo” está constituido por un conjunto de monedas de oro de los siglos XIV y XV (dobla nazarí, escudos de oro de Carlos VI de Francia, florines de la monarquía aragonesa), reales de plata, y monedas de cobre (Fig. 10). Este conjunto de piezas, procedente del Museo de Zamora, fue restaurado durante el año 2001 en los talleres del IPCE, realizándose diferentes análisis sobre las aleaciones metálicas y los productos de alteración (Navarro, 2001).

El estado de conservación de los distintos tipos de monedas guarda una relación estrecha con su composición, pudiendo catalogarse los productos identificados en tres tipos básicos:

- Productos de corrosión de la propia moneda y relacionados directamente con la composición de las aleaciones utilizadas.
 - Clorargirita (AgCl) en las monedas de plata, las cuales presentan un estado de conservación muy variable.
 - Cuprita (Cu_2O), malaquita y azurita ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), brocantita ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), atacamita/paratacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), etc., en las monedas de cobre, las cuales se encontraban totalmente mineralizadas.
- Costras procedentes de la corrosión de otras monedas. En el caso más habitual encontramos sales de cobre (malaquita o atacamita) sobre monedas de oro o plata y sales de plata (clorargirita) sobre monedas de oro o cobre.
- Depósitos relacionados con el medio de enterramiento arqueológico e independientes de la composición de las monedas. Entre ellos pueden señalarse veladuras carbonatadas (calcita, dolomita), yeso, depósitos detríticos (cuarzo, feldspatos, micas, arcillas) y fosfatos.



Figura 10. Detalles de algunas de las monedas oro y plata del Tesoro de Zamora donde se observa el variable grado de alteración de las monedas de plata (la moneda del vértice izquierdo se encuentra fuera de escala).

Análisis de las monedas de oro

Los análisis de las distintas monedas de oro no plantean complicaciones especiales, realizándose de forma directa sobre áreas libres de depósitos superficiales en piezas seleccionadas, sin toma de muestra. La técnica utilizada es la microscopía electrónica de barrido acoplada con microanálisis mediante espectrometría de dispersión de energías de rayos X (MEB-EDX); dado el carácter conductor de las monedas no se aplica sombreado conductor.

Los resultados obtenidos aparecen reflejados en la tabla 4, siendo preciso remarcar que los análisis realizados corresponden a la composición superficial de las piezas estudiadas y, como consecuencia de la mayor alterabilidad del cobre y plata presentes en las aleaciones, pueden no ser representativos de zonas interiores.

| | Cobre | Plata | Oro |
|---------------------|-------|-------|-------|
| Dobla nazarí | 1,26 | 13,97 | 84,77 |
| | 1,97 | 14,50 | 83,53 |
| Escudo | 0,57 | 2,07 | 97,35 |
| | 0,31 | 2,93 | 96,76 |
| Escudo | 0,64 | 3,40 | 95,96 |
| | 0,61 | 2,94 | 96,45 |
| Florín | 10,26 | 9,19 | 80,55 |

Tabla 4. Aleaciones de las monedas de oro.

Las formas de depósitos superficiales más habituales en las monedas de oro son finas veladuras carbonatadas, de tonos blanquecinos o verdosos (en función del contenido en sales de cobre) que suelen cementar granos de arena y depósitos de tierras, rosáceos o rojizos, cementados por carbonatos.

En los microanálisis EDX realizados sobre estas veladuras se identifican C, O, Ca y/o Mg -elementos asignables a calcita magnés-

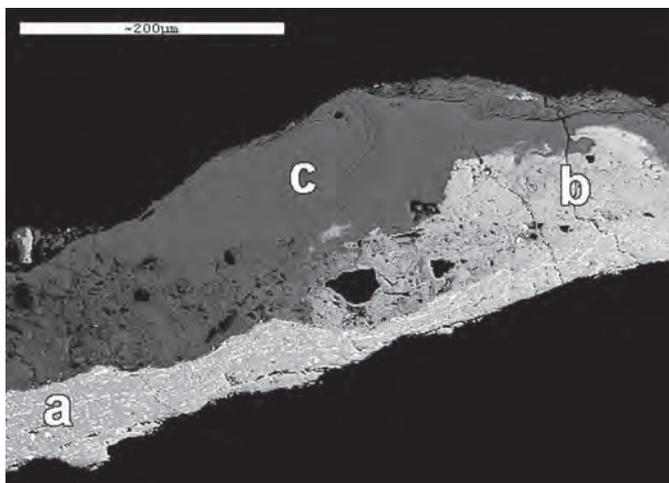


Figura 11. Imagen BSE de la sección estratigráfica de una costra desarrollada sobre una moneda de plata en la que se ha señalado: nivel inferior de cuprita con intercalaciones de láminas de plata inalterada (a), nivel intermedio de cuprita (b) y costra exterior de malaquita (c).

sica y/o dolomita- junto a los que aparecen pequeñas proporciones de Si, Al, K y Fe -asignables a depósitos terrígenos (cuarzo, feldspatos, arcillas), Cu -sales de cobre-, Cl -cloruros de plata o cobre- y S -sulfatos-. Estas películas carbonatadas se levantan con cierta facilidad dejando ver un sustrato aparentemente inalterado.

En los análisis EDX de los depósitos terrosos no se detectan variaciones cualitativas con respecto a la composición de las veladuras antes descritas, con la excepción de un notable incremento en los elementos asignables a filosilicatos (arcillas) y la presencia de trazas de fosfatos. En los depósitos estudiados mediante DRX se identifican cuarzo, filosilicatos (micas, clorita y/o caolinita), feldespato potásico, plagioclasas (albita), calcita, clorargirita, yeso y partículas de malaquita.

En su forma más simple, las costras verdes desarrolladas sobre las monedas de oro están constituidas por malaquita que, en ocasiones, engloba pequeños granos de cuarzo. Se han observado, no obstante, costras más complejas en cuyo análisis mediante DRX se han identificado cuprita, malaquita, brocantita, paratacamita, cuarzo y trazas de clorargirita. En su práctica totalidad los componentes de estas costras proceden de la corrosión de las monedas de cobre y plata.

Análisis de las monedas de plata

Como consecuencia de la alteración superficial generalizada que presentan estas monedas, los análisis directos son inviables, debiendo recurrirse al estudio de los productos eliminados durante su limpieza y a la localización de posibles restos inalterados de los núcleos metálicos.

En el análisis mediante DRX de las costras desarrolladas en alguna de las muestras se identifica clorargirita como componente principal, acompañada por pequeñas proporciones de atacamita, cuprita, partículas de plata y granos de cuarzo, mientras que

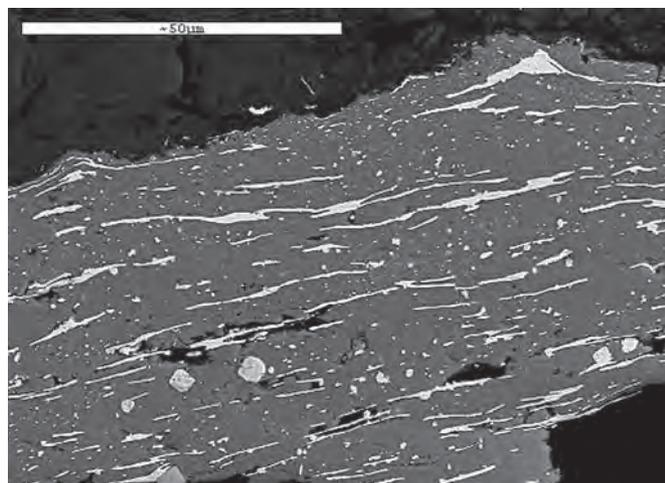


Figura 12. Imagen BSE del nivel inferior de cuprita con intercalaciones de laminillas de plata (detalle de la anterior figura).

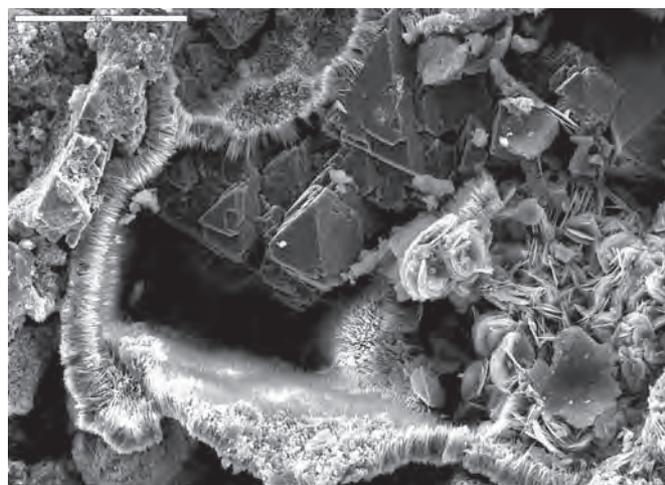


Figura 13. Detalle de la complejidad textural del interior de una costra desarrollada sobre una moneda de plata en la que se observa un núcleo de cristales idiomorfos de cuprita y cristales lenticulares de sales de arsénico, cobre, plomo y antimonio y una corteza de cristales aciculares de malaquita.

en otros casos los componentes principales son los carbonatos de cobre (cuprita y malaquita) que aparecen acompañados por proporciones menores de clorargirita y plata.

En una de las secciones estratigráficas preparadas sobre estas costras se detectan restos de plata inalterada que permiten analizar la composición de la aleación. La estructura puesta de manifiesto en el estudio mediante MEB-EDX es la siguiente (Figs. 11 y 12):

- Nivel inferior, de 20-50 μm de espesor, constituido por cuprita masiva con numerosas intercalaciones de láminas micro-métricas y discontinuas de plata (Fig. 13) y trazas de cloruro de plata. En el análisis puntual de dichas láminas de plata se obtiene una composición $\text{Cu}_{6,7}\text{-Ag}_{91,9}\text{-Pb}_{1,4}$ ².

² La delgadez de las laminillas seleccionadas y la presencia de cobre en la matriz cuprítica que las envuelve pueden afectar a los resultados obtenidos.

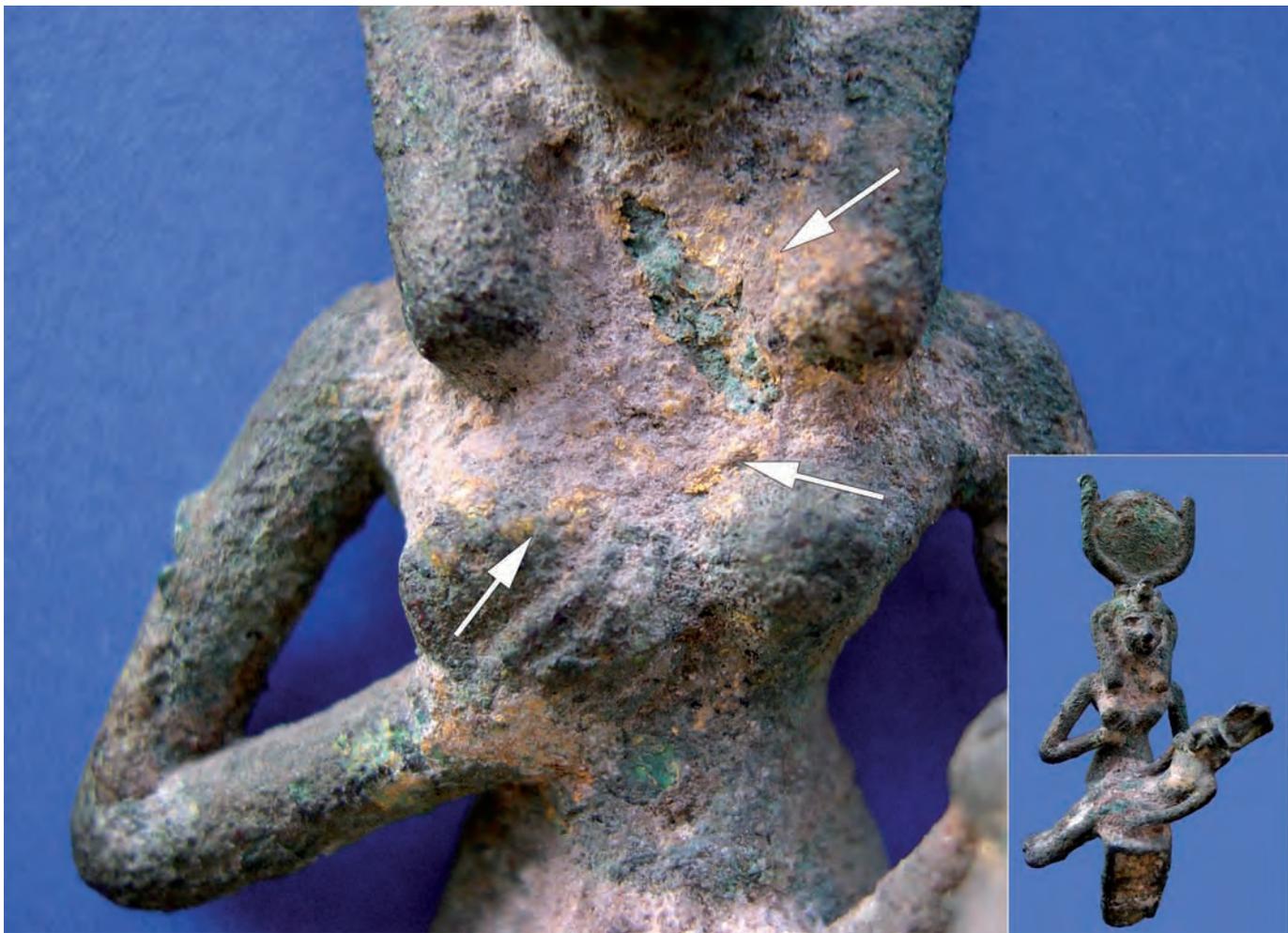


Figura 14. Isis y Orus. Detalle de la corrosión superficial que afecta a la figura y del precario estado de los restos de dorado.

- Nivel intermedio, de 50 y 75 μm de espesor, constituido por cuprita con pequeñas inclusiones detríticas.
- Nivel superior, de 100-150 μm , formado por una corteza con textura botroidal de malaquita.

En el estudio mediante MEB-EDX de muestras “rugosas” de estas costras se observa una elevada complejidad textural, apareciendo granos botroidales huecos, constituidos por cristales aciculares de carbonatos de cobre, en cuyo núcleo se desarrollan cristales idiomorfos de cuprita y, ocasionalmente, agregados de cristales laminares en cuya composición se han identificado As, O, Cu, Pb y Sb (Fig. 13).

Análisis de las monedas de cobre

Las monedas de cobre se encuentran intensamente alteradas, no habiéndose identificado restos del núcleo metálico inalterado. Sus productos de alteración han sido caracterizados en las costras analizadas sobre las monedas de oro y plata identificándose cuprita, malaquita, azurita, atacamita/paratacamita y brocantita.

Evaluación del efecto de la limpieza con láser sobre diferentes superficies metálicas (oro, plata y dorados)

Los análisis que se exponen en esta sección (Navarro, 2004-a, b) fueron realizados sobre una figura de aleación con base cobre representando a Isis y Orus, procedente de los fondos del Museo Arqueológico Nacional y depositada para su restauración en los talleres del IPCE.

La totalidad de la figura se encontraba cubierta por costras compactas de colores verdes y ocre (producto de la corrosión del soporte metálico) y, en mucha menor medida, depósitos blanquecinos. Destacando entre los productos de corrosión se observaban diversos restos de una decoración realizada con lámina de oro, bien representados en la base del cuello, busto y zona posterior del tocado aunque mostrando un estado precario de conservación (Fig. 14).

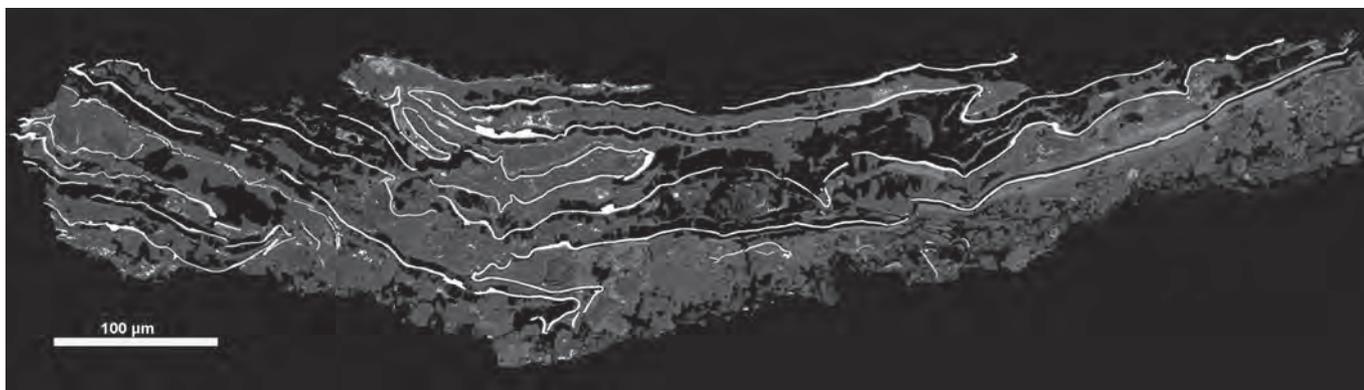


Figura 15. Imagen BSE obtenida mediante microscopía electrónica de barrido de una muestra de dorado de la figura de Isis y Orus donde se aprecia la estructura multicapa y replegada de la lámina de oro y la capa carbonatada de asiento interlaminar.

La compacidad de las costras no permitió en ningún momento acceder analíticamente al núcleo metálico de la figura, realizándose una batería de análisis sobre las zonas superficiales menos afectadas por la corrosión, sin toma de muestra, mediante fluorescencia de rayos X en los que, de forma sistemática, se identifican cobre, plomo, hierro y calcio en la composición superficial de los puntos analizados.

Los análisis realizados mediante DRX sobre micromuestras de las costras de alteración verdes permitieron la identificación de atacamita y paratacamita, acompañadas por pequeñas proporciones de cuarzo, mientras que en las costras de coloración ocre se identificaban diversos depósitos detríticos (cuarzo, feldespatos), sales de cobre (atacamita) y bajas proporciones de yeso, siendo posible la presencia de cloruro de hierro (molisita $-\text{FeCl}_3$) y sulfato de cobre (brocantita).

Los depósitos blancos mostraron una composición esencialmente carbonatada, identificándose calcita, cuarzo y yeso con pequeñas proporciones de aragonito y posible presencia de bajas proporciones de calcita magnésica en unos puntos mientras que en otros el aragonito es el componente principal, acompañado por calcita magnésica, yeso y cuarzo.

Los restos de dorado fueron estudiados mediante MEB-EDX sobre una muestra incluida en resina, pulida y sombreada con una película conductora de carbono, observándose una lámina de oro de composición $\text{Au}_{96,5}\text{-Ag}_{3,5}$ y $0,5\text{-}0,7\ \mu\text{m}$ de espesor, con estructura multicapa, muy replegada (Fig. 15). En los análisis de la capa de asiento del dorado se identifica carbonato cálcico, posible calcita magnésica y bajas proporciones de yeso

Las dificultades existentes para limpiar la pieza, especialmente sensible en las zonas doradas, motivaron que el equipo de restauración de materiales arqueológicos del IPCE optase por una limpieza local mediante láser, utilizándose a tal efecto un láser de pulsos Nd-YAG, Q-Switched, $1064\ \text{nm}$ de longitud de onda, pulsos de $70\ \text{ns}$ y frecuencia de $5\ \text{Hz}$.

Ante las dudas existentes sobre los efectos reales que el láser pudiese ejercer sobre las capas de dorado se realizaron una serie de pruebas piloto de limpieza para las que se diseñó un sistema de captación de partículas sobre filtros de membrana de $0,45\ \mu\text{m}$

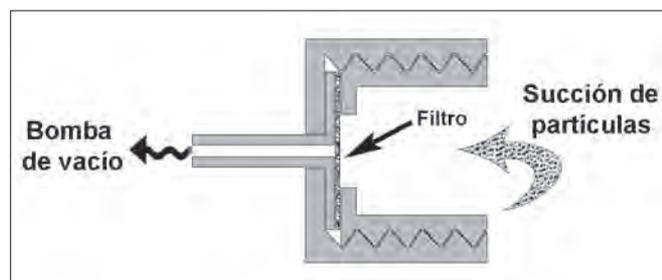


Figura 16. Esquema del dispositivo de captación de partículas diseñado para evaluar la incidencia de la limpieza con láser.

de tamaño de poro mediante aspiración con bomba de vacío que recogía el material eyectado durante la limpieza como consecuencia del avance del proceso de fotoablación (Fig. 16).

El material retenido en los filtros fue posteriormente examinado mediante microscopía electrónica de barrido con objeto de caracterizar textural y composicionalmente el material eliminado en la limpieza. Las partículas recogidas mostraban formas angulosas y texturas similares a las costras de las que proceden, no observándose –en líneas generales– tamaños superiores a $5\ \mu\text{m}$, siendo destacable la presencia de abundantes microesferas cuyos diámetros oscilaban entre $0,1$ y $2\ \mu\text{m}$ (Fig. 17) indicativas del desarrollo de procesos de fusión.

Entre las partículas angulosas analizadas predominaban aquellas en las que los elementos principales son Cu y O (asignables a óxidos y carbonatos de cobre), pudiendo aparecer acompañados por S, Cl, Ca, Fe, etc. En otros casos se identificaron elevadas proporciones de Pb, acompañado por Cl, Cu, Sn y O ó partículas silicatadas (depósitos detríticos) acompañados por sales de cobre.

Los análisis realizados sobre las partículas esféricas señalan como rasgo común la detección de elevados contenidos en plomo, cloro y cobre en la mayor parte de ellas. En un segundo tipo de partículas aparece una composición mucho más compleja, identificándose S, O, Cu, Na, Cl y Ca como elementos mayoritarios.

Los resultados obtenidos son parcialmente coincidentes con los análisis directos realizados mediante DRX sobre partículas

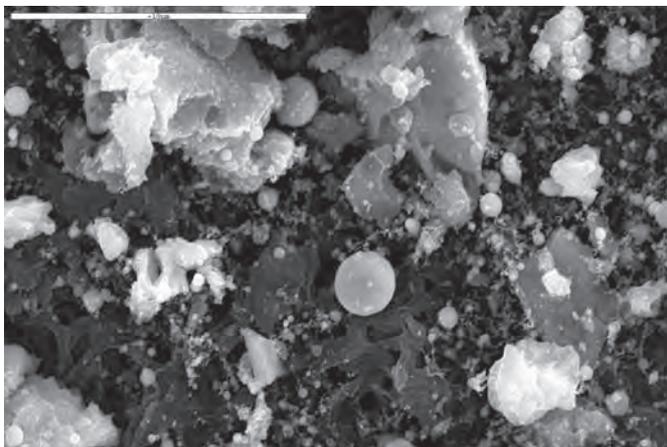


Figura 17. Detalle de las partículas retenidas en uno de los filtros en los que se aprecia una elevada densidad de microsferas.

extraídas de las costras de alteración de la pieza. En las partículas analizadas, además de la presencia frecuente de elevadas proporciones de Pb y sales de Cu, se han identificado Sn y, puntualmente, Zn, elementos que no habían sido detectados en los análisis realizados mediante fluorescencia de rayos X en el informe antes citado.

Una situación similar a la descrita se plantea durante el proceso de limpieza de un conjunto de cuentas de oro, con decoración de filigranas, de un collar de época islámica, procedente de los fondos del Museo de Córdoba, en las que el equipo de restauradores del IPCE encuentra dificultades para eliminar algunas de las costras de malaquita, tierras y carbonatos que las recubría. En este caso se opta por realizar una serie de pruebas de limpieza mediante láser y evaluar su eficiencia y efectos secundarios frente a los de la limpieza mecánica convencional. El sistema utilizado para la captación de las partículas eliminadas durante la fotoablación fue el anteriormente descrito y basado en la aspiración mediante vacío y retención en filtros de membrana, las cuales fueron estudiadas mediante MEB-EDX (Navarro, 2006-a).

Los análisis pormenorizados de las distintas partículas recogidas detectan una presencia mayoritaria de granos de malaquita en los que los microanálisis realizados, además de los elementos asignables al carbonato de cobre, han permitido detectar Zn, Ca, Si, Al, K, Pb y Fe y, con menor importancia, partículas de cloruro de plata, plata, sulfuro de plata, tierras, yeso y otras. No obstante, el hecho más destacable es la presencia de numerosas microsferas metálicas con un diámetro medio de 0,5 μm en cuyo análisis se identifican oro y plata, con pequeñas cantidades de cobre, en proporciones muy similares a las de la composición de la superficie metálica de las cuentas³, indicativos de la existencia de una pérdida de material derivada del método de limpieza utilizado.

Como fase final del examen se procedió a evaluar, comparativamente y de forma directa, el estado superficial de las cuentas sometidas a limpieza mecánica y láser, recurriéndose para ello a la microscopía electrónica de barrido (Navarro, 2006-b), (Díaz, Lozano y Navarro, 2007).

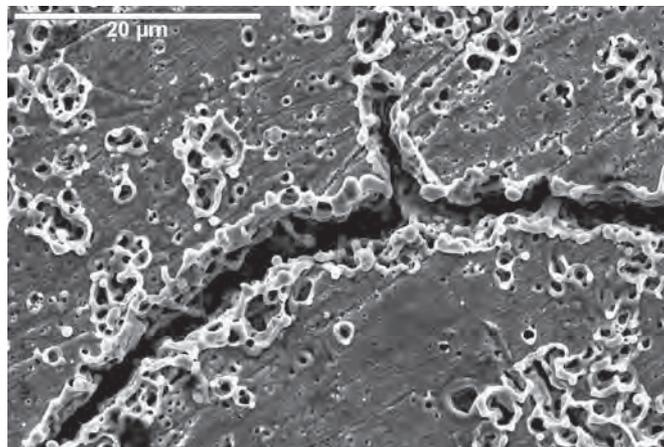


Figura 18. Detalle del desarrollo preferente de formas en fusión sobre las microfisuras existentes en una cuenta de oro limpiada con láser.

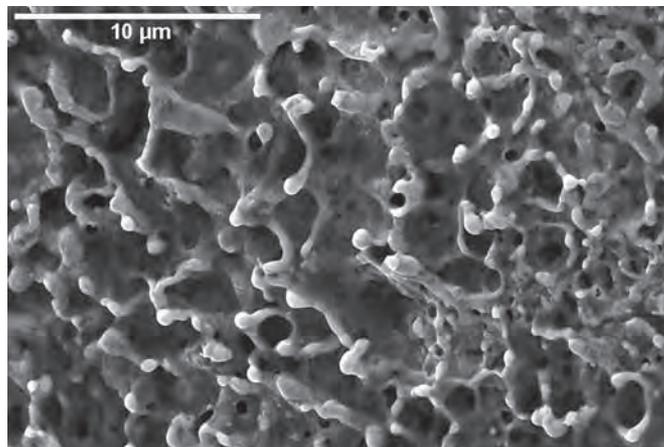


Figura 19. Detalle del desarrollo generalizado de microgotas de fusión sobre la superficie de una cuenta de oro limpiada con láser.

Desde el punto de vista de eficiencia del método de limpieza, las superficies limpiadas con láser se muestran mucho más homogéneas, desapareciendo los restos de costras y depósitos superficiales incluso de zonas protegidas por la decoración de las filigranas, si bien estas diferencias no son apreciables visualmente.

La principal diferencia aparece en todas las superficies sometidas a limpieza con láser, sobre las que se desarrollan formas de deterioro que guardan estrecha relación con la composición de las microsferas descritas en el estudio de los filtros. Estas formas de deterioro se caracterizan por la presencia de formas de fusión que aparecen de forma preferente en zonas microfisuradas o donde la estructura microporosa del soporte metálico queda al descubierto. En una primera fase de fusión aparecen pequeñas protuberancias que, poste-

³ Es preciso tener en cuenta que el volumen mínimo analizable mediante esta técnica es superior al de las microsferas y los resultados pueden encontrarse afectados por la composición del entorno de la partícula analizada.

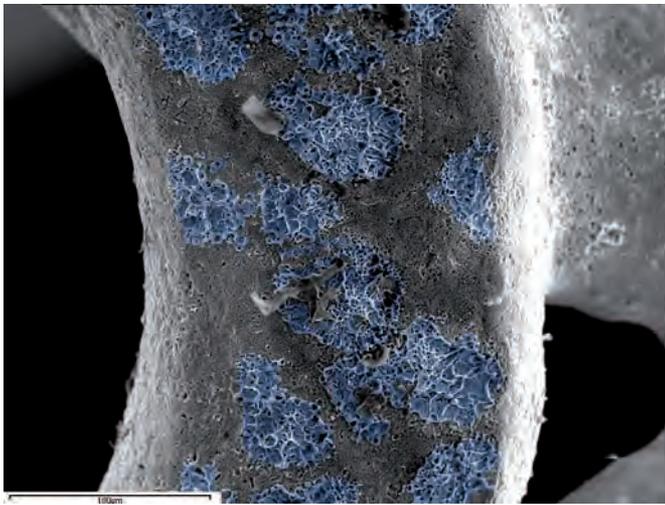


Figura 20. Detalle de un hilo de filigrana de plata. Se han coloreado de azul los puntos de impacto del spot del láser.

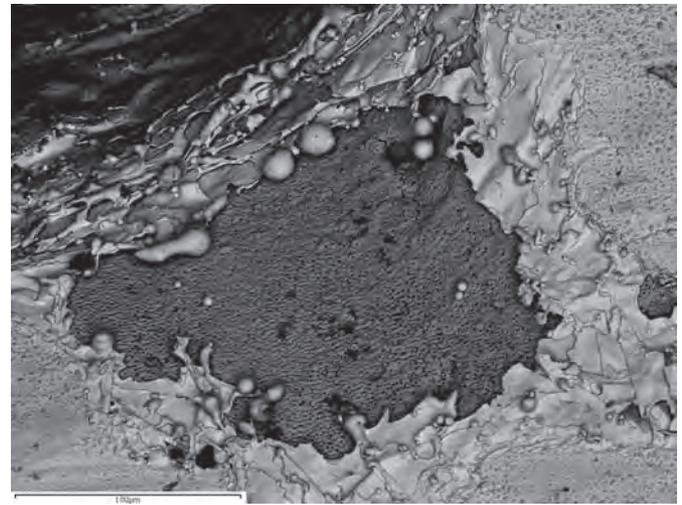


Figura 21. Detalle de los daños producidos por el láser en un dorado sobre plata. La superficie afectada por el spot queda delimitada por una aureola de gotas de oro fundido.

riormente, evolucionan dando lugar a gotas microscópicas que pueden coalescer o eyectarse individualmente hacia el exterior (Figs. 18 y 19). La formación de gotas de fusión ha podido constatarse en todos los elementos presentes en las cuentas: hilos de filigrana, chapa metálica de oro, soldaduras y dorados.

Aunque, en primera instancia, este tipo de morfologías constituye un deterioro evidente, su evaluación real es difícil de realizar por la escala microscópica a la que se produce. Entre los daños realizados, debe valorarse la pérdida de material y la destrucción de texturas superficiales, entre ellas las huellas de uso. Como contrapartida, en las zonas donde existe un deterioro previo se ha podido comprobar cómo la coalescencia de microgotas de material fundido actúa en refuerzo de la estructura microporosa de la aleación al comportarse como una soldadura.

La situación observada en las cuentas del collar de época islámica se repite nuevamente en los análisis de los elementos decorativos de un espejo chino de la dinastía Qing procedente de los fondos del Museo Nacional de Artes Decorativas sobre los que se habían realizado unas pequeñas catas de limpieza con láser (Navarro, 2009). En este caso el material examinado corresponde a una filigrana elaborada con hilos de plata en cuyo análisis se identifica una aleación de plata y cobre en la que los porcentajes de plata oscilan entre 95,2 y 95,6 %. La principal forma de alteración observada es el desarrollo de una película de sulfuro de plata que ennegrece, de forma generalizada, la pieza.

En el estudio mediante MEB-EDX se observan morfologías de fusión superficial de la plata similares a las descritas en las cuentas del collar; las imágenes obtenidas permiten delinear perfectamente cada uno de los impactos del *spot* del láser (Fig. 20), los cuales afectan tanto a los propios hilos de plata de la

filigrana como a las soldaduras y dorados sobre plata. En este último caso se observa la pérdida de la lámina de oro y la formación de una aureola de gotas de oro fundido que delimita el área de impacto del *spot* del láser (Fig. 21).

Bibliografía

GÓMEZ, M.^a L., 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", *Bienes Culturales*, nº 8, pp. 211-221.

NAVARRO, J. V. (2001): *Análisis de monedas medievales del tesoro Plaza Arias Gonzalo* (Museo de Zamora). IPHE (Informe interno).

IPHE (2003): "Criterios de intervención en materiales pétreos", *Bienes Culturales*, nº 2, anexo.

NAVARRO, J.V. (2004-a): *Análisis de materiales en una figura de Isis lactante procedente del Museo Arqueológico Nacional*. IPHE (informe interno nº reg. 21593).

NAVARRO, J.V. (2004-b): *Análisis de los materiales eliminados de una figura de Isis lactante mediante limpieza con láser*. IPHE (informe interno nº re. 21593).

NAVARRO, J.V. (2006-a): *Análisis mediante microscopía electrónica de barrido del material eliminado en la limpieza con láser de las cuentas de oro de un collar islámico procedente del museo de Córdoba*. IPHE (Informe interno nº reg. 22916).

NAVARRO, J. V. (2006-b): *Análisis mediante microscopía electrónica de barrido de las cuentas de oro de un collar islámico procedente del museo de Córdoba*. IPHE (Informe interno nº reg. 22916).

NAVARRO, J. V. y PÉREZ GARCÍA P. P. (2006): *Análisis de muestras de piedra, costras y depósitos superficiales en el busto de la Dama de Elche* (Museo Arqueológico Nacional). IPHE, Informe interno.

DÍAZ, S., LOZANO, R. y NAVARRO, J. V., (2007): "Laser cleaning process on a gold necklage evaluation", *LACONA VII Congress. Lasers in the conservation of artworks*. Madrid.

NAVARRO, J. V. (2007-a): *Análisis del material contenido en los compartimentos de un estuche médico romano procedente de excavación en la necrópolis oriental de Mérida*. IPHE (Informe interno nº reg. 23170).

NAVARRO, J. V. (2007-b): *Análisis del metal en un estuche médico romano procedente de excavación en la necrópolis oriental de Mérida*. IPHE (Informe interno nº reg. 23170).

NAVARRO, J. V. (2009): *Examen mediante MEB-EDX de la figura de un dragón de la filigrana de un espejo de tocador chino de la dinastía Qing*. IPHE (Informe interno nº reg. 30051).

3.5. Técnicas de procesamiento de imagen y visión artificial en entornos artísticos

Juan Torres Arjona

Grupo de Aplicación de Telecomunicaciones Visuales. Universidad Politécnica de Madrid

Introducción

El sistema visual es uno de los sentidos más complejos del cuerpo humano; gracias a él captamos multitud de información además de permitirnos sentir experiencias únicas. Por ello no es de extrañar que la ciencia dedicada a la visión y tratamiento de imágenes se aplique a multitud de disciplinas. Por supuesto, el mundo del arte no es una excepción ya que existen numerosas herramientas de análisis y tratamiento de imágenes que son utilizadas tanto para la creación de obras artísticas como para el análisis y conservación preventiva aprovechando el carácter no-destructivo de un sistema visual.

Sin embargo el mundo más tecnológico queda muchas veces muy distante del artístico, a pesar de que un conocimiento básico del primero puede facilitar en gran medida el trabajo del conservador, restaurador o historiador de arte así como permite ofrecer nuevas ideas al artista. Así, en este artículo pretendemos exponer algunas herramientas de tratamiento de imágenes y visión artificial, muchas de las cuales ya están siendo aplicadas en entornos artísticos. Para ello también presentaremos algunas de estas aplicaciones utilizadas en distintos campos.

Antes de continuar vamos a aclarar dos conceptos fundamentales que ya se han nombrado y que normalmente dan lugar a confusión pero que, desde el punto de vista científico, son muy distintos. Se trata del tratamiento digital de imágenes y la visión artificial.

El tratamiento digital de imágenes es el área del tratamiento de señal por la que se modifica una imagen con la intención de mejorar su calidad o de reconstruirla normalmente para un mejor visionado (Jähne, 2002: 17). En relación al segundo concepto, según (Shapiro, 2001: 13) “el objetivo de la visión artificial es el de realizar decisiones útiles sobre objetos y escenas físicas basadas en imágenes”. Otra definición similar e igualmente válida sería que el objetivo de todo sistema de visión artificial es extraer información visual de una escena en tres dimensiones mediante una o varias cámaras de forma automática.

Claramente ambos conceptos son distintos dado que el tratamiento digital de imágenes es más limitado al no tratar de extraer ningún conocimiento de la escena, si bien muchas veces ambos conceptos conviven. Es decir, un sistema de visión artificial normalmente tiene al menos una etapa donde se realiza un tratamiento digital que adecua las imágenes para facilitar una etapa posterior del proceso de extracción de información.

La primera aplicación que se conoce de tratamiento de imágenes (González, 2002: 3) se realizó para un periódico. Se trató de una transmisión de imágenes digitales de Londres a Nueva York a

través de un cable submarino allá a comienzos de los años veinte. Así se reducía el tiempo de envío del método ‘tradicional’ de una semana a unas tres horas. Para ello implementaron complejos sistemas de digitalización y reconstrucción de imágenes a través de cintas perforadas. La aparición de máquinas computadoras con cierta capacidad de proceso de señales bidimensionales grandes permitió, a comienzos de los sesenta el desarrollo de los primeros algoritmos de tratamiento digital para mejorar la calidad de las imágenes. Así, en 1964 se realizó una de las primeras restauraciones digitales de imágenes procedentes de la luna y que corregían diversas distorsiones inherentes al dispositivo de captura. A comienzos de los setenta (Pajares, 2001: 2) se amplió el campo de aplicación y se comenzaron a realizar desarrollos en Medicina, con la aparición de la tomografía axial computerizada, y en Astronomía.

A partir de los años sesenta el crecimiento en técnicas, aplicaciones y sistemas fue exponencial debido sobre todo al aumento también exponencial de la capacidad de cálculo de los procesadores digitales. De este modo en la actualidad el procesamiento de imágenes se encuentra presente en multitud de campos no sólo científicos e industriales, sino que se ha consolidado incluso en el ámbito doméstico.

En relación al Patrimonio Cultural y Artístico son varios los ámbitos de aplicación donde se hacen uso de estas técnicas. Por una parte los conservadores, restauradores e historiadores utilizan sistemas avanzados de análisis, captura y procesamiento de imágenes digitales¹. Además el uso de herramientas de generación de gráficos se utiliza en aplicaciones turísticas para crear entornos virtuales (Gonzo, 2004 y Macía, 2004). Tampoco hay que olvidar la creación de obras de arte, como es el caso del “*15 seconds of fame*” (Solina, 2002), que será comentado más adelante. Por último, cabe destacar algunos sistemas utilizados para detectar falsificaciones, robos o tráfico ilegal de patrimonio como el desarrollado por Wei (Wei, 2006).

Para continuar con este artículo empezaremos hablando de algunos conceptos básicos referentes a la adquisición de imágenes. Una vez introducidos estos conceptos, entraremos con algo de detalle en distintos campos de la visión artificial y el tratamiento de imágenes viendo algún ejemplo de su aplicación en entornos artísticos. Finalizaremos este artículo presentando algunas conclusiones extraídas en base a estas aplicaciones.

¹ Entre otras aplicaciones se puede destacar el sistema VARIM (<http://www.gatv.ssr.upm.es/wikivarim>), desarrollado por el Instituto del Patrimonio Cultural de España y la Universidad Politécnica de Madrid, y la herramienta de análisis VIPS, desarrollada por la National London Gallery (<http://www.vips.ecs.soton.ac.uk>).



Figura 1. Concepto de resolución espacial. (a) Imagen original. (b) Imagen reducida al 50% de resolución. (c) Imagen al 25%. (d) Imagen al 12,5%.

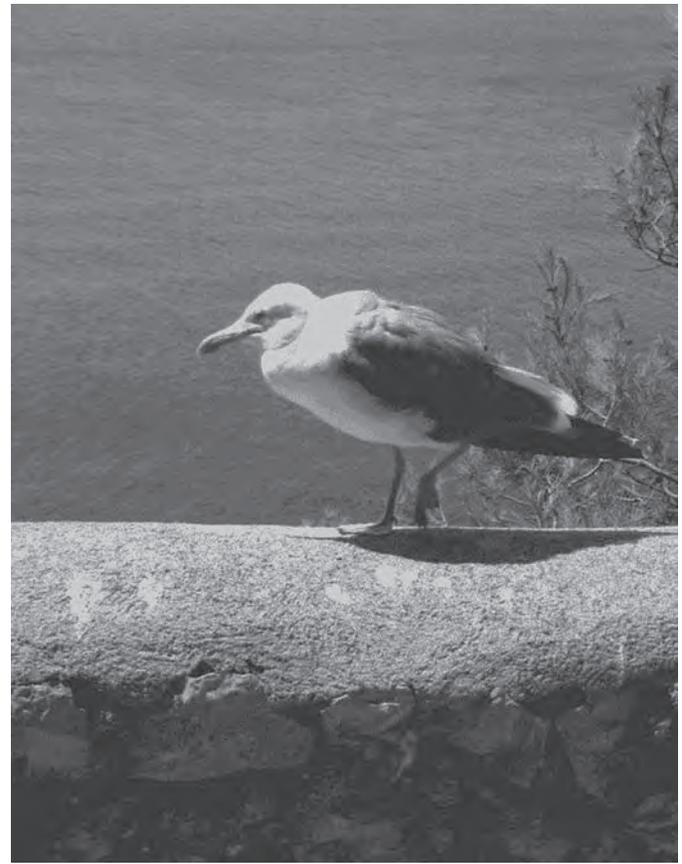


Figura 2. Concepto de resolución en amplitud. ↖(a) Imagen de 256 niveles. ↑(b) Imagen de 4 niveles. ←(c) Imagen de 2 niveles.

Algunos conceptos básicos

Una imagen digital no es más que una representación en dos dimensiones de una escena en tres dimensiones. Como no se trata más que de una representación, puede ser manipulada o tratada a voluntad con el fin de mejorarla o adecuarla a las necesidades del trabajo. Una imagen digital está compuesta por píxeles dispuestos a lo largo de sus dos dimensiones: ancho y alto. Cuanto mayor número de píxeles tenga la imagen mayor será su **resolución espacial**. Así, las figuras 1 a, b, c y d muestran la misma imagen con distintas resoluciones. Para ilustrar mejor este concepto se ha mantenido el mismo tamaño de impresión para las cuatro imágenes aunque su tamaño original (resolución) sea el indicado.

Cada uno de los píxeles representa información de un punto del mundo real. Para ello contiene un valor finito de dicho punto. Al rango de valores que puede tomar cada uno de estos píxeles se le denomina **resolución en amplitud**. Así, lo más habitual es trabajar con resoluciones de 256 valores. Este número no es arbitrario sino que, al tratarse de valores digitales, es una potencia de 2. Así también se suele decir que una imagen con dicha resolución tiene una **profundidad** de 8 bits por píxel. Como se ha comentado, este es el valor más utilizado porque según diversos estu-



Figura 3. Tipos de imágenes. ↖(a) Color. ↑(b) Niveles de grises. ←(c) Binaria.

diós un ojo humano estándar no es capaz de distinguir más de 256 valores distintos de intensidad. Sin embargo cada vez es más habitual trabajar con imágenes de mayor resolución; 1024 niveles -10 bits por píxel- o incluso 4096 niveles -12 bits por píxel- son resoluciones ampliamente utilizadas. Esto se debe a que, aunque el ojo humano no sea capaz de distinguirlos, las aplicaciones de tratamiento de imagen sí son sensibles a variaciones mayores de 256 niveles. Para ciertas aplicaciones, sobre todo al tratar con imágenes comprimidas, se utilizan resoluciones menores con la consiguiente pérdida de calidad. A modo de ejemplo se presenta la figura 2 donde se muestra la misma imagen a distintas resoluciones (2 a, b y c).

Normalmente las resoluciones de trabajo, tanto espaciales como en amplitud, vienen determinadas por las restricciones de las aplicaciones en las que se utilizan. Si bien es cierto que a mayor resolución mayor calidad de imagen, no es menos cierto que las capacidades de transmisión y computación también se incrementan. Por ello es muy habitual a la hora de diseñar o trabajar con una aplicación encontrarse con compromisos entre calidad y eficiencia. Así por ejemplo para una aplicación donde se muestran imágenes a través de una *web*, si éstas presentan una resolución demasiado elevada, el número de imágenes es grande y la conexión con la red es un poco lenta, interactuar con la aplicación puede ser inmanejable.

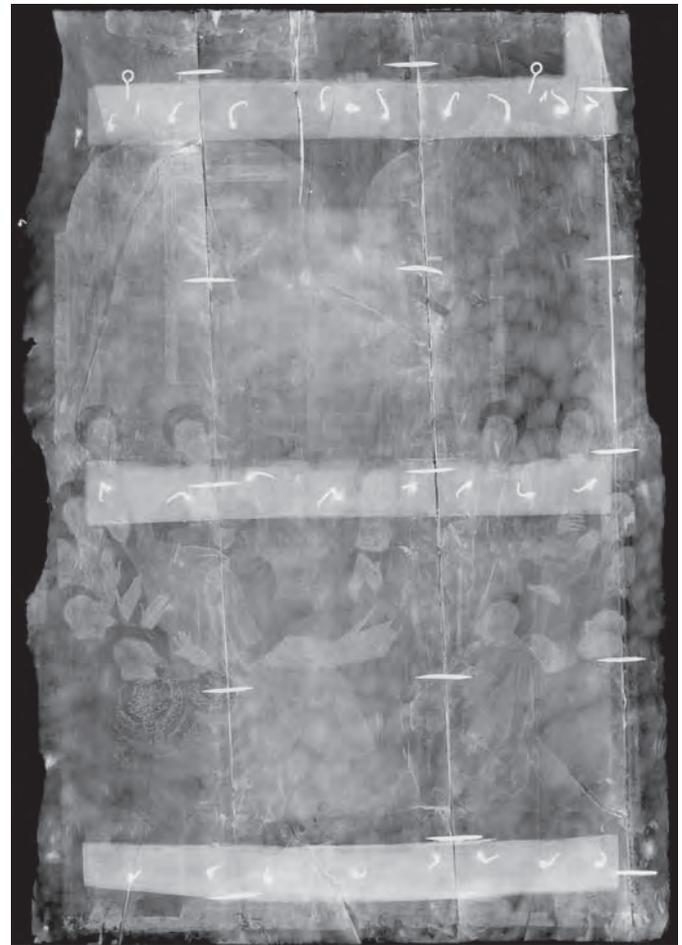


Figura 4. Tipos de imágenes. ↑(a) Reflectografía. →(b) Rayos X.

Se ha comentado que un píxel contiene un valor asociado a un punto real. Una vez, de nuevo dependiendo de la aplicación, ese valor puede ser relativo a un color, a un nivel de grises o binario. Así aparece el concepto de **número de bandas** –Fig. 3–. Las imágenes con una sola banda se corresponden a imágenes de niveles de grises o, si sólo se tienen en cuenta dos valores, se denominan imágenes binarias. Las imágenes en color normalmente son de tres bandas correspondientes a los tres colores primarios -rojo, verde, azul²- aunque también pueden tener una cuarta banda donde se indica un nivel de transparencia por cada píxel.

Podríamos establecer otra clasificación de tipos de imágenes enfocadas a métodos de captación o a cómo han sido generadas. Así, para entornos artísticos es muy habitual trabajar con imágenes **multiespectrales** que se corresponden a respuestas de los materiales respecto a radiaciones o reflexiones en distintas zonas del espectro electromagnético -visible, infrarrojo, ultravioleta, rayos X-. En otros entornos también se utilizan imágenes obtenidas de la zona de microondas -radar, lidar- e incluso imágenes radio -MRI, gamma-. Podemos ver algún ejemplo en la figura 4 donde se muestra una imagen de reflectografía (a) y la misma

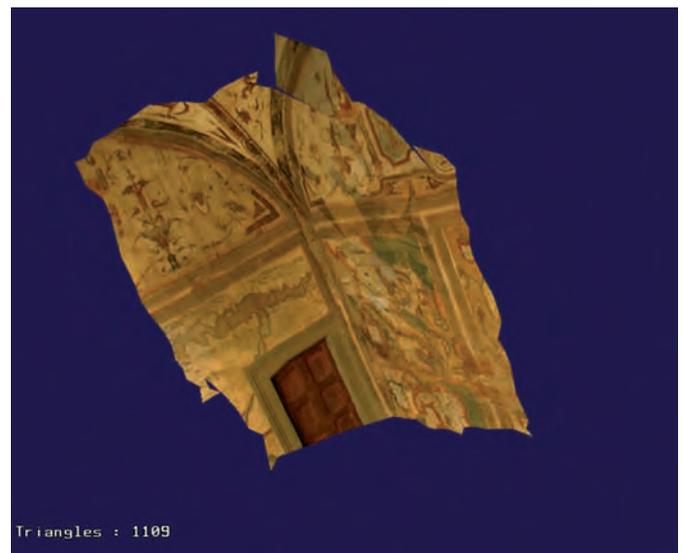


Figura 5. Imagen sintética.

pero obtenida mediante radiografía (b). También se puede observar en la figura 5 otro tipo de imágenes denominadas sintéticas o generadas a través de gráficos en tres dimensiones (c). Estrictamente hablando, se podría decir que este último caso no es

² O en sus siglas en inglés Red, Green, Blue (RGB).

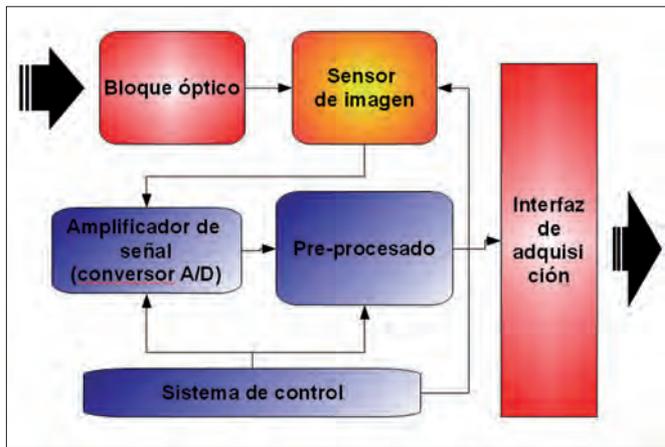


Figura 6. Esquema general de un sistema de adquisición de imágenes.

una imagen puesto que no tiene por qué corresponderse con el mundo real al ser generada sintéticamente. Sin embargo en el caso que nos ocupa tan sólo nos referiremos a imágenes sintéticas que representan o modelan escenas del mundo real.

Una vez definidos algunos conceptos importantes sobre imágenes digitales, pasamos a describir un esquema genérico de un sistema de adquisición de imágenes digitales (Fig. 6) el cual convierte una escena del mundo real en una representación digital.

El primer elemento de este esquema es el **bloque óptico**, compuesto por un conjunto de lentes encargadas de adecuar la proyección de la escena captada. Este bloque es uno de los más determinantes a la hora de diseñar un sistema, dado que condiciona elementos tales como el campo de visión que abarcarán las imágenes, la distancia a la que los elementos de la escena aparecen enfocados, la capacidad de captar luz de la escena, la posibilidad de discernir los objetos en movimiento, la presencia de distorsiones geométricas o colorimétricas, etc.

A continuación se encuentra el **sensor de imagen**, que se encarga de transformar la luz incidente entregada a través del bloque óptico en una señal eléctrica. La elección de un tipo de sensor u otro influye en el tamaño y calidad o presencia de ruido de la imagen a obtener.

El siguiente elemento es un **amplificador de señal**, que no hace más que mejorar la señal eléctrica proporcionada por el sensor. En cámaras digitales este amplificador incluye también un convertor analógico/digital.

Después la mayoría de sistemas de adquisición disponen de un módulo de **pre-procesado** que se encarga de realizar un pequeño tratamiento de la imagen antes de ser enviada o almacenada para, por ejemplo, comprimir la imagen, corregir el ruido de la cámara, mejorar la luminosidad o realizar alguna corrección cromática.

Tanto el sensor, como el amplificador y el bloque de pre-procesado son gestionados desde un **sistema de control** que dispone de toda la lógica e inteligencia para realizar el proceso completo de adquisición. En determinados sistemas incluso puede controlar el bloque óptico y normalmente algunas de sus funciones pueden ser manejadas desde el exterior.

La última etapa no es más que un **interfaz de adquisición**, encargado de establecer una comunicación con un dispositivo externo como puede ser un ordenador, un dispositivo de visualización, un disco duro, una impresora, etc. A través de dicha comunicación se produce tanto la transmisión de las imágenes como el control de la adquisición de forma externa.

Por último, para obtener más información sobre estos y otros conceptos relacionados se pueden consultar los siguientes textos de referencia: González, 2002; Jähne, 1995; Russ, 2007; Shapiro, 2001 y Menéndez, 2000.

Aplicaciones

Para continuar con este trabajo vamos a describir algunas de las aplicaciones y herramientas de la visión artificial y el tratamiento digital de imágenes que, de alguna manera, se utilizan en diversos campos del arte, tanto en su creación como en su estudio. De este modo las técnicas las hemos clasificado en: análisis de imágenes, reconocimiento de patrones, fotogrametría y adecuación de imágenes. Además hemos incluido un ejemplo totalmente práctico y conocido de uso de herramientas de visión artificial para la reflectografía de infrarrojos: el sistema VARIM.

Análisis de imágenes

Las técnicas de análisis de imágenes tratan de obtener información básica de una o varias imágenes. Obtención de bordes, información geométrica y localización de puntos en distintas imágenes serán centro de nuestra atención.

Detectores de bordes

Algunas de las herramientas más utilizadas en visión artificial parten de sistemas de detección de los bordes en una imagen, que no son más que cambios bruscos de intensidad en ésta. Los bordes son importantes porque son los puntos que mayor información ofrecen en una imagen. Para la implementación de un detector de bordes se suele hacer uso de técnicas basadas en el gradiente de una imagen a través de máscaras de convolución u operadores de derivada. Aquellos detectores basados en operadores de primera derivada –operador de Roberts, Sobel (Jähne, 1995: 332)- suelen ser más rápidos, por lo que tienen un mayor uso en aplicaciones en tiempo real o con fuertes restricciones computacionales. Por contra son sensibles a las direcciones en las que se utilizan, por lo que su aplicabilidad es menor. Por otra parte los basados en operadores de segunda derivada –como el Laplaciano- suelen obtener mejores resultados pero son más costosos computacionalmente hablando. Uno de los detectores de bordes más eficiente y completo es el de Canny (González, 2002: 634), el cual utiliza un operador de segunda derivada con técnicas de supresión de no máximos y del que se puede ver un ejemplo de aplicación en la figura 7.



Figura 7. Detector de bordes. ↑(a) Imagen original. →(b) Imagen de bordes.

Transformaciones geométricas

132

El bloque óptico de las cámaras de adquisición de imágenes introduce aberraciones que afectan a las imágenes adquiridas, aunque muchas veces tan sólo se debe al uso de lentes de gran angular -con distancias focales bajas-. Esta distorsión puede observarse fácilmente en líneas rectas las cuales aparecen curvadas. Dicha desviación depende principalmente de la calidad de las lentes y de la distancia focal, y se incrementa con la distancia entre los puntos observados y el eje óptico de la lente. Aunque en la mayoría de aplicaciones esta aberración es inapreciable, en otras aplicaciones donde se necesita extraer información geométrica de la imagen o en aplicaciones de composición de imágenes contiguas su aparición puede ser determinante.

Existen dos tipos de distorsiones geométricas: **distorsión radial y tangencial**. Los nombres se deben al tipo de desplazamiento del punto de la imagen con respecto al punto ideal. La principal es la primera y, en la gran mayoría de lentes y aplicaciones, la segunda puede despreciarse. Si la imagen captada presenta un desplazamiento negativo de los puntos en el plano de ésta se le denomina **distorsión de barril** -Fig. 8b-, mientras que si el desplazamiento es positivo la distorsión es de **cojín** -Fig. 8c-.

Existen diversos métodos de corrección de dicha distorsión, como el mostrado en Torres, 2004, basado en la utilización de una imagen patrón para calcular el grado de distorsión del bloque óptico.

Otro ejemplo distinto referente a la geometría se puede encontrar en los trabajos de David G. Stork (Stork, 2004, 2006, 2007) el cual muestra otro ejemplo más de cómo las nuevas técnicas de análisis de imágenes sirven para el análisis histórico de pinturas. Su trabajo lo centró en la investigación sobre la postura

de David Hockney, el cual afirmaba que los pintores renacentistas hacían uso de espejos y proyecciones ópticas a la hora de realizar cambios de perspectiva en los objetos de sus creaciones. Sin embargo las nuevas técnicas de cambios de proyección de imágenes digitales le han permitido a Stork rebatir la teoría de D. Hockney. Por ejemplo, en la figura 9 se puede apreciar en detalle la 'araña de Arnolfini' de la obra perteneciente a la National London Gallery. En la figura 10a se puede observar el detalle de uno de sus brazos. En la figura 10b se ha realizado un cambio de perspectiva de (a) para colocar ese brazo en el mismo plano que otro de los brazos. Finalmente en la figura 10c se ha superpuesto la imagen proyectada encima del segundo brazo y se puede comprobar que las dimensiones y distancias entre elementos no concuerdan, con lo que se demuestra que no se utilizaron, como afirmaba Hockney, herramientas de cambios de perspectiva a la hora de elaborar la obra.

Búsqueda de puntos coincidentes

Otra de las técnicas utilizadas en aplicaciones artísticas consiste en la búsqueda entre imágenes contiguas de puntos coincidentes. Es decir, mediante éstas se localiza un punto conocido de una imagen en otra imagen distinta. Son numerosos los algoritmos utilizados para ello. Los más básicos consisten en métodos de correlación estadística entre zonas de la imagen que se basan en la similitud entre los alrededores de un mismo punto desde distintas perspectivas. De éstos se derivan otros algoritmos más complejos y novedosos como son los que utilizan medidas de orden entre píxeles (Posse, 2009) basados en la ordenación de valores de intensidad en matrices de búsqueda entre imágenes.



Figura 8. Distorsión geométrica. κ (a) Imagen original. \uparrow (b) Distorsión de barril. \leftarrow (c) Distorsión de cojín.

Otros algoritmos también están basados en seguimiento de puntos en secuencias de vídeo como es el algoritmo KLT³ (Shi, 1994 y Lucas, 1981).

Las aplicaciones de estos algoritmos en entornos artísticos se centran en sistemas de composición de imágenes (Fig. 11) así como en la localización de estructuras predefinidas en diversas imágenes.

Reconocimiento de patrones

En otro nivel de extracción de información visual se encuentran las técnicas de reconocimiento de patrones. Estas herramientas (Pajares, 2001: 373) permiten obtener una clasificación de objetos atendiendo a una serie de clases prefijadas de antemano. Aquí comentaremos una de las herramientas más importantes para el reconocimiento de formas geométricas, la transformada de Hough (Davies, 1990). Además presentaremos un sistema donde se utilizan técnicas de detección de rostros.

Transformada de Hough

A la hora de localizar y reconocer formas geométricas en una imagen, una de las herramientas más utilizadas es la transfor-



Figura 9. Araña de Arnolfini. © National London Gallery.



Figura 10. (a) Imagen de uno de los brazos. (b) Proyección de (a). (c) Superposición de brazos en el mismo plano.

³ El nombre viene dado por sus diversos autores: Takeo Kanade, Bruce Lucas y Carlo Tomasi.

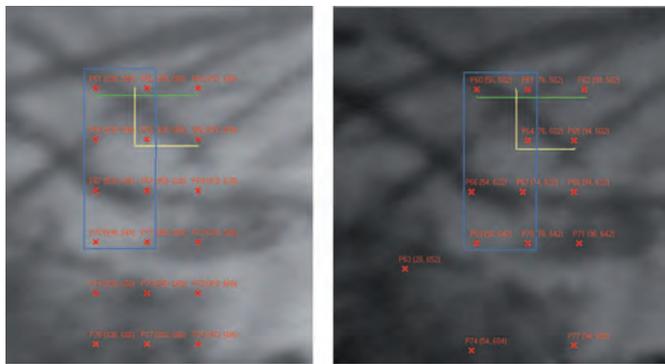


Figura 11. Algoritmo de búsqueda de puntos coincidentes en imágenes contiguas.

mada de Hough (Davies, 1990). Entre las formas geométricas que es capaz de detectar se encuentran rectas, rectángulos, círculos y elipses y, en general, todas aquellas que sea posible expresar de forma analítica. Para ello hace uso de espacios transformados relacionando las coordenadas de los píxeles con los parámetros que describen la forma geométrica de forma analítica. En su forma transformada los píxeles se convierten en coordenadas relacionadas, en el caso de las rectas con la pendiente y la ordenada en el origen. Así, las rectas detectadas en la imagen original se corresponden con máximos en el dominio transformado. En la figura 12 se puede ver un ejemplo. La figura 12a muestra la imagen original con las rectas detectadas superpuestas. Estas rectas han sido obtenidas a través de la transformada de Hough de la figura 12b, donde la acumulación de zonas oscuras se corresponde con las coordenadas paramétricas de las rectas.

Esta herramienta es una técnica robusta y fiable para la detección de formas siendo inmune a la presencia de ruido en la imagen y a la discontinuidad de las formas. Por contra, el coste computacional al realizar la transformada es muy alto, con lo que en ciertas aplicaciones resulta muy difícil su implementación.

Detección de rostros

Como caso de aplicación curioso se presenta la obra parodia de Warhol "15 seconds of fame" (Solina, 2002)⁴. Se trata de un salón de exposiciones donde los visitantes se convierten en protagonistas de la propia obra. Utilizando técnicas de detección y clasificación de rostros, unos monitores muestran imágenes gráficas de dichos rostros.

Para la detección de rostros, las técnicas de visión artificial hacen uso de diversos rasgos biométricos como son la distancia entre ojos, el tamaño de la nariz, labios y orejas. Además, se utilizan técnicas de búsqueda por componentes de color para la selección del tono de piel y algoritmos de inteligencia artificial y redes neuronales para clasificar, por ejemplo, expresiones faciales.

Fotogrametría

La fotogrametría es la ciencia encargada de calcular las dimensiones y posiciones de los objetos en el espacio. Sin embargo en una

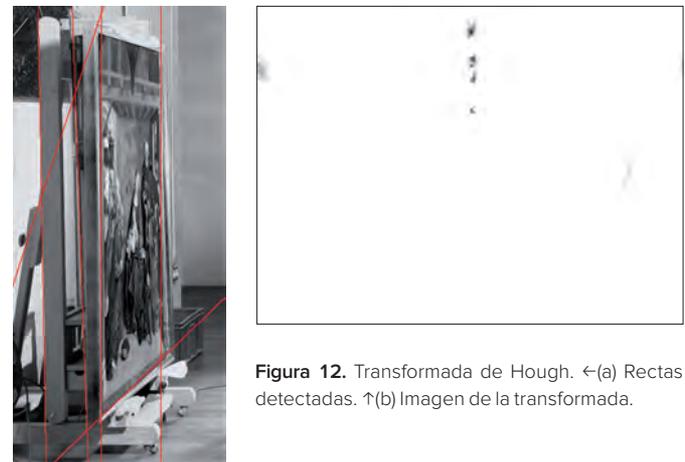


Figura 12. Transformada de Hough. ←(a) Rectas detectadas. ↑(b) Imagen de la transformada.

imagen digital aislada tan sólo se dispone de información relativa a dos dimensiones. En este campo de la visión artificial se establecen dos líneas de trabajo enfocadas a obtener la tercera dimensión desconocida a priori:

Por una parte se utilizan técnicas complejas de calibración de cámaras para establecer las correspondencias entre el mundo real y las imágenes capturadas.

Además, hay otro tipo de aplicaciones que utilizan estas calibraciones para generar modelos en tres dimensiones que no son más que imágenes sintéticas que tratan de reconstruir los objetos de interés.

En el ámbito cultural se suelen encontrar muchos más trabajos que utilizan aplicaciones del último tipo. Así, la generación de imágenes en tres dimensiones se utiliza ampliamente para estudios de conservación y restauración donde una réplica sintética de objetos puede, por ejemplo, ayudar a estudiar con mayor detalle y más fácilmente una obra al no tener que acceder directamente a ella; detectar defectos o desgastes debidos al paso del tiempo al poder implementar herramientas de seguimiento de estado más fácilmente, etc. A modo de ejemplo podemos citar el trabajo de Gonzo (Gonzo, 2004) que presenta un sistema de reconstrucción de castillos en base al uso de láseres y técnicas de adquisición multicámara.

Además, otro uso importante de estas técnicas se da en aplicaciones turísticas, dado que la creación de modelos 3D y el uso del resto de nuevas tecnologías permite realizar visitas virtuales de obras de arte y cualquier otro Patrimonio Cultural, como es el caso del Museo de San Telmo (Macía, 2004).

Adecuación de imágenes

Como se ha visto en la introducción, el objeto del tratamiento digital de imágenes es mejorar la calidad de éstas. Muchas son las veces en que las condiciones del entorno o una mala elección de parámetros hacen que las imágenes pierdan calidad.

⁴ Ver <http://black.fri.uni-lj.si/15sec/>



Figura 13. Transformación logarítmica. (a) Imagen original. (b) Imagen corregida.

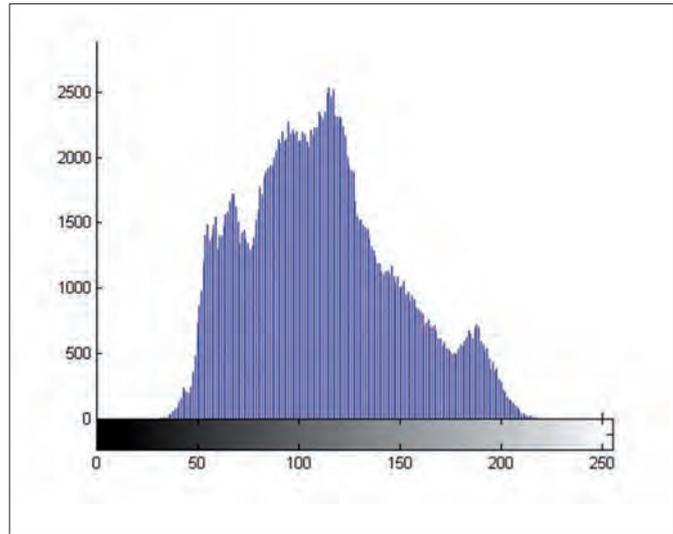


Figura 14. Ecuación de histograma. ⚡(a) Imagen original. ⬆(b) Histograma original. ⬅(c) Imagen ecualizada.

Son múltiples los algoritmos que se utilizan para corregir estos problemas, sin embargo tan sólo nombraremos los más básicos basados en transformaciones puntuales de los píxeles que componen una imagen.

Por una parte se encuentran las transformaciones basadas en una expresión o representación sencilla. Así, se pueden encontrar transformaciones que modifican la respuesta lineal de la imagen, transformaciones logarítmicas para aclarar imágenes oscuras, exponenciales para oscurecer imágenes sobreexpuestas, transformaciones por tramos o utilizando curvas polinómicas. A modo de ejemplo significativo las figuras 13 a y b muestran una transformación logarítmica de una imagen que, en el momento de su captura, estaba demasiado oscura.

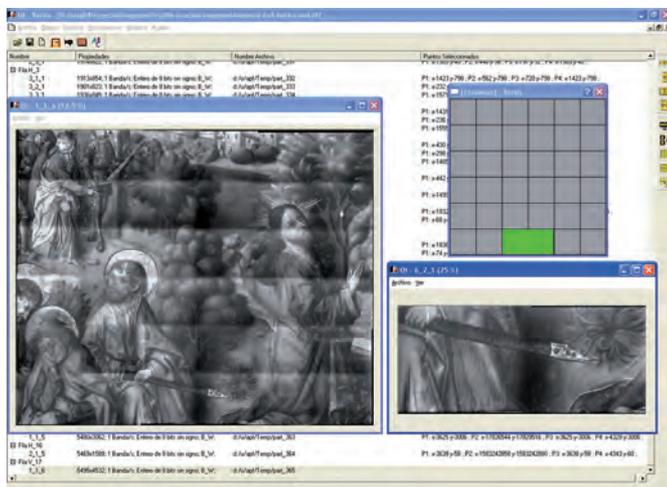


Figura 15. Aplicación VARIM.

Otro tipo de transformaciones son las que utilizan el histograma de la imagen, que no es más que la representación de la frecuencia de los distintos valores de intensidad de ésta. Así, son típicos los algoritmos (González, 2002) que ensanchan o encogen el histograma u otros más complicados que lo ecualizan, es decir, que tratan de distribuirlo de forma uniforme. Como ejemplo el de las figuras 14 a, b y c:

136 Proyecto VARIM

Para terminar con el apartado de aplicaciones comentaremos la aplicación VARIM (*Visión Aplicada a la Reflectografía de Infrarrojos Mecanizada*) (Torres, 2008). Esta idea nació como respuesta a la necesidad de mejorar los clásicos métodos tediosos y lentos de creación de imágenes reflectográficas y ofrecer una herramienta de trabajo para historiadores, restauradores y otros usuarios con recursos limitados. Así, el Instituto del Patrimonio Cultural de España y la Universidad Politécnica, en colaboración con otras empresas y entidades nacionales, comenzaron a diseñar un sistema mecanizado capaz de captar y componer mosaicos reflectográficos de manera automática, en especial para su utilización en el estudio de grandes retablos que exigen componer decenas e incluso centenas de imágenes.

De este modo VARIM dispone de novedosos algoritmos de visión artificial centrados en la adquisición y composición automática de imágenes -utilizando técnicas como la búsqueda automática de puntos coincidentes-, corrección de ruido y distorsión geométrica de la cámara, así como otras herramientas auxiliares, todo ello a través de una interfaz gráfica amigable y fácil de utilizar (Fig. 15). En la actualidad decenas de pequeñas y medianas entidades relacionadas con el estudio y análisis del Patrimonio están utilizando las herramientas implementadas.

Conclusiones

Como se ha podido ver a lo largo de este artículo, el área científica del tratamiento de imágenes y de la visión artificial ofrece tecnologías horizontales que pueden ser utilizadas para multitud de aplicaciones en campos de diversa índole. Por supuesto el mundo artístico también hace uso de dichas tecnologías en muchas facetas, principalmente para estudios y análisis de obras. Del mismo modo también ha permitido el desarrollo de nuevos métodos de expresión artística. Así, se ofrece como una valiosa herramienta de apoyo para historiadores, restauradores, conservadores y artistas.

Sin embargo, a pesar de que las tecnologías comentadas están cada vez más consolidadas, este campo científico es, comparado con ciencias como la mecánica, la ingeniería civil, la astronomía, etc., todavía muy incipiente con lo que aún queda mucho terreno por explorar y, sin duda, las posibilidades que ofrece y ofrecerá son prometedoras. Además, la integración con otras nuevas tecnologías como Internet y los dispositivos móviles está ampliando su uso incluso para turistas, consumidores y público en general.

Para terminar y como bien dice el dicho popular: “*una imagen vale más que mil palabras*”, con el ahorro de trabajo que eso supone.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Marián del Egado y a Araceli Gabaldón del Instituto del Patrimonio Cultural de España su ayuda y colaboración para realizar el trabajo aquí expuesto y sin las cuales no podría presentarlo.

Bibliografía

- BUTT, M. A., MARAGOS, P. (1998): "Optimum Design of Chamfer Distance Transforms": *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7, nº 10.
- CRIMINISI, A., STORK, D. G. (2004): "Did the great masters use optical projections while painting? Perspective comparison of paintings and photographs of Renaissance chandeliers", Cambridge: *17th International Conference on Pattern Recognition*, vol. 4: 645-648.
- FALCO, C. M. (2007): "Computer Vision and Art": *IEEE Multimedia*, vol. 14, nº 2: 8-11.
- DAVIES, E. R. (1990): *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*: Academic Press.
- GONZÁLEZ, R. C., WOODS, R. E. (2002): *Digital Image Processing*: Addison-Wesley Publishing Company.
- GONZO, L. *et al.* (2004): "Photo-Realistic 3D Reconstruction of Castles with Multiple-Sources Image-Based Techniques", Estambul: *ISPRS 20th Congress*: 120-125.
- JÄHNE, B. (1995): *Digital Image Processing*, Berlín: Springer-Verlag.
- JÄHNE, B., HAUSSECKER, H. (2000): *Computer Vision and Applications*: Academic Press.
- LUCAS, B., KANADE, T. (1981): "An Iterative Registration Technique with an Application to Stereo Vision": *International Joint Conference on Artificial Intelligence*: 674-679.
- MACÍA, I. *et al.* (2004): "Application of Virtual Showcase technologies in real scenarios: the case of San Telmo Museum", Creta: *Proceedings of the Computer Graphics International*: 428-435.
- MENÉNDEZ, J. M., CASAJÚS, F. J. (2000): *Tecnologías de Audio y Vídeo*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- PAJARES, G., DE LA CRUZ, J. M. (2001): *Visión por computador. Imágenes digitales y sus aplicaciones*, Madrid: Ra-Ma.
- POSSE, A., TORRES, J., MENÉNDEZ, J. M. (2009): "Matching Points in Poor Edge Information Images", El Cairo: 2009 *IEEE International Conference on Image Processing*.
- RUSS, J. C. (2007): *The Image Processing Handbook*: CRC Press.
- SHAPIRO, L., STOCKMAN, G. (2001): *Computer Vision*: Prentice Hall.
- SOLINA, F. *et al.* (2002): "15 seconds of fame – An interactive, computer-vision based art installation", Singapur: *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*: 198-204.
- STORK, D. G. (2004): "Optics and the Old Masters Revisited": *Optics & Photonics news* (Optical Society of America), nº 3: 30-37.
- Stork, D. G. (2006): "Computer Vision, Image Analysis and Master Art: Part 1": *IEEE Multimedia*, vol. 13, nº 3: 16-20.
- STORK, D. G., JOHNSON, M. K. (2006): "Computer Vision, Image Analysis and Master Art: Part 1": *IEEE Multimedia*, vol. 13, nº 4: 12-17.
- STORK, D. G., DUARTE, M. F. (2007): "Computer Vision, Image Analysis and Master Art: Part 3": *IEEE Multimedia*, vol. 14, nº 1: 14-18.
- TOMASI, C., KANADE, T. (1991): "Detection and Tracking Point Features", Seattle: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 593-600.
- TORRES, J., MENÉNDEZ, J. M. (2004): "A practical algorithm to correct geometrical distortion of image acquisition cameras", Singapur: 2004 *IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 4: 2451-2454.
- TORRES, J., POSSE, A., MENÉNDEZ, J. M. (2008): "Descripción del sistema VARIM: captación y composición automática del mosaico reflectográfico", Madrid, *Revista de Bienes Culturales*.
- WEI, W. *et al.* (2006): *New Non-contact Fingerprinting Method for the Identification and Protection of Objects of Cultural Heritage Against Theft and Illegal Trafficking*, Praga: 7th European Commission Conference on Cultural.



Figura 2. Alteración del arte rupestre por precipitación de carbonatos en el Abric de Pinós (Benissa, Alicante).



Figura 4. Altamira (Santillana del Mar, Santander). Bisonte hembra, superpuesto a parte anterior de otro bisonte y signos geométricos de la sala de los polícromos, según Breuil y Obermaier, 1935.

El descubrimiento de los primeros conjuntos se produjo a finales del siglo XIX y su estudio no escapa a la dinámica científica de principios del siglo XX, momento en el que se está forjando la consolidación de los estudios prehistóricos en el Estado Español. En este transcurso se desarrollan algunos episodios que sacuden y aceleran el proceso de investigación. En 1902 la comunidad científica admite por primera vez la antigüedad de las pinturas de Altamira que Marcelino Sanz de Sautuola había descubierto en 1879 (Fig. 4). Este acontecimiento abre las puertas al hallazgo y a la documentación de nuevos conjuntos de arte rupestre prehistórico. De hecho, en 1903 Juan Cabré descubrió la Roca dels Moros de Calpatá (Creta, Teruel) (Fig. 5) en lo que se considera el descubrimiento del primer conjunto de pintura levantina, aunque años antes, en 1885 Marconell citara los toros del Prado del Navazo en Albarracín. En cualquier caso será a partir de 1903 cuando se sucedan los hallazgos de forma más continuada. Y es a partir de



Figura 3. Mujer orientada hacia la izquierda del Abric Centelles (Albocàsser, Castellón).

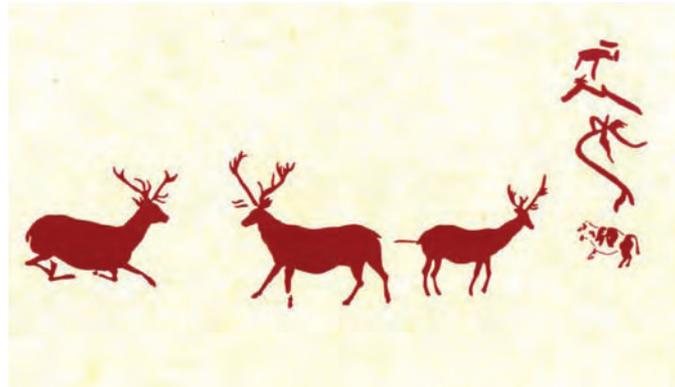


Figura 5. La Roca dels Moros de Calpatá (Creta, Teruel) (Calco según Breuil y Cabré, 1909).

este momento cuando se incrementa de forma considerablemente el número de conjuntos de arte rupestre, proceso todavía abierto. No es el momento de trazar un detallado inventario de los hallazgos, simplemente reseñaremos algunos de los principales acontecimientos que se suceden en más de un siglo de descubrimientos.

Los años sesenta vienen marcados por la realización de las primeras síntesis; la de Pilar Acosta para el Arte Esquemático (Acosta, 1968) y la de Antonio Beltrán para el Levantino (Beltrán, 1968), ambos trabajos suponen el primer inventario de los conjuntos de arte postpaleolítico y al mismo tiempo representan completas síntesis de sus contenidos y significado.

Entre los últimos descubrimientos destaca el hallazgo en 1980 por parte del Dr. Mauro Hernández y el Centre d'Estudis Contestans del conjunto de abrigos que se agrupan bajo el nombre de



Figura 6. Localización de los abrigos con Arte Macroesquemático en las sierras de Alicante.

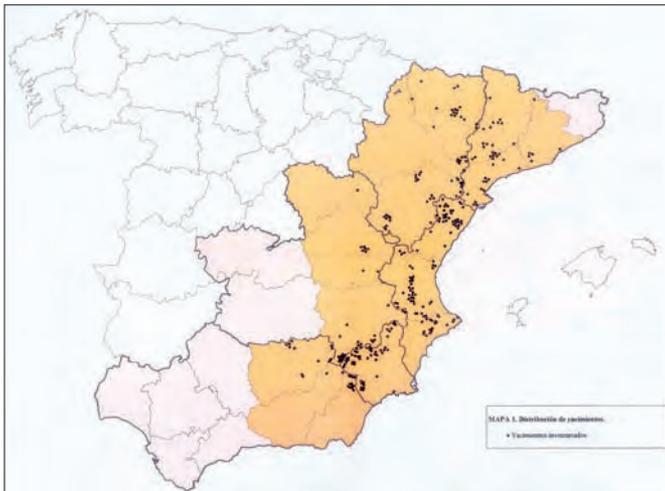


Figura 8. Distribución del arte rupestre en el Arco Mediterráneo de la Península Ibérica.

Arte Macroesquemático (Hernández Pérez, 1983) (Fig. 6). No menos sorprendente y excepcional resulta la localización de un Arte Macroesquemático mueble en las cerámicas cardiales (Martí y Hernández, 1988). De hecho, ambos sucesos y la superposición de pinturas levantinas sobre motivos macroesquemáticos marcan la discusión científica que actualmente se desarrolla sobre la cronología relativa de los estilos postpaleolíticos en el arco mediterráneo (Fig. 7).

De forma paralela al desarrollo de las investigaciones, en los años ochenta se produce un incremento de la conciencia social sobre el valor de este patrimonio, que tuvo su expresión en el



Figura 7. Cerámica cardial del Neolítico antiguo con motivo antropomorfo en doble "Y" (foto tomada de Hernández, 2005: 320).

campo jurídico. La Ley de Patrimonio Histórico Español promulgada el año 1985, establece en su artículo 40,2 que... *quedan declarados Bienes de Interés Cultural, por ministerio de esta Ley, las cuevas abrigos y lugares que contengan manifestaciones de arte rupestre.*

En este marco de revalorización, el año 1995, la Generalitat Valenciana junto con las Comunidades Autónomas de Cataluña, Aragón, Castilla la Mancha Murcia y Andalucía, propusieron la inclusión del Arte Rupestre del Arco Mediterráneo en la lista del Patrimonio Mundial (Fig. 8). Los argumentos a favor de su incorporación a esta lista fueron la fragilidad de estas manifestaciones artísticas, su valor documental, el valor de los paisajes en los que se conserva y su contexto social.

El año 1998 el Comité de Patrimonio Mundial reunido en Kyoto decidía incluir el Arte Rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica en la Lista de Patrimonio Mundial (Fig. 9).

El arte rupestre del arco mediterráneo de la Península ibérica constituye el conjunto más grande de pinturas rupestres de toda Europa y es un fiel reflejo de las formas de la vida humana durante un periodo de la evolución de la Humanidad.

Kioto, 2 de diciembre de 1998

A partir de este momento, tomando como punto de partida la protección legal y el reconocimiento del valor único del Arte Rupestre del Arco Mediterráneo se desarrollan actuaciones dirigidas a mejorar su conocimiento, a compatibilizar su conservación y a atender la creciente demanda social para acceder a estos lugares (Martínez Valle, 2005) (Fig. 10).

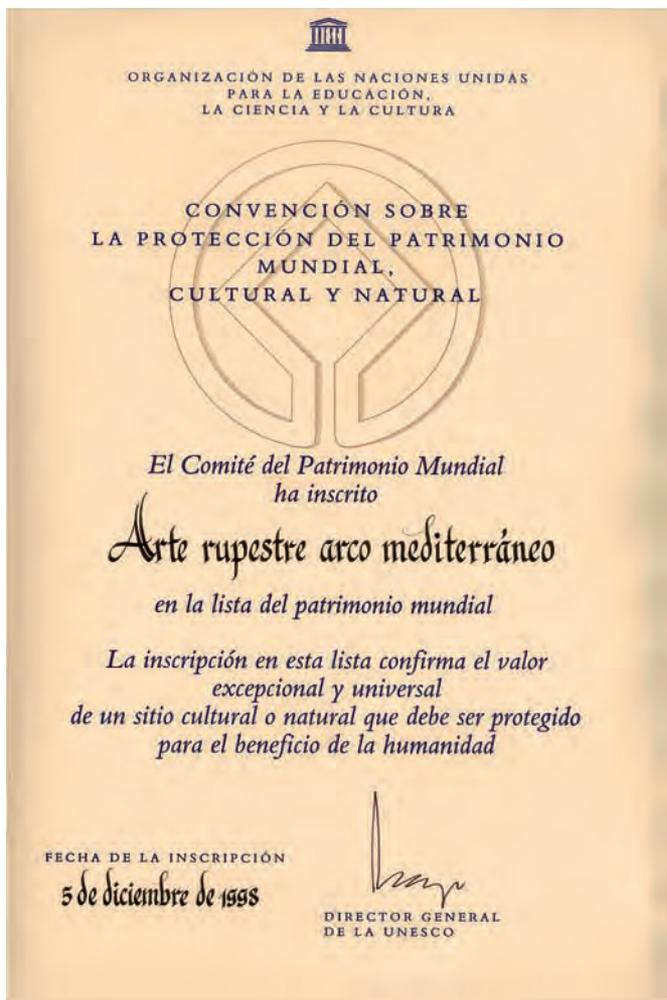


Figura 9. Diploma de la UNESCO en el que se reconoce la inscripción en la lista del patrimonio mundial del arte rupestre del Arco Mediterráneo.

Perspectivas actuales en la documentación y en el estudio del arte rupestre

Este renovado impulso en la gestión se ha desplegado al mismo tiempo que se han ido desarrollando nuevos enfoques en la documentación y en el estudio del arte rupestre. Las novedades se han generado en la mejora de las técnicas de documentación, en las técnicas de datación absoluta y relativa, en el desarrollo de analíticas y en los nuevos enfoques interpretativos como son el estudio de la composición y el estilo y el desarrollo de estudios desde la perspectiva de la Arqueología del Paisaje. Además, se ha desplegado una importante labor en la conservación preventiva.

La documentación

La documentación es el primer paso para cualquier aproximación al arte rupestre. Según el diccionario de la Real Academia documentar es *la acción de obtener un documento*, entendido éste como... *un escrito, diploma, carta, relación u otro escrito que*

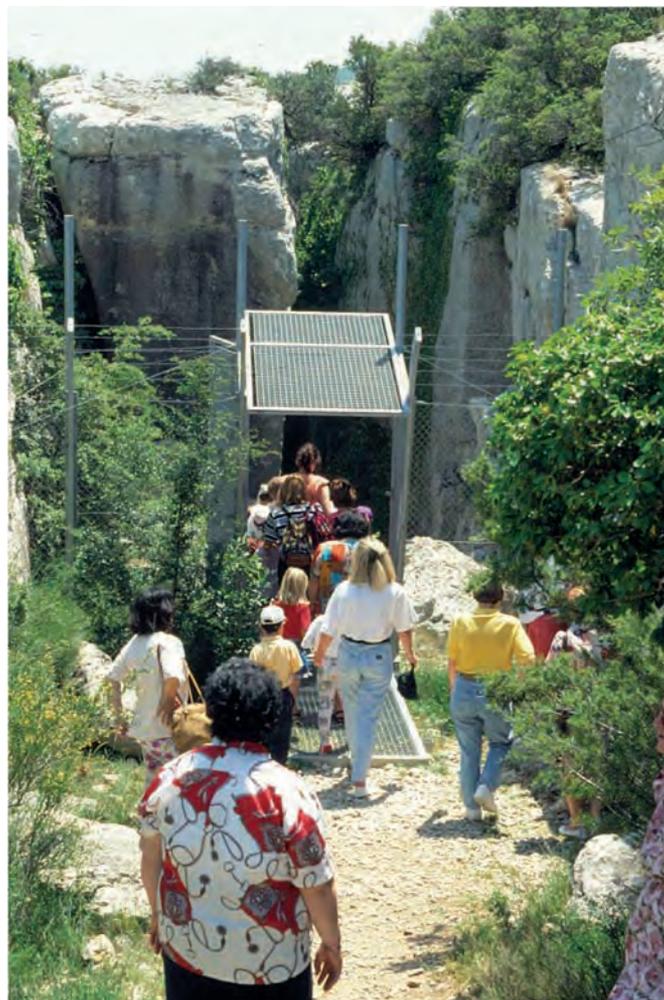


Figura 10. Visita guiada a un abrigo con arte rupestre.

ilustra acerca de algún hecho, principalmente de los históricos. Cuando el objeto es una manifestación rupestre, lo que se persigue con su documentación es obtener una imagen fidedigna de lo conservado y al mismo tiempo una descripción exhaustiva de sus características formales y de sus rasgos físico-químicos.

En los últimos años se ha conocido una evolución en los métodos de documentar el arte rupestre y también se ha ampliado los límites de esta acción, pasando de la mera descripción a un análisis interdisciplinar de sus características.

Los primeros trabajos de documentación realizados en las primeras décadas del siglo XX se basaban en el dibujo a mano alzada con la ayuda de lupas, compases y bastidores y en ocasiones eran pintores quienes realizaban el calco de los motivos. En tierras valencianas, Joan Baptista Porcar realizaría una enorme labor de documentación de gran parte de los abrigos del Barranc de Gassulla en Castellón (Porcar, 1934 y Porcar *et al.*, 1935) (Fig. 11). Uno de los principales problemas de este tipo de documentación era el elevado grado de subjetividad que podía alcanzar el calco definitivo de los motivos representados. Con posterior-

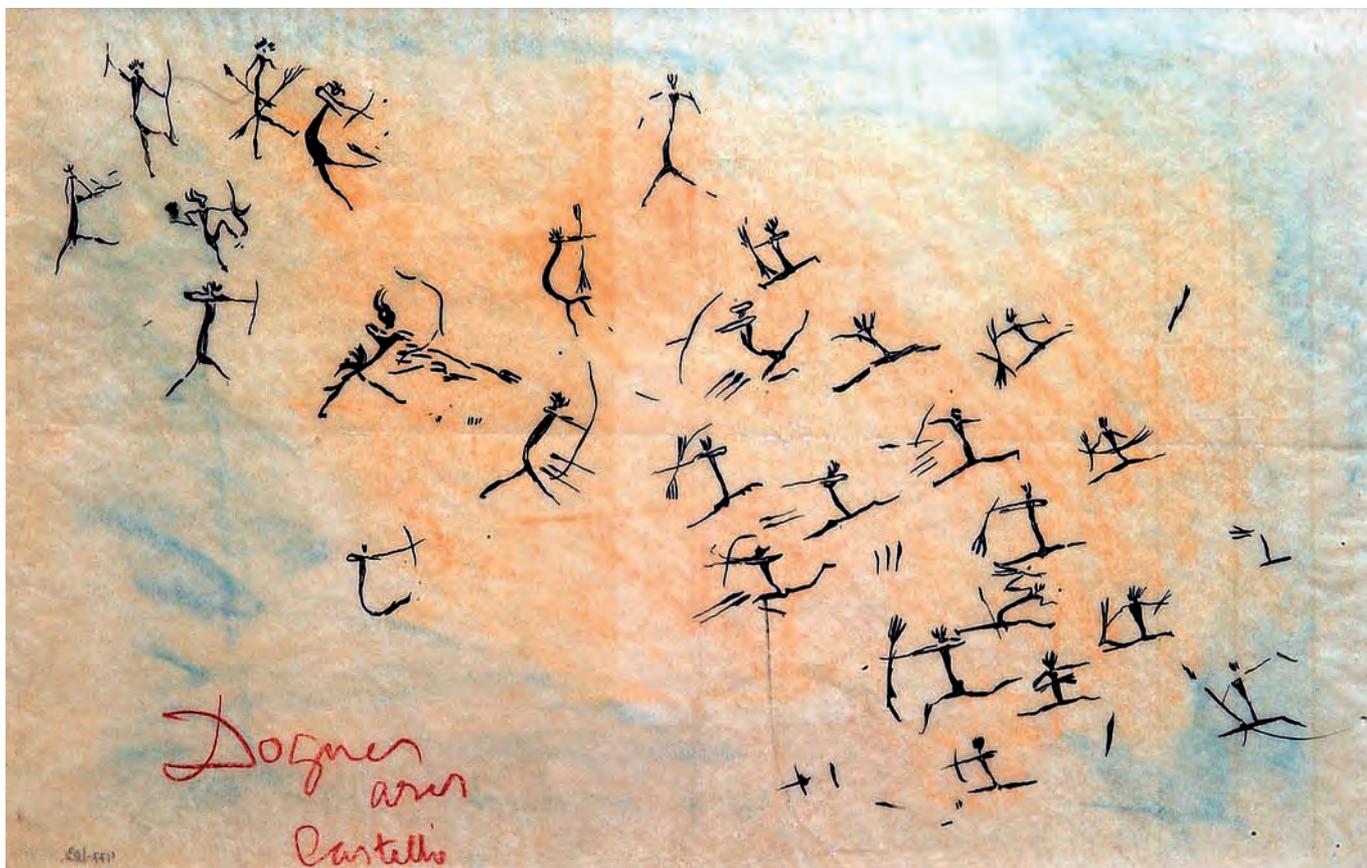


Figura 11. Dibujo del Abric de les Dogues (Ares del Maestre, Castellón) realizado por Juan Bautista Porcar.

ridad se impuso la técnica del calco directo consistente, a grandes rasgos, en colocar sobre la superficie de las pinturas, papeles transparentes que permitieran la copia de los motivos. Para ello se mojaban continuamente los motivos con el fin de avivar los colores. Este procedimiento poco a poco iba provocando la aparición de una veladura formada por la precipitación de carbonatos y sales y ocasionaba un serio problema de conservación. A éste hay que añadir el daño que en ocasiones producían los instrumentos con los que se realizaba el trabajo de documentación al entrar en contacto con la superficie de la roca (Fig. 12).

Desde los años 80 cada vez gana más aceptación como método de documentación el calco digital. Este salto cualitativo ha ido de la mano de un importante desarrollo informático que nos ha permitido el acceso a ordenadores personales cada vez más potentes y a cámaras digitales que generan unas imágenes de resolución acorde con nuestros propósitos.

Para su elaboración se parte de una fotografía digital con una elevada resolución. Esta imagen se trabaja posteriormente mediante programas de tratamiento de imagen como el *Photoshop* hasta conseguir un primer documento. Las posibles interferencias provocadas por sombras, restos de óxidos, etc. se corregirán comprobando el calco en el mismo abrigo (Domingo y López Montalvo, 2002). Este método de documentación cuenta con algunos inconvenientes. Entre los más destacados deberíamos señalar



Figura 12. Calco directo de arte rupestre en abrigo.

la gran inversión de tiempo que se necesita durante el proceso de la elaboración del documento. A ello tendríamos que sumar los derivados del estado de conservación de los mismos motivos y del soporte en el que están representados. Las paredes donde se ha realizado la mayor parte del arte rupestre tiene considerables alteraciones que complican la lectura de los motivos, los pigmentos con los que están ejecutados suelen estar velados y, en ocasiones,

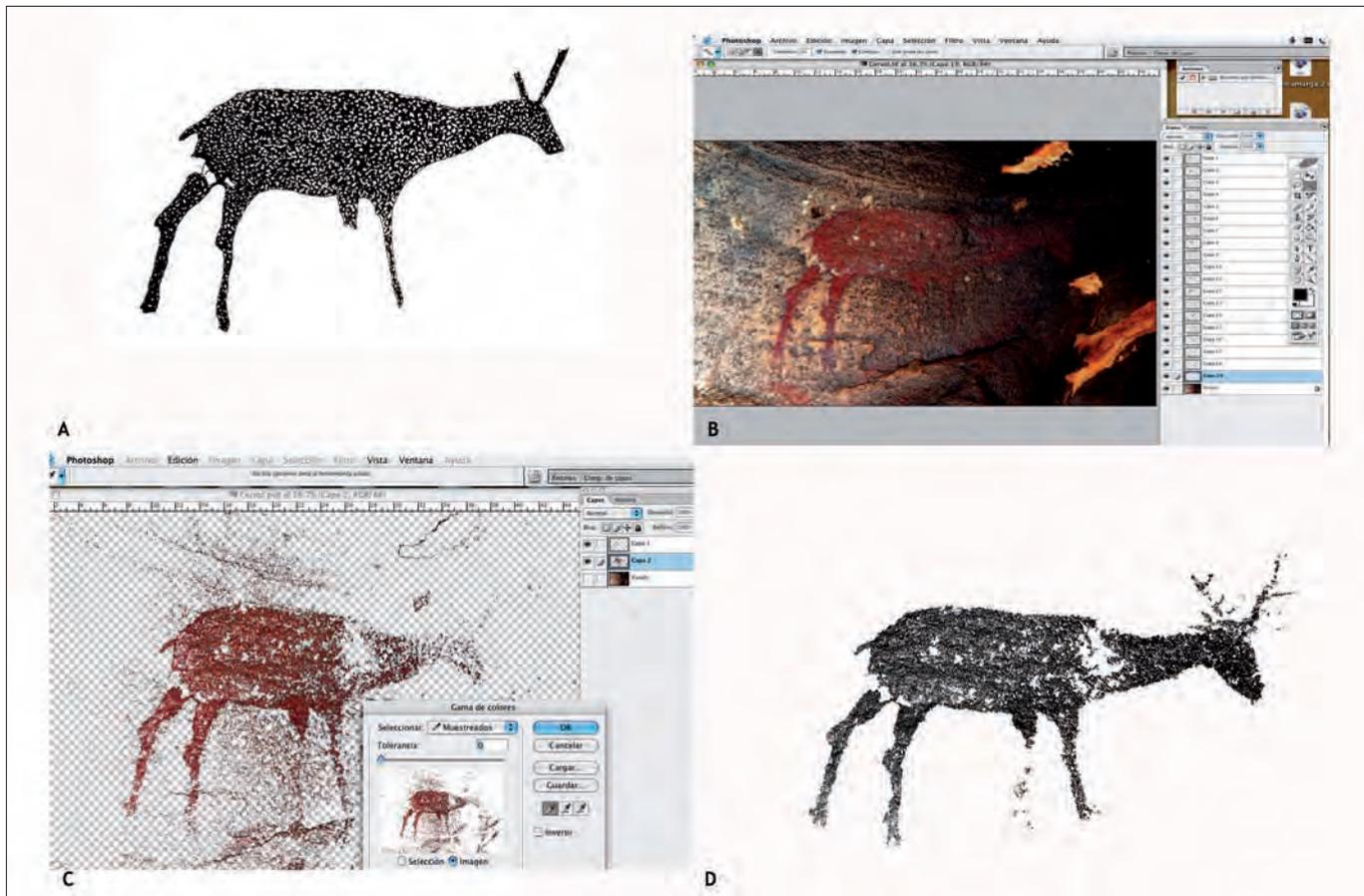


Figura 13. A- Calco del ciervo del Abric de l'Aigua Amarga (Gilet, València) (según Aparicio, 1977:39) y B-C y D. Elaboración del calco y calco del ciervo del Abric de l'Aigua Amarga (calco según los autores).

tenemos que sumar la presencia de óxidos en los mismos paneles que dificultan la lectura de los motivos. Por otra parte están los problemas inherentes a la imagen de la que partimos para elaborar el documento como son las sombras, la alteración de las proporciones del motivo en proceso de calco, etc., problemas que se deben resolver cotejando el documento de trabajo con el original hasta obtener el calco “definitivo”.

También se han elaborado calcos digitales “automáticos” a partir de la fotografía multiespectral, campo en el que se abren interesantes perspectivas (Vicent *et al.*, 1996).

A partir de la digitalización 3D de los abrigos, se obtiene entre otros aspectos, una información volumétrica totalmente fiel al modelo real, aspecto que con los otros sistemas de documentación no quedaba bien resuelto. Sin embargo, la lectura del motivo representado sigue teniendo los mismos problemas con los que nos encontramos durante la elaboración del calco digital.

El estudio del arte rupestre como documento histórico

Una vez se ha obtenido un buen documento es cuando se aborda su estudio, atendiendo a varios aspectos; el estilo, la composición y el significado.

Ya nos hemos referido a los estilos presentes en el arco mediterráneo definidos por décadas de estudios e investigación. Un análisis más detallado nos muestra que es posible individualizar tendencias estilísticas con validez territorial y cronológica. Ya en los primeros estudios sobre el arte levantino, Breuil estableció diferentes fases basadas en el grado de naturalismo, tendencia que fue seguida aunque simplificada por otros autores como Ripoll y Beltrán. Hoy se realizan análisis a escala regional para intentar delimitar mejor variantes estilísticas. Un ejemplo bien estudiado es el área de Valltorta y Gassulla (Martínez Valle y Villaverde 2002, Domingo *et al.*, 2007). A partir de este análisis hemos llegado a la conclusión de que en este territorio se desarrollaron al menos cuatro fases estilísticas dentro del arte levantino a lo largo de un periodo de tiempo relativamente amplio. Aceptar esta amplitud cronológica nos ha llevado a una lectura renovada de muchos paneles y a plantear la hipótesis de que no se pintaron en una sola ocasión, sino que se fueron construyendo a lo largo de distintos momentos cronológicos, en lo que Sebastián denominó escenas acumulativas (Sebastián, 1993) (Fig.14) (Villaverde *et al.*, 2002). Un planteamiento que, por otra parte, es totalmente coherente con el mismo contexto arqueológico.

Además de la composición y el estilo, otros métodos permiten fijar la cronología relativa del arte rupestre. En primer lugar se

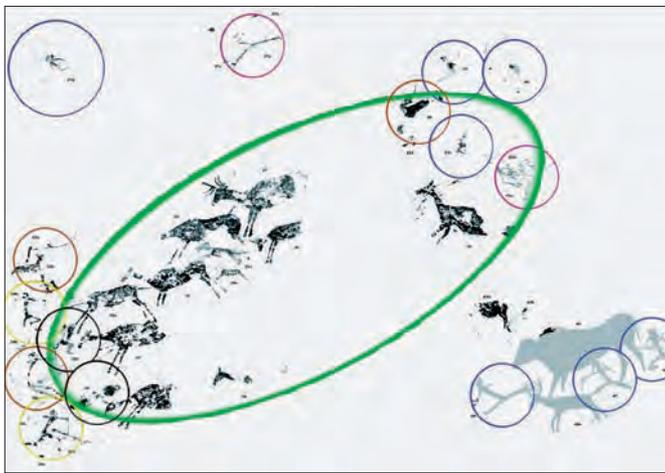


Figura 14. Hipótesis de los distintos horizontes estilísticos de la Cova dels Cavalls (Tírig, Castelló) y de la reconstrucción de la escena principal del abrigo (calco tomado y modificado de Martínez y Villaverde, 2002:156-157).

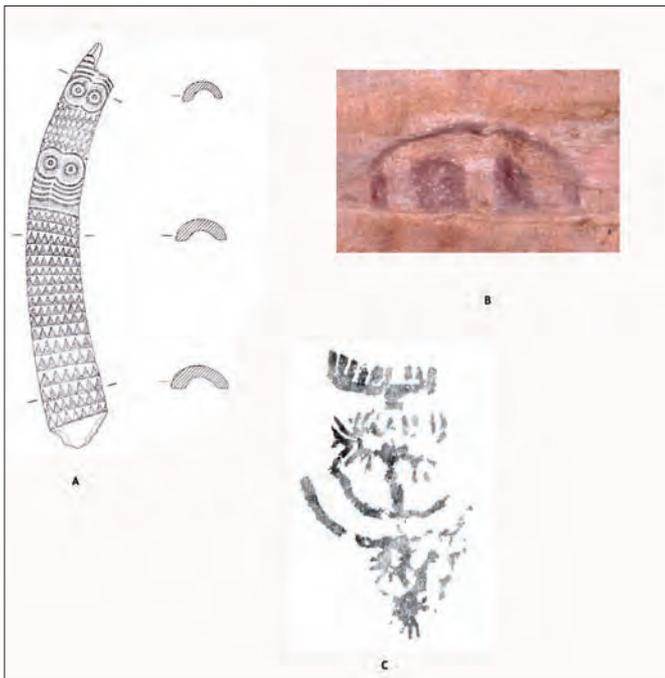


Figura 16. A) Ídolo oculado de Ereta del Pedregal (Navarrés, Valencia) (calco tomado de Hernández, 2005: 311), B- Ídolo oculado del Abric del Castell de Vilafamés (Vilafamés, Castelló), C- Ídolo oculado del Abric II de les Meravelles (Gandia, València) (calco según los autores).

puede tener en cuenta la situación de los motivos respecto a los depósitos arqueológicos, cuando estos existen. En este sentido se valora la posible altura del autor en la ejecución de la obra respecto a los depósitos sedimentológicos (Fig. 15). El arte rupestre también puede quedar englobado en los mismos depósitos arqueológicos facilitando su datación. En ocasiones son fragmentos parietales que se desprenden de su ubicación originaria.

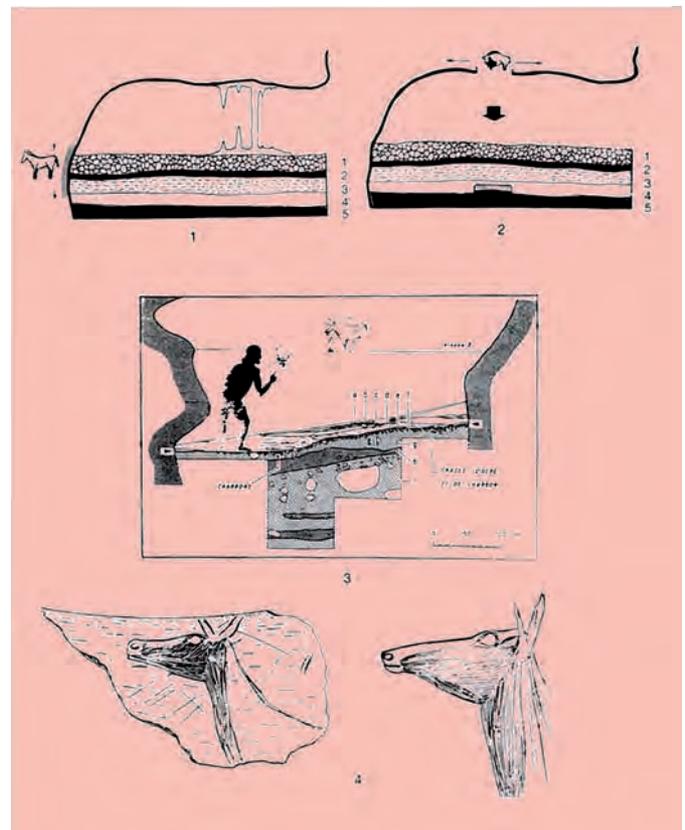


Figura 15. 1-Datación por cubrición, 2- Datación integración de restos en depósitos arqueológicos, 3- Altura del autor en la ejecución de la obra y 4- Paralelos muebles (lámina tomada y modificada de Sanchidrián, 2001: 44).

El arte mueble puede ayudar a fijar la cronología de alguna manifestación artística. Un ejemplo clásico es la relación entre lo que conocemos como Arte Esquemático Reciente y las cerámicas e ídolos del Neolítico final (Breuil, 1935; Acosta, 1968 y Martí, 2006) (Fig. 16) o la datación del Arte Macroesquemático a partir de las decoraciones cerámicas cardiales del Neolítico Antiguo (Martí y Hernández, 1988).

Otro método utilizado es la datación absoluta y relativa obtenida a partir de métodos físico-químicos. La datación absoluta de pigmentos orgánicos (carbón) ha supuesto un paso fundamental en la ordenación del arte rupestre paleolítico (Cachier, et al., 1999). Pero la aplicación de este método no ha sido posible en los conjuntos de arte rupestre al aire libre del arco mediterráneo en los que en los motivos pintados no se han utilizado materiales orgánicos o han desaparecido, por lo que resulta imposible la datación mediante C14. Una perspectiva nueva se comienza a abrir mediante la datación de los oxalatos formados en las superficies pintadas o sobre los propios motivos. En el abrigo del Tío Modesto (Henarejos, Cuenca) se han obtenido dataciones a partir este método (Ruiz et al., 2006) de los desconchados de la roca sobre los que se pintaron diversos motivos levantinos, ayudando a establecer una secuencia cronológica relativa de la ejecución del panel.

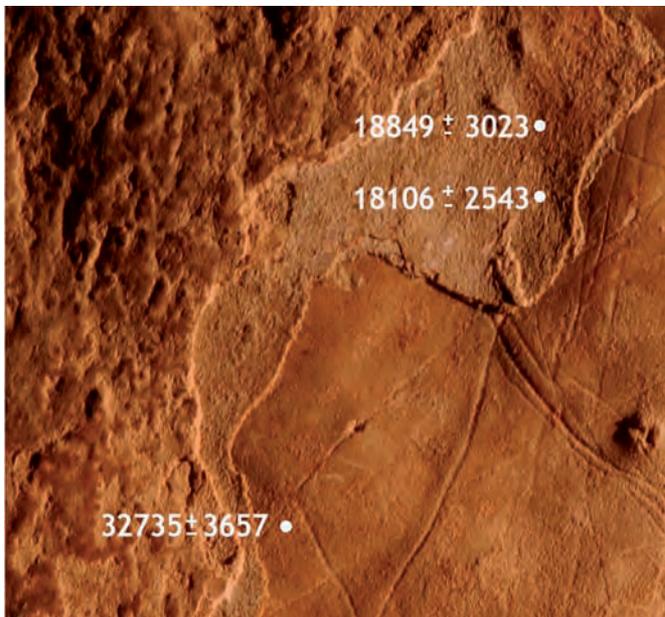


Figura 17. Distintas dataciones absolutas por TH tomadas en los grabados de la Cova de les Meravelles.

En la Cova Meravelles (Gandia) tenemos otro ejemplo de datación relativa de los soportes, que ayuda a situar el momento de realización de una grafía rupestre, en este caso grabados paleolíticos. La datación por TH de la roca soporte de los grabados y la de las capas cubrientes confirma la cronología solutrense atribuida por estilo a los zoomorfos grabados (Villaverde, 2005) (Fig. 17).

El análisis de los pigmentos

Los primeros análisis de pigmentos en el Estado Español, fueron realizados en las pinturas paleolíticas de Altamira y estuvieron motivados por los problemas de conservación que afectaban al conjunto (Cabrera, 1978). La incorporación de esta disciplina a los conjuntos del arco mediterráneo es tardía. El año 1991 se analizaron muestras en los conjuntos de arte rupestre murciano (Montes y Cabrera, 1992) lo que por primera vez aportó datos muy importante sobre la caracterización de los pigmentos usados por los artistas prehistóricos. Con posterioridad se han realizado trabajos similares en conjuntos de la Comunitat Valenciana, Aragón y Catalunya. Hoy además se cuenta con métodos de análisis no destructivos mediante fluorescencia de rayos-X Dispersiva en Energía (EDXRF). En el abrigo con Arte Levantino de La Saltadora (Les Coves de Vinromà, Castellón) hemos aplicado esta técnica con excelentes resultados (Domingo *et al.*, 2007) (Fig. 18). La analítica nos ha permitido diferenciar la materia prima usada en los pigmentos y confirmar la existencia de distintos pigmentos en la elaboración de algunos paneles del abrigo IX. También se ha podido constatar la realización de repintes o rectificaciones de algunos motivos y la existencia de una cierta complejidad en los pigmentos utilizados que resultan coherentes con la idea de composición por adición como hemos propuesto anteriormente (Roldán *et al.*, 2007: 204).

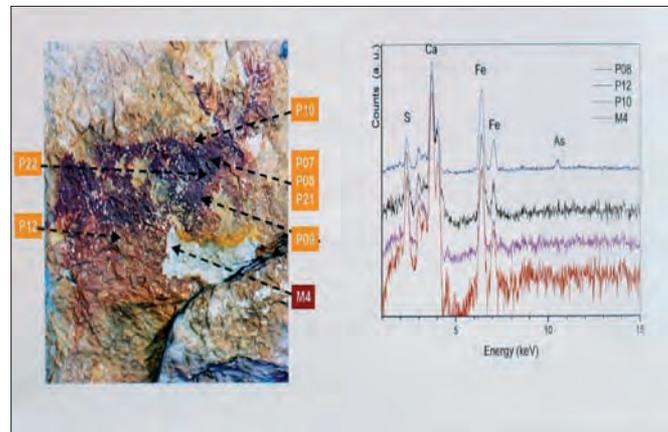


Figura 18. Análisis no destructivo de pigmentos mediante fluorescencia de rayos X (imagen tomada de Roldán, et al., 2007: 202).

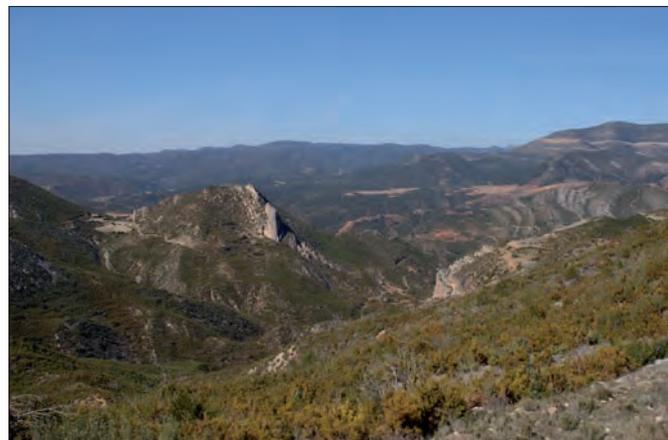


Figura 19. Paisaje de los alrededores del Abrigo I de las Clochas.

Un poco de interpretación histórica

Los cambios operados en los métodos de análisis y estudio también se pueden seguir en las diferentes corrientes interpretativas. Los primeros trabajos de investigadores pioneros como Breuil y Obermaier asumen una visión historicista del arte rupestre impregnada de elementos etnológicos. Teorías como la magia de caza servían para explicar el arte de los cazadores paleolíticos. A partir de los años 50 los trabajos de Lévi Straus y sus discípulos marcan una nueva senda interpretativa desde la corriente estructuralista que asume que cualquier manifestación gráfica expresa un trasfondo social y simbólico de sus autores. Un ejemplo de esta lectura lo tenemos en los trabajos de Julián Martínez sobre la Cueva de los Letreros de Vélez Blanco (Martínez, 1991), excepcional conjunto de arte esquemático. El arte esquemático es un producto más de la cultura de las sociedades neolíticas y como tal puede informarnos sobre la organización social de sus autores: las primeras sociedades agropecuarias asentadas en este territorio. En el panel principal de la Cueva de los Letreros se pintaron una serie de motivos bitriangulares en



Figura 20. Calco del Abrigo I de las Clochas (calco según Martínez Valle y Guillem, 2006).

disposición vertical, en diferentes agrupaciones. El autor interpreta esta distribución como la representación de una estructura de parentesco, de cuya lectura se deduce que los autores de las pinturas expresaron un incremento de la complejidad social y la importancia de vincular un grupo humano al territorio.

Un análisis similar hemos desarrollado recientemente en el conjunto de abrigos de las Chochas (Gestálgar, Valencia) (Grande del Brío y Francisco Javier González Tablas el año 1990, Martínez Valle y Guillem, 2006). Los abrigos se localizan en una encrucijada de caminos, en el tramo medio del barranco de las Clochas, cerca de un manantial de agua (Fig.19).

El Abrigo I contiene una extraordinaria composición de arte esquemático, con tres grupos de representaciones con antropomorfos (Fig.20). Por una parte estarían las figuras mayores, realizadas con pinturas de color anaranjado ubicadas en el extremo derecho del abrigo. En la segunda agrupación, en posición central, hay figuras de tamaño ligeramente inferior que presentan un pigmento de coloración más oscura, y finalmente en la tercera agrupación, ubicada a su izquierda, encontramos un grupo de figuras de pigmento similar al anterior pero realizadas con un trazo mucho más fino y de tamaño mucho más reducido (Fig. 20).

La primera agrupación presenta una disposición horizontal y tres figuras, que aisladas del resto, se corresponden con representaciones antropomorfas. De esta composición destacaríamos que los motivos más abstractos, los motivos en “Y”, trazos curvos y aspás aparecen en un plano superior. No sabemos en que medida pueden estar representando “un nivel superior” al de los humanos situados en planos inferiores.

Este tipo de distribuciones horizontales se ha relacionado con el desarrollo de distinciones de individuos (Martínez García, 2002: 70) propias del proceso de cambio económico en la que están inmersos los grupos humanos que pintaron estos motivos.

En los grupos 2 y 3 creemos que también queda confirmada la segmentación, en este caso basada en la diferenciación

sexual (Fig. 20). De hecho en el grupo central predominan los antropomorfos masculinos que quedan aislados del grupo de la izquierda por medio de una barra horizontal. En un nivel inferior aparecen dos composiciones que responden al mismo esquema: en la parte superior se representaron animales y por debajo varias figuras humanas con los brazos en asa en las que no se ha indicado el sexo. Ante esta falta de indicadores sexuales podemos pensar que el sexo era una cuestión irrelevante o que, por su posición respecto a los antropomorfos masculinos, se trataría de figuras femeninas.

Hay otros elementos que confirman esta segmentación sexual. En el grupo central las figuras 18 y 19 representan a un hombre (19) con un niño cogido de la mano (18) y lo mismo podemos afirmar de las figuras 21, 23 y 24, pero en este caso el antropomorfo masculino (23) estaría acompañado de dos niños (Fig. 20). Esta asociación de adultos masculinos con niños puede interpretarse como la representación de una iniciación, en este caso el paso de los niños al mundo de los adultos.

La lectura de las escenas que acabamos de comentar nos remiten a unas sociedades tribales cuya forma de organización ha registrado un cambio cuantitativo que se traduce, entre otras cosas, en la aparición de linajes. Es a partir de este momento cuando las reciprocidad se establecerá ya no con toda la comunidad, sino entre los miembros del linaje.

Estos trabajos se enmarcan en un nuevo enfoque interpretativo: la Arqueología del Paisaje, en la que el término “paisaje” se valora como el producto de la interacción del medio ambiente, el medio social y el medio cultural en el cual la especie humana desarrolla su ciclo vital, este mismo planeamiento ha sido utilizado y desarrollado por otros investigadores (Criado, 1993 a y b), Parcero (1995), Santos *et al.*, (1997) y Martínez García (1998), entre otros.

En este enfoque realizamos un continuo viaje del dato empírico hacia el campo teórico y de éste al dato empírico, con el fin de construir continuamente el modelo y comprobar sus recurrencias y la validez del mismo.



Figura 21. Excavación del Abric del Mas de Martí (Albocásser, Castelló).

Desde esta perspectiva, el estudio del arte rupestre no puede desligarse del análisis del contexto arqueológico, al cual nos acercamos a partir del desarrollo de prospecciones sistemáticas, acompañadas de excavaciones arqueológicas.

La excavación de los yacimientos arqueológicos nos permitirá la definición de la secuencia de ocupación humana y la función del yacimiento (Fig.21). Este objetivo se consigue a partir de la articulación de un equipo multidisciplinar en el que intervienen arqueólogos, geólogos, sedimentólogos, antracólogos, palinólogos, arqueozoólogos, y un largo etc.

La ciencia al servicio de la conservación del arte rupestre

El arte rupestre fue un medio de comunicación venerado y respetado por las culturas que lo crearon. Hoy el arte rupestre es un patrimonio cultural, en el que se acumulan no sólo valores estéticos y simbólicos, sino que además es un documento histórico de primera mano que nos transmite un mensaje de las sociedades del pasado y en la mayoría de los casos forma parte de paisajes de gran riqueza ecológica (Figs.22 y 23).

Pero además, para la actual sociedad industrial es un recurso turístico que se explota, en ocasiones con serios riesgos de destrucción y banalización. Estos conjuntos no siempre han sido visitados con el respeto que se merecen, las paredes donde



Figura 22. Arquero orientado a la izquierda de Bhinbetka (India).



Figura 23. Valle del Côa (Portugal).



Figura 24. Destrucción de pinturas levantinas en el Abric I de Benirrama (Alicante).

están los grabados o las pinturas han sido mojadas con el fin de facilitar la visualización de los motivos, en otras ocasiones rayadas o pintadas para dejar constancia de los nombres de los visitantes y de la fecha y procedencia y en ocasiones han sido sustraídas en lo que constituye brutales muestras de vandalismo y expolio. Estas agresiones no se pueden resolver exclusivamente con medidas coercitivas como los vallados. El gran número de estaciones repartidas por todo el territorio peninsular impide el cierre de todos los conjuntos, medida que por otra parte no siempre resulta eficaz.

A estas agresiones individuales hay que añadir las inherentes a nuestra actividad. El paisaje en el que están inmersos la mayoría de conjuntos sufre una continua presión antrópica con la transformación de los usos tradicionales o la construcción de grandes obras públicas (Fig. 24).

En los últimos años se ha producido un avance muy significativo en el desarrollo de proyectos de conservación del arte rupestre en los que intervienen diversas disciplinas cien-

tíficas. El punto de partida es el conocimiento de los soportes, en este campo cabe destacar los trabajos pioneros de el Milano, Albarracín (Benito et al., 1993) y Cogul (Sancho *et al.*, 1994) que caracterizan los soportes como paso previo para afrontar los problema de conservación. Y en la misma medida se ha producido un avance significativo en el estudios de factores biológicos de alteración (Sáiz, 2002) con la caracterización de los microorganismos que habitan sobre las rocas soporte de las manifestaciones rupestres y las consecuencias que ocasiona su actividad.

Hoy mediante la interdisciplinarietà que caracteriza los proyectos de intervención se trabaja para frenar el deterioro de un patrimonio milenario.

Bibliografía

- ACOSTA MARTÍNEZ, P. (1968): *La Pintura Rupestre Esquemática en España*. Salamanca: Memoria nº1. Seminario de Prehistoria y Arqueología. Universidad de Salamanca.
- 148 APARICIO PÉREZ, J. (1977): "Pinturas rupestres esquemáticas en los alrededores de Santo Espiritu (Gilet y Albalat de Segart, Valencia), y la cronología del arte rupestre". *Saguntum. Papeles del Laboratorio de Arqueología*, 12, pp.: 31-72.
- BELTRÁN MARTÍNEZ, A. (1968): *Arte Rupestre Levantino*. Anejo de Caesaraugusta. Zaragoza: Monografías Arqueológicas del Seminario de Prehistoria y Protohistoria IV. Universidad de Zaragoza.
- BENITO, G., MACHADO, M.J. y SANCHO, C. (1993): "Sandstone weathering proceses damaging prehistoric rock paintings at the Albarracín Cultural Park, NE Spain". *Environmental Geology*, 22, pp.:71-79.
- BREUIL, H. y J. CABRÉ (1909): "Les peintures rupestres du bassin inferieur de l'Ebre. I Les roches peints de Calapatá a Cretas (Bas Aragon). II Les fresques a l'air libre de Cogul, Province de Lèrida (Catalogne)". *L'Anthropologie*, 20, pp.: 1-21.
- BREUIL, H. (1935): *Les peintures rupestres schématiques de la Péninsule Ibérique*. IV. Sud-Est de l'Espagne. Fondation Singer-polignac, Imprimerie de Lagny.
- CABRERA, J. M. (1978): "Les materiaux des pintures de la grotte d'Altamira. Zagreb": Actes 5ª Reunión Triennale de INCOM, pp.: 1 a 9.
- CLOTTES, J. (2005): "Décadas de descubrimientos y estudios. La investigación del arte rupestre de la Comunidad". En R. Martínez Valle (Coord.) *Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana*. València. Generalitat Valenciana. pp.:15-24.
- CRIADO BOADO, F. (1993 a): "Límites y posibilidades de la Arqueología del Paisaje". *Spal*, 2, pp.:9-55.
- CRIADO BOADO, F. (1993b): "Visibilidad e interpretación del registro arqueológico". *Trabajos de Prehistoria*, 50, pp.:39-56.
- CHARIER, H., ARNOLD, M., TISNERAT, N. y VALLADAS, H. (1999): "Datation directe des peintures prehistoriques par la méthode du carbone 14 en spectrometrie de masse par accélérateur". In: *Jacques Evin (dir.): 14C et archæologie: 3ème Congrès International*, Lyon 6-10 avril 1998, pp.:39-44.
- DOMINGO, I. y E. LÓPEZ MONTALVO, E. (2002): "Metodología: el proceso de obtención de calcos o reproducciones". En R. Martínez Valle y V. Villaverde (Eds.): *La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta*. Valencia: Generalitat Valenciana. Monografías del Instituto de Arte Rupestre 1, pp.: 75-81.
- DOMINGO, I., LÓPEZ, E., VILLAVERDE, V. y R. MARTÍNEZ (2007): "Los Abrigos VII, VIII y IX de les Coves de la Saltadora (Coves de Vinromà, Castelló)". Valencia: Generalitat Valenciana. *Monografías del Instituto de Arte Rupestre*, nº 2.
- GRANDE DEL BRÍO, R. y F.J. GONZÁLEZ-TABLAS (1990): "Las pinturas rupestres de "Las Colochas" (Sierra de Gestalgar, Valencia)". *Archivo de Prehistoria Levantina*, XX, pp.:299-316.
- HERNÁNDEZ PÉRES, M. S. (1983): "Arte esquemático en el País Valenciano. Recientes aportaciones". *Xephyrus*, XXXVI, pp.: 63-75.
- HERNÁNDEZ PÉREZ, M. S. (2005): "Entre el esquema y la abstracción. Arte Esquemático en la Comunidad Valenciana". En R. Martínez Valle (Coord.) *Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana*. Generalitat Valenciana. pp.: 295-325. València.
- HERNÁNDEZ PÉREZ, M. S., FERRER MARSET, P. y E. CATALÁ FERRER (1988): *Arte Rupestre en Alicante*. Alicante.

MARTÍ, B. (2006): "Cultura material y arte rupestre en el País Valenciano, Aragón y Cataluña. En J. Martínez y Hernández (eds.)". Actas del *Congreso de Arte Rupestre Esquemático en la Península Ibérica. Comarca de los Vélez*, 5-7 de Mayo 2004, pp.: 119-147. Almería.

MARTÍ, B. y M. S. HERNÁNDEZ (1988): *El Neolítico valencia. Arte rupestre i cultura material*. Valencia: Servei d'Investigació Prehistòrica de la Diputació de Valencia.

MARTÍNEZ GARCÍA, J. (1991): "Análisis de un sistema de parentesco en las pinturas rupestres de la Cueva de los Letreros (Vélez-Blanco, Almería)". Sabadell: *Ars Praehistorica*, t. VII-VIII.

MARTÍNEZ GARCÍA, J. (1998): "Abrigos y accidentes geográficos como categorías de análisis en el paisaje de la pintura rupestre esquemática. El sudeste como marco". *Arqueología Espacial*, 19-20, pp.: 543-561.

MARTÍNEZ GARCÍA, J. (2002): "Pintura rupestre esquemática: el panel, espacio social". *Trabajos de Prehistoria*, 59, 1, pp.: 65-87.

MARTÍNEZ VALLE, R. (2005): "Décadas de descubrimientos y estudios. La investigación del arte rupestre de la Comunidad". En R. Martínez Valle (Coord.) *Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana*. Generalitat Valenciana. pp.: 41-61. València.

MARTÍNEZ VALLE, R. y V. VILLAVERDE BONILLA (Coord.) (2002): "La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta." Valencia: Generalitat Valenciana. *Monografías del Instituto de Arte Rupestre*, nº 1.

MARTÍNEZ VALLE, R. y P.M. GUILLEM (2006): *Un alto en el Camino. Los abrigos pintados del Barranco de Las Clochas*. Gestalgar, Valencia. Ayuntamiento de Gestalgar. Asociación Amigos de Gestalgar

MONTES, R. y CABRERA, J. M. (1992): "Estudio gráfico y componentes pictóricos del arte prehistórico de Murcia (Sureste de España). Murcia: *Anales de Prehistoria y Arqueología*, 7-8, pp.: 69-74.

PARCERO, C. (1995): "Elementos para El estudio de los paisajes castreños del noroeste peninsular". *Trabajos de Prehistoria*, 52(1), pp.:127-144.

PORCAR, J. B. (1934): "Pinturas rupestres al barranc de Gasulla". *Boletín de la Sociedad Castellonense de Cultura*, XV, pp.: 343-347.

PORCAR, J. B., BREUIL, H. y H. OBERMAIER (1935): *Excavaciones en la Cueva Remigia (Castellón)*. Madrid: Memorias de la Junta Superior de Excavaciones y Antigüedades.

ROLDÁN, C., FERRERO, J., MURCIA-MASCARÓS, S.; VILLAVERDE, V.; MARTÍNEZ VALLE, R., GUILLEM, P.M., DOMINGO, I. y E. LÓPEZ (2007): "Análisis *In situ* de pigmentos de las pinturas rupestres de los abrigos VII, VIII y IX de la Saltadora mediante Fluorescencia de Rayos-X." En Domingo, I.; López, E.; Villaverde, V. y Martínez, R. (2007): *Los Abrigos VII, VIII y IX de les Coves de la Saltadora (Coves de Vinromà, Castelló)*. Valencia: Generalitat Valenciana. Monografías del Instituto de Arte Rupestre, nº 2, pp.: 191-205.

RUIZ, J.F.; ROWE, M. W. y STEELMAN, K. (2006): "Firs Radiocarbon Dating of Oxalate Crust over Spanish Prehistoric Rock Art". *INORA*, pp.: 46, 1-4.

SAIZ JIMÉNEZ, C. (2002): "Estudio de los procesos de alteración de las rocas y pinturas rupestres de la cueva de Doña Trinidad (Ardales, Málaga) y abrigo de los Letreros (Vélez Blanco, Almería)". *Panel, revista de arte rupestre*, nº 1, pp.: 86-91.

SANCHIDRIÁN, J. L. (2001): *Manual de arte prehistórico*. Madrid: Ariel Prehistoria.

SANCHO, C., PEÑA, J.L. y MATA, M.P. (1994): "Estudio alterológico de la arenisca soporte de las pinturas y grabados de la Roca dels Moros de el Cogul (Lleida)". *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (3-4), pp.: 103-118.

SANTOS, M., PARCERO, C. y F. CRIADO (1997): "De la Arqueología Simbólica del Paisaje a la Arqueología de los Paisajes Sagrados". *Trabajos de Prehistoria*, 54 (2) pp.: 61-80.

SEBASTIÁN, A. (1993): *Estudio sobre la composición en el Arte Levantino*. Valencia: Tesis Doctoral inédita.

SHANKS, M. y C. TILLEY (1987): *Social Theory and Archaeology*. Polity. Londres. En: Clive Gamble, 2002- *Arqueología Básica*. Barcelona. Ariel Prehistoria.

VICENT GARCÍA, J. M., MONTERO RUÍZ I., RODRÍGUEZ ALCALDE, A., MARTÍNEZ NAVARRETE, I. y T. CHAPA (1996): "Aplicación de la imagen multispectral al estudio y conservación del arte rupestre postpaleolítico". *Trabajos de Prehistoria*, 53, 2, pp.: 19-35.

VILLAVERDE, V. (2005): "Arte Levantino: entre la narración y el simbolismo". En R. Martínez Valle (Coord.) *Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana*. Valencia: Generalitat Valenciana. pp.: 197-226.

VILLAVERDE, V., LÓPEZ MONTALVO, E., DOMINGO, I. y R. MARTÍNEZ VALLE (2002): "Estudio de la composición y estilo". En R. Martínez y V. Villaverde (Coord.): *La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta*. Valencia: Generalitat Valenciana. *Monografías del Instituto de Arte Rupestre. Museu de la Valltorta* 1, pp.: 135-189.

3.7. Caracterización de elementos metálicos en textiles históricos y estudio de sus diversas alteraciones mediante técnicas microscópicas

Livio Ferrazza, M^a Gertrudis Jaén

Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales

Desde la antigüedad encontramos el empleo de metales en la manufactura de textiles, localizando su uso, tanto en la estructura del tejido o ligamento, como en la ornamentación, aplicados estos generalmente a través de la técnica o labor de bordado y en la elaboración de galones y flecos entre otros, (Figs. 1, 2).

También podemos encontrar la utilización de diferentes variantes tipológicas de estos elementos metálicos: en forma hilos metálicos, de laminillas u hojuelas, como recubrimiento del alma en los hilos entorchados, en lentejuelas, etc.

Entre la diversidad de este material metálico asociado al textil histórico, predominan los hilos entorchados, que consisten en un hilo compuesto de una lámina metálica o una fina tira de material orgánico, dorado o plateado. Esta lámina se enrolla en espiral en dirección S o Z alrededor de otro hilo denominado *alma*. En la fabricación de estos entorchados se utilizan diferentes metales, desde los simples como el oro, plata y latón hasta materiales elaborados que requieren un cierto conocimiento tecnológico como plata dorada y cobre plateado/dorado.

En el momento de plantear su preservación, estas decoraciones textiles, pueden presentar dificultades en su conservación por la presencia simultánea de los distintos componentes, inorgánicos y orgánicos, que se superponen y que junto a los pequeños tamaños de los hilados, complican en gran medida las intervenciones de conservación y restauración. Por lo tanto, la preservación del material metálico asociado a los tejidos requiere consideraciones diferentes al resto de la obra textil que incluyen el estudio científico y los análisis necesarios para la identificación de los materiales empleados, la evaluación del estado de conservación, el reconocimiento de los agentes de degradación y la interacción de estos materiales con el ambiente en el que se conserva la pieza.

Ante las cuestiones de si se tiene que eliminar un material que se deposita, si se debe actuar sobre un proceso de corrosión, o si es necesario proteger el material respecto a un entorno agresivo, es importante el conocimiento de todos los aspectos que interesan del tejido con el apoyo de las técnicas y de las metodologías científicas disponibles que permitan alcanzar el diagnóstico. Además de establecer el deterioro y sus causas, la contribución de la ciencia nos permite establecer las condiciones microclimáticas más apropiadas para la futura conservación de las piezas textiles en los diferentes entornos.



Figura 1 (a y b). Aplicación de hilo metálico entorchado como trama suplementaria en la estructura del tejido o ligamento.



Figura 2 (a y b). Aplicación de hilo metálico mediante técnica de bordado.

Metodologías de análisis

El estudio del material metálico asociado a los textiles necesita una toma de muestras planificada a partir de una observación detenida mediante microscopía estereoscópica y microscopía óptica de la pieza. Este primer examen previo a la toma de muestra es importante ya que permite la caracterización morfológica de los hilos metálicos, la medida del número de torsión de la lámina metálica por centímetro, observar el sentido de torsión (S o Z), y observar el alma de fibra del hilo metálico con su descripción de torsión y de color. Esta fase también permite evaluar de forma preliminar el estado de conservación, y verificar la presencia de fracturas, deformaciones plásticas y alteraciones cromáticas de las superficies.

En la segunda fase de estudio, se toman las muestras a partir de los resultados de los exámenes anteriores. Las muestras se analizan desde el punto de vista morfológico y de composición mediante microscopía electrónica de barrido con un espectrómetro de rayos X acoplado, trabajando con un voltaje de aceleración entre los 15 y 20 kV. Se han analizado dos tipos de muestras. La caracterización morfológica de la superficie, algunos aspectos de la técnica de elaboración, los productos de corrosión y el estado de conservación, se realizaron con fragmentos metáli-

cos sin preparación. El estudio de la aleación y de otros aspectos del modo de fabricación de los elementos metálicos requirió la preparación de la muestra en sección transversal metalográfica. La observación con microscopía electrónica en modalidad electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE), junto al microanálisis permite realizar un estudio morfológico, estructural y compositivo de los hilos metálicos, observando signos característicos necesarios al evaluar la metodología de fabricación (espesor, borde, corte, presencia de estrías superficiales, etc.), las capas de recubrimiento (espesor y distribución de los elementos), y el estado de conservación con la observación concerniente a la presencia de fracturas, arañazos, pérdidas, y con el estudio de las concreciones superficiales debidas a la corrosión de los metales y a la deposición de contaminantes del medio ambiente.

El estudio de la técnica de aplicación de la capa de dorado o del plateado, ha sido posible con los resultados obtenidos con las imágenes SEM en modalidad electrones retrodispersados (señal BSE), donde el brillo y el contraste de las imágenes son relacionados con las zonas de la muestra con distinta composición química que ha sido determinada mediante el microanálisis con rayos X.

Resultados obtenidos

El estudio sistemático de los tejidos y bordados históricos por parte del Laboratorio de Materiales y del Departamento de Restauración Textil del Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R), ha permitido estudiar una serie de diferentes materiales metálicos decorativos asociados al patrimonio textil, que varían en composición y técnica de fabricación, en base al periodo histórico de manufactura del tejido o del bordado.

La caracterización de las diversas tipologías de hilos ha sido ampliado con el estudio de las diferentes patologías de degradación que afectan generalmente a estos elementos decorativos, y que se diferencian en base a la composición metálica, la técnica de elaboración y a las características del ambiente conservativo. De este modo, se han obtenido resultados que aportan información desde el punto de vista histórico, tecnológico, de conservación y la restauración.

Entorchados en oro y/o plata

La colaboración del IVC+R con el Sección Arqueológica Municipal del Ayuntamiento de Valencia, ha dado lugar al estudio de entorchados dorados provenientes de una excavación de una tumba del siglo X-XI. El análisis EDX ha detectado una fina lámina metálica realizada con una aleación oro/plata al 50%, (Figs. 3 y 4).

152

Oro de Chipre

Los estudios analíticos de unos hilos característicos pertenecientes a los bordados de una capa pluvial de manufactura valenciana (Figs. 5, 6), y datada a finales del siglo XV y principios del siglo XVI, han evidenciado la presencia de un hilo metálico elaborado con una fina tira orgánica, posiblemente una membrana de origen animal, plateada en superficie. Los hilos se presentan con una ligera tonalidad dorada y con un alma de fibras de lino. La posible presencia de una veladura orgánica es la que confiere una tonalidad dorada a la superficie metálica. (Figs. 7, 8).

La existencia de estos hilos pone de manifiesto que, al menos hasta principios del siglo XVI, hay disponibilidad de estos entorchados que aparecen en Europa desde el siglo X aproximadamente, y que pervive hasta el siglo XV cuando se sustituye por los entorchados en plata y oro¹.

Entorchados y laminillas en plata y plata dorada

La mayor parte de los estudios históricos datan alrededor del siglo XIII la aparición en Europa de los hilados realizados en plata dorada. Estos hilos metálicos son delgadas láminas realizadas generalmente con una aleación de plata/cobre y doradas superficialmente con oro fino. La delicada capa de recubrimiento se presenta únicamente en la superficie externa de la lámina, que se enrollaba uniformemente sobre a un núcleo de fibras, generalmente de seda

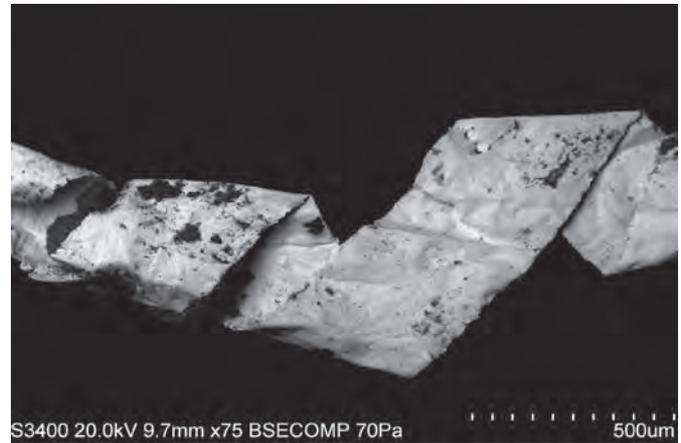


Figura 3. Imágenes SEM en modalidad electrones retrodispersados del entorchado.

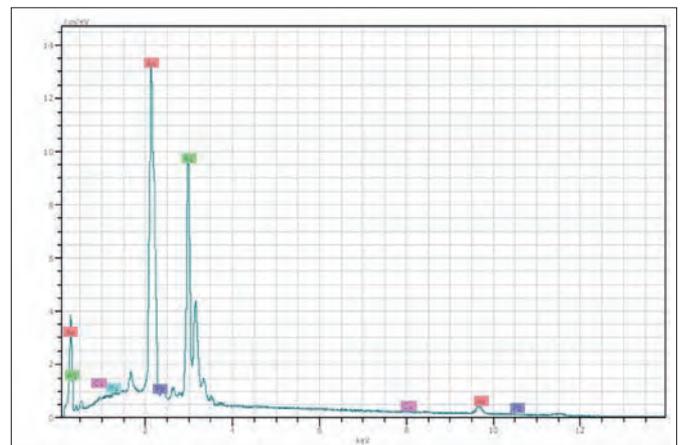


Figura 4. Espectro EDX del núcleo metálico del entorchado.



Figura 5. Fondo del personaje elaborado con oro de Chipre, perteneciente a la cenefa bordada de la capa pluvial del siglo XV-XVI.

¹A. Cabrera Lafuente, en tejido hispanomusulmanes, pp. 8.



Figura 6. El oro de Chipre con el núcleo retorcido en fibras blancas de lino.



Figura 7. La muestra del oro de Chipre observada en sección estratigráfica donde se aprecia la lámina de plata unida al substrato orgánico.

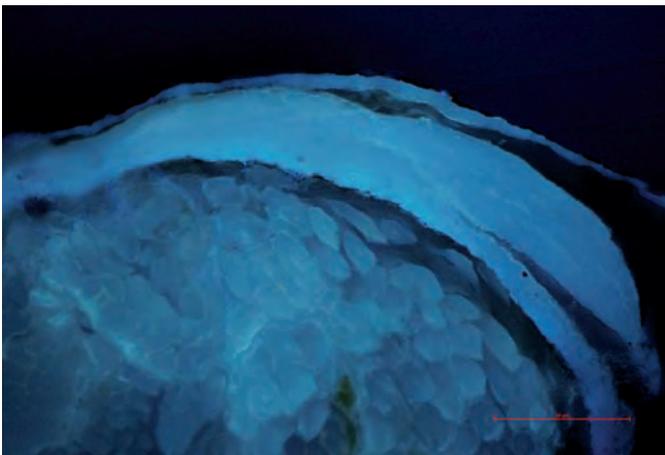


Figura 8. En la imagen en fluorescencia UV se aprecia el substrato orgánico y el núcleo de las fibras de lino. Las observaciones en fluorescencia ultravioleta permiten apreciar la característica coloración azulada del substrato orgánico.

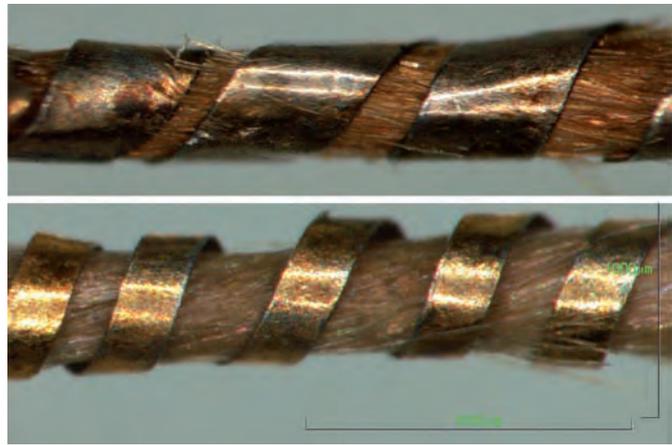


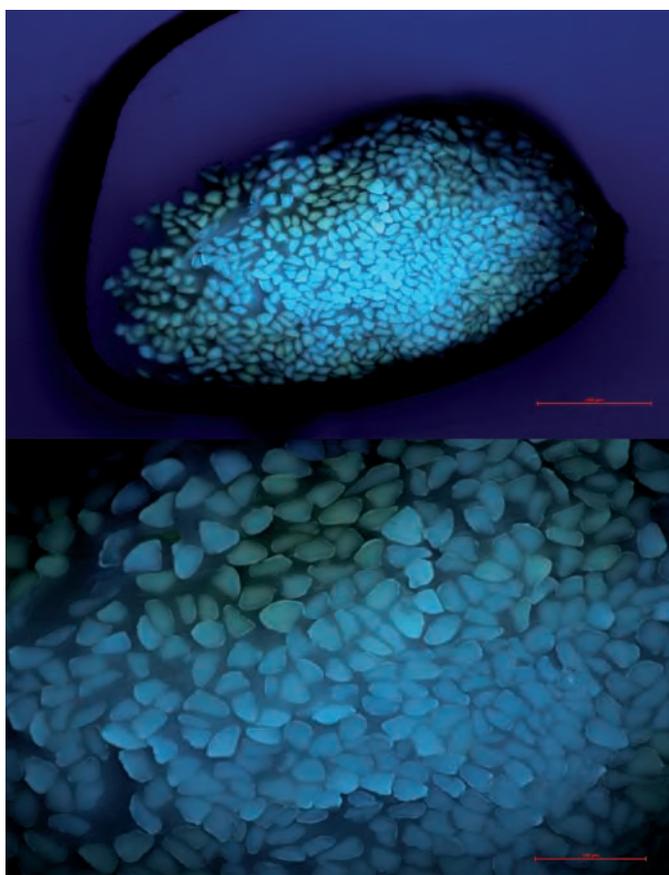
Figura 9. Entorchados dorados realizados con una laminilla de plata dorada, envuelta en espiral alrededor de un núcleo de fibras de seda. Muestras tomadas de los bordados de una capa pluvial de manufactura valenciana del siglo XV-XVI.



Figura 10. Entorchados dorados y plateados con un núcleo de seda. Muestras tomadas del tejido de fondo y bordados de una casulla del siglo XIV-XI de la Hispanic Society of America de Nueva York.

amarillas para los entorchados dorados, y de seda blanca para la plata (Figs. 9, 10,11).

La presencia en la superficie de las láminas de estrías longitudinales y paralelas entre sí, puede indicar el uso de un dispositivo para el procesado de la hiladura y/o para el adelgazamiento de la lámina metálica (Figs. 12, 13). Los resultados hasta hoy obtenidos pueden indicar el empleo de una técnica de dorado con calor, como la soldadura entre una lámina de plata con una de oro fino, con la formación a nivel superficial de una aleación oro/plata, siguiendo el método descrito por Biringuccio en el siglo XVI. En este caso se aprovecha los intervalos térmicos de fusión de los metales sin usar ningún material de aporte, y ejerciendo presión y estiramiento de la hoja de oro. Se necesitan estudios analíticos para confirmar el uso de esta técnica, como las observaciones con el microscopio electrónico para detectar la presencia de trazas de orientación definida del proceso mecánico de estiramiento debido a la utilización de instrumentos específicos.



154

Figura 11. Sección transversal de un entorchado en plata dorada observada con microscopía óptica en fluorescencia ultravioleta. Se aprecia el núcleo interno con fibras de seda.

Entorchados en latón

Análogamente al oro de Chipre, en el mismo bordado, se aprecian hilos metálicos realizados con una aleación en latón (Fig. 14). Estos entorchados también difieren en las características dimensionales y de fabricación ya que se trata de una lámina metálica muy ancha y de coloración dorada-rojiza, enrollada con sentido S sobre a un alma de fibras vegetales blancas (Fig. 15).

Las láminas en latón, eran utilizadas como hilos a partir del final del siglo XVII y principios del siglo XVIII², pero no se desecha su utilización antes de estos periodos. Biringuccio en su obra *De la Pirotechnia*, habla de la fabricación de hilos en cobre y latón, llamados *orpello* que parecen de oro.

Entorchados, canutillos, laminillas y hojuelas en cobre dorado o plata dorada

Numerosos tejidos y bordados datados entre los siglos XIX y XX, y restaurados en los últimos años por el IVC+R, revelan el uso de distintos materiales decorativos en metal.

Se sigue encontrando el uso de la plata dorada y nuevos elementos decorativos realizados en cobre dorado con una alea-



Figura 12. Imágenes SEM en modalidad BSE de los entorchados en plata dorada.

ción oro/plata, oro/cinc o con sólo oro, aunque cambia el modo de aplicar la capa de recubrimiento. Los estudios revelan una distribución uniforme del dorado sobre todas las superficies del núcleo metálico, lo que indica que es improbable que el oro fuera aplicado en hoja y luego martillado y calentado, ya que este método normalmente produce el recubrimiento de una sola superficie. La presencia del recubrimiento sobre todo el núcleo metálico sugiere un procedimiento de tipo químico/electroquímico o electrolítico (ej. recubrimiento galvánico), donde cada lámina ha sido dorada de forma individual después del corte.

Para verificar esta hipótesis, puede ser de ayuda la observación con SEM en modalidad BSE de la distribución de la capa de recubrimiento. Habitualmente, en este tipo de laminillas se caracterizan por la existencia de estrías paralelas orientadas longitudinalmente, con una ligera morfología ondulatoria, que pueden ser debidas a un procedimiento moderno, como el baño electroquímico (Figs. 16, 17).

Estado de conservación

Del conjunto de datos obtenidos a través de las numerosas muestras de entorchados, laminillas y otros elementos metálicos deco-

² C. Buss, *Il paliotto del pellicano*, pp. 27-46.

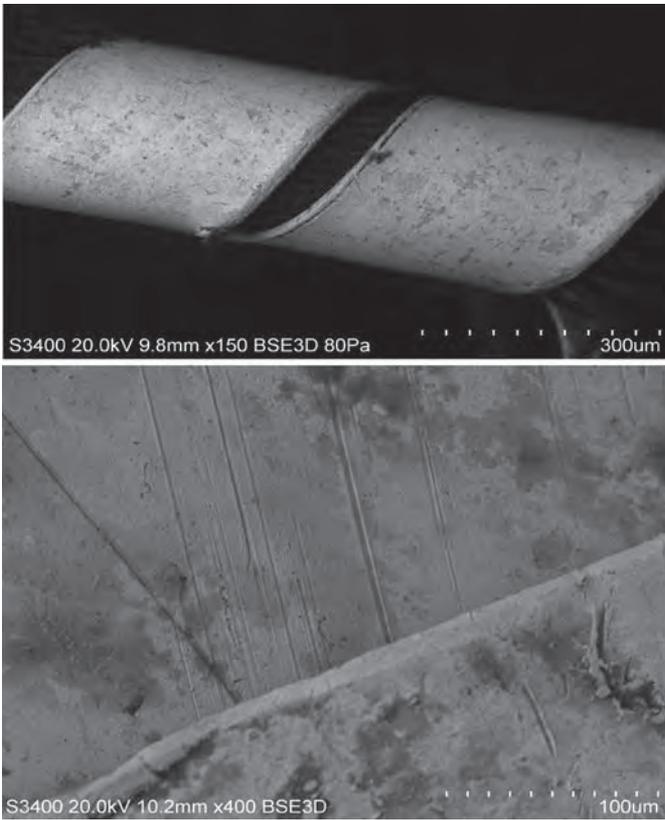


Figura 13. Imágenes SEM en modalidad BSE. En la superficie de la lámina en plata se aprecian las estrias paralelas y longitudinales debidas a las técnicas de fabricación como la hiladura o el proceso de adelgazamiento de la lámina.



Figura 14. Zona del ropaje perteneciente a la cenefa bordada de la capa pluvial.

rativos estudiados, se pueden definir cuales son los fenómenos de alteraciones que afectan mayoritariamente a estos materiales.

La observación con microscopía estereoscópica, permite evaluar de manera preliminar, el estado de conservación, apreciando las distintas formas de deterioro que podemos resumir en cuatro modos:

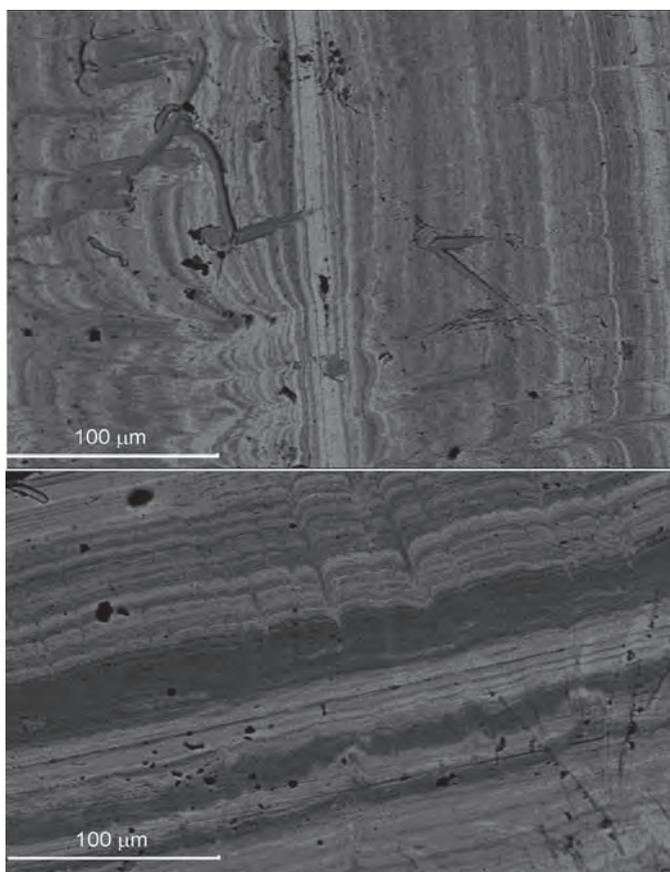


Figura 15. Imagen del entorchado en latón.



Figura 16. Entorchado en cobre dorado con un núcleo en fibras de seda. En la imagen SEM en modalidad BSE, se aprecia la capa superficial en oro/plata sobre la superficie externa e interna de la lámina en cobre.

- Alteración cromática uniforme debida a la presencia de una fina capa oscura y opaca a nivel superficial.
- Alteración cromática debida al desgaste, desprendimiento y caída de las capas de recubrimiento.



156 **Figura 17.** Superficie de la laminilla en plata dorada con baño galvánico.

- Manchas superficiales de distinto tamaño y morfologías con tonalidad oscura o verde.
- Deformaciones de la estructura metálica.

En general son daños producidos por la manipulación, el uso de los textiles y por la interacción de los materiales constituyentes de los hilos metálicos con el medio ambiente, como en el caso de la sulfuración y cloruración de la plata. El estudio con microscopía electrónica de barrido permite definir exactamente las distintas formas de alteraciones:

La corrosión superficial por cloruros y sulfuros de plata

Los problemas de conservación más evidentes en las láminas en plata y de plata dorada, derivan de la formación, a nivel superficial, de una pátina oscura y opaca, cuya extensión y espesor puede ser poco homogéneas (Figs. 18, 19). La capa es consecuencia de la formación de cloruro de plata, generalmente presente en combinación con el sulfuro de plata. El cloruro detectado es debido a la reacción del óxido de plata con iones cloruros presentes en el ambiente, mientras que en el caso del sulfato de plata, se forma



Figura 18. Ejemplo de un tejido del siglo XV con aplicaciones de entorchados dorados completamente oscurecidos.



Figura 19. Entorchado en plata dorada tomado de la indumentaria de una imagen del vestir de finales del siglo XIX.

en ambientes que presentan trazas de los compuestos del azufre, como el sulfuro de hidrógeno, en combinación con oxígeno y humedad (espectros EDX, figura 24).

Se pueden observar casos extremadamente graves en los entorchados en plata dorada, con la formación superficial de una espesa capa de cloruros y sulfuros de plata (Fig. 20).

Las observaciones con el SEM permiten apreciar el crecimen-

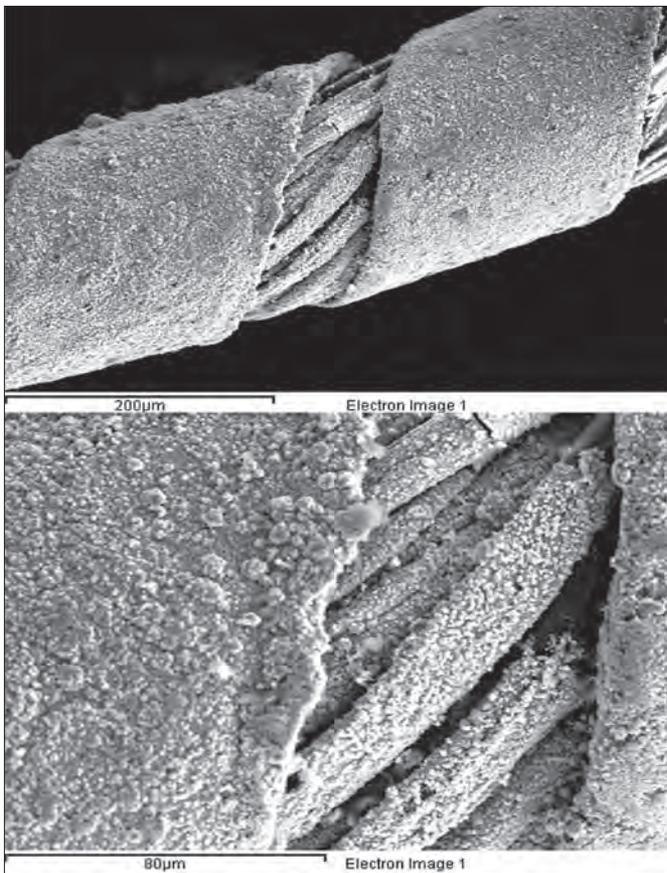


Figura 20. Imágenes SEM en modalidad BSE de un entorchado en plata dorada del siglo XV. Se aprecia la capa de corrosión superficial.

to del cloruro y del sulfuro de plata en forma de pequeñas burbujas. En determinados casos se ha llegado a observar el crecimiento de cristales de sulfuro de plata en forma de las características flores (Figs. 21, 22,23).

Las alteraciones en los elementos decorativos en cobre dorado o plateado

Durante la restauración del traje de luces del *Lagartijo*, datado a finales del siglo XIX, se ha evidenciado un severo problema de conservación de los elementos de metal perteneciente al bordado (Figs. 25, 26). En la observación de los canutillos y de las lentejuelas, se apreciaban espesas capas superficiales de tonalidad verde y rojiza, con un difuso fenómeno de destaque de la capa de dorado, que imposibilitaba cualquiera intervención directa de limpieza.

Los estudios han revelado que todos los elementos metálicos están elaborados en cobre dorado con una aleación plata/oro aplicado mediante electrólisis. Las observaciones con microscopía óptica y microscopía electrónica, y los análisis cualitativos EDX han permitido identificar la presencia de sales del cobre, detectando en algunas áreas el cloro, elemento que se puede asociar al fenómeno de corrosión del cobre o de la plata.

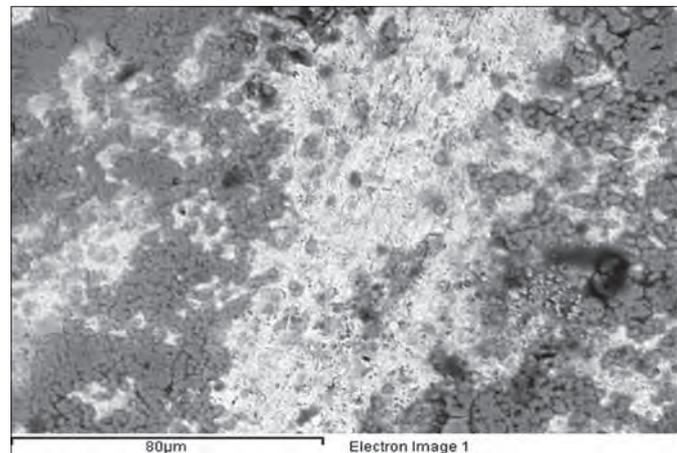


Figura 21. Imagen SEM en modalidad BSE de la superficie de una lámina en plata dorada con el crecimiento de los cristales de cloruros y sulfuros de plata.

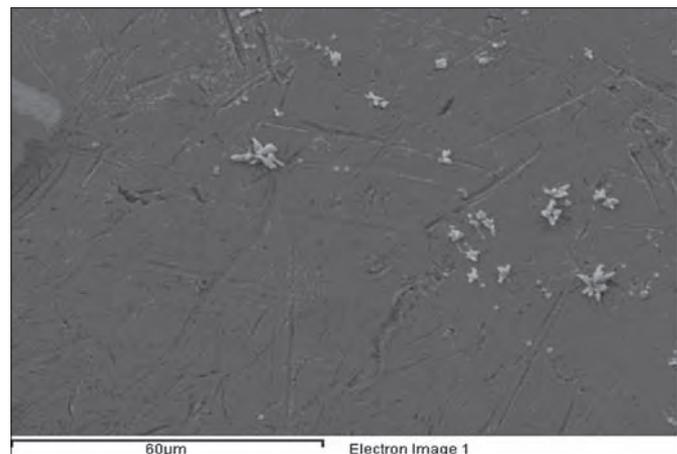


Figura 22. Imagen SEM en modalidad SE de la superficie de una lámina en plata dorada con el crecimiento de los cristales de sulfuros de plata.

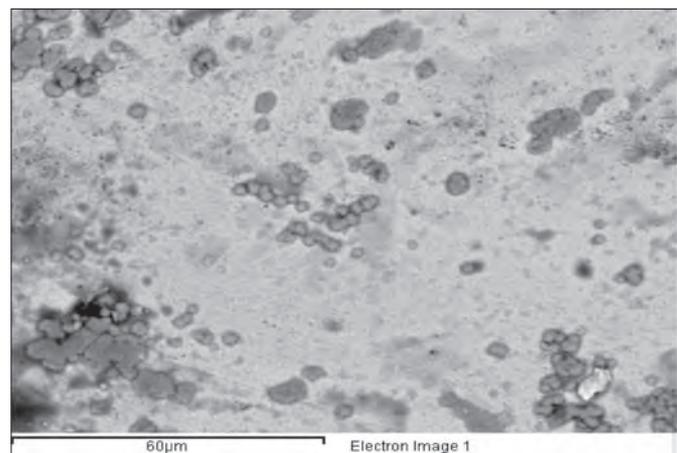


Figura 23. Imagen SEM en modalidad BSE de la superficie de una lámina en plata dorada con el crecimiento de los cristales de cloruros y sulfuros de plata.

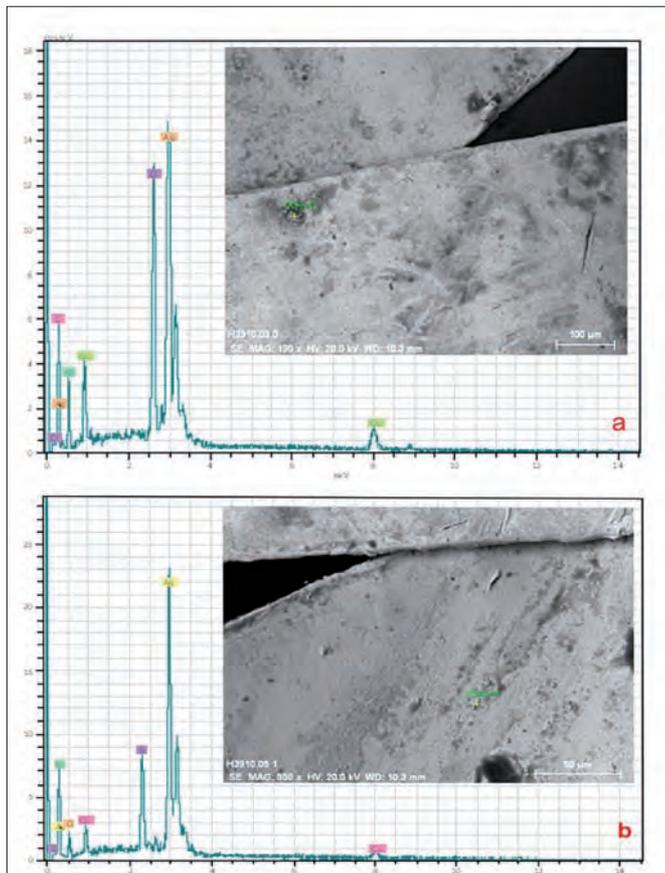


Figura 24. Espectros EDX sobre la presencia del cloruro de plata en los depósitos de la superficie externa de la lámina en plata dorada (a), y del sulfuro de plata localizado en un área de contacto entre el metal y las fibras de seda (b).

158

El fenómeno de desprendimiento es causado principalmente por la formación, por debajo del recubrimiento, de una capa rojiza de cuprita (Fig. 27).

Se observa el fenómeno de corrosión típico de pila galvánica entre metales con potenciales electroquímicos distintos (cobre-oro/plata), donde el cobre presenta mayor corrosión frente a los metales nobles. Este fenómeno se agrava en ambientes de temperatura y humedad inadecuados.

Degradación de las capas de recubrimiento

En muchos bordados y tejidos con aplicaciones de hilos metálicos dorados es común observar la pérdida de esta tonalidad dorada y del brillo de la superficie metálica. Esta alteración, como ya descrito antes, es debida a la presencia de los productos de neoformación que crean pátinas oscuras y opacas, como en el caso de la sulfatación de la plata.

Frecuentemente se puede observar una distribución irregular de la capa de oro que puede depender de la técnica de aplicación, de un extenso fenómeno de desgaste causado por la manipulación y el uso del tejido, o por el desprendimiento de la capa superficial



Figura 25. Hilos de canutillo en cobre dorado tomados del bordado del traje de luces del Lagartijo.

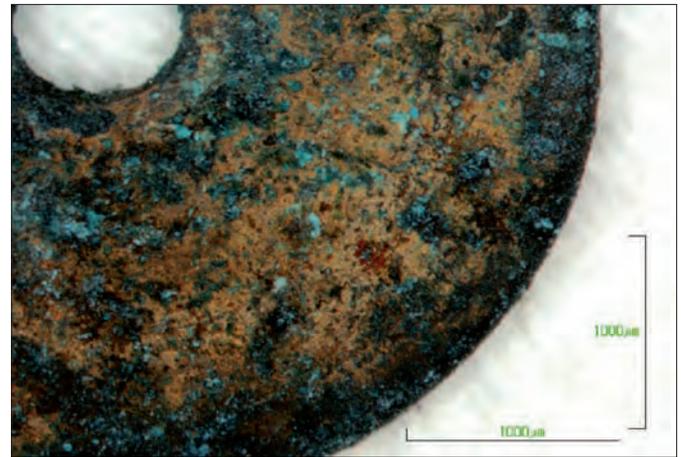


Figura 26. Detalle de la superficie de una lentejuela en cobre dorado perteneciente al bordado del traje taurino.

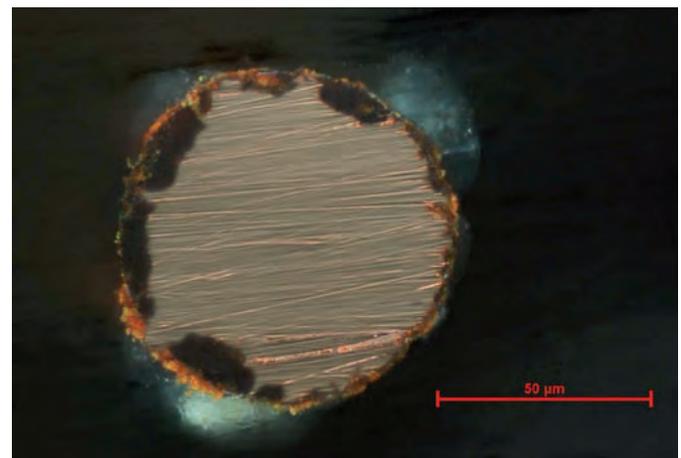


Figura 27. Sección transversal del canutillo en cobre dorado, se aprecia la formación de la cuprita a nivel superficial.

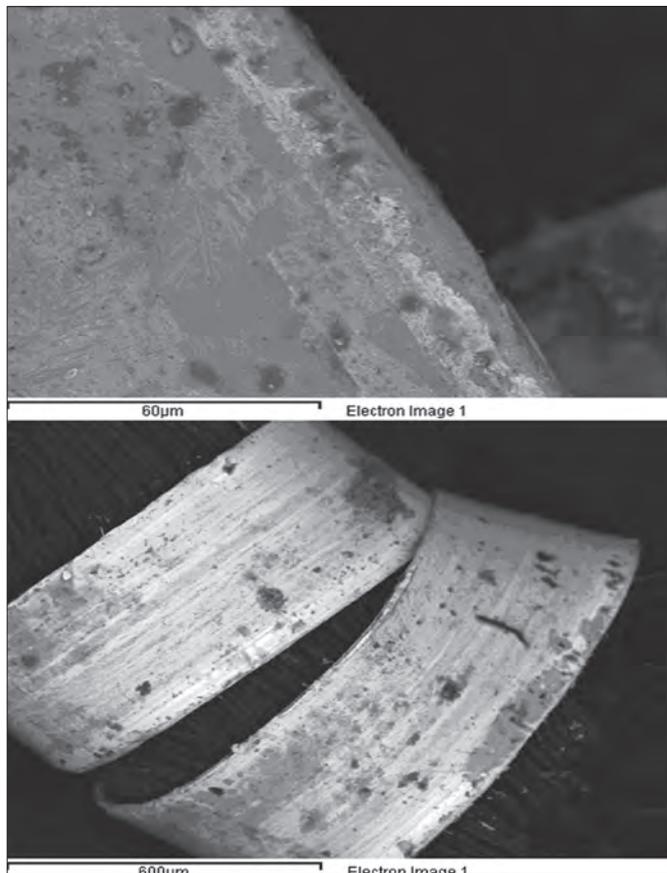


Figura 28. Imágenes SEM en modalidad BSE de la superficie de un entorchado en plata dorada. Se aprecian las lagunas superficiales correspondientes a la pérdida de la capa de recubrimiento.

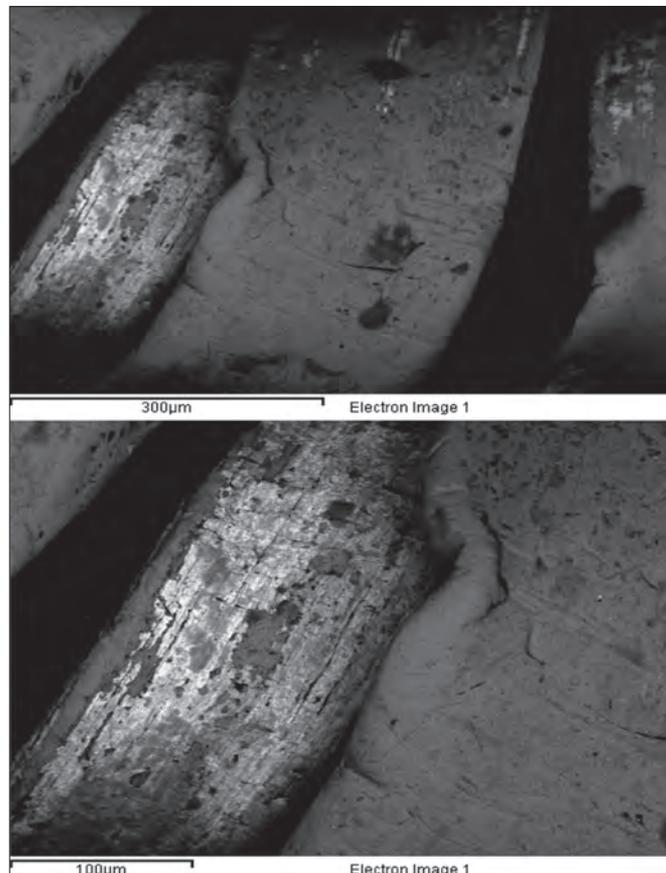


Figura 29. Imágenes SEM en modalidad BSE de la superficie de un entorchado en cobre dorado. Se observa la severa alteración de la superficie dorada.

(Figs. 28,29). Las observaciones, como en el estudio de la técnica de aplicación de la capa de recubrimiento, se realizaron con microscopía electrónica en modalidad electrones retrodispersados.

El desprendimiento de la capa superficial viene dado, generalmente, a la formación de una capa intermedia de oxidación o de corrosión que depende de la naturaleza metálica de la lámina. También se observa como las incrustaciones superficiales pueden crear tensiones mecánicas causando la separación y la sucesiva caída de la capa (Fig. 30).

La alteración químico-física del oro de Chipre

En el caso específico del oro de Chipre, los hilos presentan un estado de conservación muy precario, ya que las superficies muestran depósitos debidos a la corrosión del metal con formación de cloruros y sulfuros de plata, y depósitos de los contaminantes del medio ambiente (ej. yeso, aluminosilicatos, etc.). Es evidente el deterioro debido a la alteración de la superficie metálica por la formación de una extensa craqueladura, y el desprendimiento en numerosas áreas de la capa metálica, originado por las dilataciones del sustrato orgánico causado por variaciones termo-higrométricas ambientales (Fig. 31).

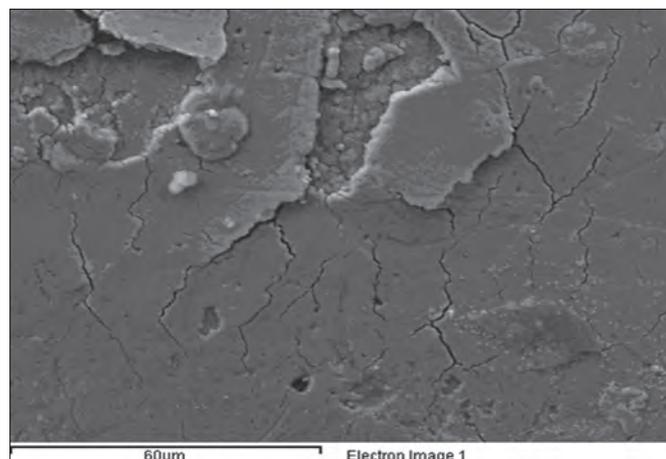
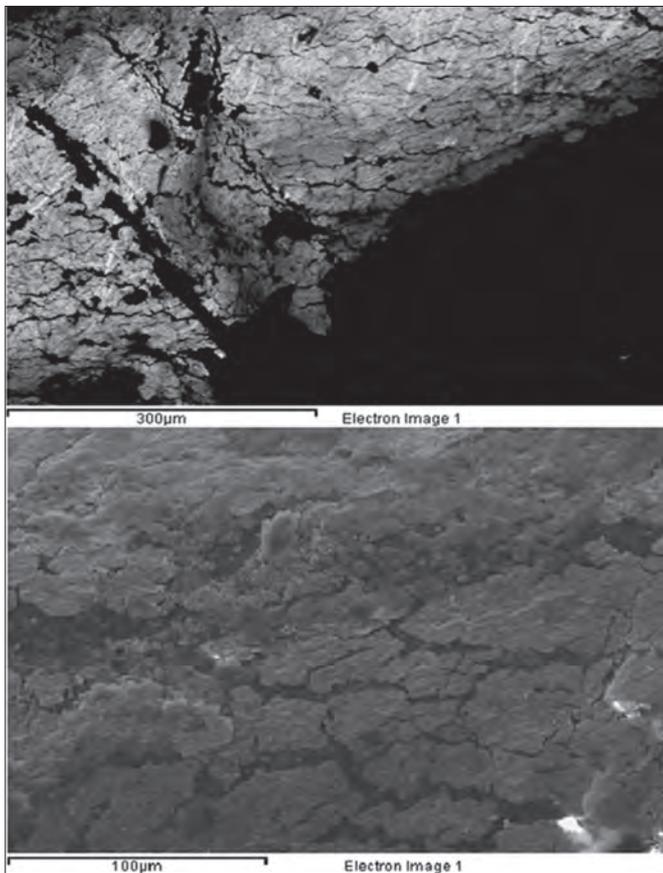


Figura 30. Imagen SEM en modalidad BSE de la superficie de una lámina en plata dorada con la espesa capa de los productos de corrosión.



160

Figura 31. Superficie plateada del oro de Chipre. En las imágenes MEB en modalidad SE y BSE se aprecia la severa alteración del metal.

Conclusiones

Las técnicas microscópicas, entre las cuales destaca la microscopía electrónica de barrido con sistema de microanálisis, se han confirmado como una de las metodologías de estudio más adecuada para el análisis de los elementos metálicos aplicados a las piezas textiles históricas.

Con la necesaria toma de pequeñas muestras es posible obtener una serie de datos necesarios para caracterizarlos tanto a nivel histórico, como tecnológico.

Mediante el MEB-EDX ha sido posible efectuar una importante investigación, identificando el material metálico que constituye el recubrimiento del alma en los hilos entorchados, en las laminillas u hojuelas, en lentejuelas, etc., y evaluar la secuencia tecnológica utilizada para la producción de estos elementos decorativos.

El trabajo además ha contribuido a definir el estado de conservación a nivel microscópico, evaluando exactamente el tipo de deterioro desarrollado en base a la distinta composición metálica del hilo.

Estos resultados nos aportan datos de gran valor para, posteriormente, aplicar los tratamientos más adecuados para la conservación de estas piezas textiles que forman parte de nuestro importante patrimonio.

Agradecimientos

The Hispanic Society of America de Nueva York.

Sección Arqueológica Municipal del Ayuntamiento de Valencia.SIAM.

Fotografías: Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (IVC+R): Pascual Mercé.

Bibliografia

VV.AA.: "Metal threads made of proteinaceous substrates examined by scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry" en *Studies in Conservation*, IIC volume 34, nº. 4, Noviembre 1989.

VV.AA.: *Botticelli e il ricamo del Museo Poldi Pezzoli, storia di un restauro*, edición a cura del Museo Poldi Pezzoli, Milano, 1989.

VV.AA.: *Vestiduras pontificales del Arzobispo Rodrigo Ximénez de Rada. S.XIII. Su Estudio y Restauración*, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Ministerio de Cultura, 1995.

VV.AA.: *España y Portugal en las rutas de la seda – Diez siglos de producción y comercio entre Oriente y Occidente*. Comisión Española de la Ruta de la Seda. Publicacions Universitat de Barcelona, Barcelona, 1996.

VV.AA.: "Tejidos hispanomusulmanes, en Bienes Culturales", *revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, Ministerio de Cultura, 5/2005.

VV.AA.: "Fili in rame argentato dall'abito di gala della duchessa Maria Luigia di Parma (1791-1847): indagini sulla tecnologia di produzione e sullo stato di conservazione" en *La metallurgia italiana*, numero 9, 2006, pp.: 25-31.

BUSS, Ch.: *Il paliotto del pellicano: un caso aperto*, en *Quaderni di studi e restauri del Museo Poldi Pezzoli*, Silvia Editrice, Milano, VII/2007.

CARMIGNANI, M.: *I ricami dal VIX al XVII secolo nella collezione Carrand*, Firenze, 1991.

DARRAH, J.A.: "Metal Threads and Filaments" en *Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artefact*, Summer School press, University of London, 1987, pp.: 211-221.

JÁRÓ, M.: «Gold embroidery and fabrics in Europe: XI-XIV Centuries» en *Gold Bulletin*, volume 23, nº. 2, 1990.

JÁRÓ, M., TÓTH, A.: «Deterioration of metal threads and other metallic decorations made of gold, silver or gilt silver on museum textiles» en *METAL95 Problems and Conservation*, Semur en Auxois, 1995, pp.: 201-208.

KARATZANI, A.: «Characterisation of metal threads from Byzantine Greek ecclesiastical textiles: the contributions of analytical investigation to the study and preservation of textiles» en *METAL07 Study and conservation of composite artefact*, Amsterdam, 2007, pp.: 20-25.

PAOLOZZI STROZZI, B.: *Il parato di Niccolò V per il Giubileo del 1450*, Museo Nazionale del Bargello, Firenze, 2000.

VANOCCIO, Biringuccio, *De la Pirotechnia*, The M.I.T. Press, Cambridge, 1966.

Vocabulario técnico de tejidos. Centre International d'Etude des Textiles Anciens, C.I.E.T.A., Lyon, 1968.

Capítulo 4

Innovación

4.1. Estudio y cartografía de sales en paramentos pétreos: innovaciones tecnológicas con este propósito

Manuel Blanco Domínguez*

Oscar Buj Fandos*

Francesca Colucci**

Josep Gisbert Aguilar*

Pedro López Julián*

Belén Franco López*

Ignacio Mateos Royo*

Pilar Navarro Echeverría*

*Equipo Arbotante/Geotransfer. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza

**Instituto Geológico y Minero. Ministerio de Industria. Madrid

162

Introducción

Los problemas de sales, omnipresentes en materiales arquitectónicos, son una de las principales causas de su deterioro. Además, todavía son mal conocidos los sistemas geoquímicos de interacción agua-material que están en el origen de las sales; también hay numerosas incógnitas sobre el control que ejerce el que la mayor parte de su fenomenología se desarrolle en el interior del sistema poroso de los materiales.

Una parte importante de este desconocimiento se debe a la falta de metodologías que permitan –de una forma rápida y económicamente viable– conocer la distribución de sales sobre la superficie arquitectónica y los cambios que en ella se producen. El conocimiento de esta distribución es importante para acotar los puntos donde es relevante estudiar los materiales en profundidad con técnicas que, necesariamente, van a ser más lentas y costosas.

Presentamos aquí un método muy rápido de cartografía de sales que permite conocer la distribución superficial de las mismas y seguidamente discutimos los criterios empleados para la realización de la cartografía y la información que puede obtenerse de la misma. El método se basa en una simplificación de una idea de Borelli (1994) desarrollada por nuestro equipo (Gisbert *et al.*: 2002) y ha sido empleado en la caracterización de las patologías de sales en numerosos edificios de patrimonio en los últimos diez años.

Sistema de Medida

El sistema se basa en la creación de una red de puntos y en la medida de conductividad de cada uno de ellos. En lo que respecta a la ejecución del método los problemas a evaluar y resolver han sido:

Soporte que captura las sales superficiales (Fig. 1)

Se trabaja con una oblea diseñada para cada tipo de sustrato. El material de la oblea es un material poroso con un sistema capilar que se coloca humedecido y que compite con la base pétreo por capturar la sal combinando mecanismos de succión de agua y difusión salina. En sustratos irregulares y de bajo valor artístico empleamos una oblea de pulpa de celulosa; para pinturas murales o sustratos muy delicados empleamos una oblea de hidroxipropilcelulosa con interposición de papel japonés, en casos intermedios se usan obleas textiles.

Humectación del soporte y del sustrato pétreo

Investigaciones previas (Gisbert *et al.*: 2002) nos han llevado a concluir que la cantidad de agua es la mínima tolerable en el soporte aplicada sobre un sustrato seco. Interesa que la sal pase al soporte de medida por difusión; el exceso de agua siempre provoca un bulbo de succión en el material del sustrato y una dilución de la sal en un volumen mucho mayor del inicial.

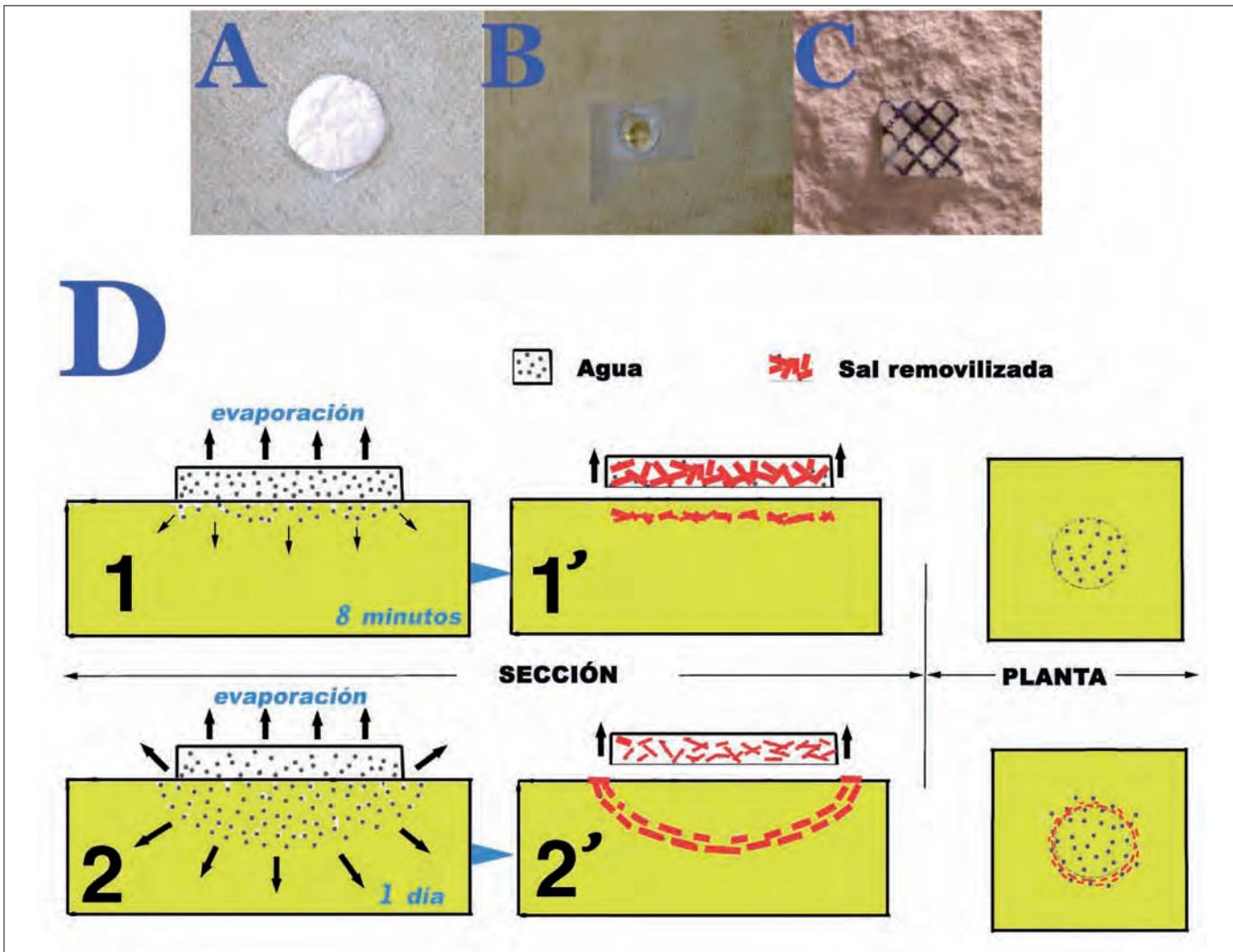


Figura 1. A-C.-Hemos desarrollado un soporte de medida en función de las características del sustrato a medir. En todos ellos se puede interponer un papel japonés si las características del soporte lo aconsejaren.

El soporte de fibra de papel (A) (arbozell) es el más versátil en cuanto a su posibilidad de colocación sobre un sustrato irregular. También es el ideal para realizar análisis químico de la sal extraída.

El soporte de hidroxipropilcelulosa (B) es muy adecuado (con interposición de papel japonés) para soportes con pintura mural pues es la "oblea" que menos agua aporta al sustrato al tiempo que la sal pasa rápidamente al gel, dada su notable capacidad de difusión.

El soporte textil (C) es apropiado para situaciones intermedias entre las dos anteriores, siendo su principal ventaja la rapidez de aplicación.

D.- Esquema de comportamiento de una oblea en función de la cantidad de agua y tiempo de aplicación.

1.-Comportamiento con agua reducida y tiempos cortos. Nótese la ausencia de halo perimetral y la mayor tasa de extracción de sal.

2.-Comportamiento con exceso de agua y tiempos prolongados. En esta situación se forma halo salino perimetral, permanece más sal en el sustrato y se ubica a mayor profundidad.

Tiempo de aplicación del soporte

Es conocido el tiempo el funcionamiento oscilante de los sorbentes empleados en restauración. Redman, Ch. (1999) hace una revisión general de este fenómeno que básicamente consiste en una cesión, en primera instancia, de líquido del sorbente al sustrato, hasta que la evaporación superficial en el sorbente fuerza un retorno del líquido cedido al sustrato hacia el sorbente. A esta primera oscilación la llamaremos "primer reflujo".

Nosotros (Gisbert *et al.*: 2002) hacemos un estudio particular del funcionamiento en el arbozell, midiendo con una sonda los reflujos. Sobre un sustrato impermeable, estos reflujos son muy regulares y constantes pero cuando se coloca el arbozell sobre un sustrato poroso (una roca) el funcionamiento es muy irregular. En las determinaciones experimentales realizadas el "primer reflujo" de agua hacia el sorbente se produce entre los 6 y 15 primeros minutos; esto nos obliga a realizar medidas del tiempo del "primer reflujo" en cada caso para establecer el tiempo de permanencia de las obleas según el sustrato y las condiciones ambientales.



Figura 2. Sonda para conductímetro que permite medir la conductividad superficial. El equipo de medida es comercial. La sonda está fabricada sobre diseño del equipo Arbotante por el Servicio de Instrumentación Científica de la Universidad de Zaragoza.

Nuestra experiencia nos lleva a concluir que, para establecer el tiempo del primer refluo, además del tipo de sorbente, tipo de sustrato y condiciones ambientales (humedad, temperatura, insolación directa etc.) hay que tener en cuenta un factor errático derivado de la aplicación manual del arbozell y que condiciona el grado de conexión entre los sistemas capilares del sustrato y del sorbente (presión que se hace con los dedos al colocar el sorbente, estilos personales de colocación, etc.). Para resolver este problema hemos creado una pistola que proyecta la papeta de arbozell con presión y metodología “standard”. La pistola resuelve el problema en las grandes papetas (aplicaciones de desalación) pero no en las obleas para la cartografía, que consecuentemente deberán aplicarse de la forma más standard posible, con el mismo “gesto” operativo y con la misma presión de colocación.

Sistema de medida de la conductividad/medida de las sales

La salinidad en cada punto se determina por medio de una sonda que mide la conductividad superficial de la oblea. La sonda es de diseño y fabricación propia (Fig. 2) aunque opera con un conductímetro comercial de la casa CRISON. La precisión es más baja que si retiramos y diluimos la oblea en un estándar de agua destilada, pero la ganancia de tiempo compensa con mucho la pérdida de precisión.

Cuando se desea una evaluación más completa de las sales, se realiza una extracción con papeta convencional (sobre un máximo salino y con los tiempos medidos para el primer refluo) con lavado posterior de la papeta y análisis químico subsiguiente.

Análisis químico (siempre posible) y físico (cuando es posible) de las sales presentes

Para conocer la especie mineralógica de sal presente es necesaria una cierta cantidad de eflorescencia (0,2 gr.) y aunque esta cantidad es pequeña, en muchos casos no es posible obtenerla y en los

más favorables sólo se consiguen datos en algunos puntos de la superficie estudiada. El estudio de la especie salina es especialmente complejo pues hay que mantener la humedad y temperatura del lugar de muestreo para evitar una transformación de la especie/s mineralógica/s.

Contrariamente, con técnicas geoquímicas y extrayendo la sal con obleas de arbozell podemos tener un dato semicuantitativo de cualquier punto de la superficie que deseemos investigar. Así, las metodologías de análisis químico permiten una aproximación muy exacta de la composición y movimiento salino en los muros de los edificios históricos (ver ejemplo en Fig. 3)

Medida de sales en profundidad

En este caso, las medidas experimentales (en el estado actual de conocimientos) son dificultosas, caras, destructivas y lentas. No existe otro procedimiento que realizar una perforación seguida de una medida de conductividad del polvo (por tramos de perforación) con algún protocolo adicional para medir la conductividad base del material (ver el nuestro en Blanco *et al.* 2005) y discriminar de esta forma el intervalo de conductividad que se debe a la presencia de sales.

El líquido resultante de la extracción puede ser sujeto de un análisis químico y, consecuentemente, obtener información “cualitativa y cuantitativa” muy detallada. Con estas metodologías podemos obtener “cortes” de distribución de sales en el interior de un material (ver ejemplo en Fig. 4).

Para la elaboración de estos cortes es necesaria una cierta modelización del comportamiento de los materiales durante el secado y de la distribución de sales en profundidad de forma que pueda extrapolarse el contenido de sales en el interior de los materiales con un mínimo de perforaciones (Blanco, Colucci, Gisbert, 2006a).

Combinando las medidas superficiales de sales y apoyándose en experimentos de laboratorio, tenemos medianamente elaborado un modelo de movimiento de las sales a través de sistemas

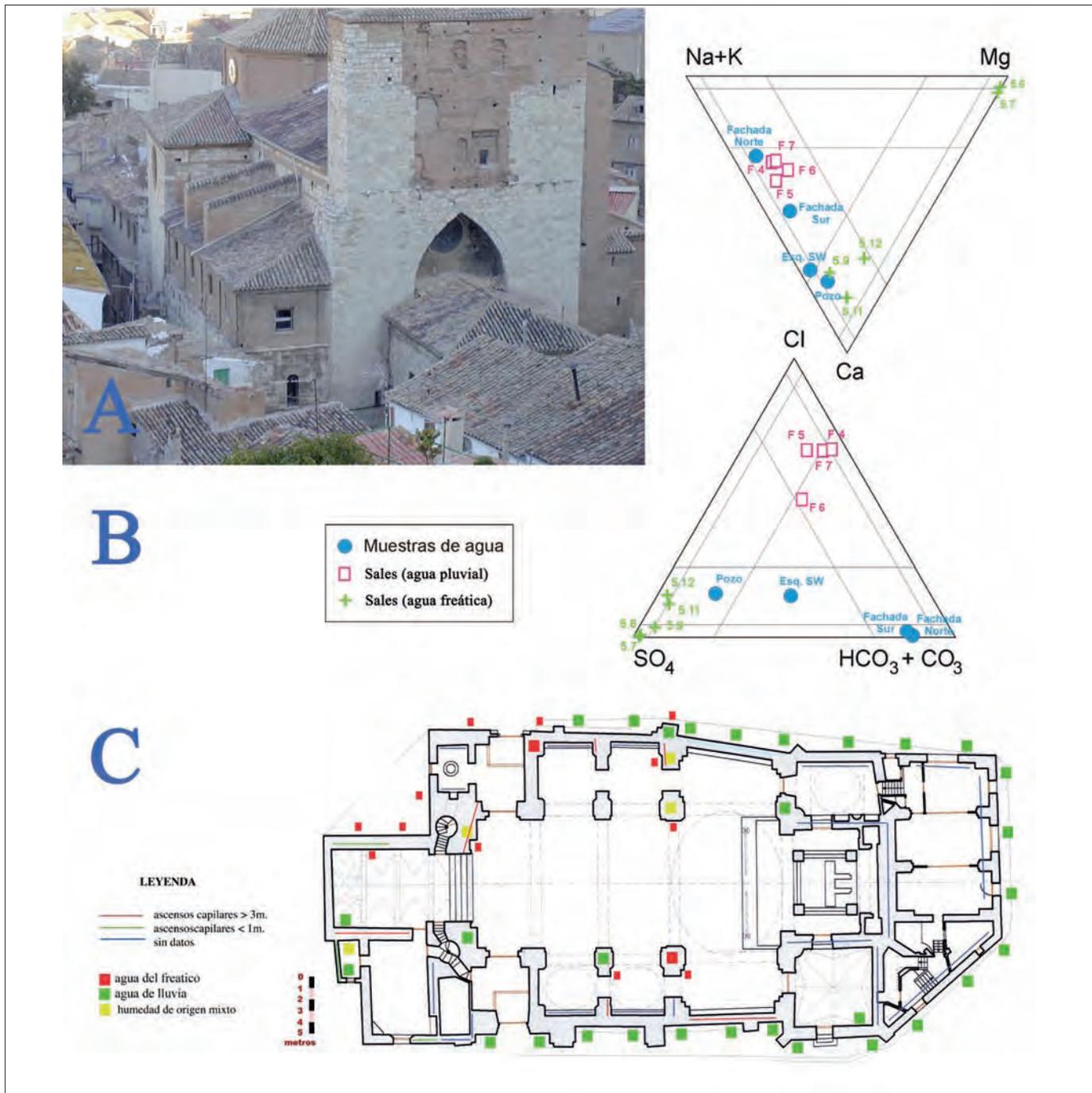


Figura 3. Geoquímica de sales asociada los mapas de sales. Ejemplo en la iglesia de Falces (Navarra).

A.-Vista general de la iglesia. Todo el perímetro exterior e interior (pilastras exentas incluidas) presentaban ascensos capilares y costras salinas. El edificio es muy complejo pues desde su creación en el siglo XII ha sufrido continuas reformas y adiciones, hasta el punto que hay tres pavimentos superpuestos. Dada la complejidad de la fábrica y la gran cantidad de sales que afectaban el paramento era muy complicado establecer, cuándo la humedad provenía de cimientos o cuando lo hacía de cubiertas.

B.-Se analizó el agua que procedía de cubiertas un día de lluvia (cubierta de fachada norte y cubierta de fachada sur) así como el agua de un regato de escorrentía que incidía sobre el muro oeste y el agua de pozo próximo a la iglesia. Estos análisis se cotejaron con el análisis de sales extraídas con papetas de forma que donde el agua provenía de cubiertas, la geoquímica de las sales coincidía con la del agua de cubiertas, y cuando la humedad provenía de cimientos, la geoquímica de las sales coincidía con la del agua del pozo. Los aniones resultaron ser los elementos que más discriminaban. Los elevados valores de magnesio indicaban que la humedad había percolado a través de un hormigón de actuaciones recientes.

C.- Con los datos anteriores se indicó en la planta el origen de las humedades. Este mapa interpretativo permite diseñar las actuaciones arquitectónicas pertinentes en cada punto.

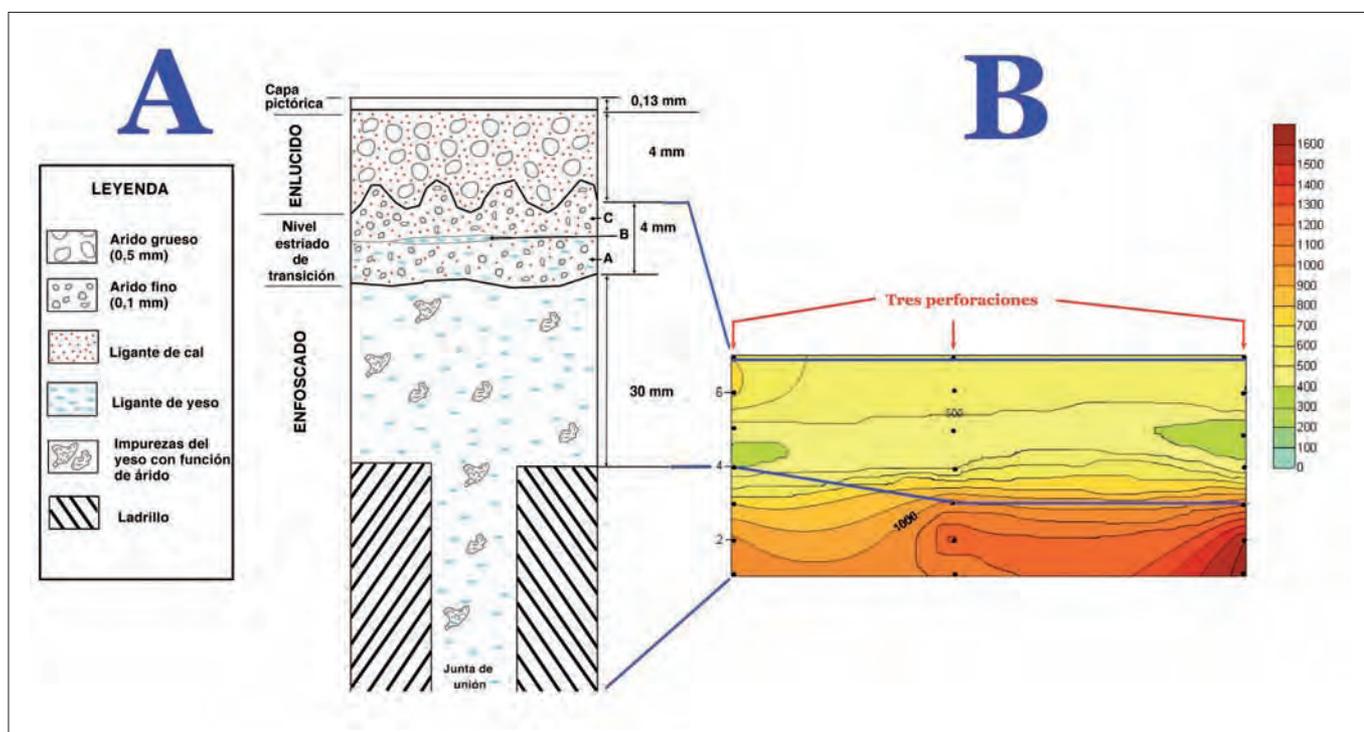


Figura 4. Cartografía de sales en profundidad. Ejemplo de la bóveda Regina Martirum con frescos de Francisco de Goya en la Basílica del Pilar. En la actuación de 2004/05 se restauró una gotera que había desprendido una parte de la capa pictórica generando una gran acumulación de sales. Las pinturas se arrancaron y antes de volver a adherirlas se estudiaron las acumulaciones salinas en el enfoscado para posteriormente proceder a la desalación. A.- Estratigrafía de morteros y capa pictórica. El arranque incluía capa pictórica más enlucido (despegue en el nivel estriado). B.- Uno de los cortes realizados en los que se representa la cantidad de sales presentes a distintas profundidades. El mortero de yeso, muy poroso, tenía una eflorescencia superficial que se retiró con brocha, pero el “cuerpo” del mortero tenía escasa concentración de sales; contrariamente el ladrillo, microporoso y con velocidad de secado mucho más lenta que el enfoscado, había acumulado una gran cantidad de sales y presentaba, además, una retención selectiva del magnesio.

166

porosos que tiene en cuenta el tamaño del sistema de poros y su grado de conexión. (Colucci 2002, Blanco *et al.* 2006b, Buj *et al.* 2009 y Colucci *et al.* 2009).

Interés de los resultados

Con las cartografías salinas elaboradas con el método explicado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

A) Identificación de los frentes húmedos

La zona de máxima evaporación coincide con la de máxima acumulación salina. Su morfología tiene una relación estrecha con la localización de la fuente de humedad (Fig. 5). En la interpretación de esta morfología hay que tener en cuenta que la disposición inicial de acumulación de sales puede modificarse a posteriori por impactos superficiales de lluvias cortas y por las variaciones ambientales de humedad y temperatura.

B) Identificación de la procedencia del agua y materiales atravesados

Este tema lo hemos abordado a través de una metodología de análisis geoquímico integral desarrollado sobre la hipótesis de

que los solutos van a dar lugar a las sales tienen su origen en cuatro posibles composiciones:

1. Agua freática en un pozo próximo al edificio.
2. Agua de lluvia tras su percolado por las cubiertas.
3. Extracto en agua destilada de los distintos materiales del edificio.
4. Extracto con papeta de las sales en un punto determinado del monumento.

Es evidente que las sales presentes en un punto “4” del edificio serán resultado de las sales de una fuente freática de humedad más lo disuelto en los materiales atravesados (1+3) o de una fuente pluvial de humedad más lo disuelto en los materiales atravesados (2+3) o, en los casos más complicados, de la suma de todos (1+2+3). Esta metodología permite identificar la procedencia de la humedad que generan las sales y también si algunas de ellas provienen preferentemente de alguno de los materiales atravesados. Nuestro trabajo en la Bóveda Regina Martirum (Franco *et alii*: 2008) es un ejemplo exhaustivo de estas posibilidades; el ejemplo de la Fig. 3 abunda en el mismo sentido.

C) Control en la evolución de las sales tras actuaciones de restauración.

En el desarrollo de los protocolos de aplicación de obleas,

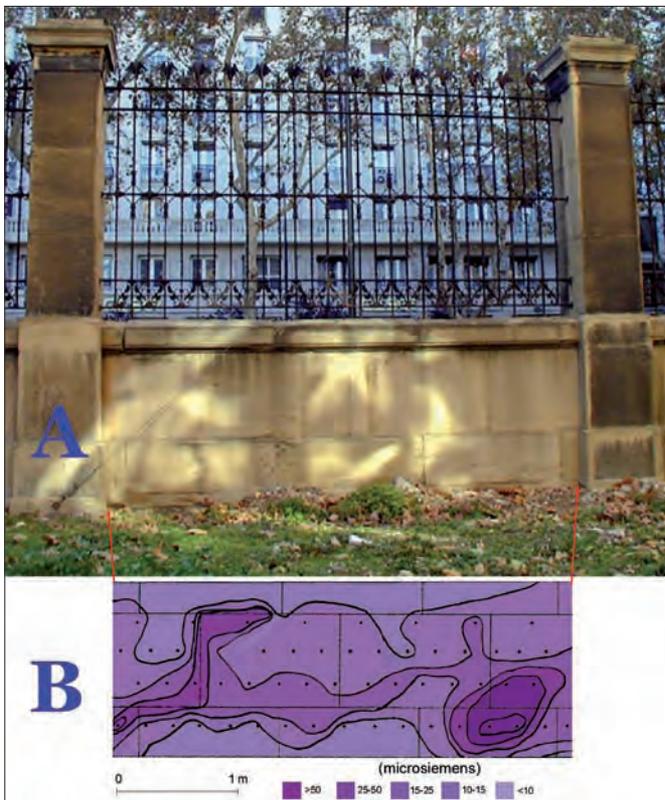


Figura 5. Valla (A) del edificio “Paraninfo” de la Universidad de Zaragoza. Cartografía superficial de sales (B) de un tramo de la valla perimetral. En la cartografía se aprecia una acumulación de sales entre los 50 y 70 cm. de altura que se mantiene constante en toda la corrida y que corresponde a los ascensos capilares en el muro provocados por el agua de lluvia desde el terreno anexo. En los dos lados y junto a las dos pilastras que limitan el paño hay dos máximo salinos provocados por orines. En el máximo de la izquierda se aprecia que las sales se han difundido por las juntas del sillar. Esto indica que la junta de sillar esta abierta y que por su posición –incluso en lluvias cortas– el agua percola hacia el interior del muro mojándolo más y haciendo que esa zona seque más tardíamente. Por difusión la sal emigra hacia esas zonas de secado tardío.

Señalemos que las juntas de sillar pueden tener unos comportamientos encontrados. Si están en buen estado y selladas con mortero tradicional, no difunden la sal. Si están deterioradas (como en este caso) o rejuntadas con cemento Pórtland, la acumulan.

uno de los fenómenos que comprobamos fue que la aplicación de una oblea con exceso de agua genera un halo salino perimetral a la zona de aplicación. En el estudio de restauraciones antiguas hemos constatado que la reposición del mortero en las pérdidas genera un halo salino semejante en las pinturas originales que rodean a la pérdida (ver Fig. 6). La documentación de este proceso nos permite establecer estrategias para evitarlo y verificar la eficacia de las desalaciones.

D) Cartografía cuantitativa y composicionalmente selectiva

El uso de obleas de arboceíl combinado con el análisis geoquímico permite medidas cuantitativas de uno o varios cationes salinos mediante el lavado de la oblea y posterior análisis químico del

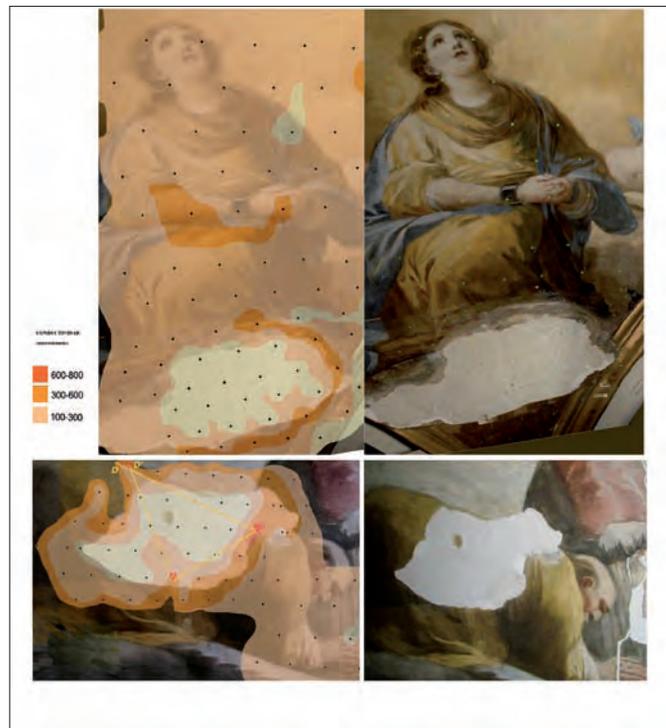


Figura 6. Cartografía de sales documentando “halos” salinos. Ejemplo de la bóveda “Regina Martirum” con frescos de Francisco de Goya en la Basílica del Pilar.

En los dos ejemplos presentados de la bóveda se aprecian restauraciones antiguas (fruto de goteras históricas que provocaron pequeñas pérdidas pictóricas) que se retocaron aprovechando la actuación del 2004/05. Antes de retocarlos se estudió su estado y, entre otras actuaciones, se realizaron las cartografías salinas superficiales (fotos de la izquierda).

En ambos casos se aprecia un halo salino periférico a la pérdida pictórica y resultado de la removilización de sales producida por el agua del mortero de restauración al aplicarse sobre el sustrato con sales. En las nuevas reposiciones realizadas en la actuación del 2004/05 se tomaron diversas medidas para eliminar esos “halos salinos perimetrales”.

líquido. Esta aproximación puede ser conveniente cuando, como en el caso de la catedral de Tudela (ver Fig. 7), hay un elemento salino que es mucho más agresivo que el resto de sales.

E) Control de los movimientos de la sal: Secado y evolución posterior.

Los experimentos de laboratorio (Colucci 2002, Blanco M. *et al.* 2006a) y los datos cartográficos (fig. 4 y 8) han probado que, durante el secado, la sal emigra desde los materiales macroporosos (primeros en secar) a los microporosos (últimos en secar).

Los cambios de humedad y temperatura del aire son, sin duda, otro motor en el transporte cuyos efectos pueden estudiarse con la metodología aquí expuesta. Datos recientes nos permiten pensar que el flujo de vapor de agua a través de los muros puede ser un mecanismo incluso más importante que el anterior; éste es un camino poco explorado ya que no disponemos de una forma eficaz de medir los flujos de vapor de agua a través de muros en paramentos históricos.

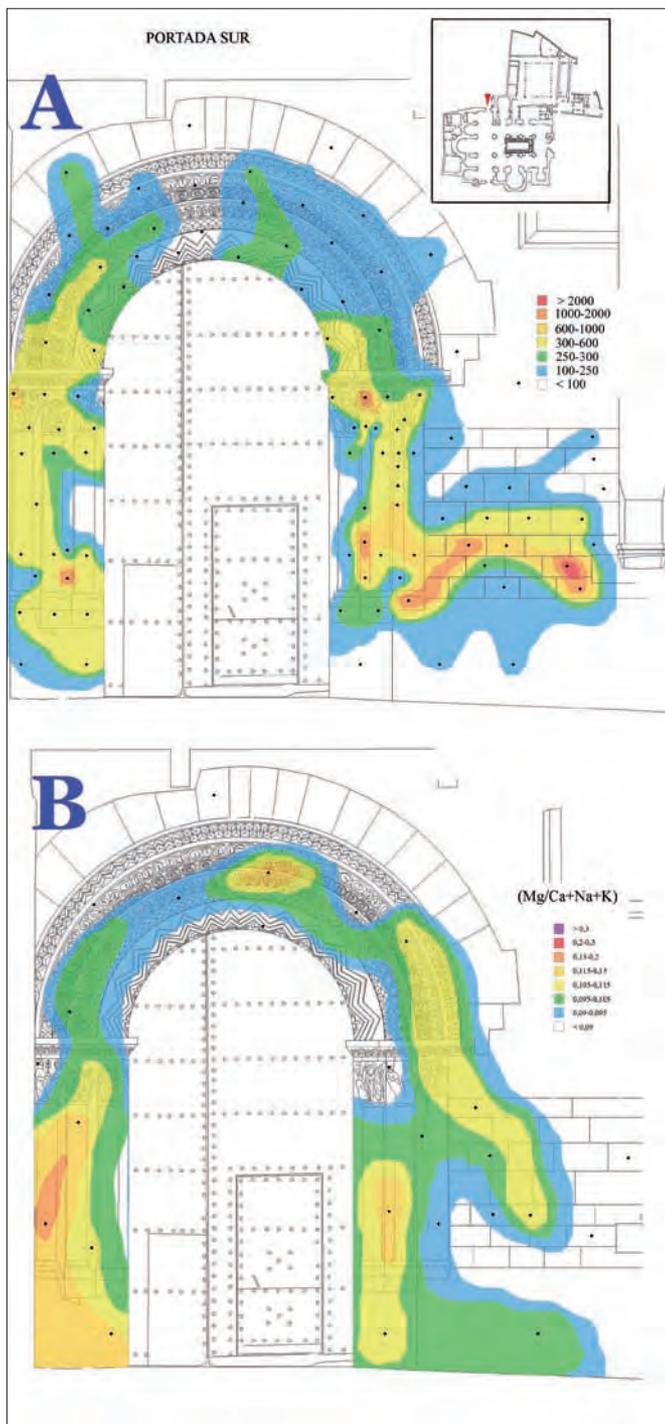


Figura 7. Cartografía de sales con representación cuantitativa de un determinado elemento. Ejemplo de la portada Sur de la catedral de Tudela.

A.- Cartografía del total de sales realizada por conductividad.

B.- Cartografía cuantitativa de la relación de magnesio frente a otros cationes.

Las zonas más sensibles a sufrir daños importantes son aquellas donde se superpone alto contenido salino y alto contenido en magnesio.

Las pautas de movimiento del magnesio, muy diferentes a las del sodio y del potasio, han resultado ser una constante pues en las cartografías de las otras dos portadas, tiende, como en ésta, a acumularse en las zonas bajas y en el centro del arco.

Conclusiones

Hemos puesto a punto un sistema de cartografía de sales en paramentos históricos que se está revelando muy eficaz para establecer:

- Distribución y composición de las sales en los paramentos pétreos. Relación de las distintas sales con las patologías asociadas.
- Posición de los frentes húmedos y origen espacial de la humedad.
- Origen de la humedad (tipo de agua: freática o pluvial) y materiales atravesados.
- Movimientos y cambios de la paragénesis salina en el edificio considerado.

Agradecimientos

Deseamos mostrar nuestro agradecimiento a la Institución Príncipe de Viana (Navarra), Instituto del Patrimonio Cultural de España, Dirección General de Patrimonio de la Diputación General de Aragón y a la empresa Tracer Conservación y Restauración, por la autorización para el uso de datos procedentes de Informes realizados para cada una de estas entidades.

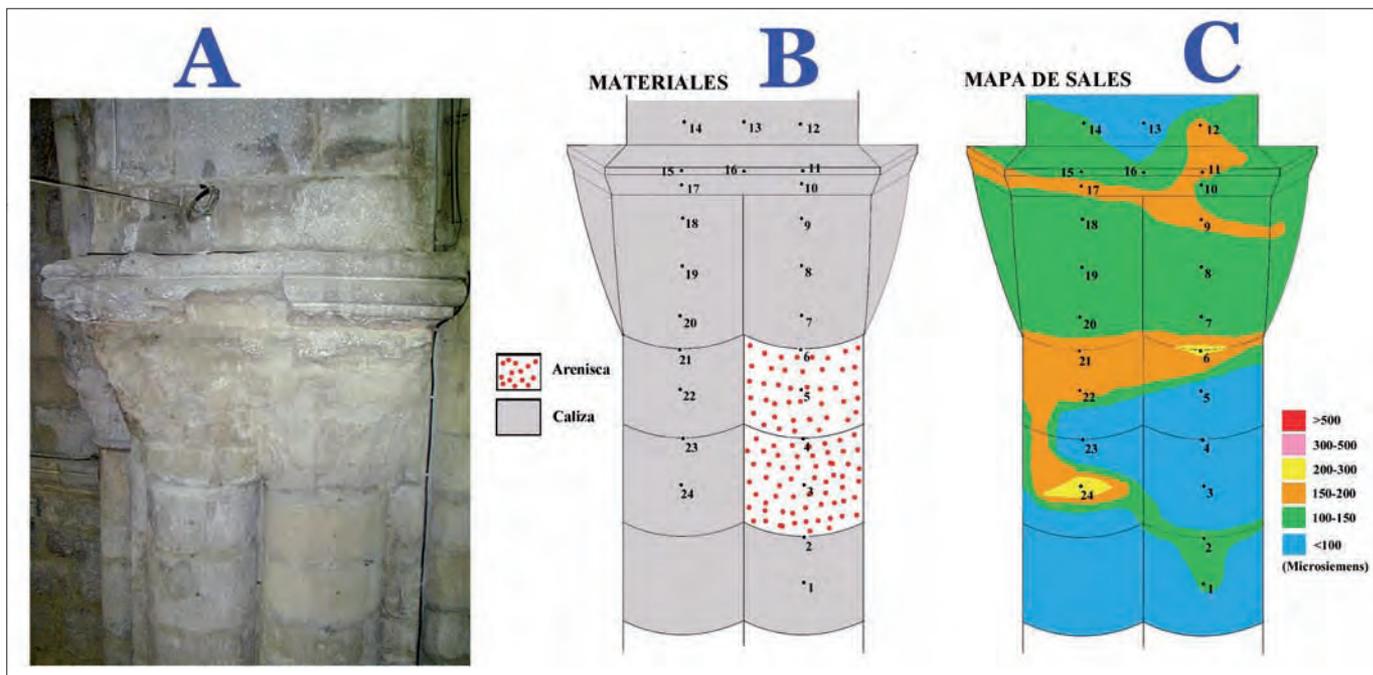


Figura 8. Movimientos de la sal durante el secado. Ejemplo en un capitel del interior de la catedral de Tudela.

En el caso que presentamos, las sales son resultado de una intrusión de agua de cubiertas (la gotera intrusa agua desde la parte superior izquierda de la foto A que ya estaba reparada cuando estudiamos el capitel.

B.- Esquema litológico del capitel y la pilastra. La mayor parte de la fábrica esta constituida por una caliza micrítica con una porosidad de tipo microporo. En una restauración de 1983 se sustituyeron dos sillares de caliza por sillares de arenisca del valle del Ebro (macroporosa).

C.- En la cartografía salina se aprecia como la sal se acumula en las partes mas altas, también en una junta entre el capitel y los sillares de la pilastra (junta sellada con mortero Pórtland) y también en la caliza en la periferia de los sillares de arenisca por efecto de la difusión de la sal hacia el material que más tiempo tarda en secar (la caliza).

Bibliografía

BLANCO, M.; COLUCCI, F.; GISBERT, J. y LOPEZ, P. (2005): "Protocolo para establecer la conductividad base de un material". *II Congreso de Investigación en Conservación-Restauración del Patrimonio Cultural*, Barcelona.

BLANCO, M.; COLUCCI, MF.; GISBERT, J. (2006a): "Modelo de distribución de las sales en materiales pétreos porosos". Libro de Actas del X Simposio sobre Centros Históricos y Patrimonio Cultural de Canarias, CICOP, pp. 60-67.

BLANCO, M.; COLUCCI, MF.; GISBERT, J. (2006b): "Modelo de movilización de sales en materiales pétreos porosos: Un caso de desalación". Libro de Actas del X Simposio sobre Centros Históricos y Patrimonio Cultural de Canarias, CICOP pp. 135-139.

BLANCO, M.; COLUCCI, M.F.; GISBERT, J.; FRANCO, B.; LÓPEZ P.; SANCHEZ, A. (2006): "I Sali Negli Interventi di Restauro: Cartografia e Diagnostica" en *Le Risorse Lapidarie dall'antichità ad oggi in Area Mediterranea*. Canosa di Puglia (Bari). Vanni Badino y Giuseppe Baldassarre Ed.: 123-128.

BORELLI, E. (1994): "Standardization of removal salts method from porous support and its use as diagnostic tool". *III Intern. Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. Ed. Fassina, V.; Ott, H.; Zezza, F., Venice pp.163-167.

BUJ FANDOS, O.; MCKINLEY J.; GISBERT AGUILAR, J.; SMITH B.; BLANCO DOMINGUEZ, M. y COLUCCI, F. (2009): "Evaluation of the Susceptibility to salt weathering: Permeability measurements", *VII forum italiano di Scienze Della Terra*. Geoitalia, Rimini: Vol 3, pp. 262.

COLUCCI, F. (2002): *Studio sulla mobilità dei Sali in materiali lapidei con diversa porosità: applicazioni nel restauro del patrimonio architettonico in materiali lapidei con diversa porosità: applicazioni nel restauro del patrimonio architettonico*, Tesis de Laura, Departamento di Scienze della Terra e Geologico Università di Bologna.

COLUCCI, F.; GISBERT AGUILAR, J.; BALTUILLE, J.M.; BUJ FANDOS, O. (2009): "Salt Distribution mapping on building stones: comparison of destructive and no-destructive techniques", *VII forum italiano di Scienze Della Terra*, Geoitalia, Rimini: Vol 3, pp. 265.

FRANCO OCHOA, B.; GISBERT AGUILAR, J.; MATEOS ROYO, I.; NAVARRO ECHEVARRÍA, P.; LÓPEZ JULIÁN, P. (2008): "Evaluación del estado de salinización de las pinturas murales de Goya en la bóveda Regina Martirum de El Pilar de Zaragoza", *Bienes Culturales*, nº 8, "Ciencias Aplicadas al Patrimonio", pp. 183-195.

FRANCO, B.; GISBERT, J.; COLUCCI, M. F.; MATEOS, I.; NAVARRO, P.; BLANCO, M.; BUJ, O. (2008): "Salt crystalization in the Goya's frescos (Zaragoza, Spain): features, desalination and restoration criteria". *Salt weathering on buildings and stone sculptures*, Copenhagen: 229-236.

GISBERT, J.; FRANCO, B.; MATEOS, I.; NAVARRO, P. (2002): "Deterioro de los materiales pétreos por sales: Cinética del proceso, cartografía y métodos de extracción". *I Congreso GEIIC*. Valencia: 287-294.

GISBERT AGUILAR, J.; BLANCO DOMINGUEZ, M.; BUJ FANDOS, O. y COLUCCI F. (2009): "Evaluation of the Susceptibility to salt weathering: Salt cartography ", *VII forum italiano di Scienze Della Terra*, Geoitalia, Rimini: Vol 3, 261.

REDMAN Ch.(1999): "Cellulose sorbents: an evaluation of their working properties for use in wall painting conservation", *The Conservator*, nº 23: 68-76.

4.2. Iluminación no invasiva de pinturas rupestres. Análisis de la percepción del color

Jesús Zoido, Daniel Vázquez y Antonio Álvarez

Departamento de Óptica

Universidad Complutense de Madrid. Escuela Universitaria de Óptica

Introducción

La conservación de la producción artística asociada al Patrimonio Cultural plantea dos problemas fundamentales. Por una parte, es necesario, en el mayor grado posible, mostrar al público esta producción, que constituye el Patrimonio Histórico de un país. Esta circunstancia impone la necesidad de emplear fuentes de iluminación apropiadas que permitan una adecuada percepción de los bienes culturales. Por otra parte, una conservación adecuada de las obras a exponer requiere reducir al mínimo la interacción con la radiación electromagnética con objeto de minimizar el daño producido sobre las mismas. En el caso de la iluminación de pinturas rupestres, existen factores de diversa índole que hacen que la iluminación juegue un papel especialmente importante. En cualquier caso, hay dos requerimientos fundamentales que se deben satisfacer: minimizar el daño que se produce sobre la obra y obtener una reproducción óptima del color de la misma.



Figura 1. Pintura rupestre y procedimiento de medida.

La Cueva de los Murciélagos está ubicada en la localidad de Zuheros, Córdoba. En esta cueva se localiza un número significativo de importantes manifestaciones del arte rupestre y constituye uno de los yacimientos Neolíticos más importantes de Andalucía, siendo la primera localización en la que aparecen muestras del arte correspondiente al Paleolítico Superior en esta comunidad. Con el ánimo de diseñar un sistema de iluminación adecuado, hemos medido la reflectancia espectral de algunas de las pinturas ubicadas en esta cueva. Para ilustrar los resultados obtenidos, en este trabajo sólo consideramos una de ellas. También se han realizado medidas de la reflectancia espectral de la piedra sobre la que se encuentra la pintura considerada. En la figura 1 se muestra la pintura que se analiza en este trabajo y el procedimiento de medida. A partir de la medida de la reflectancia espectral, se ha procedido a la caracterización colorimétrica de la pintura y de la piedra que la soporta (Sección 2). Para llevar a cabo esta caracterización hemos considerado que la pintura es observada en condiciones óptimas, en lo que a la reproducción del color respecta, bajo la iluminación que proporciona la distribución espectral de un cuerpo negro a una temperatura $T_i=1850$ K. Se ha elegido este iluminante como referencia porque esta es la temperatura aproximada que tendría una antorcha, que era la fuente de iluminación empleada por los artistas originales. Con este criterio, los valores triestímulo que se obtienen, tanto para la pintura como para la roca, son los correspondientes al estímulo de color percibido por los creadores de la obra. En lo subsiguiente en este trabajo consideraremos estos valores triestímulo como los valores de referencia. Por supuesto, conviene señalar que la adopción de este criterio concerniente a la iluminación primigenia de la obra de arte implica la asunción de que la percepción del color del sistema visual humano en el Paleolítico Superior era similar a la que conocemos en la actualidad. Esta suposición, aunque no puede ser contrastada, no parece descabellada si consideramos que en el Paleolítico Superior ya había desarrollada una conducta moderna completa (este término se emplea en antropología, arqueología y sociología para referirse a una serie de rasgos y habilidades característicos que diferencian al humano actual y sus antepasados recientes de los actuales primates y de otros linajes de homínidos ya extinguidos), incluyendo el lenguaje, la música y otras generalidades culturales.

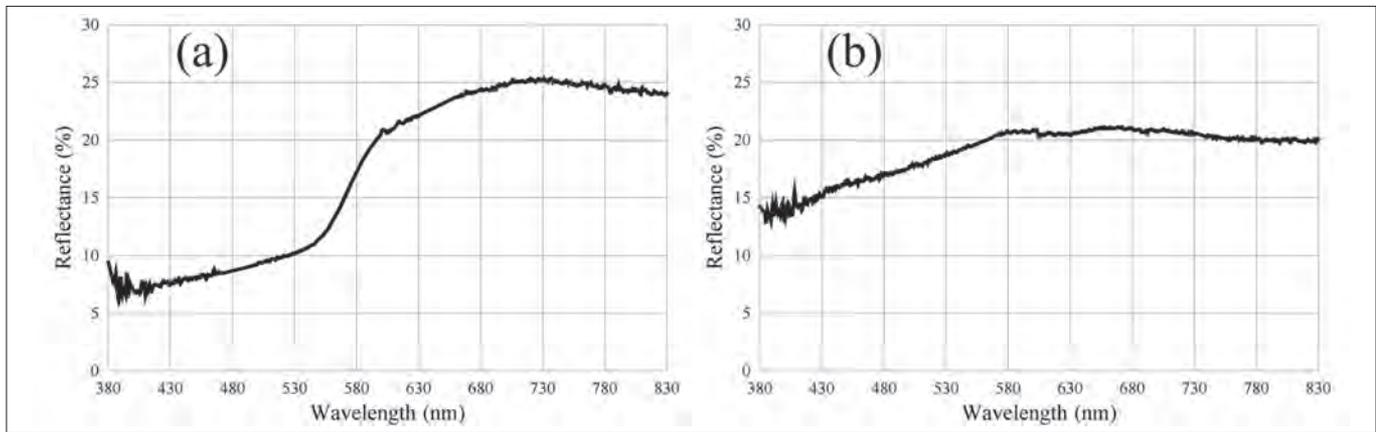


Figura 2. Curvas de reflectancia espectral. (a) pintura y (b) piedra.

La Sección 3 de este trabajo se dedica a analizar los cambios en la percepción del color que la pintura y la piedra presentan cuando se emplean para su iluminación diferentes fuentes de luz: cuerpo negro a diferentes temperaturas, los 38 iluminantes recomendados por la CIE y una lámpara halógena. Las variaciones en la percepción del color son evaluadas cuantitativamente calculando las distancias en el espacio CIELAB entre el estímulo de color que percibe el observador cuando se ilumina la obra con la antorcha (valores triestímulo de referencia) y el estímulo de color que se genera cuando se emplea cualquier otro iluminante. Este análisis nos permitirá llevar a cabo una evaluación cuantitativa del comportamiento colorimétrico de las diferentes fuentes de luz consideradas cuando se emplean para iluminar pinturas rupestres.

Como ya se ha mencionado, aunque una adecuada percepción del color de la obra de arte es importante, es imprescindible tener en cuenta los criterios de conservación de la misma. Teniendo este hecho en cuenta, la elección de la fuente de luz más adecuada requiere llevar a cabo un análisis detallado del daño que se produce sobre la pintura a iluminar. En la Sección 4 utilizamos la función de respuesta espectral relativa (función de daño) propuesta por la CIE para calcular, para todos los iluminantes empleados previamente en este trabajo, la irradiancia efectiva que produce daño sobre la pintura considerada. A partir de los resultados obtenidos se lleva a cabo una comparación cuantitativa del comportamiento de las diferentes fuentes de luz en lo que a la generación de daño respecta.

Las pinturas consideradas en este trabajo presentan un tono fundamentalmente rojizo. Esta unicidad tonal simplificará el diseño de una fuente de luz cuya distribución espectral de potencia radiante minimiza el daño causado por la interacción de la radiación con el pigmento que constituye la pintura, sin un cambio apreciable en el estímulo de color producido respecto a la sensación de color percibida por los artistas originales. Con objeto de minimizar la exposición de la pintura a la radiación, se emplearán bajos niveles de iluminación de fondo. Otra consecuencia importante de esta medida en el contexto que nos ocupa es que también se favorece la adaptación visual del observador.

Tomando como punto de partida la hipótesis introducida por Miller, en la última parte de este trabajo proponemos una fuente de luz cuya distribución espectral, minimizando la absorción de radiación, reduce el daño producido sobre la pintura y optimiza la percepción del color de la misma. El procedimiento seguido en este trabajo se puede generalizar para optimizar sistemas de iluminación empleados para cualquier otro tipo de obra de arte.

Caracterización colorimétrica de la pintura y la piedra

En primer lugar, se ha procedido a medir la reflectancia espectral del pigmento que constituye la pintura en cuatro zonas diferentes de la misma. En lo sucesivo, la curva promedio resultante de estas medidas se denotará por $\rho_p(\lambda)$. También se ha medido la reflectancia espectral, $\rho_r(\lambda)$, de la piedra en ausencia de pigmento en los alrededores de la pintura. Estas medidas han sido llevadas a cabo empleando un espectrofotómetro AvaSpec-2048-2, en el rango espectral comprendido entre 400 nm y 750 nm y con un intervalo de medida de 5 nm. Las curvas que representan las reflectancias espectrales medidas para la pintura y la piedra se muestran en la figura 2. Con objeto de llevar a cabo los cálculos pertinentes, estas curvas han sido interpoladas previamente. Tal y como previamente ha sido puesto de manifiesto, asumimos que la fuente de luz empleada por los artistas originales era una antorcha, de tal forma que consideramos que la reproducción de color adecuada se obtiene cuando se ilumina la pintura con la distribución espectral radiante de un cuerpo negro a temperatura $T_i=1850$ K, la cual está dada por:

$$S_{T_i}(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_i)} - 1} \quad \text{W.m}^{-3}. \quad (1)$$

Las dos constantes en esta expresión son $c_1=2\pi hc^2=3.741832 \times 10^{-16}$ W.m^2 y $c_2=hc/k=1.438786 \times 10^{-2}$ m.K. El estímulo de color que se genera cuando la pintura cuya reflectancia espectral se muestra

en la figura 2 se ilumina con esta distribución espectral, está especificado por sus correspondientes valores triestímulo:

$$X_i^{T_i, P} = K_{T_i} \sum_{j=1}^N S_{T_i}(\lambda_j) \rho_p(\lambda_j) \hat{x}_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3), \quad (2)$$

Donde $\hat{x}(\lambda)$ son las tres funciones de mezcla que caracterizan al observador patrón CIE 1931, $[\lambda_1, \lambda_N]=[400, 750]$ nm es el intervalo espectral en el que se han medido las reflectancias y $\Delta\lambda=1$ nm. Con este último valor, el número de longitudes de onda en que queda dividido el espectro visible es $N=350$. De forma similar, los valores triestímulo de la piedra cuando se ilumina con la distribución espectral (1) están dados por:

$$X_i^{T_i, r} = K_{T_i} \sum_{j=1}^N S_{T_i}(\lambda_j) \rho_r(\lambda_j) \hat{x}_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3). \quad (3)$$

En las últimas dos ecuaciones, la constante K_{T_i} se calcula considerando como estímulo blanco de referencia la distribución (1) del cuerpo negro. Su valor se obtiene de la siguiente manera:

$$K_{T_i} = \frac{100}{\sum_{j=1}^N S_{T_i}(\lambda_j) x_2(\lambda_j) \Delta\lambda} \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones previas, se han calculado las correspondientes coordenadas cromáticas $(x_1^p, x_2^p)_{T_i}$ y $(x_1^r, x_2^r)_{T_i}$ de la pintura y la piedra respectivamente cuando ambas son iluminadas con una antorcha. La posición en el diagrama cromático CIE 1931 de las cromaticidades obtenidas se representan en la figura 3.

Tal y como se ha indicado previamente, los valores triestímulo (2) y (3) que se obtienen al iluminar la pintura y la roca con la distribución espectral (1) son considerados como los estímulos de referencia. Todas las variaciones de los parámetros colorimétricos se calcularán a partir de estos valores triestímulo.

Desplazamientos cromáticos

En esta sección analizaremos las variaciones de color que experimentan la pintura y la roca cuando se iluminan con distintas fuentes de luz diferentes de la antorcha. En la subsección 3.1 se analizan los desplazamientos cromáticos cuando la fuente de luz empleada es la distribución espectral del cuerpo negro a diferentes temperaturas. Los cambios de color que se producen cuando se emplean como fuentes de luz los diferentes iluminantes recomendados por la CIE se analizan en la subsección 3.2.

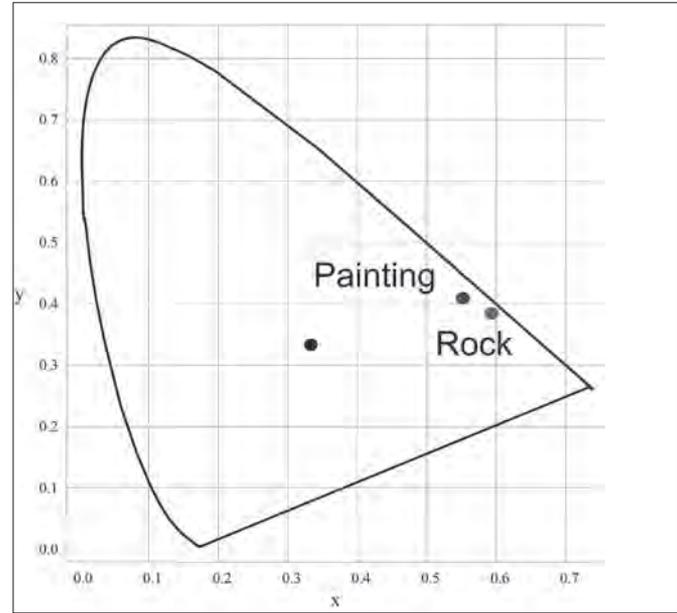


Figura 3. Localización en el diagrama cromático CIE 1931 de las cromaticidades correspondientes a la pintura y la piedra cuando se iluminan con la distribución de un cuerpo negro a la temperatura $T_{T_i} = 1580$ K.

Variaciones de las características colorimétricas con la temperatura de la distribución del cuerpo negro

Ahora consideraremos que, tanto la pintura como la piedra se iluminan con la distribución espectral del cuerpo negro a temperaturas diferentes de T_{T_i} . En este caso, la distribución espectral está dada por:

$$S(T, \lambda) = K(T) \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad \text{W.m}^{-3}, \quad (5)$$

T corresponde a la temperatura del cuerpo negro. El valor de $K(T)$ se elige de tal manera que la exitancia radiante espectral del cuerpo negro cuya temperatura se considera coincida con la del cuerpo negro a la temperatura T_{T_i} de la antorcha, es decir:

$$K(T) = \frac{S_{T_i}}{c_1 \sum_{j=1}^N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_j^5 e^{c_2/(\lambda_j T)} - 1}}, \quad (6)$$

con

$$S_{T_i} = \sum_{j=1}^N S_{T_i}(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (7)$$

Con objeto de llevar a cabo una comparación cuantitativa del daño producido por los diferentes iluminantes, es importante que todos ellos tengan la misma exitancia radiante total. De esta forma, la normalización de la distribución que introduce la constante $K(T)$ jugará un papel importante en el momento de calcular el daño que causa sobre la pintura la fuente de radiación considerada. Los valores triestímulo de la pintura y la piedra cuando se iluminan con la distribución espectral (6) están dados por:

$$X_i^p(T) = K_T \sum_{j=1}^N S(T, \lambda_j) \rho_p(\lambda_j) x_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3) \quad (8)$$

y

$$X_i^r(T) = K_T \sum_{j=1}^N S(T, \lambda_j) \rho_r(\lambda_j) x_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

Respectivamente, con:

$$K_T = \frac{100}{\sum_{j=1}^N S(T, \lambda_j) x_2(\lambda_j) \Delta\lambda} \quad (10)$$

174

Con esta elección de la constante K_T , hemos asumido que, en cada caso, el estímulo blanco de referencia es la fuente de luz empleada para iluminar la pintura. Los valores triestímulo se han calculado en el rango de temperaturas comprendido entre $T=1000$ K (fuente de luz muy cálida) y $T=7000$ K (fuente de luz fría) en intervalos $\Delta T=100$ K. Considerando las ecuaciones (8) y (9) hemos calculado también las coordenadas cromáticas, $(x_1^p(T), x_2^p(T))$ y $(x_1^r(T), x_2^r(T))$, asociadas con la pintura y la piedra respectivamente cuando la fuente de luz empleada corresponde a la distribución espectral (5). La variación de estas coordenadas cromáticas con la temperatura del cuerpo negro se muestra en la figura 4.

El comportamiento que muestra la variación de las coordenadas cromáticas es el esperado. Cuando la temperatura del cuerpo negro utilizado como fuente de luz aumenta, las coordenadas cromáticas de la pintura y la piedra tienden a acercarse al centro del diagrama cromático. La curva que describe la variación de las coordenadas cromáticas de la piedra prácticamente coincide con la curva del cuerpo negro. Sin embargo, la pintura siempre presenta un tono más rojizo que el correspondiente a esta curva. Evidentemente, si uno analiza la reflectancia espectral de la pintura que se muestra en la figura 2, este comportamiento no resulta nada sorprendente.

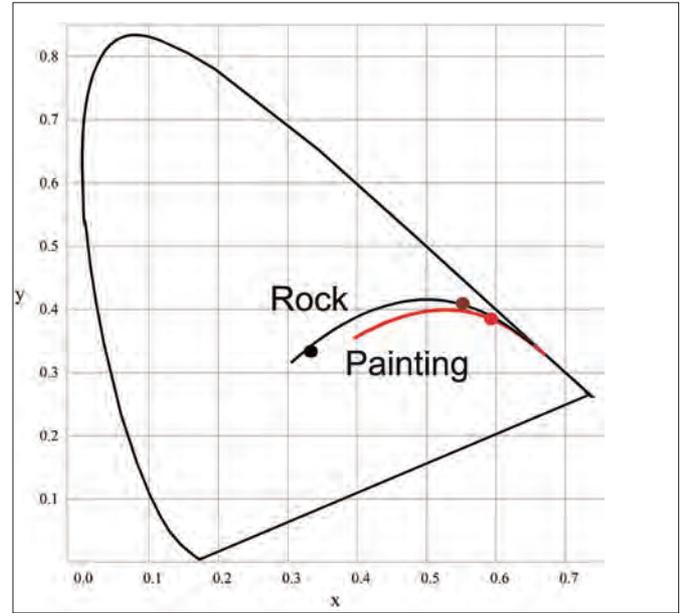


Figura 4. Curvas paramétricas $(x_1^p(T), x_2^p(T))$ y $(x_1^r(T), x_2^r(T))$ que muestran en el diagrama cromático CIE 1931 la variación de las coordenadas cromáticas de la pintura y la piedra en función de la temperatura del cuerpo negro empleado como fuente de luz..

Con objeto de llevar a cabo una evaluación cuantitativa de las diferencias del estímulo de color que representa a la pintura y la piedra cuando se iluminan con la antorcha y el estímulo de color que generan cuando se iluminan con la distribución espectral del cuerpo negro a temperatura T , todos los estímulos de color, especificados inicialmente en el sistema CIE 1931, se han transformado al espacio de color CIELAB. En este espacio, las coordenadas (L^*, a^*, b^*) que especifican un estímulo de color están relacionadas con los correspondientes valores triestímulo (X_1, X_2, X_3) , que especifican el estímulo en el espacio CIE 1931, a través de las siguientes relaciones:

$$L^* = 116 \left(\frac{X_2}{X_{2,w}} \right)^{1/3} - 16, \quad (11)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X_1}{X_{1,w}} \right)^{1/3} - \left(\frac{X_2}{X_{2,w}} \right)^{1/3} \right],$$

Y

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{X_2}{X_{2,w}} \right)^{1/3} - \left(\frac{X_3}{X_{3,w}} \right)^{1/3} \right],$$

Donde $(X_{1,w}, X_{2,w}, X_{3,w})$ son los valores triestímulo de la fuente de luz que se emplea en cada caso con $X_{2,w}=100$. Considerando estas transformaciones y los valores triestímulo (2) y (3) previamente calculados, hemos obtenido las coordenadas, $(L_{T_i}^p, a_{T_i}^p, b_{T_i}^p)$ y $(L_{T_i}^r, a_{T_i}^r, b_{T_i}^r)$, en el espacio CIELAB para la pintura y la piedra respectivamente cuando se iluminan con una antorcha. De forma similar, utilizando los valores triestímulo (8) y (9), hemos calculado también las coordenadas, $(L^p(T), a^p(T), b^p(T))$ y $(L^r(T), a^r(T), b^r(T))$, en el espacio CIELAB asociadas a la pintura y la piedra cuando la fuente de luz empleada es la distribución espectral del cuerpo negro a temperatura T

En el espacio CIELAB se puede utilizar la distancia Euclídea entre dos puntos para representar de forma aproximada la magnitud de la diferencia de color percibida por un observador entre los dos estímulos a los que los puntos están asociados. De esta forma, la diferencia de color que se percibe entre la pintura iluminada por la antorcha y la pintura iluminada por la distribución espectral del cuerpo negro a temperatura T se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta E_{T_i}^p(T) = \left[(L_{T_i}^p - L^p(T))^2 + (a_{T_i}^p - a^p(T))^2 + (b_{T_i}^p - b^p(T))^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

De la misma forma, la diferencia de color percibida entre los estímulos de color que se obtienen cuando la piedra se ilumina con la antorcha y cuando se ilumina con la distribución del cuerpo negro está dada por:

$$\Delta E_{T_i}^r(T) = \left[(L_{T_i}^r - L^r(T))^2 + (a_{T_i}^r - a^r(T))^2 + (b_{T_i}^r - b^r(T))^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Las curvas (12) y (13) que proporcionan la variación de las diferencias de color como una función de la temperatura se representan en la figura 5. Tal y como se puede apreciar en esta figura, para una temperatura dada, la distancia entre el estímulo de color generado al iluminar con la correspondiente distribución del cuerpo negro y el que se obtiene al iluminar con la antorcha es siempre mayor en el caso de la pintura.

Este hecho pone claramente de manifiesto que la iluminación de la piedra es siempre menos crítica que la iluminación del pigmento que constituye la pintura. Es decir, cuando empleamos para iluminar dos fuentes de luz cuyas distribuciones espectrales son significativamente diferentes, las diferencias de color que se obtienen para la pintura son también significativas, mientras que en el caso de la piedra estas diferencias pueden resultar insignificantes.

Generalmente se asume que, si la distancia ΔE entre dos estímulos de color es menor que tres unidades CIELAB, estos estímulos son indistinguibles entre sí. Si la distancia es mayor que esta cantidad, un observador normal es capaz de apreciar la diferencia entre los estímulos considerados. De esta forma, cuando la fuen-

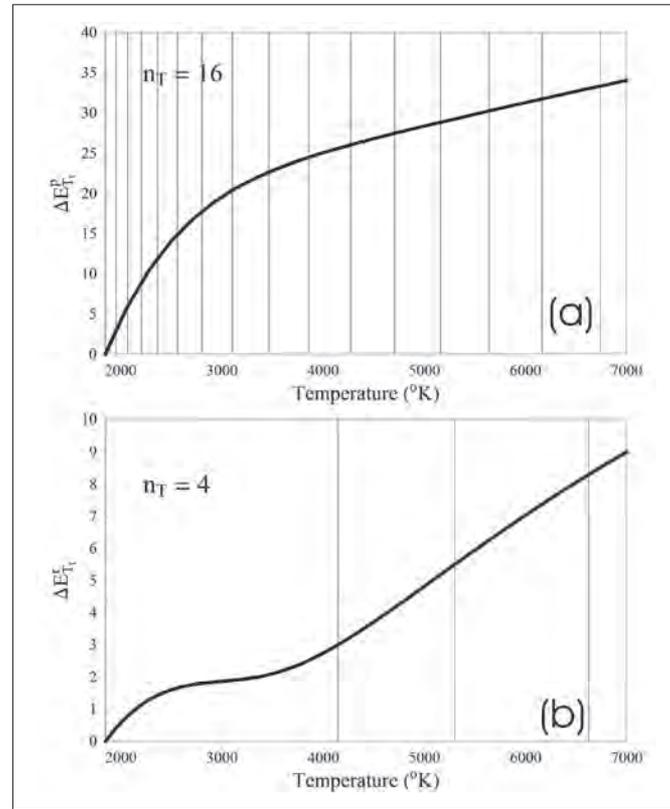


Fig. 5. Distancia entre el estímulo de color generado cuando se ilumina con una antorcha y el estímulo de color que se obtiene al iluminar con la distribución espectral de un cuerpo negro a temperatura T (a) Pintura y (b) piedra. Las líneas verticales indican los intervalos de temperatura entre cuyos extremos la distancia es de tres unidades CIELAB. En cada caso, el rango de temperaturas entre dos líneas rectas proporciona estímulos de color indistinguibles entre sí. De esta forma, el número total de intervalos que contienen temperaturas que proporcionan estímulos de color indistinguibles es (a) $n_T=16$ para la pintura y (b) $n_T=4$ para la piedra.

te de iluminación utilizada es la distribución del cuerpo negro a temperatura T, los intervalos de temperatura que aparecen en la figura 5 entre dos líneas rectas consecutivas generan estímulos de color que proporcionan la misma sensación a un observador, son indistinguibles entre sí. Un observador patrón no distinguiría los estímulos de color generados cuando se ilumina con la distribución de dos cuerpos negros cuyas temperaturas se corresponden respectivamente con los extremos del intervalo. Teniendo en cuenta este hecho, el primer intervalo en cada gráfico (distancias menores que tres) corresponde a temperaturas de la distribución del cuerpo negro que se utiliza como iluminante que proporcionan estímulos de color indistinguibles del estímulo de color generado cuando se ilumina con la antorcha. Es decir, desde un punto de vista colorimétrico, es totalmente equivalente iluminar la pintura o la piedra utilizando una antorcha que hacerlo con la distribución espectral de un cuerpo negro cuya temperatura esté comprendida en el primer intervalo de cada gráfica. Este intervalo es considerablemente menor en el caso de la pintura, lo que significa que el rango de variación de temperaturas para la distribución del cuerpo

negro en el que la percepción de color es similar a la que se obtiene con una antorcha es muy reducido. Sin embargo, en el caso de la piedra es posible emplear como iluminante una distribución del cuerpo negro cuya temperatura varíe en el intervalo de temperatura comprendido entre 1000 K y 4000 K obteniendo estímulos de color que son percibidos de la misma forma que lo sería el estímulo que se genera al iluminar con la antorcha.

3.2 Variación de las características colorimétricas cuando se emplean diferentes iluminantes patrón.

| α | Source | α | Source |
|----------|-----------------------|----------|---------------------|
| 1 | A illuminant | 21 | FL3.3 |
| 2 | D65 Illuminant | 22 | FL3.4 |
| 3 | C illuminant | 23 | FL3.5 |
| 4 | D50 Illuminant | 24 | FL3.6 |
| 5 | D55 Illuminant | 25 | FL3.7 |
| 6 | D75 Illuminant | 26 | FL3.8 |
| 7 | FL1 | 27 | FL3.9 |
| 8 | FL2 | 28 | FL3.10 |
| 9 | FL3 | 29 | FL3.11 |
| 10 | FL4 | 30 | FL3.12 |
| 11 | FL5 | 31 | FL3.13 |
| 12 | FL6 | 32 | FL3.14 |
| 13 | FL7 | 33 | FL3.15 |
| 14 | FL8 | 34 | HP1 |
| 15 | FL9 | 35 | HP2 |
| 16 | FL10 | 36 | HP3 |
| 17 | FL11 | 37 | HP4 |
| 18 | FL12 | 38 | HP5 |
| 19 | FL3.1 | 39 | Xenon lamp |
| 20 | FL3.2 | 40 | Halogen lamp |

Tabla 1. Numeración y descripción de los iluminantes. El número, α , que aparece en las columnas uno y tres es el asignado por nosotros. La nomenclatura empleada (columnas dos y cuatro) es la propuesta por la CIE 7-12: lámparas fluorescentes comunes; 13-15: lámparas fluorescentes de banda ancha; 16-18: lámparas fluorescentes de banda estrecha; 19-21: lámparas de halofosfatos; 22-24: lámparas tipo "DeLuxe"; 25-29: lámparas fluorescentes de tres bandas; 30-32: lámparas fluorescentes de múltiples bandas; 33: lámpara simuladora del iluminante D65; 34: lámpara de descarga de alta presión; 35: lámpara de sodio de alta presión; 36-38: lámpara de haluros metálicos de alta presión.

Ahora analizaremos el cambio de color que se producen en la pintura y la piedra cuando empleamos para su iluminación un conjunto de 40 iluminantes diferentes. A los 38 iluminantes recomendados por la CIE, hemos añadido los espectros de una lámpara de xenón y una lámpara halógena. La numeración que hemos empleado y la descripción de cada iluminante están contenidas en la Tabla 1.

Sea $S_\alpha(\lambda)$ la distribución espectral del iluminante α , ($\alpha=1, 2, \dots, 40$). Estas distribuciones se han normalizado para que la exitancia radiante total de cada iluminante coincida con la de la distribución espectral del cuerpo negro a la temperatura de la antorcha. Los

valores triestímulo que se obtienen cuando se iluminan la pintura y la piedra con el iluminante α están dados respectivamente por:

$$X_i^{p,\alpha}(T) = K_\alpha \sum_{j=1}^N S_\alpha(\lambda_j) \rho_p(\lambda_j) x_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3) \quad (14)$$

Y

$$X_i^{r,\alpha}(T) = K_\alpha \sum_{j=1}^N S_\alpha(\lambda_j) \rho_r(\lambda_j) x_i(\lambda_j) \Delta\lambda \quad (i=1, 2, 3), \quad (15)$$

Con

$$K_\alpha = \frac{100}{\sum_{j=1}^N S_\alpha(\lambda_j) x_2(\lambda_j) \Delta\lambda} \quad (16)$$

A partir de estas expresiones hemos calculado los valores triestímulo para los 40 iluminantes considerados en la Tabla I, los cuales nos permiten a su vez calcular las correspondientes coordenadas cromáticas. Los resultados obtenidos se muestran, representados en el diagrama cromático CIE 1931, en la figura 6.

Una rápida inspección de esta figura pone de manifiesto que las cromaticidades obtenidas, tanto para la pintura como para la piedra, varían sustancialmente en función del iluminante considerado. Este resultado indica claramente que la percepción de la obra de arte considerada depende muy significativamente de la distribución espectral de la fuente de luz empleada para su iluminación. En consecuencia, a la hora de diseñar sistemas de iluminación para pinturas rupestres deberemos ser especialmente cuidadosos en la selección de la fuente de luz que vamos a utilizar. En nuestro caso, siguiendo los criterios previamente adoptados, deberemos seleccionar el iluminante que minimice las diferencias con el color percibido cuando la pintura se ilumina con una antorcha. Con objeto de llevar a cabo tal selección, deberemos realizar, en primer lugar, una estimación cuantitativa de las diferencias entre el color que se reproduce al utilizar un iluminante determinado y el estímulo de color que realmente pretendemos reproducir. A tal efecto procederemos como se indica a continuación.

A partir de los resultados previos hemos transformado los valores triestímulo (14) y (15), expresados en el sistema CIE 1931, al sistema CIELAB. Para ello se han utilizado las ecuaciones (11). Denotaremos por $(L_\alpha^p, a_\alpha^p, b_\alpha^p)$ y $(L_\alpha^r, a_\alpha^r, b_\alpha^r)$ a las coordenadas en este espacio que se obtienen para la pintura y la piedra respectivamente cuando la fuente de luz empleada es el iluminante α . Con el fin de proceder a una evaluación cuantitativa del comportamiento colorimétrico de los cuarenta iluminantes considerados en este trabajo, hemos calculado la distancia en el espacio CIELAB entre el estímulo de color asociado con el iluminante α y el estímulo de color que se obtiene cuando la fuente de luz es la antorcha. Esta distancia está dada por:

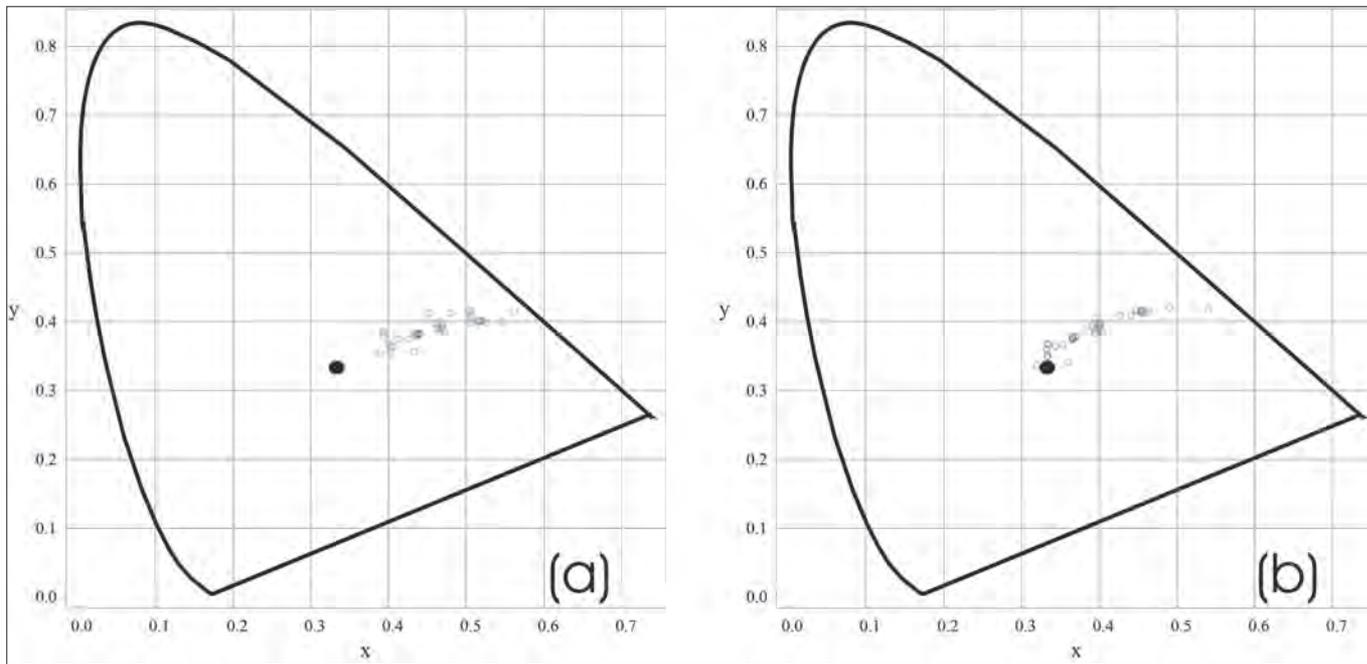


Fig. 6. Diagrama cromático CIE 1931 en el que se muestran representadas las coordenadas cromáticas que se obtienen al emplear como fuentes de iluminación los 40 iluminantes listados en la Tabla 1. (a) Coordenadas cromáticas para la pintura. (b) Coordenadas cromáticas para la piedra.

$$\Delta E_{\alpha}^p = \left[(L_{\alpha}^p - L_{T_r}^p)^2 + (a_{\alpha}^p - a_{T_r}^p)^2 + (b_{\alpha}^p - b_{T_r}^p)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

Y

$$\Delta E_{\alpha}^r = \left[(L_{\alpha}^r - L_{T_r}^r)^2 + (a_{\alpha}^r - a_{T_r}^r)^2 + (b_{\alpha}^r - b_{T_r}^r)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

Para la pintura y la piedra respectivamente.

Los valores que se obtienen para estas distancias se representan en la figura 7. En esta figura se pone claramente de manifiesto cómo, de nuevo, las distancias son considerablemente mayores para la pintura que para la piedra. Este resultado confirma otra vez el obtenido anteriormente en la subsección 3.1: la iluminación de la piedra es mucho menos restrictiva que la iluminación del pigmento que constituye la pintura. Cuando se utiliza cualquiera de los iluminantes considerados, las diferencias de color (respecto al estímulo que se obtiene cuando se utiliza la antorcha como fuente de luz) que se perciben para la piedra son siempre menores que para el pigmento.

Conviene poner de manifiesto el hecho de que, cuando la pintura se ilumina con cualquiera de las fuentes de luz listadas en la Tabla 1, los valores que toman todas las distancias son siempre mayores que tres unidades CIELAB. Esto significa que el color obtenido al iluminar la pintura con cualquiera de los cuarenta iluminantes es percibido por un observador de forma

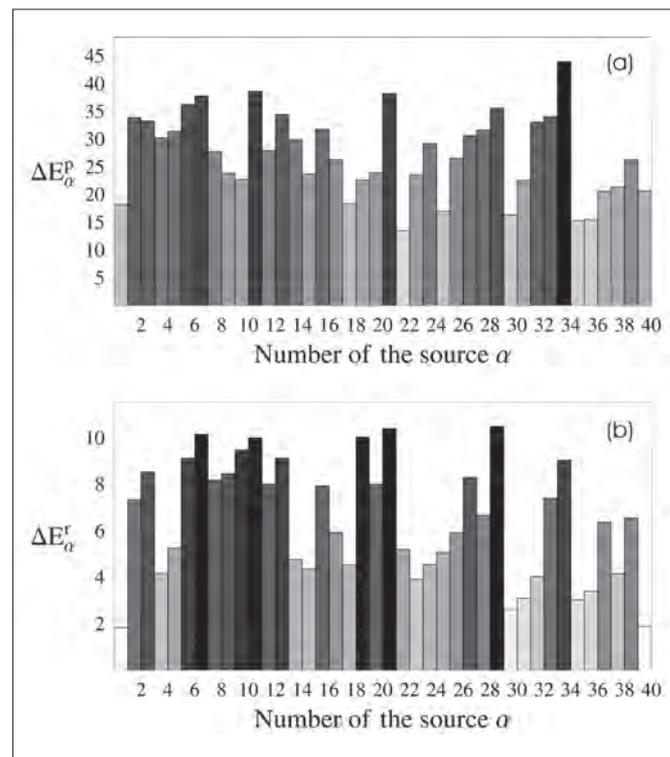


Fig. 7. Valores de las distancias entre el estímulo de color que se obtiene cuando la fuente de luz empleada es el iluminante α y el estímulo que se genera cuando se usa la antorcha como iluminante. (a) Distancias obtenidas al iluminar la pintura, dadas por la ecuación (17). (b) Distancias obtenidas al iluminar la piedra, dadas por la ecuación (18).

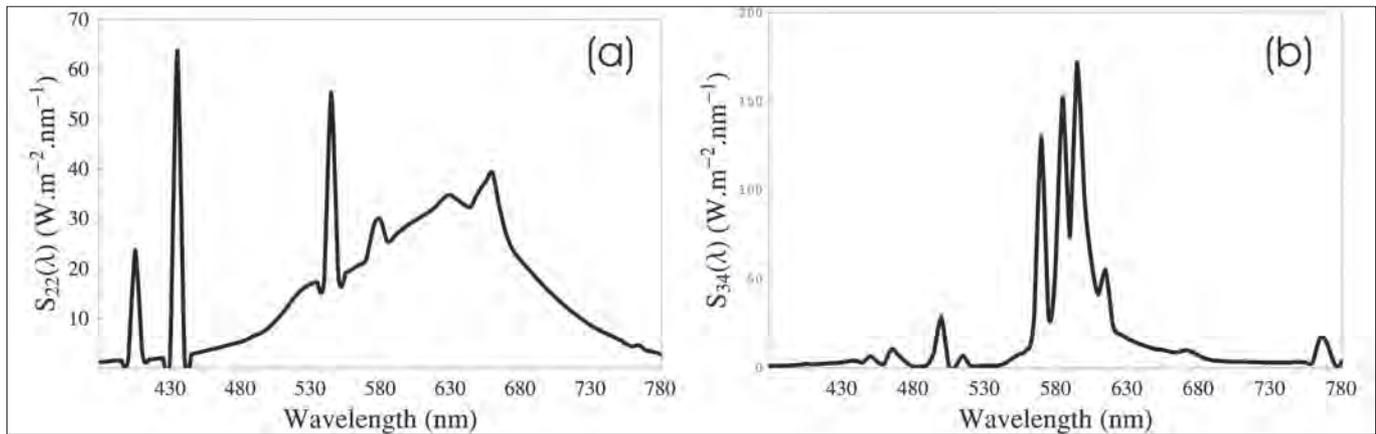


Fig. 8. Distribución espectral de irradiancia de: (a) iluminante 22 (lámpara tipo “DeLuxe” FL3.4) que minimiza la distancia al estímulo de color que se produce cuando la pintura se ilumina con la antorcha; (b) iluminante 34 (lámpara de descarga a alta presión HP1) que proporciona el valor máximo de la distancia.

diferente a como era percibido por los artistas originales. En el caso de la pintura, la distancia alcanza un valor máximo de $\Delta E_{\alpha}^p = 44$ unidades CIELAB para el iluminante número 34 (lámpara de descarga a alta presión HP1). El valor mínimo es de $\Delta E_{\alpha}^p = 14$ unidades CIELAB y corresponde al iluminante número 22 (lámpara tipo “DeLuxe” FL3.4). En cualquier caso, esta última distancia, aún siendo la mínima, toma un valor excesivamente elevado, de manera que el color percibido al emplear este iluminante es considerablemente diferente al que se percibiría utilizando la antorcha. Este análisis nos lleva a concluir que ninguna de las cuarenta fuentes de luz analizadas es adecuada, desde el punto de vista colorimétrico, para iluminar la pintura. Las distribuciones espectrales de irradiancia de los iluminantes 34 (máxima distancia) y 22 (mínima distancia) se representan en la figura 8.

Sin embargo, en lo que a la piedra respecta, para algunas de las fuentes de luz consideradas la distancia obtenida toma un valor menor o muy ligeramente superior a tres unidades CIELAB. En estos casos, el color de la piedra es percibido sin ninguna variación, o con una variación mínima, respecto al color que mostraría la piedra al ser iluminada con la antorcha. Los iluminantes que proporcionarían una adecuada percepción cromática de la piedra son los siguientes: 1 (iluminante A), 23 (lámpara tipo “DeLuxe FL3.5”), 30 (lámpara fluorescente multibanda FL3.12), 31 (lámpara fluorescente multibanda FL3.13), 35 (lámpara de sodio a alta presión HP2) y 36 (lámpara de haluros metálicos a alta presión).

Como ya hemos mencionado, el estudio realizado nos lleva a concluir que, en el caso de la pintura que estamos considerando, no es posible obtener una adecuada reproducción del color con ninguno de los iluminantes listados en la Tabla 1. En cualquier caso, esta Tabla y la figura 7 pueden resultarnos útiles a la hora de elegir, o despreciar, una fuente de luz para la iluminación de pinturas rupestres. El procedimiento seguido en esta sección se podría aplicar a la optimización, desde un punto de vista colorimétrico, del diseño de los sistemas de iluminación utilizados con

cualquier otro tipo de bienes culturales. Por supuesto, los resultados que se obtengan dependerán de los iluminantes considerados y de la reflectancia espectral de los objetos que se pretende iluminar. Otro requisito importante es elegir adecuadamente el iluminante de referencia a partir del cual las distancias de los colores percibidos se deben minimizar.

Análisis del daño

Como ya hemos puesto de manifiesto, el diseño de un sistema adecuado para ser empleado en la iluminación de pinturas rupestres, o de cualquier otro tipo de bienes culturales, requiere llevar a cabo simultáneamente un análisis de la reproducción del color y del daño que la radiación produce sobre los objetos iluminados. El primero de estos análisis se ha llevado a cabo en la sección anterior. Ahora, en lo que sigue, pasaremos a evaluar, para cada uno de los iluminantes considerados en este trabajo, la fracción de irradiancia que es susceptible de causar daño. A esta irradiancia la denominaremos “daño efectivo”. De acuerdo con las recomendaciones que proporciona la CIE, este daño efectivo está dado por:

$$E_{dm} = \sum_{j=1}^N S(\lambda_j) D(\lambda_j) \Delta\lambda, \quad (19)$$

Donde $S(\lambda)$ es la irradiancia espectral de la fuente de luz que se está analizando y

$$D(\lambda) = e^{-a(\lambda-\lambda_0)} \quad (20)$$

Es el factor de daño propuesto por la CIE. En esta última expresión el valor de λ_0 es de 300 nm y a es una constante cuyo

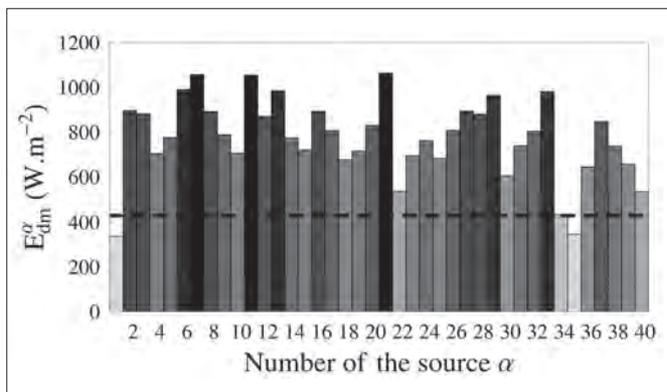


Fig. 9. Daño efectivo producido por los cuarenta iluminantes listados en la Tabla 1. La línea discontinua indica el valor, E_{dm}^{opt} , del daño que se obtiene para el iluminante óptimo de Miller.

valor es de 0.0115 nm^{-1} cuando se consideran pinturas oleaginosas (es el caso más similar a las pinturas rupestres que hemos conseguido encontrar). Introduciendo en la expresión (19) la distribución espectral (5) hemos calculado el daño efectivo, $E_{dm}(T)$, en función de la temperatura del cuerpo negro cuya distribución espectral se emplea como iluminante. El daño $E_{dm}(T)$ es una función que crece monótonamente con la temperatura y, para el rango de temperaturas considerado en este trabajo (1000 K a 7000 K), sus valores mínimo y máximo son 47 W.m^{-2} y 985 W.m^{-2} respectivamente. El daño efectivo producido por la antorcha es $E_{dm}(1850)=112 \text{ W.m}^{-2}$.

De forma similar, cuando la distribución espectral $S_{\alpha}(\lambda)$ del iluminante α , de los que figuran en la Tabla 1, se introduce en la expresión (19), obtenemos el daño efectivo, E_{dm}^{α} , para el iluminante correspondiente. Los resultados obtenidos se representan en la figura 9. El valor mínimo del daño ($E_{dm}^1=338 \text{ W.m}^{-2}$) se obtiene para el iluminante A ($\alpha=1$) y el valor máximo ($E_{dm}^{21}=1065 \text{ W.m}^{-2}$) se alcanza con la lámpara de halofosfatos FL3.3 ($\alpha=21$). En cualquier caso, todos los iluminantes producen un daño efectivo superior al de la antorcha.

Los iluminante que proporcionan valores más pequeños del daño son aquéllos cuya numeración se corresponde con los valores $\alpha=1$, $\alpha=35$ y $\alpha=34$ pero, tal y como se puede observar en la figura 7 (a), para estos iluminantes el valor de la distancia (17) es muy elevado (18, 15 y 44 unidades CIELAB respectivamente), por lo que no proporcionarían una adecuada percepción del color de la pintura.

Cuando se calcula el daño efectivo a partir de las expresiones (19) y (20), los resultados que se obtienen no dependen de la reflectancia espectral del objeto que se ilumina. Este hecho no resulta muy intuitivo ya que parece evidente que el daño causado sobre el objeto debe depender de su reflectancia. Con objeto de tener en cuenta esta circunstancia, hemos considerado el criterio propuesto por Miller. Según este criterio, la absorción de radiación electromagnética es mínima cuando la forma de la distribución espectral del iluminante coincide con la reflectancia espectral del objeto que va a ser iluminado. Nosotros nos referiremos a una

fente de luz que presente estas características como “iluminante óptimo de Miller”. En nuestro caso, la distribución espectral relativa de esta fuente de luz debe coincidir con la reflectancia espectral del pigmento que constituye la pintura, es decir:

$$S_{opt}(\lambda) = \rho_p(\lambda) \quad (20)$$

Cuando introducimos esta distribución en la expresión (19), obtenemos que el correspondiente daño efectivo es $E_{dm}^{opt}=450 \text{ W.m}^{-2}$. Este valor está indicado en la figura 9 por la línea discontinua. Considerando la ecuación (17), también hemos calculado la distancia, ΔE_{opt}^p , que mide la diferencia de color que se percibe entre el estímulo de color generado cuando la pintura se ilumina con la antorcha y el que se produce cuando la fuente de luz utilizada es el iluminante óptimo de Miller (20). El valor que se obtiene es $\Delta E_{opt}^p = 10$ unidades CIELAB. Aunque en la figura 9 podemos observar que el valor del daño que produce el iluminante óptimo de Miller es ligeramente superior que el que producen los tres iluminantes mencionados anteriormente ($\alpha=1$, $\alpha=35$ y $\alpha=34$), también podemos apreciar en la figura 7 (b) que el valor de la distancia ΔE_{opt}^p para este iluminante es considerablemente menor que el valor de la distancia ΔE_{α}^p que se obtiene para los cuarenta iluminantes que se consideran en este trabajo. A partir de estos resultados, podemos concluir que, aunque hay fuentes de luz que proporcionan un daño efectivo algo menor que el asociado al iluminante óptimo de Miller, es este último el que proporciona una mejor reproducción cromática de la pintura considerada.

Conclusiones

En este trabajo hemos analizado el cambio en la percepción del color que se produce cuando una pintura rupestre se ilumina con diferentes fuentes de luz. También hemos cuantificado el daño efectivo que estas fuentes producen sobre la pintura. Como consecuencia del estudio llevado a cabo, proponemos la utilización, en el caso que nos ocupa, de un iluminante óptimo (iluminante óptimo de Miller). La distribución espectral de este iluminante es tal que proporciona valores muy bajos del daño efectivo y una reproducción del color con una calidad muy superior a la que se obtiene con el resto de las fuentes de luz que hemos considerado en este trabajo.

El procedimiento seguido en este trabajo es susceptible de ser sistematizado con objeto de aplicarlo en la optimización, en lo que a la percepción del color y el daño producido respecta, de sistemas de iluminación aplicados a cualquier otro tipo de bienes culturales. Por supuesto, los resultados que se obtengan en cada caso serán diferentes y dependerán de las fuentes de luz consideradas y de la reflectancia espectral de los objetos que se quieren iluminar.

Bibliografía

CIE, (2004): *Colorimetry*, CIE Publication No 15. Vienna: CIE Central Bureau.

CIE, (2004): *Control of damage to museum objects by optical radiation*, CIE Publication No 157, Vienna: CIE Central Bureau.

CUTTLE, C., (1996): "Damage to museum objects due to light exposure", *Lighting Research and Technology*, 28(1), 1 -9.

CUTTLE, C., (1988): "Lighting works of art for exhibition and conservation", *Lighting Research and Technology*, 20(2), 43-53.

GARCÍA, I., (1999): *La conservación preventiva y la exposición de objetos y obras de arte*, K.R., S.L.

HOON, K. and HONG-BUM, K., (2000): "New evaluation method for the lightfastness of color papers by radiant energy", *J. Illum. Eng. Soc.*, 17-24.

MILLER, J.V., (1993): "Evaluating fading characteristic of light sources", NoUVIR Research Co., Pasadena.

SCHAEFFER, T., (2001): *Effects of Light on materials in collections*, Getty conservation Institute, 2001.

WYSCECKY G. and STILES W.S., *Color Science: Concepts and methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York (2000).

4.3. El plomo en las vidrieras históricas: características, deterioro y conservación

Fernando Cortés Pizano
Fundació Mas Carandell. Reus

Introducción

Las vidrieras tradicionales occidentales están formadas por tres materiales principales: el vidrio, el plomo y un tercer elemento, a menudo presente pero no siempre imprescindible, que son las pinturas fundibles aplicadas sobre los vidrios. Esta sencilla y exitosa combinación de elementos ha producido algunas de las obras de arte más bellas de nuestros edificios históricos religiosos desde el siglo XII hasta la actualidad.

El vidrio, evidentemente, es el material más importante dado que es el que define la esencia de una vidriera. Las pinturas fundibles, por su parte, se aplican opcionalmente sobre la superficie del vidrio para representar figuras, motivos, escenas, etc., y es generalmente a través de ellas donde podemos apreciar más directamente la mano del maestro vidriero. Estos vidrios pintados son posteriormente introducidos en el horno, a una temperatura que oscila entre los 580 y 630°C, para que las grisallas, amarillos de plata, carnaciones o esmaltes puedan ser cocidos. (Figura 1) Por último, el plomo, a pesar de la escasa importancia que generalmente se le suele conceder, es un elemento de gran importancia en una vidriera y no solamente por su evidente función práctica sino también por su interesante potencial estético.

Si bien el plomo en forma de perfiles en “H” ha sido tradicionalmente el material utilizado de forma casi exclusiva para la sujeción y separación entre los diferentes vidrios, es importante destacar que existen otros materiales que cumplen esta función, como son los bastidores o perfiles de metal o de madera, los perfiles de hojalata y las celosías de madera, metal o escayola. Asimismo, desde finales del siglo XIX aparecieron en las vidrieras otros elementos alternativos que desarrollaban la misma función que el plomo, como los perfiles de plomo recubierto de latón o cobre, la cinta de cobre estañada (comúnmente llamada técnica Tiffany), el hormigón, las resinas, etc.

En cualquier caso, y dejando a un lado las técnicas alternativas mencionadas, no cabe duda que los perfiles de plomo han sido y siguen siendo en la actualidad el principal sistema utilizado por los vidrieros para realizar el ensamblaje de las distintas piezas de vidrio, por lo que a lo largo de este estudio nos centraremos exclusivamente en las particularidades del plomo y la técnica de la vidriera emplomada.

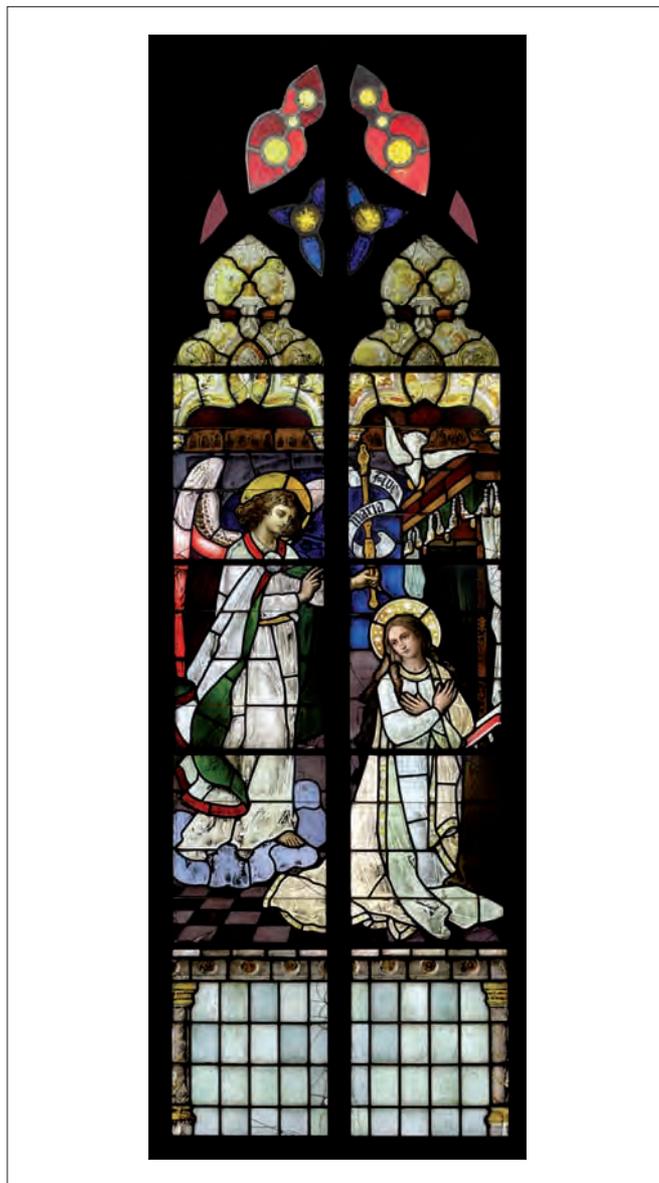


Fig. 1. Parroquia de la Asunción de Rentería. Vidriera del coro, realizada por la Casa Zettler de Alemania entre 1913 y 1915. (Foto: Fernando Cortés-Mikel Delika).

Propiedades y ventajas del plomo

Durante muchos siglos, sin gran competencia de otros materiales, el plomo y el estaño han funcionado como los principales elementos utilizados por los vidrieros para el ensamblaje de los vidrios de las vidrieras. Los motivos principales de la predilección de estos dos metales sobre otros materiales son principalmente:

- la maleabilidad (capacidad de ser modelado sin romperse), ductilidad (capacidad de ser estirado sin romperse) y flexibilidad (capacidad de ser fácilmente doblado sin romperse) del plomo, que permite trabajarlo a mano y adaptarlo fácilmente los contornos de los vidrios y, una vez transformado en un panel, doblarse sin romperse ante los empujes del viento y de las corrientes en el interior del edificio.
- el bajo punto de fusión del plomo (327°C) y el estaño de soldar (183°C), permite trabajarlo sin mayores complicaciones en cualquier taller de vidriero.
- su reducido coste en comparación con otros metales.
- su mala conductividad de la temperatura, lo que supone una protección y aislamiento para el vidrio.
- la formación de una película protectora de oxidación y su alta resistencia a la corrosión (especialmente del plomo) que permite su permanencia al exterior durante siglos.

Estas propiedades mencionadas permiten que las vidrieras puedan resistir durante siglos a la intemperie, actuando como auténticas barreras de vidrio y plomo que aíslan el interior del edificio de las adversidades del clima exterior, soportando altas y bajas temperaturas, lluvia, granizo, viento, etc. Una lámina de vidrio de entre 2mm de grosor y de unos 80cm² –medidas más habituales en las láminas de vidrio con las que tradicionalmente se han confeccionado las vidrieras- no podría soportar sin romperse los empujes del viento ni demás presiones procedentes del exterior del edificio. El éxito de la relativa resistencia de las vidrieras emplomadas consiste por tanto en el despiece adecuado de las láminas de vidrio en pequeñas piezas que, una vez emplomadas, pueden resistir durante siglos las tensiones y agresiones a las que se ven expuestas.

Composición del plomo y el estaño utilizado en las vidrieras

El plomo es un metal pesado de color gris mate azulado, blando y pesado, de una densidad relativa de 11,4 a 16°C, que funde a 327,4°C y cuya estructura interna es cristalina. El plomo en su estado puro contiene una serie de impurezas que pueden ser tanto accidentales como añadidas de forma voluntaria, siendo las más importantes la plata (Ag), el estaño (Sn), el antimonio (Sb), el Cobre (Cu), el bismuto (Bi), el zinc (Zn) el hierro (Fe) o el arsénico (As). La cantidad de estos metales traza puede variar considerablemente de una época a otra, si bien se encuentra generalmente entre el 1 y el 5% de la composición total del plomo. Por lo que respecta la estructura cristalográfica del plomo, podemos deducir que cuanto menor es la presencia de estos otros metales,



Fig. 2. Imagen al microscopio de una sección de plomo del siglo XIV procedente de una de las vidrieras de la iglesia del Monasterio de Pedralbes (Barcelona). (Foto: Detlef Kruschke).

más grandes son los cristales de estructura interna del plomo¹. El proceso de eliminación de impurezas ya era conocido en Egipto y más tarde en Grecia y Roma. Las impurezas contenidas en los plomos históricos de las vidrieras eran debidas principalmente a tres motivos: un refinado insuficiente, la recogida accidental de impurezas durante su fusión y el reciclaje de las redes de plomo de antiguas vidrieras².

El plomo utilizado en las vidrieras de la Edad Media contiene una mayor cantidad de impurezas que los plomos más modernos. A partir de 1833, y como consecuencia del perfeccionamiento del

¹ En un estudio realizado con plomos de diferentes épocas históricas (ver Müller, W.), el tamaño de los cristales podía oscilar entre 8 y 65 µm de unos plomos a otros.

² El refundido de redes de plomo procedentes de antiguas vidrieras desemplomadas, y su posterior conversión en nuevos perfiles de plomo, se ha continuado practicando en algunos talleres europeos hasta hace pocos años, lo que puede tener como resultado perfiles de plomo con una cantidad de estaño mayor de lo habitual.

sistema de eliminación de impurezas –especialmente de la extracción de la plata-, se empezó a producir un plomo más refinado pero a menudo de peor calidad que el de las vidrieras de siglos anteriores con un contenido más elevado de plata. En líneas generales podríamos decir que el plomo químicamente más puro producido en las vidrieras más recientes está compuesto por cristales más grandes (diámetro medio de 77µm) que los que encontramos en los plomos medievales (diámetro medio entre 10 y 30µm). (Figura 2)

Por lo que respecta al estaño utilizado por los vidrieros para soldar los diferentes perfiles de plomo y que actúa por tanto como metal de aportación, está constituido básicamente por una aleación de plomo y estaño. Dado que el punto de fusión del estaño puro es relativamente alto -alrededor de los 232°C- se le añade plomo para rebajarlo, creándose así una aleación de estaño y plomo cuyo punto de fusión es sensiblemente inferior -184°C-. Tradicionalmente, las proporciones de mezcla de estos dos metales podían variar sustancialmente de un vidriero a otro, por lo que en las soldaduras de estaño conservadas en las vidrieras de otras épocas podemos encontrar grandes diferencias en su estado de conservación y por tanto en el estado general de la vidriera.

Hoy en día, el estaño utilizado para soldar los plomos de las vidrieras ya no lo fabrican los vidrieros como se hacía tradicionalmente y puede obtenerse en diferentes formatos y proporciones de mezcla. El tipo de estaño más usado en general es el que contiene un 60% de estaño y un 40% de plomo, tiene un punto de fusión de 183°C y es suministrado en forma de finas varillas o lingotes de unos 40cm de longitud y de entre 3 y 6mm de diámetro.

Los peligros del plomo para la salud

Como es bien sabido, uno de los principales inconvenientes del trabajo con el plomo es su elevada toxicidad. Ya desde hace siglos la intoxicación aguda por plomo se conoce como Saturnismo. El plomo es un metal que puede entrar en el organismo humano al ser inhalado, ingerido o absorbido por la piel, que puede afectar a la mayoría de los órganos del cuerpo humano y cuyo efecto es acumulativo. El plomo entra en nuestro organismo principalmente por la inhalación de los humos o vapores emitidos por el estaño durante el proceso de soldadura de los paneles –recordemos que el estaño utilizado puede contener hasta un 60% de plomo- o malos hábitos de higiene como comer o fumar con las manos sucias de plomo. Sus efectos negativos dependerán de la cantidad de plomo presente en nuestro organismo y del tiempo de exposición. Los niveles de absorción se incrementan generalmente como consecuencia de las malas prácticas laborales, tales como lugares de trabajo mal ventilados o poco limpios, el no usar o usar indebidamente los sistemas de protección personal y unos malos hábitos de higiene.

Una vez en nuestro organismo, el plomo circula en la sangre unido a los glóbulos rojos y posteriormente se distribuye a los tejidos del hígado, riñón, médula ósea y sistema nervioso central, almacenándose en las siguientes proporciones: 95% en los huesos largos, 4% en los tejidos blandos (cerebro, hígado, riñones...) y 1%

en la sangre. "Algunos de los síntomas más comunes de intoxicación por plomo son: dolor de cabeza, vértigo, vómitos, diarreas, fatiga, migrañas, cefalea, psicosis, delirios de grandeza e insomnio o pérdida del sueño, registrándose casos donde se perdió la etapa de R.E.M. (Rapid Eye Movement). En los casos agudos, por lo común se presenta estupor o convulsiones, el cual progresa hasta el coma y termina en la muerte"³.

Elaboración de los perfiles de plomo para vidrieras

Los plomos utilizados en las vidrieras suelen ser básicamente perfiles o vergas de sección en "H" o, como dicen algunos vidrieros, de doble "U". En ocasiones particulares y para aplicaciones menos frecuentes existen perfiles con una gran variedad de formas, como los perfiles de perfil en "U" –para cerrar el perímetro exterior de un panel- o en "Y" –usados en faroles o vidrieras volumétricas-, con las alas recubiertas de cobre, latón o plata, reforzados en su interior con una varilla metálica, etc. En los perfiles en forma de "H" la parte interior y horizontal de la "H" se llama *alma* y es donde apoyan los vidrios, mientras que los dos laterales verticales se conocen como *alas* y su función es la de sujetar los vidrios, restándoles a la vez más o menos luz según su anchura.

Por lo que respecta a las medidas de los perfiles más comunes, el surco o canal interior suele tener unos 4 ó 5 mm de ancho mientras que el ancho de las alas puede presentar una mayor variedad de medidas que oscilan entre los 3 y los 20 mm, si bien en la mayoría de las vidrieras tradicionales la anchura de los plomos suelen estar entre 5 y 10 mm. Estas medidas y formas no dejan de ser aproximadas ya que en realidad desde la Edad Media hasta la actualidad, si bien todos los plomos han tenido una forma que recuerda a una "H", podemos encontrar una gran variedad de formas en el alto y ancho de los perfiles, el grueso del alma, la curva y grosor de las alas, etc.

En los surcos de estos perfiles se insertan los vidrios, conformando una estructura autónoma –en un sentido constructivo y no artístico- en el conjunto de una vidriera que llamamos panel o paño. Si bien una vidriera puede estar formada por un único panel, lo más común es que sean varios⁴. Estos paneles emplomados pueden tener un tamaño muy variado que puede oscilar entre los 10 cm² de algunos paneles de las tracerías góticas y los 150 o 200 cm² de algunos paneles de los siglos XIX y XX. La unión de los diferentes plomos de los paneles se realiza mediante estaño y la impermeabilización de todo el conjunto al paso del agua mediante masilla insertada entre el plomo y el vidrio.

³ Fuente: Wikipedia.org

⁴ En algunos casos, como en la vidriera gótica de la fachada Este de la catedral de York en el Reino Unido, con sus 311 paneles, o la vidriera del techo de la sala de Juntas de Gernika, con 372 paneles, estas obras pueden alcanzar grandes proporciones.



Fig. 3. Izquierda: fragmento de un perfil de plomo actual en bruto después de salir del molde y antes de su desbastado y estirado; derecha: perfil de plomo actual listo para ser usado. (Fotos: Fernando Cortés).

El proceso de fabricación del plomo utilizado en las vidrieras, desde los lingotes de metal en bruto, más o menos exentos de impurezas, hasta su conversión en perfiles en H, listos para ser utilizados para la confección de las vidrieras, se practica desde hace muchos siglos. Si bien no se han conservado ejemplares de plomo anteriores al siglo XII, seguramente los perfiles en H empezaron a utilizarse durante la Alta Edad Media, probablemente entre los siglos VI y VII⁵. El proceso tradicional de elaboración de los perfiles de plomo, el cual es similar al utilizado para las varillas de estaño, cambiando simplemente la forma del molde donde el metal es vertido, es, de forma resumida, el siguiente:

- *fundido del plomo y posterior colado en moldes.* El fundido del metal se realiza en crisoles de materiales refractarios. Tradicionalmente, los moldes donde se cuele el metal fundido podían ser de piedra⁶, madera o metal –este último siempre se ha mantenido como uno de los más utilizados- y podían tener uno o varios surcos o canales para la elaboración de varios perfiles simultáneamente. El tiempo de endurecimiento del plomo es realmente rápido por lo que en una sesión de trabajo se puede elaborar una gran cantidad de perfiles. Los perfiles resultantes –y por lo tanto el tamaño del molde- eran de unos 50 cm de longitud.

- *desbastado de las alas.* Una vez fuera del molde, los perfiles presentan una serie de rebabas e imperfecciones en la parte central de las alas, debido al plomo fundido que se ha escapado ligeramente por las uniones de las dos mitades del molde. El proceso de limpiar o desbastar las alas de los plomos de imperfecciones se realizaba antiguamente –hasta la introducción del molinillo en la segunda mitad del siglo XV- mediante algún tipo de cuchilla metálica afilada, lo que le creaba sobre las alas el típico aspecto facetado de los plomos medievales. (Figura 3)

- *estirado de los perfiles de plomo.* Una vez fuera del molde y desbastados, los perfiles de plomo son excesivamente cortos –50 cm aproximadamente-, duros y gruesos para poder trabajar con ellos, por lo que necesitan ser estirados. Con este proceso se obtienen perfiles más largos y de formas más definidas. Tradi-

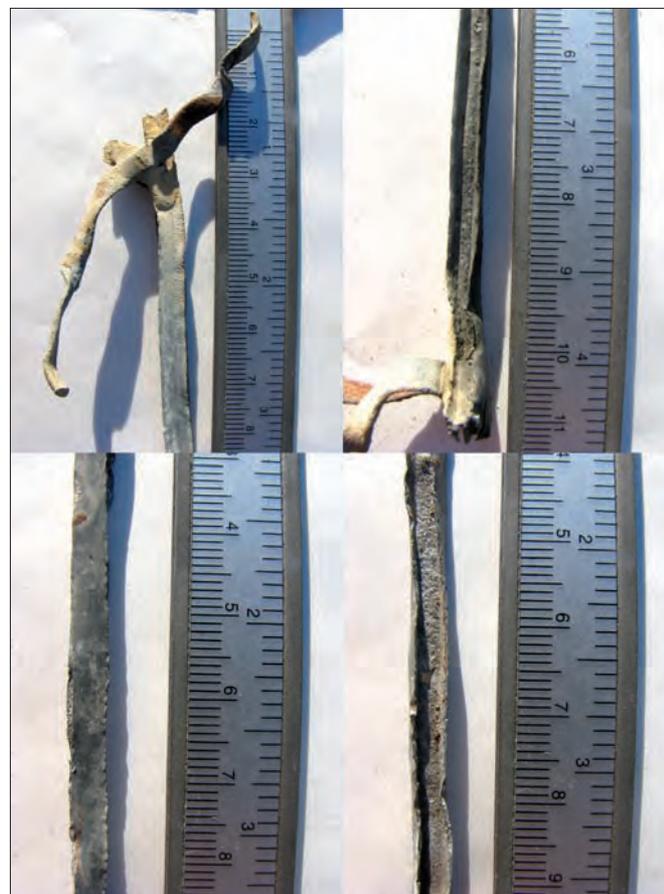


Fig. 4. Detalles de dos perfiles de plomo procedentes de sendas vidrieras del siglo XVI; arriba: Iglesia de Berlanga de Duero (Soria); abajo: Iglesia de Mota del Marqués (Valladolid). (Fotos: Fernando Cortés).

cionalmente este proceso se realizaba de forma manual por lo que a menudo la calidad de los plomos obtenidos podía diferir notablemente (Figura 4). A partir de la segunda mitad del siglo XV, pero sobre todo de forma paulatina a lo largo del siglo XVI, se empezó a utilizar el molinillo o perfiladora de plomo con el que se podían conseguir plomos más homogéneos y de diferentes medidas –anchura de las alas y altura del alma- según las ruedas de calibrado que se utilizasen. El excesivo estirado de los perfiles de plomo por parte de algunos vidrieros de finales de la Edad Media condujo a una serie de gremios europeos a prohibir el estirado manual del plomo. A pesar de estos datos, en la actualidad disponemos de evidencias suficientes que nos inducen a pensar que el proceso de perfilado y estirado de los perfiles de plomo mediante el molinillo introducido a partir del siglo XVI y en uso

⁵ En excavaciones realizadas en los monasterios ingleses de Monkwearmouth y Jarrow se encontraron junto a miles de fragmentos de vidrio plano de diferentes colores pero sin pinturas, restos de perfiles de plomo en H, datados en el último tercio del siglo VII dC.

⁶ El molde más antiguo conocido hasta la fecha, datado entre los siglos X y XI dC, fue hallado en Saint Denis (Francia) y es de piedra calcárea.



Fig. 5. Detalles de dos perfiles de plomo procedentes de diferentes vidrieras; arriba: Iglesia del Monasterio de Pedralbes (Barcelona) -siglo XIV-; abajo: Iglesia de Valpueda (Burgos) -probablemente de la segunda mitad del siglo XVI o la primera mitad del siglo XVII-. (Fotos: Fernando Cortés).

hasta nuestros días, ha producido plomos más frágiles y de peor calidad que muchos de los plomos medievales que han llegado hasta nosotros. (Figura 5)

Las ruedas utilizadas para el transporte y estirado de los perfiles en un principio parece ser que eran lisas pero con el paso de los años se fueron grabando con unas incisiones para facilitar el arrastre del plomo. Estas muescas imprimían unas muescas dentadas y verticales sobre ambas caras del alma de los plomos y dejaban sobre las alas unas finas líneas longitudinales fruto de la presión ejercida durante el arrastre del perfil (Figura 6). A partir de los siglos XVII y XVIII los plomos empezaron a ser mucho más planos, finos. Para compensar la mayor fragilidad de estos plomos se les añade una especie de canales o rebordes salientes a lo largo de la parte exterior de las alas de los perfiles con el fin de conferirles mayor fuerza. A partir de estos siglos las dentaduras o muescas de las almas empiezan a hacerse más distanciadas entre sí y en ocasiones incluso diagonales con respecto al eje del perfil. Tanto las muescas del alma como las canales de las alas se han mantenido en la mayoría de los plomos utilizados hoy en día. Como curiosidad, es interesante mencionar que durante el siglo XVII algunos vidrieros introdujeron su propia firma, el logotipo

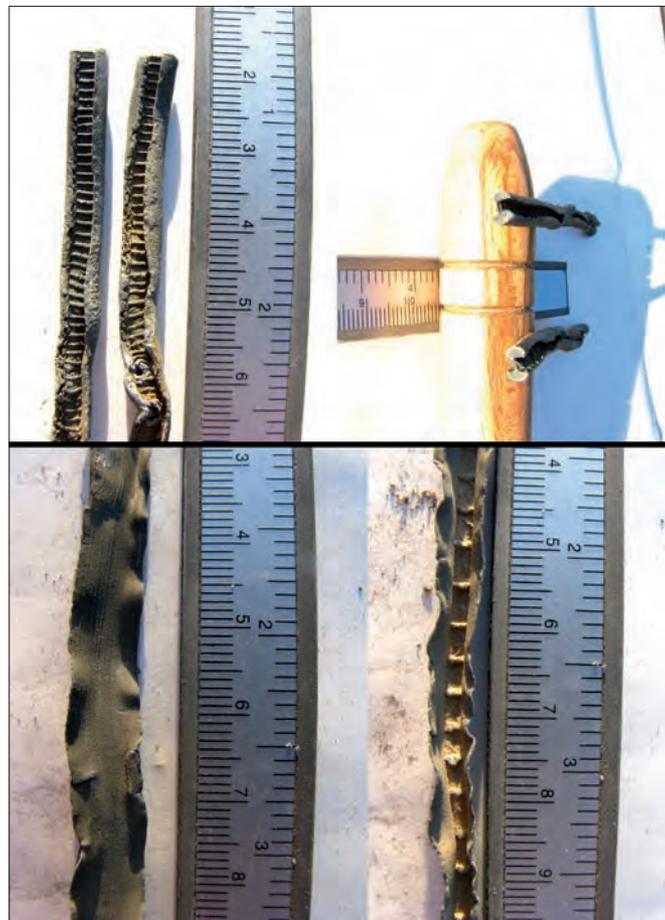


Fig. 6. Detalles de dos perfiles de plomo procedentes de diferentes vidrieras; arriba: Kloster Haina (Alemania) –plomos utilizados como nudos para las varillas de refuerzo, posiblemente del siglo XVI-; Abajo: Iglesia de Berlanga de Duero (Soria) –posiblemente del siglo XVIII-. (Fotos: Fernando Cortés).

de su taller o una fecha, grabados en el alma de los perfiles de plomo que producían.

- *corte, emplomado y soldadura de los plomos.* Las tres últimas operaciones necesarias para transformar los perfiles en el entramado o red de plomo que configuran los paneles de una vidriera son las que describiremos a continuación.

El proceso de emplomado y soldadura

Llama la atención el hecho de que tanto los perfiles de plomo como la técnica de trabajo de la vidriera emplomada no han sufrido variaciones sustanciales en sus más de 1000 años de historia. Las fuentes escritas más antiguas sobre la técnica de la vidriera y por defecto sobre la técnica y el proceso de emplomado siguen siendo en la actualidad dos manuscritos medievales bien conocidos: el del monje Theophilus, escrito hacia 1120 y el de Antonio da Pisa, escrito hacia finales del siglo XIV.

El proceso de emplomar un panel de vidriera consiste básicamente en *abrazar* todas las piezas de vidrio de un panel con perfi-

les de plomo de sección en “H”, los cuales son soldados posteriormente entre sí con estaño por ambas caras. Se trata éste de una técnica de trabajo que si bien podría parecer sencilla y carente de complicaciones, requiere de años de aprendizaje y práctica para poder realizarla correctamente. Los plomos deben ser cortados a medida de cada pieza mediante un cuchillo especial, dándole a cada extremo del perfil la forma que mejor se adapte a la del plomo en el que se va a insertar. El emplomado de los vidrios se realiza sobre el cartón de trabajo –escala 1:1- que se coloca sobre la mesa de trabajo. El trazado de los plomos debe seguir lo más ajustadamente posible el de las líneas de emplomado dibujadas en dicho cartón. Es importante decidir de antemano el trazado de los plomos y su grosor.

El emplomado de un panel no debe ser ni demasiado rígido ni demasiado blando. En un emplomado correcto, cada plomo debe abrazar firmemente los vidrios, no dejando zonas donde los vidrios queden excesivamente sueltos pero tampoco apretándolos demasiado. Asimismo, cada extremo de los plomos debe introducirse en el alma de otro –esto es lo que se llama soldadura “alma con alma” ya que las almas de ambos plomo están en contacto-, lo que, una vez soldada la unión de ambos plomos, garantiza una mayor fuerza y resistencia de todo el panel. Los perfiles de plomo utilizados no deberían ser demasiado largos ni mucho menos atravesar el panel de lado a lado, ya que esta forma de emplomar crearía zonas débiles en el panel al actuar como posibles zonas de pliegue.

Una vez tejida o trenzada la red de plomo de un panel, las uniones entre los diferentes plomos deben ser soldadas con estaño por ambas caras. La soldadura entre dos metales de bajo punto de fusión –inferior a los 200°C-, como son el plomo y el estaño, se conoce como “soldadura blanda”, la cual ya era conocida y practicada por los fenicios y chinos hace más de 2000 años. Para que el estaño pueda adherirse al plomo y se distribuya por éste de forma uniforme, es necesaria la aplicación de una grasa o resina sobre la zona del plomo donde se va a efectuar la soldadura. Generalmente se utiliza estearina, cuya función es la de romper la posible tensión superficial existente entre ambos metales, limpiar el plomo de óxido y facilitar la fluidez del estaño sobre el plomo⁷. Algunos vidrieros utilizan bobinas de estaño con alma de resina incorporada, que son aquellas en las que se han introducido colofonia –una de las resinas más comunes- en varios conductos creados en el interior de los hilos de estaño. Independientemente del tipo de grasa o resina utilizada, todas ellas dejan restos de grasa en la zona de la soldadura, por lo que es importante su eliminación frotándolos con un simple trozo de paño o papel absorbente.

La fundición del estaño y su posterior aplicación se realiza mediante un soldador. Antiguamente estos soldadores eran sencillas varillas de cobre insertadas en un mango de madera y terminadas en una cabeza apuntada. Aunque hoy en día nos parezca difícil de imaginar, con este tipo de soldadores se han emplomado miles de metros cuadrados de vidrieras durante siglos. Estos soldadores primitivos se colocaban sobre un recipiente metálico con brasas al rojo vivo y una vez la punta de cobre había alcanzado la temperatura necesaria, ya estaba lista para soldar. No es

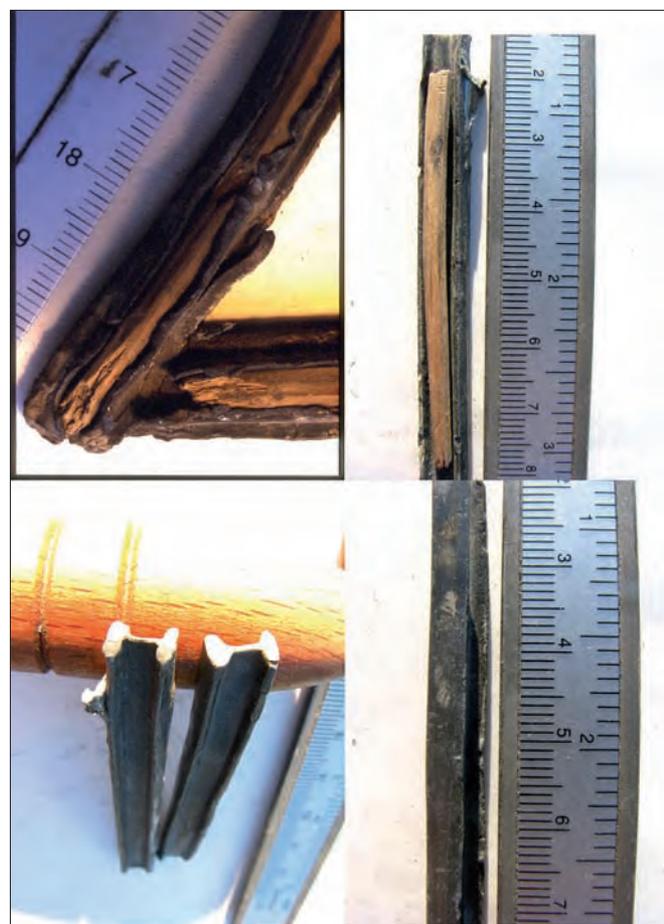


Fig. 7. Diferentes detalles de varios perfiles de plomo reforzados con junquillo de mimbre procedentes de una vidriera de alrededor de 1350 en Kloster Haina (Alemania). (Fotos: Fernando Cortés).

difícil imaginar que la temperatura de este tipo de soldadores era poco constante y difícil de mantener, y de ahí que las soldaduras de las vidrieras hasta el siglo XIX presenten en ocasiones diferencias notables en cuanto a su calidad. A partir del siglo XIX los soldadores pasaron a ser de gas. En la actualidad, si bien todavía hay vidrieros que utilizan los soldadores de gas, la mayoría de ellos utilizan soldadores eléctricos de entre 75 y 150W.

Algunas técnicas particulares de trabajo con el plomo

Las técnicas o procedimientos de trabajo con el plomo hasta aquí descritos son los habituales en la gran mayoría de las vidrieras. Existen no obstante otras prácticas poco o menos frecuentes –algunas de ellas ya desaparecidas y otras se siguen utilizando hoy día- que hemos decidido comentar aquí brevemente dado su

⁷ La estearina es un gliceril éster de ácido esteárico, que es un ácido graso saturado proveniente principalmente de grasas animales (sebo), aunque también pueden ser de origen vegetal.

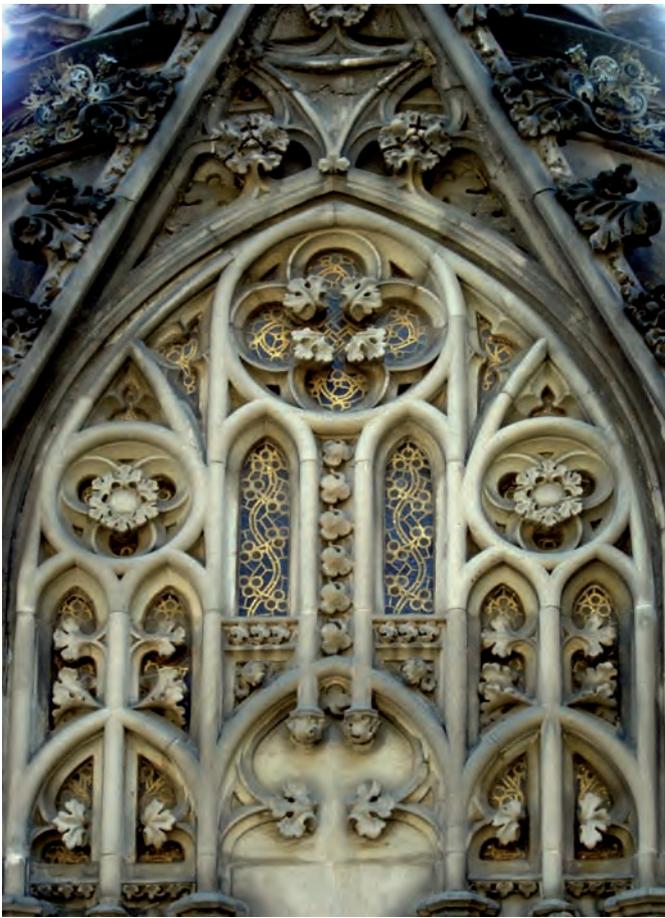


Fig. 8. Vidriera de finales del siglo XIX o principios del siglo XX situada en un mausoleo del Cementerio de Montjuic Barcelona) en la cual se han pintado de dorado los plomos exteriores. (Foto: Silvia Cañellas).

interés para la historia de la técnica de la vidriera y el trabajo con el plomo.

- *Varillas de refuerzo entre plomos.* En algunas vidrieras medievales que han conservado su emplomado original, especialmente en el ámbito germánico, se insertaban una o dos varillas de junco de mimbre o, menos frecuentemente, de hierro, entre dos o tres perfiles de plomo perimetrales, los cuales actuaban a modo de marco de refuerzo, mejorando considerablemente la estabilidad de los paneles. La versión actual de esta técnica serían los plomos armados en “H” o en “U”, los cuales son reforzados en el interior del alma con una varilla de acero. (Figura 7).

- *Plomos dobles o yuxtapuestos.* Desde la Edad Media es una práctica relativamente común el uso de dos o más plomos yuxtapuestos lateralmente y soldados entre sí, con una finalidad tanto estética, como es la de remarcar una parte del motivo representado o quitarle luz mediante un línea mucho más gruesa, como de refuerzo, en el caso de que se utilizara esta técnica en los plomos perimetrales del panel.

- *Doblajes.* La técnica del doblaje se desarrolla en el siglo XIX y consiste básicamente en colocar un vidrio individual-

mente emplomado sobre otro del mismo tamaño y perteneciente a la red de plomo principal, con la finalidad de bien oscurecer el primero, cambiar su tono/color o bien añadir o complementar con nuevas líneas de grisalla las que ya portaba el vidrio base. El plomo del vidrio de doblaje se soldaba sobre el de la red de plomo.

- *Soldadura de los plomos perimetrales por una sola cara.* Normalmente los vidrieros sueldan los paneles por ambas caras. En ocasiones, sin embargo, se dejan los plomos perimetrales de una cara sin soldar –generalmente la cara exterior- con la finalidad de, si fuera necesario, facilitar su eventual eliminación in situ durante el montaje de la vidriera al haber quedado el panel demasiado grande.

- *Esquinas de los paneles redondeadas.* En algunas vidrieras medievales se ha podido observar que en ocasiones los vidrieros utilizaban uno o dos perfiles de plomo corridos, sin soldaduras en las esquinas como en la actualidad, para cerrar el margen exterior del panel, creando de esta manera esquinas redondeadas. Esta técnica se utilizaría seguramente para economizar tanto plomo como estaño.

- *Estañado de la red de plomo.* El recubrir de estaño las alas de una red de plomo por una o por ambas caras del panel es una técnica que ha sido observada en algunas vidrieras de la Edad Media y del siglo XIX y cuya finalidad era la de proporcionar mayor fuerza y rigidez al panel.

- *Dorado de los plomos.* Los plomos de algunas vidrieras especiales de finales del siglo XIX y principios del XX, durante los estilos artísticos europeos del Modernismo, Art Nouveau, Jugendstil, Sezession, Modern style y Floreale, se pintaban de dorado. Esta técnica, que se podía aplicar por una o por ambas caras y tanto en exteriores como en interiores, tenía la finalidad de conferirle a la vidriera un carácter más noble, vistoso y decorativo. (Figura 8).

- *Incisiones en las alas de los plomos.* En ocasiones los vidrieros practican una pequeña incisión en ambas caras de las alas de los perfiles de plomo con el fin de poder doblarlo fácilmente y adaptarlo a un vidrio de formas muy acentuadas. Si bien esta es una técnica habitual, lo excepcional es aplicarla en todos los perfiles de plomo, como es el caso de una vidriera, presumiblemente del siglo XVIII, de la Capilla del Sagrario de la Catedral de Sevilla. (Figura 9).

- *Marcas de vidriero sobre el plomo.* En algunas vidrieras medievales de los siglos XIII y XIV se han podido encontrar, grabadas sobre las alas de algunos plomos perimetrales, marcas de trabajo del vidriero. Estos signos, que podían ser en forma de círculos o cifras romanas, los grababa el vidriero a modo de ayuda durante el montaje para así poder identificar fácilmente la vidriera a la que pertenecía un panel o la ubicación de cada panel en su vano correspondiente de la vidriera.

- *Emplomados provisionales.* Según documentación conservada, parece ser que en ocasiones algunos vidrieros –particularmente en Alemania y en el siglo XIX- emplomaban parcialmente los vidrios que iban a pintar, para más tarde desemplomarlos



188

Fig. 9. Detalle de una vidriera de finales del siglo XVIII o principios del siglo XIX en la Capilla del Sagrario de la Catedral de Sevilla donde se aprecia la técnica de emplomado con las alas de los plomos cortadas. (Foto: Fernando Cortés).

e introducirlos en el horno para su cocción. Presumiblemente, esta técnica sería utilizada más bien en paneles de pequeño formato y no en vidrieras enteras.

- *Plomos de fractura y plomos superficiales.* Se trata de dos métodos de restauración de vidrios fracturados utilizados tradicionalmente por los vidrieros y que presentan sus ventajas e inconvenientes. La técnica de los plomos de fractura consiste en insertar un nuevo plomo entre los fragmentos de vidrio fracturados, generalmente de menor grosor que los plomos originales de la vidriera. Las ventajas de este método son su compatibilidad con el resto de los materiales de la vidriera y la gran resistencia que aporta a la fractura. Sus principales inconvenientes son principalmente tres. El primero es de tipo estético ya que pueden desfigurarse, en mayor o menor medida, la lectura de las piezas de vidrio donde se insertan al crear una nueva línea negra en el diseño original. El segundo es de tipo técnico, dado que para la introducción de estos plomos es necesario el desemplomado y extracción de la pieza fracturada, lo que implica un riesgo de nuevas fracturas y deterioro del plomo. La tercera y última objeción es de carácter ético, ya que a menudo se ha de recurrir al *remordido* de los cantos de los vidrios a fin de poder introducir el plomo de fractura entre ellos.

Por lo que respecta al método de los plomos superficiales, éste consiste sencillamente en cubrir o tapar una fractura o pequeña laguna en el vidrio mediante una estrecha banda de plomo -generalmente se utilizan las alas recortadas de un plomo de perfil en "H"- por ambas caras. Estas bandas de plomo son soldadas con estaño en sus extremos, allí donde tocan o se insertan en el plomo original. Este método, si bien estructuralmente no es tan eficaz como el anterior, tiene la gran ventaja de que no exige el desmontaje de los vidrios fracturados ni la mordedura de sus cantos. En cualquier caso, en ambos métodos, la anchura de los nuevos plomos deberá ser siempre inferior a la de los plomos originales de la vidriera -preferiblemente de unos 3 mm-.

Las diferentes funciones del plomo en las vidrieras

Como ya hemos comentado más arriba, las principales funciones de la red de plomo de las vidrieras son por un lado la unión y soporte de las diferentes piezas de vidrio y por otro lado la de actuar como elemento de dibujo o elemento decorativo.

La unión y soporte de las diferentes piezas de vidrio es sin duda la función más evidente e importante de una red de plomo ya que de la buena calidad de un plomo y de un buen emplomado dependen en gran medida la duración y resistencia de una vidriera situada a la intemperie en el ventanal de un edificio. Para ello, los plomos deben abrazar los vidrios firmemente, permitiendo a la vez una ligera oscilación o movimiento de los paneles ante sus fases de dilatación por calor y ante los empujes del viento y las posibles vibraciones. Aparte de la calidad del plomo y del emplomado, el éxito de un buen emplomado depende asimismo en buena parte de la calidad del estaño utilizado y del proceso de soldadura de los diferentes perfiles de plomo.

Por otra parte, la principal función artística de la red de plomo de una vidriera es la de actuar como elemento de dibujo y decoración. Desde el interior de un edificio, tanto los vidrios como los plomos cobran vida y sentido, los plomos contornean y definen el dibujo del motivo representado, separando mediante líneas oscuras los diferentes vidrios o los colores de éstos. Desde el exterior, desde donde las vidrieras suelen dar la sensación de un simple paramento gris oscuro y sin vida, la vidriera puede tener asimismo su propia lectura en el caso de plomos dorados. En la fase inicial de creación de muchas vidrieras tradicionales, éstas se diseñan en función del dibujo creado por la red de plomo. Cuando vemos una vidriera a contraluz, las líneas negras que el plomo va creando al contornear las piezas de vidrio, de mayor o menor grosor según el tipo de plomo utilizado, pueden ser un elemento de dibujo y diseño de primer orden. Conforme nos alejamos y tomamos distancia con la vidriera, estas líneas de dibujo van progresivamente suavizándose, permitiendo la interacción y fusión de los colores (Figura 10).



Fig. 10. Panel de una vidriera de finales del siglo XIX en la fachada de la Catedral de Barcelona. (Foto: Fernando Cortés-Teodoro Fort).

La importancia histórica de la red de plomo en las vidrieras

A lo largo de la historia de la vidriera podemos encontrar diferentes estilos o formas de concebir este arte, en las cuales la función artística de la red de plomo desempeñaba un papel más o menos protagonista. Así, por ejemplo, en el siglo XIII destacan las sencillas y austeras vidrieras del arte cisterciense. Estas vidrieras nos ofrecen interesantes y bellos diseños basados exclusivamente en las geometrías modulares, donde los vidrios son mayoritariamente incoloros o monocromos y las pinturas, representando generalmente motivos florales, son muy escasas y discretas. En estas vidrieras, probablemente más que en cualquier otro momento de

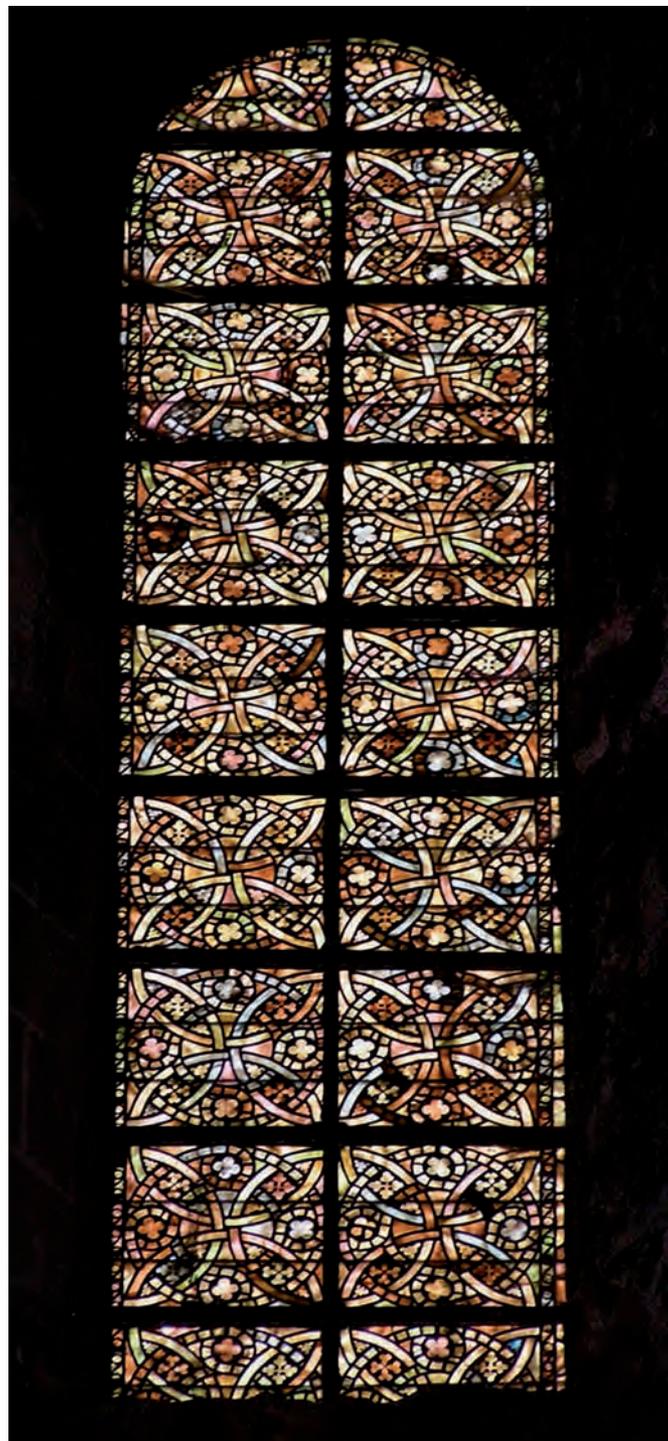


Fig. 11. Vidriera cisterciense de la primera mitad del siglo XIII en el Monasterio de Pedralbes (Tarragona). (Foto: Mikel Delika).

la historia de este arte, la red de plomo es protagonista indiscutible (Figura 11).

Asimismo, en el siglo XIII también se desarrolló en el ámbito germánico otro género de vidrieras puramente decorativas y muy coloristas conocidas como “vidrieras tapiz” las cuales, como su nombre indica, imitaban en cierta manera a tapices translúcidos

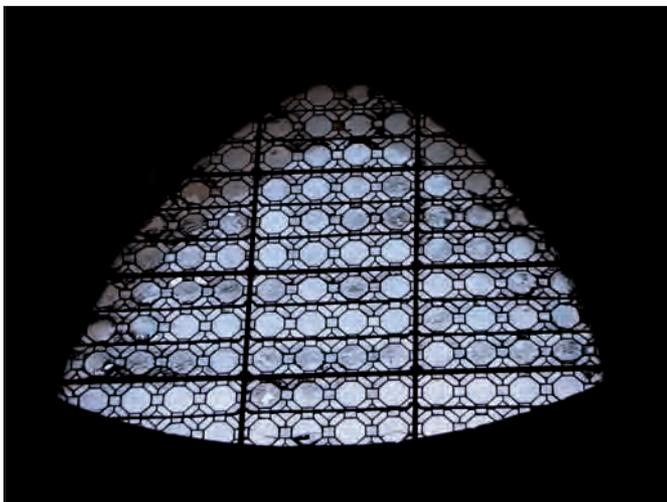


Fig. 12. Vidriera, posiblemente del siglo XVIII, en la Catedral de Burgos. (Foto: Fernando Cortés).

colgantes y donde vidrios y plomos tienen la misma importancia en el diseño general de las obras.

A finales del siglo XV y durante el siglo XVI el arte de la vidriera se convirtió en un arte cada vez más pictórico, planteándose como un género de pintura desarrollada sobre grandes lienzos traslúcidos en los cuales la red de plomo pierde protagonismo ante el avance de las grisallas. En estas vidrieras se reduce asimismo la cantidad de plomo utilizado de forma considerable, siendo las piezas de vidrio cada vez más grandes. Del siglo XVI destacamos dos géneros muy diferentes. Por un lado las vidrieras de grandes escenas o composiciones que se extienden a lo alto y ancho de todo el ventanal. En estas vidrieras, especialmente en las creadas a partir del segundo tercio del siglo XVI, da la sensación de que los plomos, más que ayudar en la composición, suponían un estorbo y se intentaban disimular y ocultar en el diseño general de la obra.

Por otro lado se desarrolla también en este siglo el género de los llamados medallones, pequeñas miniaturas artísticas creadas en piezas de vidrio circulares –generalmente de unos Ø 21 cm. Si bien estos medallones iban insertados en el centro de una sencilla vidriera geométrica incolora, en la parte principal de estas obras se prescindía por completo de cualquier tipo de emplomado, cediendo lugar a una decoración pictórica de gran calidad y delicadeza mediante el uso exclusivo de grisallas y amarillos de plata.

Paralelamente a este tipo de vidrieras comentadas se desarrolló a partir del siglo XV un tipo de vidriera utilitaria muy sencilla, formada por vidrios incoloros formando mediante la red de plomo sencillos motivos geométricos como rombos, cuadrados o rectángulos. Este tipo de vidriera, sencilla, barata y funcional, será la que dará lugar a la vidriera geométrica o “blanca” predominante en los siglos XVII y XVIII y en la cual los motivos modulares desarrollados por la red de plomo se complican en comparación a siglos anteriores (Figura 12).

Una variante de vidriera geométrica, sucesora de la vidriera blanca barroca, es una vidriera decorativa de gran colorido predo-



Fig. 13. Vidriera, posiblemente del siglo XVIII o principios del siglo XIX, sobre una puerta de la Mezquita/Catedral de Córdoba. (Foto: Fernando Cortés).

minante durante la segunda mitad del siglo XVIII y la primera del siglo XIX. Este tipo de vidriera utiliza vidrios de colores primarios, formando sencillas pero efectivas combinaciones geométricas claramente delimitadas por la red de plomo (Figura 13).

A finales del siglo XVIII y primera mitad del XIX se produce un género de vidrieras conocido como “vidriera lienzo”, el cual hunde sus raíces en la transformación pictórica experimentada por la vidriera durante el siglo XVI anteriormente comentada. Si bien las vidrieras del XVI mantienen en todos los sentidos la esencia del oficio y la tradición de este arte, las vidrieras lienzo, al funcionar como auténticos cuadros traslúcidos pintados en los ventanales de un edificio, son obras más de pintores que de vidrieros. En ellas el plomo prácticamente desaparece, siendo de gran tamaño los vidrios donde se representan los motivos pictóricos.

Por último, durante los primeros años del siglo XX nos encontramos con que en algunas vidrieras decorativas del Modernismo y geométricas del Art Decó se recupera la importancia de los emplomados. Si bien en las primeras los vidrios utilizados son mayoritariamente de colores intensos y en las segundas son incoloros y texturados, en ambos tipos de vidrieras el plomo funciona como elemento primordial de dibujo y diseño (Figura 14).

Deterioro del plomo

Es una creencia común, que aparece reflejada frecuentemente en la literatura sobre el tema, el pensar que las redes de plomo de las vidrieras tienen una duración de unos 100 años en condiciones normales de exposición⁸. No obstante, la experiencia nos demuestra que esta generalización, si bien puede tener su justificación, no es válida para todas las vidrieras. A menudo los plomos de las vidrieras de los siglos XVII, XVIII, XIX e incluso del XX son de

⁸ Durante mi etapa como estudiante de restauración de vidrieras ésta era una creencia común y yo mismo en ocasiones he transmitido a mis estudiantes durante estos últimos años la idea de que las redes de plomo, “en teoría” tenían una vida útil de unos 100 años. Con los años, sin embargo, mi experiencia personal me ha enseñado que este tipo de afirmaciones son generalizaciones no válidas para todas las vidrieras.



Fig. 14. Vidriera modernista de principios del siglo XX situada en el actual Museo de Arte de Cerdanyola del Vallès (Barcelona). (Foto: Fernando Cortés).

pésima calidad y su estado aconseja que éstas sean reemplomadas. Asimismo, muchos emplomados medievales que han llegado hasta nosotros se encuentran en un buen estado de conservación y pueden perfectamente seguir cumpliendo su función original.

Independientemente de su antigüedad y pese a sus grandes ventajas sobre otros metales ya comentadas anteriormente, el plomo se ve afectado por diferentes patologías o procesos de deterioro que pueden terminar por afectar seriamente a un panel o al conjunto de la vidriera. Estos deterioros pueden ser tanto de origen intrínseco como extrínseco y de carácter mecánico o químico.

Entre los factores intrínsecos o internos de deterioro destaca principalmente su composición química. Así por ejemplo, sabemos que un elevado porcentaje de antimonio, cobre o estaño, hacen al plomo más resistente al deterioro químico -un porcentaje de estaño superior a un 1,5% actúa como protección contra la corrosión- pero también menos elástico y más rígido. La plata por su parte aumenta la flexibilidad del plomo y su resistencia a tensiones mecánicas.

Los principales factores extrínsecos o externos de deterioro son las altas humedades y temperaturas, los bruscos contrastes entre estos parámetros, ciertos gases presentes en la atmósfera y determinados productos químicos que pueden entrar en contacto con el metal. El plomo, si bien en líneas generales es un metal relativamente resistente a los ácidos, es especialmente sensible a



Fig. 15. Detalle de la parte inferior de una vidriera plegada debido a un mal emplomado en la Catedral de Logroño (Foto: Fernando Cortés).

los ciertos ácidos como el acético, fórmico, oxálico, nítrico, tánico, húmico, formaldehído y a algunos productos disociados del azufre y el cloro que pueden inducir, especialmente en ambientes de elevada humedad, a procesos irreversibles de corrosión. Asimismo, la cal viva y el cemento Pórtland, componentes utilizados en los morteros de sellamiento, y el Blanco de plomo que en otras épocas se añadía a las masillas pueden atacar químicamente los plomos de una vidriera. Por otro lado, el contacto con otros metales puede inducir a una corrosión electrolítica en situaciones de elevada humedad.

Por último, no hemos de olvidar la importancia que el factor humano puede desempeñar en el deterioro de las vidrieras, como por ejemplo un mal emplomado o soldado original de los paneles



Fig. 16. Restos de un panel destrozado procedente de una vidriera en una iglesia de Buenos Aires (Argentina). (Foto: Sofía Villamarín).

(Figura 15). Asimismo, tanto las restauraciones excesivas o con métodos muy abrasivos, como por el contrario el abandono y la falta de un mantenimiento regular al que se ven expuestas la mayoría de las vidrieras históricas, pueden convertirse en dos de los factores de deterioro más importantes (Figura 16).

Por lo que respecta al deterioro mecánico de los plomos de las vidrieras, la principal patología que nos podemos encontrar es el debilitamiento y pérdida de consistencia que afecta a la red de plomo con el paso del tiempo. Este debilitamiento termina por producir microfisuras y fracturas en los plomos y abombamientos en el panel. Las fracturas y los abombamientos hacia la cara interior o exterior de los paneles, son sin duda los dos problemas más comunes que presentan las redes de plomo de las vidrieras. En el origen de este debilitamiento de los plomos podemos encontrar varias causas, como la fatiga del metal con el paso de los años, la presión del viento, las altas temperaturas de los meses más cálidos, las contracciones y dilataciones debidas a los bruscos cambios de temperatura y humedad, un mal emplomado (líneas rectas horizontales o verticales atravesando el panel), una mala calidad del plomo, una cantidad insuficiente de varillas de refuerzo en el panel y un tamaño excesivamente grande del mismo.

Las fracturas o fisuras de los plomos se producen generalmente sobre las alas, en la zona de contacto entre el plomo y el estaño de la soldadura. Este bien conocido que este fenómeno, generalmente suele tener un doble origen: por un lado el hecho de que los puntos de soldadura, al actuar como ejes de flexión ante los movimientos de un panel hacia el interior o exterior, van debilitándose progresivamente en esa zona; por otro lado, durante el proceso de soldadura se crea una cierta tensión y debilitamiento en la zona de unión entre el plomo y el estaño debido al fuerte contraste de temperatura que se genera al entrar en contacto dos metales con una gran diferencia de temperatura. (Figura 17).

Las fases avanzadas de deterioro químico de los plomos son afortunadamente un problema relativamente poco común,

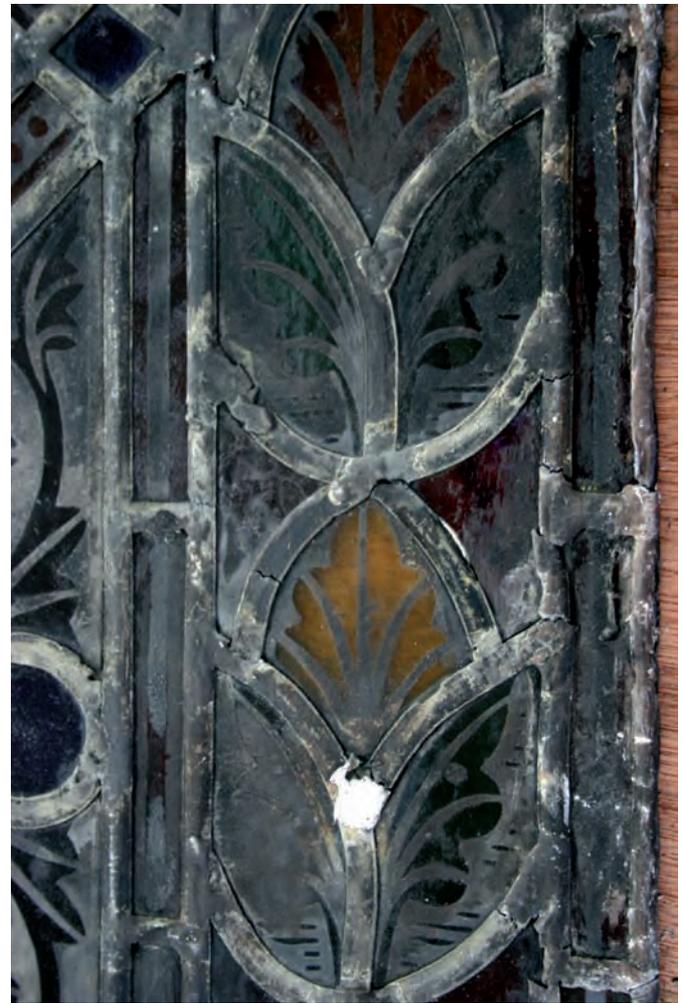


Fig. 17. Detalle de varias fracturas en la red de plomo del panel de una vidriera de finales del siglo XIX en la fachada principal de la Catedral de Barcelona. (Foto: Fernando Cortés –Teodoro Fort).

siendo en el caso del estaño de las soldaduras mucho menos frecuente. En exposición natural de una vidriera a la intemperie, el plomo sufre un rápido proceso de oxidación, el cual es sin embargo beneficioso ya que supone la formación de una película gris oscura superficial de óxido de plomo formada por anglecita ($PbSO_4$), lanarkita ($Pb_2O \cdot SO_4$) y litargirio (PbO) que actúa como protección. Esta fase de oxidación estable es el estado más común en la mayoría de vidrieras.

En una segunda fase de deterioro, si el acetato de plomo presente en esta película reacciona con el dióxido de carbono de la atmósfera puede llegar a formarse sobre el plomo una segunda película de carbonato de plomo (Blanco de Plomo). Esta capa de coloración blanca está formada por sales inorgánicas muy higroscópicas e insolubles. En una tercera fase más avanzada pero muy poco frecuente en vidrieras, el plomo puede llegar a reaccionar nuevamente con el medio, dando lugar a la formación de sulfato de plomo.



Fig. 18. Red de plomo del siglo XIX de un panel procedente de una vidriera medieval en la Catedral de Lincoln (Reino Unido). (Foto: Fernando Cortés).

Restauración de la red de plomo

Como ya dijimos anteriormente, el plomo de las vidrieras ha sido considerado tradicionalmente como un material puramente funcional, carente de valor y perfectamente reemplazable en cada nueva restauración. Esta falta de apreciación y concienciación sobre el posible valor histórico, documental y material de las redes de plomo de las vidrieras ha tenido como consecuencia reemplazados -sustitución de la red de plomo existente por una nueva- masivos e indiscriminados durante el proceso de restauración de la vidriera (Figura 18). En la actualidad, para muchos vidrieros el reemplazar un emplomado sigue siendo una intervención necesaria para sanear y mejorar el aspecto de la vidriera, para que se note que ha sido restaurada, e incorporan este procedimiento de forma sistemática en cada restauración, sea realmente necesario o no. Afortunadamente, poco a poco se va desarrollando una mayor concienciación sobre la importancia de las redes de plomo en el conjunto de la vidriera, y ello ha generado un creciente número de estudios sobre el tema y un cambio de actitud ante su conservación y restauración.

La primera medida necesaria dentro de un programa de conservación de una vidriera histórica es la documentación

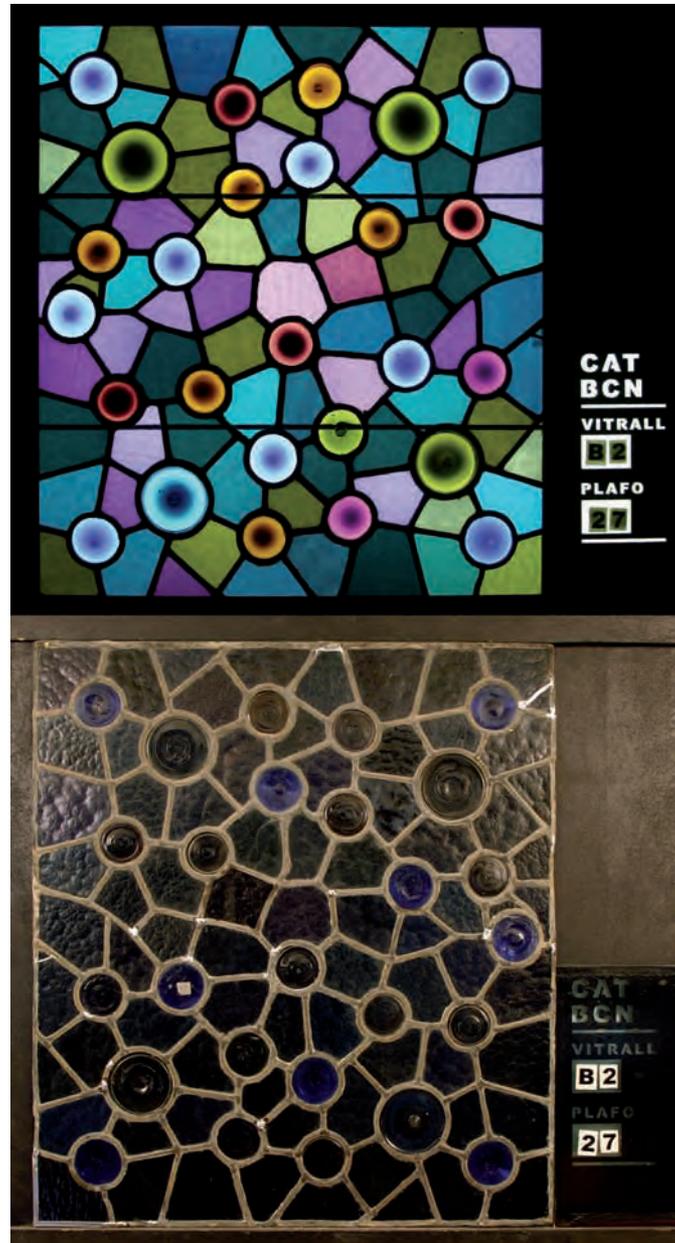


Fig. 19. Fotos de documentación de un panel de principios del siglo XX procedente de una vidriera situada en la fachada principal de la Catedral de Barcelona. (Fotos: Fernando Cortés-Teodoro Fort).

preliminar del estado de conservación de todos los materiales y evidentemente de la red de plomo. Además de la toma de fotografías generales y de detalles, es necesario especificar sobre un calco o dibujo de la red de plomo tanto las características físicas del plomo -ancho, alto, trazado, etc.- como las patologías de deterioro detectadas -fracturas, lagunas, deformaciones, deterioro químico, etc.- (Figura 19).

Una vez documentada la vidriera, las principales actuaciones de restauración que suelen ser realizadas son las siguientes:

- *Limpieza*. El plomo únicamente se debería limpiar con métodos mecánicos suaves, como pinceles de diferentes durezas, ya

que de lo contrario podríamos eliminar la capa de oxidación que recubre su superficie, la cual, como ya vimos, actúa de barrera protectora ante posteriores ataques químicos.

- *Soldadura de fracturas*. Esta es una operación muy frecuente que se realiza eliminando mediante raspado y cuidadosamente la capa de óxido que recubre la zona fracturada, aplicando a continuación estearina y soldándola con nuevo estaño. Los nuevos puntos de soldadura no deberán ser ni excesivamente gruesos o pobres en estaño ya que ambos tipos de soldadura pueden ser perjudiciales a la larga.

- *Abombamientos*. Para corregir los abombamientos es necesario aplicar pesos y, eventualmente, calor, de forma gradual sobre los paneles afectados. En ocasiones es necesario asimismo desoldar algunas soldaduras o cortar algunos plomos, volviéndolos a soldar más tarde, para reducir la presión creada y recuperar la planimetría original. Es muy importante que una vez restaurado un panel, las varillas de refuerzo que se coloquen y los nudos que las sujetan deben ser lo suficientemente fuertes como para evitar que se vuelvan a producir estos abombamientos.

- *Sustitución de plomos*. Los plomos que se encuentren excesivamente deteriorados, deformados o que se hayan perdido deben ser sustituidos por nuevos plomos de características similares a las de los originales. La sustitución completa de una red de plomo por una nueva es una operación irreversible y por lo tanto sólo debería considerarse cuando esté realmente justificada. Una parte representativa de los plomos sustituidos debería ser documentada y archivada.

- *Patinado de las nuevas soldaduras*. En el caso de que se considere que los nuevos puntos de soldadura aplicados por ambas

caras de un panel resulten excesivamente llamativos, pueden ser matizados u oscurecidos mediante la aplicación de una pátina líquida compuesta de cristales de sulfato de cobre diluidos en agua destilada que genera un proceso de oxidación acelerada.

Almacenaje de vidrieras emplomadas

El almacenaje de vidrieras durante los procesos de intervención es una operación delicada y no carente de riesgos. Los paneles de una vidriera pueden almacenarse, ya sea en el taller de restauración o en un museo, tanto en posición vertical como en horizontal pero si es en vertical los paneles deben siempre quedar apoyados sobre su lado más largo y mantener un cierto ángulo de separación en su base con respecto a la pared vertical de la caja o mueble donde se encuentren. El lugar de almacenaje de las vidrieras históricas debería mantener unas condiciones climáticas lo más estables y controladas que sea posible, siendo de preferencia los ambientes secos y ventilados con una humedad relativa y una temperatura estables. Especialmente se deberían evitar las vitrinas o muebles construidos con maderas aglomeradas o de DM (tableros de fibra de densidad media) ya que las resinas o barnices que éstas contienen desprenden gases muy nocivos -ácido formaldehído, ácido acético y ácido fórmico-. Estos gases, en un ambiente cerrado, con escasa ventilación y con una humedad excesiva, pueden atacar fácilmente el plomo, originando procesos de carbonatación y corrosión. Por último, para el almacenaje de fragmentos de plomo de cierto valor, pueden utilizarse bolsas de autocierre de polietileno.

194

Referencias bibliográficas

BAUER, W. P. (1987): "Reihenuntersuchung von Verbleiungstücken Mittelalterlicher Glasgemälde verschiedener Provenienz", en *Ö.Z.K.D.*, 21, 207-209.

BROWN, S. L. (1928): "The Structure of Lead as Related to Stained Glass", en *Journal of the British Society of Master Glass Painters*, nº 3, vol. III: 123-128.

CANNON, L. (1988): "Lead Milling Marks from a Sixteenth Century Window", en *Stained Glass Quarterly*, Fall: 222-226.

CANNON, L. Y GOLDKUHLE, D. (1991): "A study of the physical and chemical properties of lead calme and the deterioration and stability of leaded stained glass", en *XVI Coloquio Internacional (Tagung für Glasmalereiforschung)*, Comisión del CVMA en Suiza, Berna.

CORTÉS PIZANO, F. (1999): "Medieval window leads from the Monastery of Pedralbes (Catalonia) and the Cathedral of Altenberg (Germany): a comparative study", en *CVMA Newsletters*, nº 47: 25-31.

CORTÉS PIZANO, F. (2000): "Estudio del plomo medieval en las vidrieras del Monasterio de Pedralbes", en *Materiales de Construcción*, nº 259, Vol.50: 85-95.

CUZANGE, L. (2004): « La fabrication des plombs au Moyen Âge », en *Le vitrail Roman et les Arts de la Couleur. Nouvelles approches sur le vitrail du XIIe siècle*, Revue d'Auvergne, nº 570:158-168.

DENEUX, H. A. (1929): "A thirteen century mould for making calme lead", en *Journal of the British Society of Master Glass Painters*, nº 2, Vol III: 81-85.

DENEUX, H. A. (1928) : « Un moule à plom de vitraux du XIIIe siècle », en *Bulletin Monumental* 87, nº 1-2 : 149-154.

EGAN, G.; HANNA, S. D. Y KNIGHT, B. (1986): "Marks on milled window leads", en *Post-Medieval Archaeology*, 20: 303-309.

FIAUD, C. (1993) : « Le problème de l'altération des plombs anciens » en *Actes des Journées d'études du Centre International du Vitrail (Chartres)*, Bourges : 163-182.

FRENZEL, G. (1991): "Die Verbleiung Historischer Glasgemälde", en *C.V.M.A. Newsletters*, 16. *Intern. Kolloquium*, Bern: 1-6.

GARCÍA-HERAS, M.; VILLEGAS, M. A.; CANO, E.; CORTÉS PIZANO, F. y BASTIDAS, J.M. (2003): "Conservation and analytical study of metallic elements from medieval Spanish stained glass Windows", en *Conferencia Internacional de Arqueometalurgia en Europa*, Milán: 381-390.

GARCÍA-HERAS, M.; VILLEGAS, M. A.; CANO, E.; CORTÉS PIZANO, F. y BASTIDAS, J.M. (2004): A conservation assessment on metallic elements from Spanish Medieval stained glass windows, en *Journal of Cultural Heritage*, nº 5: 311-317.

KNIGHT, B. (1986): "Window Lead can be Interesting", en *Conservation News*, 29: 31-32.

KNIGHT, B., "Researches on Medieval Window Lead", en *Journal of the British Society of Master Glass Painters*, nº 1, Vol. XVIII: 49-51.

KNOWLES, J. A., "Ancient leads for windows and the methods of their manufacture", en *Journal of the British Society of Master Glass Painters*, nº 3, Vol. III: 133-140.

KNOWLES, J. A. (1959): "Decay of glass, lead and iron of ancient stained glass windows", en *Journal of the British Society of Master Glass Painters*, nº 12: 270-276.

KRATZEL, W. (1967): "Über Biege- und Zugversuche mit Proben der Verbleiung von Bildfenstern", en *Ö.Z.K.D.*, nº 21: 205-207.

MÜLLER, W. (2000): "Verbleiung bei Glasmalerei", *Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften*, Edition Leipzig, 2000.

NEWTON, R. G. (1996): "Fact or fiction? Can cold glass flow under its own weight and what happens to stained glass windows?", en *Glass Technology*, nº 4, vol. 37: 143.

NOEHL, R. (1991): "Korrosion von Fensterblei (Erstens frisches Blei, zweitens Nässe, drittens Säuren)", en *Glaswelt*, nº 4: 25-26.

PELTZ D. y ROTHMAN, V. (2007): "An examination of the lead matrices of 19th century american plated opalescent stained glass windows by John La Farge", en *Forum international pour la conservation et la restauration des vitraux: Techniques du vitrail au XIX^{ème} siècle*, Namur (Belgica): 197-206.

PISA, A. DA (1977): *Arte Delle Vetrate*. End of the 14th century. Ed. Editalia, Introduction by Salvatore Pezzella.

RAMBUSH, V. B. (1983): "The lead comes of stained glass windows: purpose, problems and preservation procedures, en *Technology & Conservation*", 8, nº3: 46-49.

SCHMELING, E.- L. (1960): "Lochfraßerscheinungen an Blei", en *Korrosion*, nº 13: 76-83.

SLOAN, J. (1989): "The best alloy for lead came", en *Professional Stained Glass*, nº 171.

STROBEL, S. (1990): *Glastechnik des Mittelalters*. Ed. Gentner Verlag, Stuttgart: 112-123.

TENNENT, N. (1993): "The corrosion of lead artifacts in wood-en storage cabinets", en *SSCR Journal*, Vol. 4 Nº 1.

TÉTREAUULT, J.; SIROIS, J. y STAMATOPOULOU, E. (1998): "Studies of lead in acetic acid environments" en *Studies in Conservation*, nº 43: 17-32.

Theophilus, *On Divers Arts*. Traducido por Hawthorne y Smith, Nueva York, Ed. Dover Publications Inc., 1979, Libro II: 67-71.

VAN TREECK, P. (2007): "Besondere ästhetische und technische Funktionen an Bleinetzen des 19. Jahrhunderts", en *Forum international pour la conservation et la restauration des vitraux: Techniques du vitrail au XIX^{ème} siècle*, Namur (Belgica): 179-190.

4.4. La tomografía axial computarizada (TAC) y su utilidad para el estudio, conservación y difusión del Patrimonio Paleontológico. Algunos ejemplos de la Sierra de Atapuerca

José Miguel Carretero Díaz

Rebeca García González

Laura Juez Aparicio.

Laura Rodríguez Aparicio

Elena Santos Ureta

Laboratorio de Evolución Humana, Departamento de Ciencias Históricas y Geografía

Universidad de Burgos

Resumen

La tomografía axial computarizada (TAC) es en la actualidad una de las herramientas analíticas más potentes para investigar la anatomía y la morfología de restos fósiles. Sin embargo, aparte de su gran interés desde el punto de vista científico, la tomografía debe verse también como una herramienta muy útil para analizar las condiciones de conservación de los fósiles y planificar los procesos de restauración. La distinta opacidad a los rayos X que presentan diferentes materiales permite diferenciarlos con claridad en la tomografía, delatando infiltraciones, fracturas, fisuras, erosiones, etc. El método es además no invasivo y absolutamente inocuo para los fósiles. Además, a partir del TAC y con el software adecuado, podemos generar modelos tridimensionales digitales de gran precisión que reproducen la morfología original o que pueden servir para reconstruirla. Finalmente estos modelos digi-

tales 3D sirven para construir réplicas físicas de los fósiles a través de las técnicas de prototipado rápido. Dada su utilidad, creemos que todas estas herramientas deben ser seriamente consideradas en los problemas asociados con la conservación y difusión del registro arqueo-paleontológico, aunque evidentemente son aplicables a otros muchos objetos del Patrimonio Cultural.

TAC y registro fósil

En los tiempos que corren resulta innegable el aporte que las nuevas tecnologías ofrecen a cualquier campo de conocimiento, del cual no escapa la conservación y restauración del Patrimonio Histórico en general y del registro fósil en particular. Durante la década de los 90, los avances en la ingeniería técnica e informática han facilitado de una manera espectacular la aplicación del

196

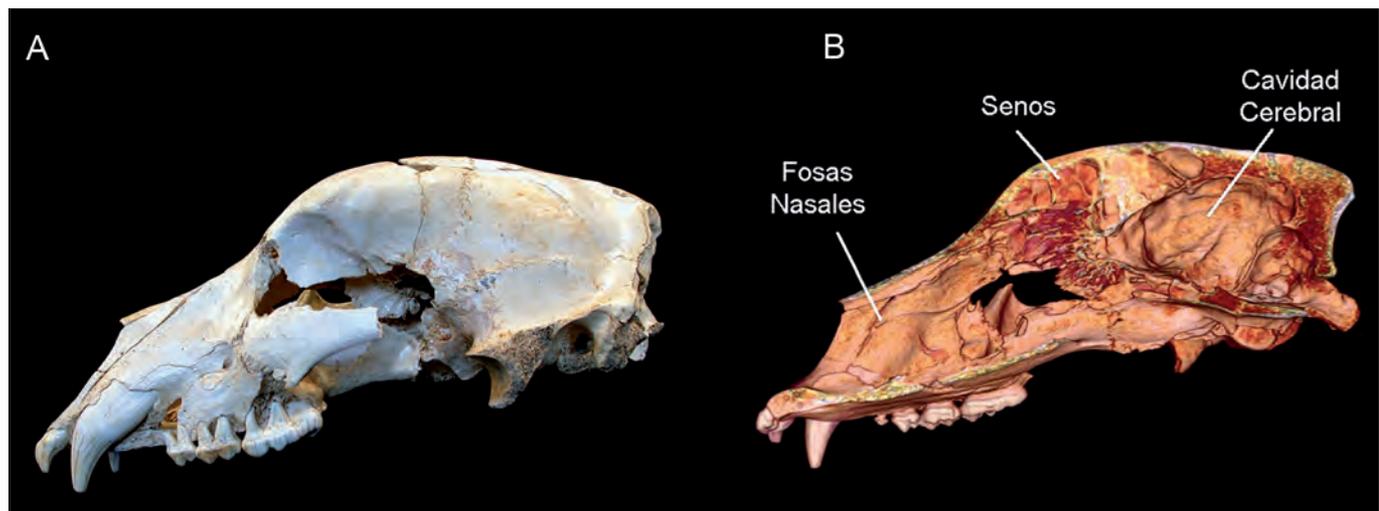


Fig. 1. (A) Cráneo de oso de Deninger (*Ursus deningeri*) de hace unos 500.000 años, del yacimiento la Sima de los Huesos (Sierra de Atapuerca), y (B) su reconstrucción virtual a partir de la tomografía. El cráneo digital se ha seccionado por la mitad para observar las estructuras internas. Dependiendo el software de reconstrucción, a cada nivel de gris se le puede asignar un color, para dar un aspecto más real a las reconstrucciones.

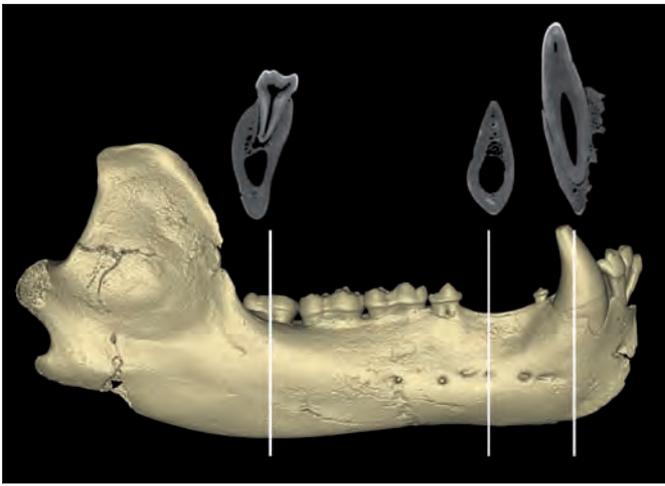


Fig. 2. Reconstrucción 3D a partir del TAC de una mandíbula de oso de Deninger de la Sima de los Huesos en la que se señalan tres secciones a distintos niveles. Tanto los cortes como la reconstrucción, permiten abordar el estudio de las propiedades mecánicas (grosor de las paredes, desarrollo de la cavidad medular, refuerzos óseos, etc. así como rasgos de la morfología dental (cemento, esmalte, dentina, estado de desarrollo, etc.). La técnica permite la observación del estado de conservación del fósil, como son las grietas, fracturas, erosiones así como el estudio de las cavidades internas.

TAC en el campo de la Paleontología de Vertebrados, abriendo un amplio abanico de posibilidades de estudio de las estructuras internas de los fósiles. La tomografía axial computarizada ofrece a los investigadores una técnica totalmente no destructiva para visualizar las características tanto del exterior como del interior de los objetos sólidos compactos, y obtener información digitalizada de sus geometrías y propiedades tridimensionales (Fig. 1).

La Tomografía Axial Computarizada o TAC fue desarrollada por el Dr. Godfrey Hounsfield en 1972 con fines médicos, por lo

que fue merecedor del premio Nobel en 1979. Su técnica se basa en el coeficiente de atenuación que experimenta el haz de rayos X al atravesar la materia. Este coeficiente de atenuación depende del material que es sometido a los rayos X y por tanto de su densidad y peso atómico. Esta técnica permite obtener cortes delgados de un cuerpo mediante rayos X sin que el objeto de estudio sufra alteración alguna. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, el TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor de uno de los ejes del objeto. La computadora, a través de una serie de algoritmos, combina todas estas imágenes en una imagen final que representa un corte del objeto como si fuera una loncha (Fig. 2). Finalmente se obtienen múltiples imágenes en rodajas (cortes) del objeto que está siendo estudiado.

Una vez realizado el TAC y con el software adecuado, podemos reconstruir el objeto tridimensionalmente en nuestro ordenador, es lo que llamamos modelo 3D. Pero no se trata simplemente de una imagen espectacular, que también. Podemos realizar con ella multitud de análisis como si trabajáramos con el original: podemos hallar distancias, espesores, diámetros, perímetros, hallar superficies, volúmenes, porosidades, densidades, calcular ángulos, estudiar detalles anatómicos, etc. y todo ello sin manipular el original y con una precisión absoluta (las medidas que tomamos sobre la reconstrucción virtual son exactas y no hay desviación en relación a los originales). Esta técnica ha sido muy utilizada desde su descubrimiento en el campo de la medicina y como hemos dicho tiene un reciente desarrollo en el estudio y conservación del registro paleontológico (Bruner y Manzi, 2006; Conroy y Vannier, 1984, 1986; Jungers y Minns, 1979; Rowe *et al.*, 1995; Ruff y Leo, 1986; Zollikofer *et al.*, 1998).

En los últimos años se han llevado a cabo investigaciones sobre la morfología y dimensiones de las cavidades internas en diferentes grupos de vertebrados, tanto fósiles como actuales (Brochu, 2000; Domínguez *et al.*, 2002, 2004; Franzosa y Rowe,

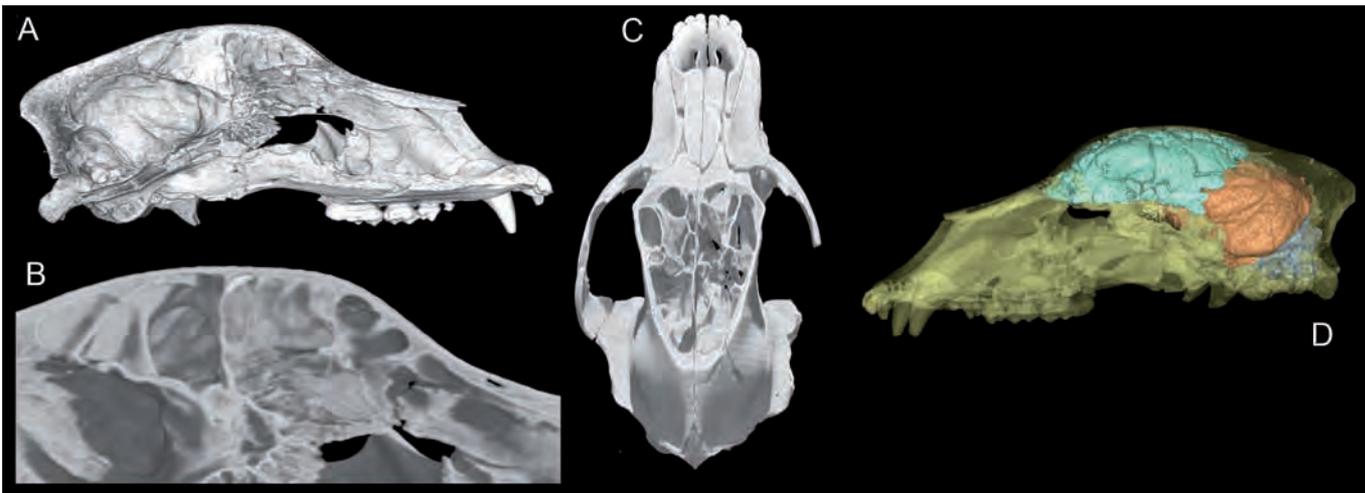


Fig. 3. A: corte sagital de la reconstrucción 3D del cráneo de *U. deningeri* de la Sima de los Huesos; B: detalle de la región frontal; C: corte transversal a la altura de los senos frontales; D: Imagen tridimensional del mismo ejemplar con el hueso transparente y los senos frontales (azul claro), el cerebro (naranja) y el cerebelo (azul oscuro) reconstruidos. Gracias a estas reconstrucciones, se ha podido estudiar la morfología interna e identificar nuevos rasgos morfológicos con valor filogenético para el conocimiento de los patrones evolutivos de los úrsidos en Europa durante el Pleistoceno (modificado de García *et al.*, 2007).

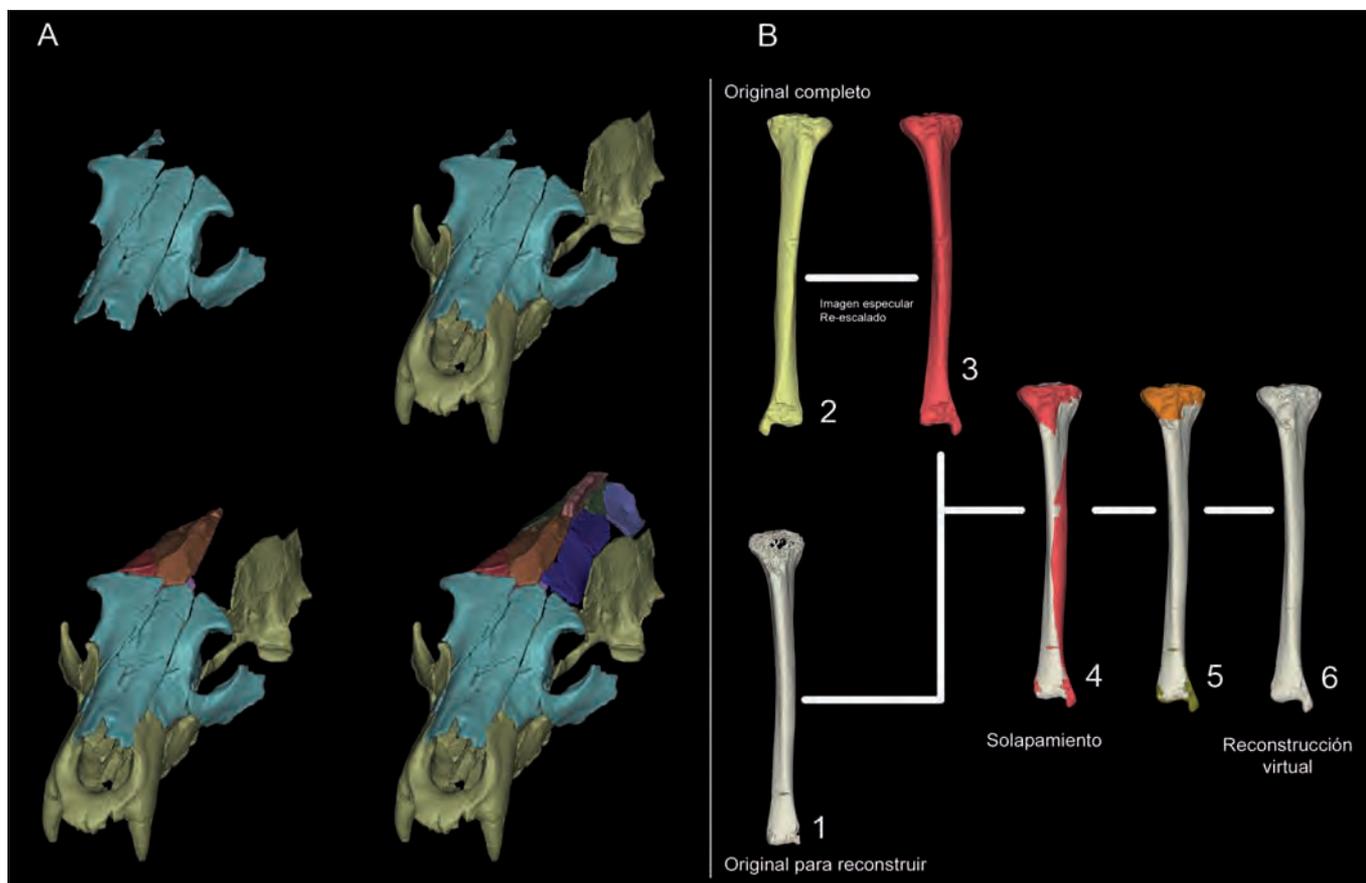


Fig. 4. Ejemplos de reconstrucción virtual. A: Ensamblaje y reposición virtual de varios fragmentos de un cráneo de carnívoro fósil, para quitarle la deformación debida a los procesos tafonómicos; B: reconstrucción de una tibia izquierda fósil (1) de SH a partir de otra completa del lado derecho (2) y del mismo yacimiento. El ejemplar completo se duplica creando su simétrico (3), y se reescala para ajustarlo convenientemente al tamaño del ejemplar incompleto. Finalmente se solapan los volúmenes (4) y se ajustan (5) hasta obtener un resultado óptimo (6).

198

2005; García *et al.*, 2007; Joeckel, 1998; Marino *et al.*, 2001; Spoor y Zonneveld, 1995) (Fig. 3), y hoy día el TAC, y el tratamiento de las imágenes y modelos 3D que se obtienen, constituye una de las herramientas básicas en muchos estudios morfológicos de importantes fósiles humanos (Arsuaga *et al.*, 1999; Bruner *et al.*, 2003; Bruner, 2004; Conroy *et al.*, 1990 Seidler *et al.*, 1997; Thompson y Illerhaus, 1998; Weaver, 2002; Weaver and Hublin, 2009; Wind, 1984; Zollikofer *et al.*, 1995).

Tanto es así, que la paleontología científica ha creado su propia revista electrónica especializada en la publicación de análisis y estudios basados en la aplicación de nuevas tecnologías, como es la tomografía, a los restos fósiles: Paleontología Electrónica (<http://palaeo-electronica.org>) perteneciente a la Sociedad Internacional de Paleontología de Vertebrados (The Society of Vertebrate Paleontology, SVP).

Sin embargo, el análisis de las imágenes generadas por el TAC es también una herramienta de gran utilidad para investigar directamente las condiciones de conservación de los restos fósiles, puede ser usada para planificar los procesos de restauración y reconstrucción y puede servir para tomar decisiones sobre el mejor tratamiento que debemos dar al registro fósil. Por lo general

los restos fósiles de vertebrados aparecen en malas condiciones, fragmentados y frágiles. Éstos suelen ser restaurados y reconstruidos con compuestos artificiales, y el resultado puede variar dependiendo de la experiencia de los investigadores y conservadores, así como de las herramientas que tengan a su disposición. Los materiales de consolidación y reconstrucción penetran en mayor o menor medida en el hueso fósil (son invasivos) y pueden tener consecuencias a veces irreversibles. En todo caso, determinan en alguna medida la conservación e integridad a largo plazo de los restos. A parte de estos posibles daños, hay que tener en cuenta que muchos fósiles están en permanente proceso de reconstrucción e investigación, factor que hace desaconsejable la aplicación de determinados productos químicos en el proceso de restauración. Además, los métodos clásicos de estudio y restauración centran su atención en la superficie del fósil, ignorando en muchos casos por completo las condiciones de conservación y la propia morfología de las estructuras internas.

La reconstrucción tridimensional de un fósil fragmentado es un paso necesario para abordar el estudio y análisis de su morfología. Ya hemos comentado que pegar los fragmentos con productos artificiales puede acarrear ciertos riesgos y que muchos fósiles

se completan tras muchos años de excavación. La ventaja de la digitalización 3D y el posterior tratamiento de imágenes es que hace posible el ensamblaje virtual de distintas piezas sin tocar el original, sirve para corregir deformaciones, eliminar costras y capas de materia que puedan enmascarar la morfología y duplicar partes que no existen (Fig. 4). Las deformaciones pueden ser cuantificadas y amortiguadas utilizando análisis geométricos y mecánicos. Al poder contar también con la información de la morfología interna de un fósil, se facilita la labor de alineamiento de las piezas y su posterior reconstrucción. Además, el proceso de reconstrucción puede ser repetido indefinidamente por diferentes investigadores promoviendo así un continuo debate sobre el estado de la reconstrucción y sus diferentes alternativas.

El TAC es pues una poderosa herramienta que permite a los investigadores, conservadores y restauradores ir mucho más allá de la observación externa, el análisis superficial y el tratamiento mecánico de los restos fósiles, pudiendo adentrarse en su interior e incluso en sus propiedades estructurales (densidad, porosidad, resistencia ...). Estas consideraciones son particularmente importantes en el caso de restos fósiles y otros objetos del patrimonio cuya singularidad sea especial, como es el caso de los fósiles de la Sierra de Atapuerca, únicos yacimientos paleontológicos de Europa declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

La tomografía axial computarizada en la UBU

Desde el primer tomógrafo creado por el Dr. Hounsfield hasta la actualidad, se han introducido muchos cambios, encaminados casi todos ellos a acortar el tiempo de barrido y la mejora de la calidad de imagen.

La Universidad de Burgos cuenta desde el año 2005 con el primer y único equipo de tomografía axial computarizada no hospitalario que hay instalado en España. Es decir, es un TAC dedicado exclusivamente a fines científicos y de investigación y no al diagnóstico de enfermos. Está siendo utilizado para realizar las tomografías de los fósiles de la Sierra de Atapuerca así como de restos actuales que sirven de comparación, sin olvidar, claro está, el uso que se le da en el campo de la industria.

TAC hospitalario vs TAC industrial

El tomógrafo Industrial de la Universidad de Burgos, se diferencia de los aparatos médicos en varios aspectos que lo hacen muy interesante. Por su pequeño tamaño y al estar completamente aislado por una cabina de plomo, no necesita una sala con demasiadas prestaciones, únicamente la temperatura no debe exceder los 20°C y debe contar con una fuente de alta tensión. A diferencia de los TACs hospitalarios, donde lo que gira es la fuente de Rayos-X, el TAC de la UBU cuenta con una plataforma giratoria donde se coloca el objeto, con una capacidad máxima de 50 cm de altura, 40 de anchura y 50kg de peso. El tubo de Rayos-X posee una potencia máxima de 225KV y una intensidad que se autorregula al

voltaje establecido (a 225KV es de 2.8mA). Esta potencia permite atravesar objetos muy densos, como algunos metales o la piedra. Su velocidad de escaneado es de 15 segundos por imagen y el doble en tiempo de reconstrucción (30 segundos/imagen). Este tiempo de adquisición y reconstrucción es más lento que el de un TAC Hospitalario, pero el tiempo de funcionamiento de este último está limitado por el calentamiento del tubo, mientras que el TAC de la UBU tiene un circuito de refrigeración que permite irradiar durante muchas horas seguidas sin que el tubo se caliente y tenga que esperar a enfriarse.

Además, las imágenes obtenidas en el TAC hospitalario (salvo los de última generación) tienen menor resolución y menor contraste que las obtenidas a partir del tomógrafo industrial (Fig. 5). Esto es debido a factores como el grosor del colimador del haz de rayos X, el número de detectores y la relación voltaje-amperaje. Los tomógrafos industriales pueden irradiar mayor energía que los hospitalarios, ya que la energía que se necesita para penetrar un organismo vivo no es la misma que se necesita para los materiales más duros, como por ejemplo los fósiles, la piedra, el metal o la madera.

Otro factor importante es que, como investigadores especialistas en el manejo de esta máquina, tenemos un constante control a la hora de decidir sobre los parámetros de exploración óptimos en cada ejemplar. Por ejemplo, en ejemplares muy encostrados, tenemos que aumentar la potencia, el tiempo de integración o tiempo de irradiación por toma, o usar ciertos filtros, todo ello para obtener mejores contrastes y calidad de la imagen, así como para reducir el ruido generado por la energía dispersa o de rebote. Otro de los parámetros que podemos decidir es la distancia entre los cortes. Esto es muy importante a la hora de poder obtener los mejores resultados, ya que si el ejemplar es muy pequeño y hacemos pocos cortes, o si la distancia entre los cortes no es la adecuada, el resultado no será el óptimo.

Resolución y calidad de las imágenes

La calidad de la imagen digital depende de varios factores como son la potencia del haz de rayos X, grosor del colimador, número de detectores, los algoritmos que se utilicen en la reconstrucción de las imágenes, la velocidad de cálculo, etc. Cada corte tomográfico es como una "rebanada" más o menos delgada que puede variar dependiendo del modelo de máquina. En nuestro caso ese espesor es de 0.5 mm., que es el haz de rayos que se filtra a través del colimador. La distancia de separación entre dos cortes consecutivos también afecta a la resolución de la reconstrucción final y puede variar entre 0.1 mm. y varios centímetros.

Los cortes adquiridos a partir del escaneado se transforman en dos tipos de archivos, los datos brutos y las imágenes en escala de grises. Según los algoritmos de reconstrucción y transformación de las imágenes y del formato de salida de las imágenes (bmp, tiff, flt), se podrá obtener mejor o peor resultado dependiendo de los bits que tenga cada imagen, ya que puede reducirse la matriz de datos brutos de 32 o 24 bits por píxel a 16 u 8 bits por píxel, con la pérdida de información que esto implica.

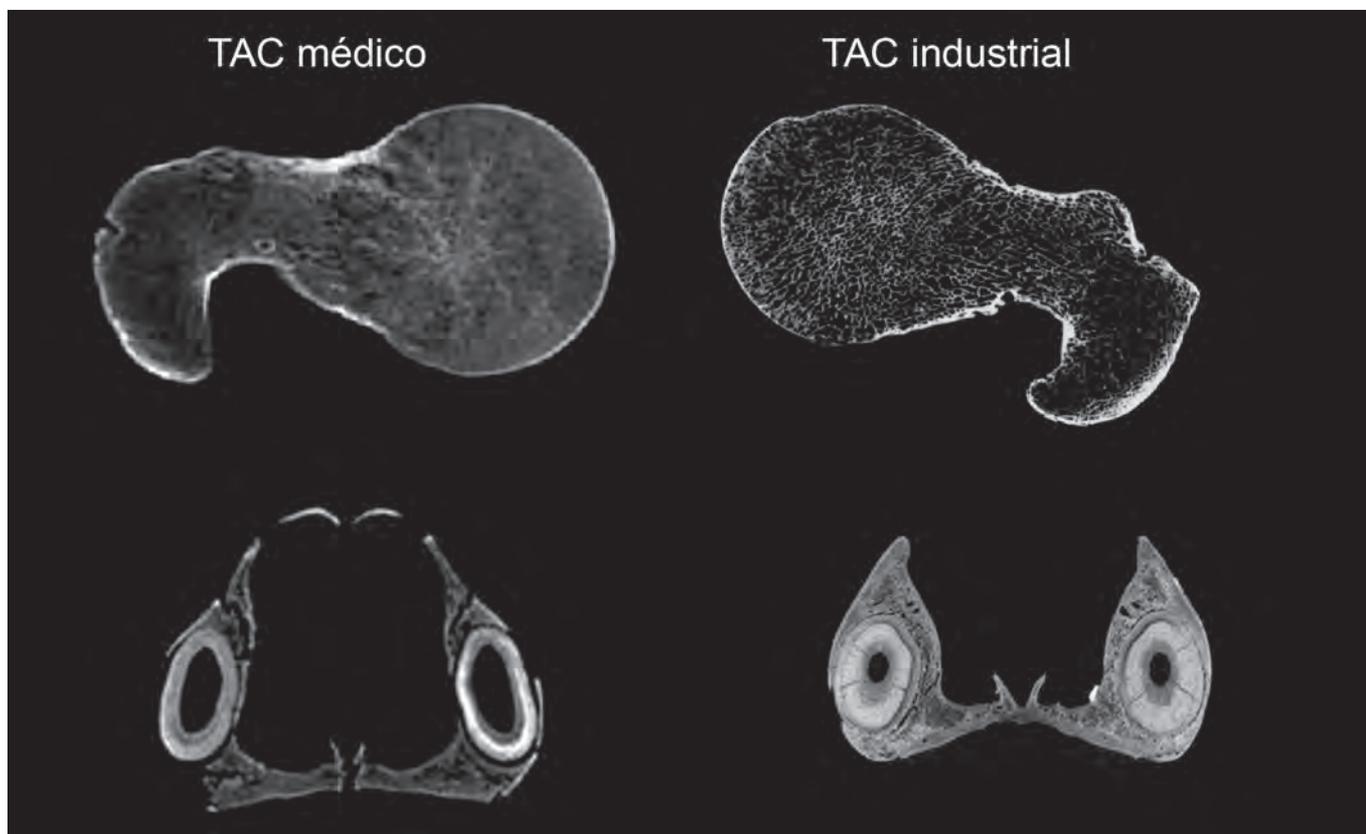


Fig. 5. Diferencia de contraste y resolución de las imágenes obtenidas en un TAC hospitalario y en el TAC de la UBU. Arriba los cortes transversales a través del cuello y la cabeza de un fémur humano y abajo cortes coronales de un cráneo de oso a la altura de los caninos. Las diferencias en cuanto a la potencia del tubo de Rayos-X, detectores y relación voltaje/amperaje, permiten obtener una mejor calidad de imagen en el TAC de la UBU.

200

El tamaño de las imágenes se mide en píxeles y al hacer la reconstrucción volumétrica éste se transforma en un 'voxel' o píxel volumétrico, cuyo volumen (tamaño) depende del grosor de los cortes y de la distancia entre ellos.

Las imágenes digitales se pueden producir en blanco y negro, en escala de grises o en color, dependiendo del número de colores diferentes que puede contener cada uno de los píxeles que la forman, que a su vez depende de la cantidad de información o número de bits que puede almacenar un píxel (profundidad de color). Cuanto mayor sea la profundidad de color, mayor será la cantidad de tonos (de grises o colores) que puedan ser representados, más colores habrá disponibles y más exacta será la representación del color en la imagen digital.

Por ejemplo, las imágenes en "escala de grises" emplean 8 bits para representar cada píxel (profundidad de color) lo que sólo permite representar en una imagen 256 intensidades diferentes de grises (2 valores posibles para cada bit - 0 y 1 - que elevados a 8 nos da 256 tonos de color diferentes). Hasta hace poco tiempo, los ordenadores sólo reconocían 256 niveles de grises y el software desarrollado hasta entonces sólo admitía imágenes de 8 bits, pero hoy día el software de reconstrucción ya trabaja con 32 bits. Cuantos más colores pueda tener la imagen, más calidad final tendrá esta, pero más información será necesario almacenar y manejar.

Para representar los colores en una imagen de 32 bits por píxel se utilizan combinaciones de 24 bits (8 para el rojo, 8 para el verde y 8 para el azul), consiguiéndose en total 16,7 millones de valores de color. Los 8 bits restantes se utilizan para el denominado **canal alfa**, valor independiente del color que se utiliza para definir el grado de transparencia de cada píxel de la imagen. Un valor 0 indica que el punto es totalmente transparente, mientras que un valor 255 indica que será totalmente visible (opaco).

En el caso de paleontología, es muy útil que la matriz de datos tenga el mayor número de bits posible. La matriz de datos del TAC es transformada en imágenes en modo de escala de grises de 32 bits. Las distintas densidades que puede presentar un material se reflejan en valores de grises diferentes. Con el software adecuado y seleccionando los niveles de grises apropiados es posible separar los distintos materiales que integran un fósil (hueso de diferentes densidades, costras y rellenos, dentina y esmalte) (Fig. 6).

Modelos virtuales y replicas de alta resolución: el TAC y el prototipado rápido

En la paleontología es imprescindible poder replicar los fósiles originales tanto con fines de investigación como docentes y de

divulgación. Como ya hemos comentado más arriba, en muchas ocasiones es muy difícil, si no imposible, que los investigadores dispongan de la pieza original por el estado delicado del objeto, que impide su manipulación. Así mismo, la obtención de réplicas por técnicas convencionales es muchas veces inviable por esta misma razón. No se debe olvidar que muchos fósiles son piezas únicas cuyo estado de conservación es delicado, que están fragmentados y que se completan tras muchas campañas de excavación. Tanto científica como museísticamente es pues imprescindible disponer de réplicas de fósiles y objetos cuya pérdida sería irreparable, evitando así los posibles daños que podrían sufrir los materiales originales bien debido a su manipulación, bien debido a cambios de temperatura, humedad, etc. Pero llevar a cabo la duplicidad de las piezas con métodos convencionales moldeando directamente de los originales, no es posible o aconsejable en todos los casos.

Este problema queda solventado gracias al TAC y/o el escáner láser 3D de superficie junto con alguna técnica de prototipado rápido de alta resolución.

Básicamente las técnicas de prototipado rápido, tienen como objetivo el obtener de manera rápida, exacta y sin manipular el original, una réplica física tridimensional de los modelos digitales 3D que han sido generados mediante otras aplicaciones como el TAC, el escáner de superficie 3D, las herramienta de diseño asistido por ordenador (CAD) o cualquier otra técnica que genere un modelo informático tridimensional del objeto. La ventaja de los modelos digitales obtenidos con el TAC es que reproducen tanto el exterior como el interior de un objeto y por tanto las réplicas pueden reproducir igualmente las estructuras internas siempre que se cuente con una unidad de prototipado rápido (Fig. 7).

Pero no todos los fósiles conservan la estructura interna en óptimas condiciones y muchos de los especímenes susceptibles de ser replicados la han perdido por completo debido a las condiciones de fosilización. En el caso de muchas piezas arqueológicas y del patrimonio escultórico ocurre lo mismo. También hay que tener en cuenta que el TAC tiene sus limitaciones físicas y a veces los objetos no se pueden trasladar a las instalaciones del TAC o simplemente son demasiado grandes para aplicar esta técnica. En todos estos casos la digitalización 3D de superficie es la solución lógica para producir un modelo digital y la posterior réplica.

La técnica de prototipado con la que contamos en la Universidad de Burgos es la conocida como Sinterización Selectiva Láser (SLS) de polvo de poliamida. Para la construcción de los modelos sólidos por SLS, se deposita una capa de polvo de poliamida de unas décimas de mm. en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO₂ sinteriza el polvo en los puntos seleccionados causando que las partículas se fusionen y solidifiquen. Los elementos son generados de capa en capa, iniciando el proceso por las cotas más bajas y terminados por las superiores. Dado que la materia prima se encuentra en estado

sólido (se trata de microesferas), no es necesario generar columnas que soporten al elemento mientras éste se va creando, por lo que no existen limitaciones de rotación de pieza.

Las técnicas de prototipado rápido pueden ser aplicadas a las más diversas áreas, tales como la arqueología, paleontología, restauración, conservación del patrimonio, educación, museística, marketing, medicina, arquitectura (Fig. 8).

Modelos digitales 3d y patrimonio cultural

La representación digital y tridimensional del Patrimonio, va hoy día más allá de la simple medida del objeto y pone a nuestro alcance nuevas posibilidades de todo tipo. En la actualidad la imagen tridimensional de una pieza se concibe como fuente de conocimiento y soporte a los procesos de conservación, difusión y transmisión del Patrimonio. Proponemos la digitalización en 3D como concepto temático, del cual pueden desgajarse múltiples “proyectos específicos”.

El formato digital 3D posee algunas características que a nuestro juicio lo hacen especialmente atractivo en los tres ámbitos clave del patrimonio cultural: conservación, investigación y difusión, aunque también quedan algunos aspectos por resolver.

Siempre existe un deterioro natural e irreversible al que se ven sometidas todas las piezas, y en ocasiones los procesos de restauración y rehabilitación pueden incidir negativamente en el legado patrimonial. Con una copia digital 3D, tendríamos salvaguardada la geometría de la pieza e incluso su apariencia por medio del escáner en color y la propia fotografía. La fiabilidad y el rigor metodológico de los datos obtenidos con el TAC y el escáner 3D permiten realizar representaciones formales con un elevado grado de precisión. Además la inmediatez en la toma de datos, en su intercambio y los mínimos costes económicos en la generación de nuevas copias digitales son también importantes ventajas de la técnica.

La realización de copias digitales como medida cautelar de preservación debería ser una constante hacia la que tendríamos que dirigir una parte importante de nuestros esfuerzos. La posibilidad de obtener una réplica, la forma “real”, sin la necesidad de tener que actuar directamente en los restos originales, hace que se contribuya a mantener sin alteraciones el Patrimonio existente, favoreciendo la preservación y conservación.

Todos estamos de acuerdo en que la fácil accesibilidad al resultado de la investigación debe ser una máxima de primer orden, haciéndolos comprensibles para “todos los públicos”. El formato digital presenta una alta potencialidad de difusión, ya que hoy día las copias digitales son de fácil transmisión e intercambio. La copia digital 3D de la pieza es más fácilmente comprensible, más “visual”, que el tradicional dibujo o la fotografía. La mayor accesibilidad e interactividad del objeto escaneado con el investigador o público que examina la pieza, facilita el acceso a unos materiales de consulta generalmente muy limitada. Permite utilizar en el lugar de trabajo, sin necesidad



Fig. 7. Réplicas realizadas en la máquina de Sinterizado láser de la UBU a partir del TAC. Superior: Copia exacta (cráneo y mandíbula) de un ejemplar de oso de la Sierra de Atapuerca. Inferior: Réplica de la mitad izquierda del mismo cráneo, en la que se pueden observar las estructuras internas. Como la tomografía obtiene toda la información, se puede replicar tanto el objeto completo como partes aisladas del mismo.

de desplazamientos, información de primera calidad y exactitud de piezas emblemáticas del patrimonio cultural. Favorece el intercambio de datos con otros centros y la difusión de la información, abriendo a futuros y potenciales usuarios una amplia gama de servicios. El formato digital está ya preparado para ser colgado directamente en la red y poder consultarse simultáneamente en diferentes lugares. Hoy día es generalizada la conexión a Internet en centros de investigación, universidades, museos, ministerios, consejerías de cultura, bibliotecas, etc. que podrían disponer sin problema de este recurso y que son potenciales receptores y a su vez difusores y amplificadores de este patrimonio. Esto nos ofrece la posibilidad de generar archivos en formato HTML, de reducido tamaño y muy aptos para una amplia difusión a través de Internet, como ocurre por ejemplo con la red NESPOS (<http://www.nespos.org>) especializada en el intercambio de archivos digitales de fósiles humanos. La inserción de modelos virtuales dentro de la Red es una manera muy rápida de acceder a un sector de la población joven, inmersa en plena

vorágine de las NN. TT. y a la que poder educar en cuestiones patrimoniales o reforzar y complementar actitudes de concienciación de la importancia de dicho patrimonio.

En el otro lado de la balanza, hay que trabajar aún sobre algunos aspectos del proceso. La elevada carga económica debida a la adquisición y uso de estas nuevas tecnologías así como el aprendizaje para el correcto manejo del software y las máquinas (el mero hecho de poseer esas tecnologías no equivale a tener “conocimiento” e “información”), aconsejan, o directamente hacen necesario, tanto un enfoque multidisciplinar de la investigación (paleontólogos, anatomistas, morfológicos, restauradores, conservadores, informáticos, ingenieros, matemáticos) como una decidida colaboración entre las instituciones. La colaboración es la mejor garantía para un aprovechamiento eficaz de los recursos.

La compatibilidad entre formatos digitales es una cuestión que también debe fomentarse hasta que sea una práctica universal, y evitar así caer en la contradicción de generar útiles mode-



Fig. 8. Últimas fases de la realización de réplicas realizadas mediante el TAC y el Sinterizado Láser de polvo de poliamida. Arriba: réplicas de una mandíbula de hiena manchada (*Crocuta crocuta*) recién construida (izquierda) y una vez pulida y policromada (derecha). Abajo: réplica en proceso de policromado del cráneo del oso de la Sima de los Huesos.

los 3D con una muy limitada posibilidad de consulta, e incluso con una caducidad de la información. Iniciativas para solventar este problema son el desarrollo de formatos libres y multiplataforma (lectura/consulta de archivos con independencia del sistema operativo que los generó o el navegador utilizado).

Finalmente, algunos investigadores ya han señalado que uno de los mayores problemas de la era digital es el concepto de “propiedad”. Los objetos del patrimonio local o nacional pueden ser fácilmente exportados en forma de información digital, pudiendo dar lugar a auténticos abusos. Este aspecto requiere nuevas consideraciones legales y deontológicas en relación al patrimonio digitalizado, pero esto no debe impedir el uso y desarrollo de estas potentes herramientas que tanto pueden aportar al conocimiento, conservación y difusión de nuestro rico patrimonio cultural.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto CGL 2006-13532 C03-02) y la Junta de Castilla y León (proyecto BU005A09). Laura Rodríguez disfruta de una beca de la Fundación Atapuerca. Laura Juez disfruta de una beca de la Universidad Burgos-IBERDROLA. Agradecemos especialmente a Marián del Egado (IPCE), Ana Carro y Ana Isabel Velasco (AEM) y David Juanes (IVACOR) su amable invitación a participar en las jornadas “La Ciencia del Arte II, Ciencias Experimentales y Conservación del Patrimonio” así como en la publicación de esta monografía. Mercedes Serrano González ha pintado amablemente las réplicas de Sinterizado láser para este trabajo. Nuestro agradecimiento también para el Equipo de Investigación de los yacimientos de la Sierra de Atapuerca (EIA), y para nuestros compañeros del Laboratorio de Evolución Humana de la Universidad de Burgos y del Centro Mixto UCM-ISCIH de Evolución y Comportamiento Humanos de Madrid.

Bibliografía

- ARSUAGA, J.L.; MARTÍNEZ, I.; LORENZO, C.; GRACIA, A.; MUÑOZ, A.; ALONSO, O. y GALLEGO, J. (1999): "The human cranial remains from Gran Dolina Lower Pleistocene site (Sierra de Atapuerca, Spain)", *Journal of Human Evolution*, 37(3-4): 431-457.
- BROCHU, C.A. (2000): "A digitally rendered endocast of *Tyrannosaurus rex*", *Journal of Vertebrate Paleontology*, 20: 1-6.
- BRUNER, E.; MANZI, G. y ARSUAGA, J.L. (2003): "Encephalization and allometric trajectories in the genus *Homo*: evidence from the Neandertal and modern lineages", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 15335-15340.
- BRUNER, E. (2004): "Geometric morphometrics and paleoneurology: brain shape evolution in the genus *Homo*", *Journal of Human Evolution*, 47: 279-303.
- BRUNER, E. y MANZI, G. (2006): "Digital tools for the preservation of the human fossil heritage: Ceparno, Sacopastore and other case studies", *Human Evolution*, 21: 33-44.
- CONROY, G.C. y VANNIER, M.W. (1984): "Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography", *Science*, 226: 456-458.
- CONROY, G.C. y VANNIER, M.W. (1986): "Three-dimensional computer imaging: Some anthropological applications"; 211-222 en J. G. Else and P. C. Lee (eds.), *Primate Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CONROY, G.C.; VANNIER, M. W. y TOBIAS, P.V. (1990): "Endocranial features of *Australopithecus africanus* revealed by 2D and 3D computed tomography", *Science*, 247: 838-841.
- DOMÍNGUEZ, P.; JACOBSON, A.G. y JEFFERIES, R.P.S. (2002): "Paired gill slits in a fossil with a calcite skeleton", *Nature*, 417: 841-844.
- DOMÍNGUEZ, P.; MILNER, A.C.; KETCHAM, R.A.; COOKSON, M.J. y ROWE, T. (2004): "The avian nature of the brain and inner ear of *Archaeopteryx*", *Nature*, 430: 666-669.
- FRANZOSA, J. y ROWE, T. (2005): "Cranial endocast of the Cretaceous theropod dinosaur *Acrocantbosaurus atokensis*", *Journal of Vertebrate Paleontology*, 25: 859-864.
- GARCÍA, N.; SANTOS, E.; ARSUAGA, J.L. y CARRETERO, J.M. (2007): "Endocranial morphology of the *Ursus deningeri* von Reichenau 1904 from the Sima de los Huesos (Sierra de Atapuerca) Middle Pleistocene site", *Journal of Vertebrate Paleontology*, 27: 1007-1017.
- JOECKEL, R.M. (1998): "Unique frontal sinuses in fossil and living Hyaenidae (Mammalia, Carnivora): Description and Interpretation", *Journal of Vertebrate Paleontology*, 18: 627-639.
- JUNGERS, W.L. y MINNS, R.J. (1979): "Computed tomography and biomechanical analysis of fossil long bones", *American Journal of Physical Anthropology*, 50: 285-290.
- MARINO, L.; SUDHEIMER, K.D.; MURPHY, T.L.; DAVIS, K.K.; PABST, A.; MCLELLAN, W.A.; RILLING, J.K. y JOHNSON, J.I. (2001): "Anatomy and three-dimensional reconstructions of the brain of a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) from magnetic resonance images", *The Anatomical Record*, 266: 397-414.
- ROWE, T.; CARLSON, W. y BOTTORFF, W. (1995): *Thrinaxodon: Digital Atlas of the Skull*. University of Texas Press.
- RUFF, C. B.; LEO, F.P. (1986): "Use of Computed Tomography in Skeletal Structure Research", *Yearbook of Physical Anthropology*, 29: 181-196.
- SEIDLER, H.; FALK, D.; STRINGER, C.; WILFING, H.; MULLER, G.B.; ZUR NEDDEN, D.; WEBER, G.W.; REICHEIS, W. y ARSUAGA, J.L. (1997): "A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill: implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution", *Journal of Human Evolution*, 33: 691-703.
- SPOOR, C.F. y ZONNEVELD, F.W. (1995): "Morphometry of the primate bony labyrinth: A new method based on high-resolution computed tomography", *Journal of Anatomy*, 186: 271-286.
- THOMPSON, J.L. y ILLERHAUS, B. (1998): "A new reconstruction of the Le Moustier skull and investigation of internal structures using 3-D- μ CT data", *Journal of Human Evolution*, 35: 647-665.
- WEAVER, A. (2002): "Relative cerebellar and cerebral hemisphere volume in Pliocene and Pleistocene *Homo*: a complex trajectory", *Journal of Human Evolution*, 42: A38.
- WEAVER, T.D. y HUBLIN J.J. (2009): "Neandertal birth canal shape and the evolution of human childbirth", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106 (20): 8151-8156.
- WIND, J. (1984): "Computerised x-ray tomography of fossil hominid skulls", *American Journal of Physical Anthropology*, 63: 265-282.
- ZOLLIKOFER, C.P.E.; PONCE DE LEÓN, M.S.; MARTIN, R.D. y STUCKI, P. (1995): "Neanderthal computer skulls", *Nature*, 375: 283-285.
- ZOLLIKOFER, C.P.E.; PONCE DE LEÓN, M.S. y MARTIN, R.D. (1998): "Computer-assisted paleoanthropology", *Evolutionary Anthropology*, 6: 41-54.

4.5. Sistemas digitales de adquisición de imágenes visibles, infrarrojos e hiperespectrales

Salvador Giró
Infaimon S.L.

Introducción

La utilización de cámaras digitales de captura de imagen ha sido ampliamente utilizada en el mundo del arte desde la aparición de los primeros modelos a principios de los años 80. La evolución de la tecnología de visión digital ha sido rápida y constante, permitiendo no sólo el archivo de las imágenes de las obras de arte en formato digital para labores de documentación, sino que se ha mostrado como una técnica muy eficaz en los procesos de conservación y restauración.

La posibilidad de utilizar Internet como ventana abierta, de los museos al mundo, ha incrementado aún más, si cabe, la necesidad de digitalizar todas las obras de arte con la mayor resolución posible, para poder dar tanto al público en general, como a los expertos repartidos por todo el planeta, la reproducción del más mínimo detalle de una obra, con un simple clic en su ordenador.

En el presente artículo se expone una breve introducción de la tecnología de captura digital, su estado actual y evolución. Por otra parte se pretende abrir una puerta a una nueva tecnología que de seguro va a tener una importancia capital en el mundo del arte en los próximos años. Esta tecnología es la espectroscopía de imagen hiperespectral, tanto en visible como en infrarrojo.

Aunque sólo algunos institutos de restauración y museos cuentan con esta tecnología, la multitud de potenciales aplicaciones que pueden tener, hacen de ella una herramienta fundamental en el futuro, tanto para la restauración como para estudiar las técnicas, procesos y materiales que los artistas han utilizado en la creación de sus obras.

Cámaras matriciales y cámaras lineales

Un artículo como el presente sólo proporciona la oportunidad de hacer una descripción breve de la tecnología más avanzada disponible en estos momentos en los sistemas de captura digital.

Sin entrar en mayores detalles sobre cámaras, sí que es conveniente mencionar que la tecnología actual está basada en dos categorías de sensores CCD (Charge Coupled Devide) y CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). En ambos casos estos sensores están compuestos por elementos fotosensibles que convierten la luz en diferencias de potencial y finalmente en bits para formar una imagen digital.

Los primeros sensores en aparecer fueron los CCD y más recientemente se han desarrollado los CMOS. Aunque estos últimos están teniendo una evolución muy rápida y probablen-

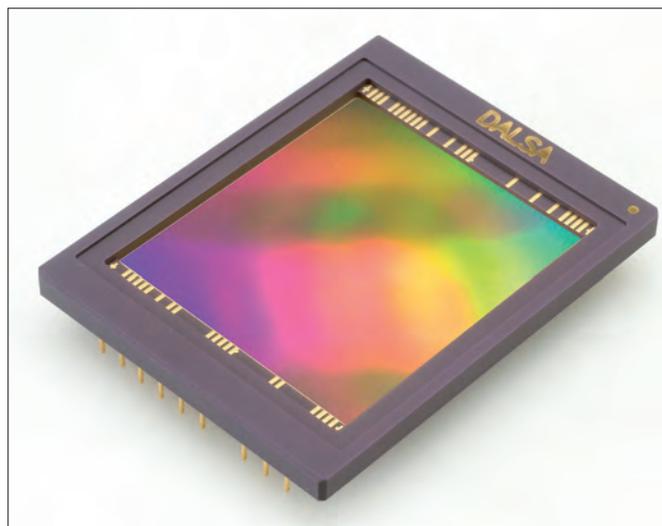


Fig. 1a. Sensor CCD matricial.



Fig. 1b. Cuerpo de cámara matricial Dalsa de 22 megapíxeles. (www.dalsa.com).

te en el futuro se empleen prácticamente en todos los ámbitos donde se requiera una captura de imagen, su calidad aún no es comparable a la de los sensores CCD. Para aplicaciones donde se requieren las más altas prestaciones, como es el caso de la captura de obras de arte, se sigue recomendando la utilización de cámaras con sensores CCD (Fig. 1a).

La máxima resolución que se está utilizando en la actualidad en cámaras comercializables es de 22 megapíxeles (Fig. 1b), si

bien recientemente se encuentran disponibles de forma experimental las primeras cámaras que permiten capturar imágenes de hasta 50 megapíxeles.

En principio, para la mayoría de obras de arte, las resoluciones mencionadas anteriormente serían suficientes para alcanzar unos excelentes resultados. Una cámara de 50 megapíxeles tiene una resolución aproximada de 8200x 6100 píxeles. Por tanto, dependiendo del tamaño de la pintura se podrían alcanzar los 100 o 150 píxeles por centímetro lineal, lo que permite en algunos casos tomar una sola imagen del cuadro a la máxima resolución, sin necesidad de acudir a la múltiple toma de imágenes mediante el sistema de mosaico.

Cuando la resolución de la cámara no es suficiente, debido al gran tamaño de la obra de arte, se deben tomar de múltiples imágenes para generar un mosaico (Torres *et al.*, 2008). La agrupación de las imágenes del mosaico y la corrección de los efectos creados en los laterales de las imágenes, requieren una importante labor de post-procesado informático, que en algunas ocasiones hace mucho más costoso el proceso de elaboración de la imagen, que la propia toma de imágenes. Por este motivo, es especialmente recomendable tomar las imágenes con la máxima resolución para evitar la elaboración del mosaico. Si la realización del mosaico es ineludible, debido a que la obra es de grandes dimensiones, siempre es más recomendable utilizar imágenes de la máxima resolución con el fin de que ese mosaico esté compuesto por el mínimo de imágenes posible.

Otra tecnología utilizada para la toma de imágenes de obras de arte se basa en la utilización de cámaras lineales. Contrariamente a la tecnología de cámaras matriciales descrita anteriormente, donde la cámara incorpora un sensor matricial de "X * Y" píxeles y captura la imagen total de una sola vez, en el caso de las cámaras lineales se utiliza un sensor lineal de "X" píxeles de longitud por un píxel de anchura (Fig. 2a). En la actualidad los sensores lineales de mayor resolución tienen hasta 16.000 píxeles. La cámara (Fig. 2b) sólo es capaz de capturar una sola línea, por tanto, para capturar la imagen de toda una obra de arte se deberá mover, o bien la cámara a lo largo de la obra de arte, o bien mover el cuadro frente a la cámara, para poder construir la imagen línea a línea (Fig. 3). La ventaja del método reside en que la resolución horizontal es muy grande, recordemos 16.000 píxeles, mientras que la resolución vertical no tiene límites, pudiendo ser de las mismas dimensiones que el propio cuadro.

Una vez más, mediante este método se puede capturar la imagen total de la obra de arte en una sola toma, en la mayoría de ocasiones con una excelente resolución. En caso de no alcanzarse la resolución óptima, por el tamaño de la obra, se deberá hacer un mosaico compuesto por imágenes colocadas una al lado de la otra, ya que se habrá capturado toda la resolución en una dirección.

Aunque la utilización de cámaras lineales no está muy extendida en la captura y archivo de obras de arte, probablemente por desconocimiento de la tecnología, es importante resaltar su uso y funcionamiento, ya que es el mismo método que se emplea en los sistemas hiperspectrales, descritos más adelante.

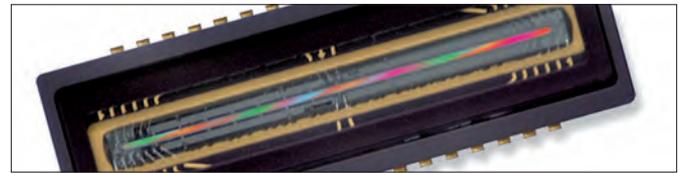


Fig. 2a. Sensores lineales. Se puede comprobar la situación de los píxeles en una sola línea contrariamente a los sensores matriciales.



Fig. 2b. Cámara lineal Dalsa de 12.000 píxeles por línea.

Sistemas multispectrales

Hasta el momento la captura de imágenes ha sido realizada habitualmente en monocromo o en color. En el caso de la captura en color las cámaras que permiten obtener de forma digital la separación del color en RGB (Rojo, Verde y Azul) son las más utilizadas. Estas cámaras incorporan sensores con un filtro de color RGB sobre los píxeles del sensor. A dicho filtro se le denomina Bayer. Una vez capturada la imagen, dentro de la cámara, se realiza un proceso de interpolación entre los distintos píxeles para obtener una imagen en color real.

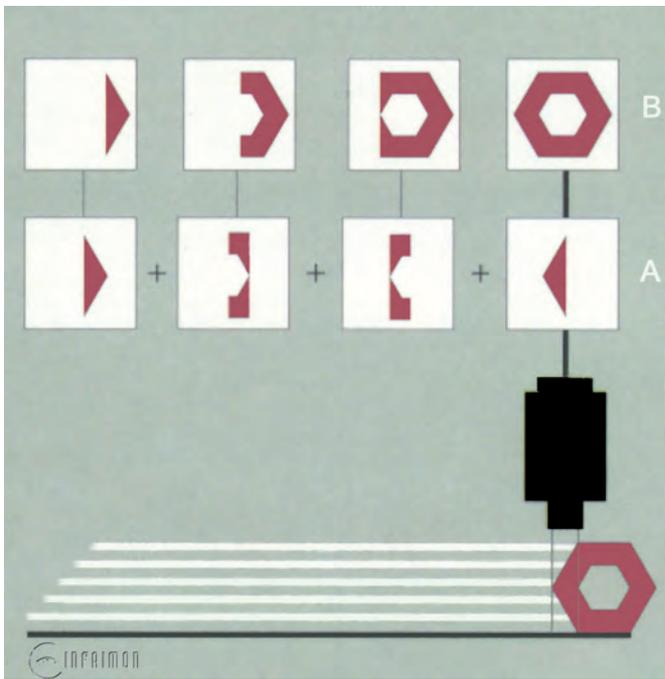


Fig. 3. Funcionamiento de una cámara lineal. El objeto se desplaza por delante de la cámara. La cámara captura la imagen línea a línea (A) y construye la imagen total (B). (www.infaimon.com).

Otro método utilizado frecuentemente con cámaras de 3CCD de mayor calidad, se basa en la utilización de un prisma que difracta la luz procedente de la óptica y la direcciona hacia tres sensores distintos (Fig. 4). Cada uno de estos tres sensores incluye un filtro de color, rojo, verde y azul respectivamente. La combinación de las tres imágenes procedentes de los tres sensores produce una imagen de color real muy similar a la que ven nuestros propios ojos.

También existen cámaras que permiten capturar la imagen de forma monocromática, o escala de grises. Este tipo de cámaras se utilizan para capturar imágenes dentro del espectro visible, o bien imágenes en el espectro infrarrojo. La imagen resultado es la suma de todas las longitudes de onda capaces de ser capturadas por el sensor. En el entorno del arte esta tecnología en luz visible se utiliza poco, sin embargo, en la captura de imágenes infrarrojas ha sido la única alternativa hasta el momento y es la base de funcionamiento de lo que se denomina reflectografía de infrarrojos (Gabaldon A., 2006)

La utilización sólo de imágenes monocromáticas o de imágenes con tres planos de color (RGB) es evidentemente muy interesante y nos da una visión de la realidad cercana a lo que pueden ver nuestros ojos. Sin embargo, la imagen que generan los objetos que tenemos a nuestro alrededor, contiene un espectro completo de longitudes de onda. Es más, esas diferentes longitudes de onda pueden llegar a dar una información adicional relacionada con la composición de los objetos que observamos.

La captura de imágenes en color tal como la realizan cámaras se podría decir que es un método de captura multispectral, ya

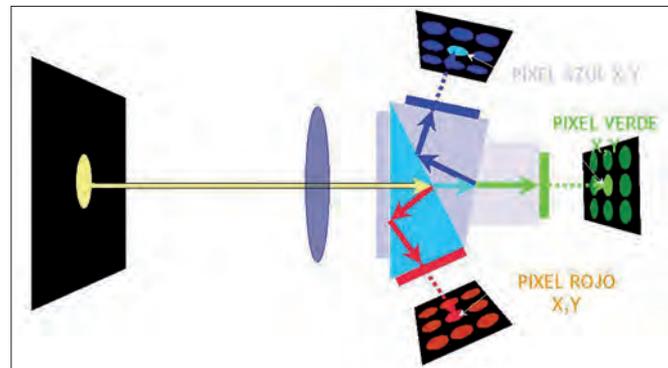


Fig. 4. Esquema de funcionamiento de un sensor 3CCD con prisma (www.jai.com).

que se capturan tres amplias bandas espectrales pertenecientes al rojo, verde y azul. Sin embargo la idea de sistema multispectral va más allá, y se define como un sistema capaz de capturar decenas de bandas espectrales. Cuando el número de bandas espectrales capturadas asciende en un orden de magnitud, es decir, alcanza los centenares de bandas espectrales, entonces se denomina sistema hiperespectral.

Los sistemas multispectrales más utilizados se basan en ruedas de filtros. Estos están compuestos por una cámara monocromática y una rueda de filtros que incorpora una serie de filtros de distintas longitudes de onda. La cámara captura una imagen con cada uno de los filtros y de esta forma se obtienen una serie de imágenes correspondientes a diferentes longitudes de onda. La ventaja de este método reside en que la rueda de filtros, puede tener tantos filtros como longitudes de onda sean necesarios en el análisis que se desee realizar. Sin embargo, tiene la limitación de la velocidad, ya que es necesario colocar el filtro frente al objetivo de la cámara y tomar tantas imágenes como filtros o longitudes de onda se utilizan.

Otro método muy utilizado es el de prismas ópticos frente a diferentes sensores, este método es semejante al mencionado anteriormente cuando se ha hablado de cámaras de 3CCD. En la actualidad hay fabricantes capaces de producir cámaras con hasta 6CCD, y por tanto con 6 filtros distintos frente a cada uno de los sensores. La ventaja fundamental de esta metodología reside en la velocidad de captura, ya que en una sola captura se puede realizar la adquisición de las "n" imágenes pertenecientes a cada una de sus bandas espectrales.

Tecnología hiperespectral en el entorno del arte

Los sistemas que son capaces de capturar centenares de bandas espectrales se denominan hiperespectrales, son actualmente los más innovadores y tienen grandes posibilidades especialmente en el mundo del arte.

Para poder comprender mejor el método de funcionamiento de un sistema hiperespectral, como el que se comenta a continua-

ción, es necesario hacer una descripción minuciosa de la tecnología utilizada.

De hecho, la tecnología se denomina espectroscopía de imagen, y está basada en un componente de dispersión de visión denominado prisma-reja-prisma (En Inglés: PGP- prism-grating-prism) que fue inventado por Aikio, M (1992), y que permite obtener espectrógrafos de imagen hiperespectrales para aplicaciones de todo tipo dentro del campo industrial, científico y cultural. Comprendiendo una extensa gama de longitudes de onda que van desde el UV (320 nm) al Infrarrojo lejano (12.000 nm).

La limitación tecnológica de este tipo de sistemas no permite, con un solo sistema, tener un rango espectral tan amplio, sino que para cada rango de longitudes de onda se debe utilizar un sistema hiperespectral distinto. Así existen los siguientes sistemas dependiendo de su rango de longitudes de onda:

- Espectro UV: Banda espectral entre 200 y 400 nm
- Espectro Visible/NIR: Entre 400 y 1.000 nm
- Espectro Infrarrojo Cercano (SWIR): 1.000 y 2.500 nm
- Espectro Infrarrojo Medio (MWIR): 3.000 y 5.000 nm
- Espectro Infrarrojo Lejano (LWIR): 8.000 y 12.000 nm

Dentro de las aplicaciones relacionadas con obras de arte, por el momento sólo se han utilizado los sistemas hiperespectrales UV, Visible/NIR y SWIR, sin embargo no se descarta la utilización de MWIR y/o LWIR, en cuanto las investigaciones en estos campos estén más avanzadas.

208

Los sistemas espectrográficos PGP se están utilizando en el mundo entero para aplicaciones industriales, de visión y de análisis espectral, sistemas aerotransportados para teledetección, aplicaciones científicas y culturales como es el caso de estudio de obras de arte que es el motivo de este artículo.

El origen de la espectroscopía de imagen

La espectroscopía se utiliza para investigar las propiedades de los materiales vía la interacción de la radiación electromagnética con la materia. Ha sido utilizada para investigar la estructura atómica, utilizando las líneas espectrales en emisión y absorción exhibidas por varios elementos, y se utiliza también para el análisis químico de innumerables componentes y soluciones mediante espectrografía de infrarrojo.

La utilización de la colorimetría para la investigación del colesterol o del azúcar en la sangre, por ejemplo, en laboratorios médicos es una forma de espectroscopía. Entre muchas otras aplicaciones de la espectroscopía se destacan las pruebas de la emisión de los automóviles, determinación de los niveles de alcohol en sangre, evaluación de la polución del aire (Wolfe, 1997) y determinación de la composición de pigmentos (Domenech *et al.*, 2009)

Los primeros trabajos realizados en espectroscopía de imagen se llevaron a cabo en el campo de la geología. Los geólogos tenían la necesidad de identificar las unidades geológicas caracterizadas

por ciertos minerales. El trabajo de los geólogos se basa en el análisis de las formaciones en el campo, lo que hace en ocasiones muy arduo el estudio y requiere mucho tiempo, si se quiere estudiar una gran extensión de terreno. Por tanto, desde hace ya mucho tiempo se emplea la fotografía aérea y las imágenes de satélite para cartografiar. En un principio se utilizaron ciertas bandas espectrales para discriminar las distintas formaciones. Sin embargo análisis de laboratorio, realizados ya en los años setenta, utilizando sistemas hiperespectrales mostraron su eficiencia en la identificación de la mineralogía de las rocas, siendo necesario tener bandas espectrales que distaran como mucho 20 nm.

El primer sistema hiperespectral infrarrojo se desarrolló en 1980 en el Jet Propulsion Laboratory de Pasadena, California, USA. El primer sistema visible/infrarrojo se construyó en 1987 y era capaz de medir el espectro entre 400 y 2500 nm, y podía obtener 224 bandas espectrales con separación entre ellas de 10 nm. (Green *et al.* 1998)

Posteriormente la tecnología se fue mejorando y se desarrolló el sistema prisma-reja-prisma (PSP) en el que se basa los sistemas más avanzados hiperespectrales (Aikio, 1992).

Al mismo tiempo que se mejoraban los sistemas espectrográficos de imagen, también evolucionaban rápidamente los sensores de las cámaras incrementando la sensibilidad, la calidad y aumentando la resolución en número de píxeles de los detectores matriciales, manteniéndose a unos costes relativamente asequibles. También el avance de los sistemas informáticos ha ido a notable ritmo durante los últimos años, permitiendo hacer el tratamiento de las imágenes hiperespectrales de forma fácil y eficaz.

Los sistemas de espectrografía de visión hiperespectral, que se presumen más eficaces para el trabajo en obras de arte, están basados en el sistema de dispersión de imagen prisma-reja-prisma (PGP). El diseño permite tener un espectrómetro de coste ajustado, que se puede construir para diversas longitudes de onda, como ya se ha mencionado anteriormente. Las ventajas de esta tecnología son:

- Los PGP proporcionan una gran dispersión lineal debido a su rejilla de difracción, si se compara con un prisma de visión directa con dispersión menor y no lineal.
- Los PGP pueden modificarse para diferentes rangos de longitudes de onda cambiando los ángulos de los vértices de los dos prismas, el material de los prismas y el periodo de la rejilla.
- La rejilla es un elemento óptico de transmisión holográfica de volumen de fase, que se utiliza para una alta eficiencia de difracción (hasta el 70%) y que tiene polarización independiente.
- Las propiedades de visión directa permiten una construcción optomecánica tubular única para el espectrógrafo, que lo hace muy estable y de reducidas dimensiones, por tanto fácil de transportar y de acomodar a cualquier tipo de cámara.



Fig. 5. Una imagen está compuesta por sus diferentes bandas espectrales. Dentro del espectro visible entre el 400nm (violeta) y 700nm (rojo).

Sistemas hiperespectrales

Cada sistema de imagen tiene su propio ancho de banda espectral de trabajo, definido por el filtro utilizado, por el sensor o por ambos. Los sistemas multispectrales utilizan múltiples filtros (normalmente entre 3 y 12) como en el caso de las cámaras RGB de 3CCD. Los sistemas hiperespectrales se definen como aquellos que tienen decenas o centenares de bandas espectrales y una resolución espectral relativa de orden de 0.01. Esta clasificación está basada en los trabajos de Descour y Shen 2000.

Cada imagen es una imagen espectral, ya que está formada por radiación en una parte limitada del espectro electromagnético. En colorimetría se utilizan tres categorías para clasificar las imágenes: escala de grises, tricromáticas (por ejemplo RGB), y multispectrales (Fig. 5). Una imagen generada por un espectrómetro de imagen es un conjunto de datos 3D que se comentarán más adelante.

Espectroscopía de imagen y definición de cubo de datos hiperespectrales

El concepto de imagen espectroscópica se muestra en la figura 6 con un espectro medido para cada elemento en una imagen. De acuerdo con Willoghby *et al.* (1996) los espectrómetros de imagen hiperespectral generan imágenes espaciales de dos dimensiones, así como una tercera dimensión espectral utilizando un detector matricial de dos dimensiones. El conjunto de datos 3D son los datos de la imagen hiperespectral u objeto cúbico, que se define

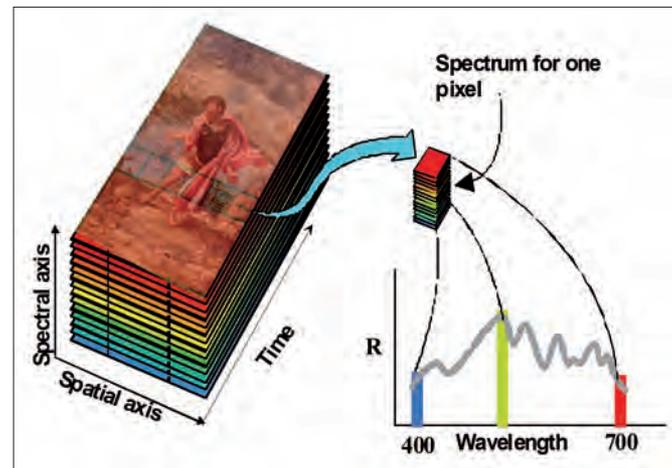


Fig. 6. Imagen hiperespectral (o cubo hiperespectral) donde se muestran cada una de las imágenes pertenecientes a una banda espectral. Si se selecciona un pixel de la imagen se obtendrá la curva de respuesta espectral de este pixel (imagen cedida por specim - www.specim.fi).

por la resolución de la imagen en las coordenadas "X", e "Y", y la longitud de onda que es la coordenada "Z".

En el caso que nos ocupa, la generación de este cubo hiperespectral como el que se muestra en la figura 6, se construye mediante un sistema de rendija que limita el campo de entrada de la imagen a una sola línea, que conjuntamente con el sistema de imagen espectrométrico permite dispersar los elementos de esta

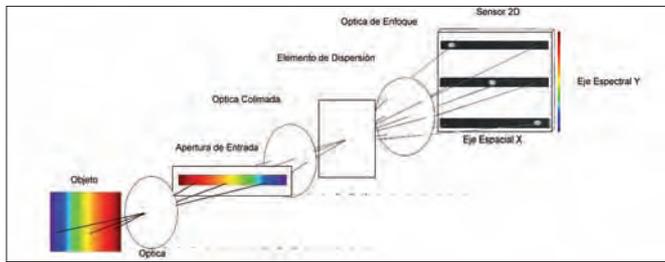


Fig. 7. Esquema de un sistema hiperespectral PSP. Se toma una línea del objeto que mediante una sistema prisma-reja-prisma (PSP) se convierte en "n" líneas de diferente longitud de onda que se dispersan sobre el sensor de la cámara.

línea sobre un detector (sensor de visión) 2D, para muestrear la dimensión espectral y la dimensión espacial simultáneamente. De esta forma se tiene las distintas longitudes de onda de una sola línea (Fig. 7). Para obtener las distintas longitudes de onda de una imagen de dos dimensiones, se deben capturar línea a línea, hasta construir la imagen entera, de la forma que se ha mencionado anteriormente en el apartado de cámaras lineales (Fig. 3). Esto se puede realizar o bien moviendo el objeto que se encuentra delante del sistema o bien moviendo el sistema con respecto al objeto a analizar.

Principios de un espectrógrafo de imagen hiperespectral

210 Un espectrógrafo es un sistema que proporciona múltiples líneas de diferentes longitudes de onda, correspondientes a la línea de imagen de entrada.

Los elementos básicos de un espectrógrafo de imagen hiperespectral se muestran en la figura 7. Una fuente de luz que ilumina el objeto a medir, una lente de entrada, que en nuestro caso será habitualmente una óptica de cámara, pero que también puede ser un objetivo de un microscopio, que captura la radiación del objeto y forma una imagen en el plano de la imagen, donde se encuentra la rendija de entrada del espectrógrafo de imagen. Esta rendija sólo deja pasar una línea de la imagen, su apertura de entrada determinará el tamaño de esta línea con una longitud y anchura determinada. Cada punto de la imagen en la dirección X tiene su imagen en la rendija de entrada. La radiación procedente de la rendija se colima bien por una lente o bien por un espejo y se dispersa mediante un elemento de dispersión, que normalmente es un prisma o una rejilla, de forma que la dirección de propagación de la radiación depende de cada longitud de onda. Posteriormente mediante una lente de enfoque, se proyecta en el plano de la imagen, donde se encuentra el sensor de la cámara. Cada punto de la imagen de entrada se representa en el plano de imagen (sensor), por una serie de imágenes monocromáticas que forman un espectro continuo en la dirección del eje espectral. Por tanto, cada línea en el sensor corresponderá a la representación de la respuesta espectral de la imagen de la línea de entrada capturada.

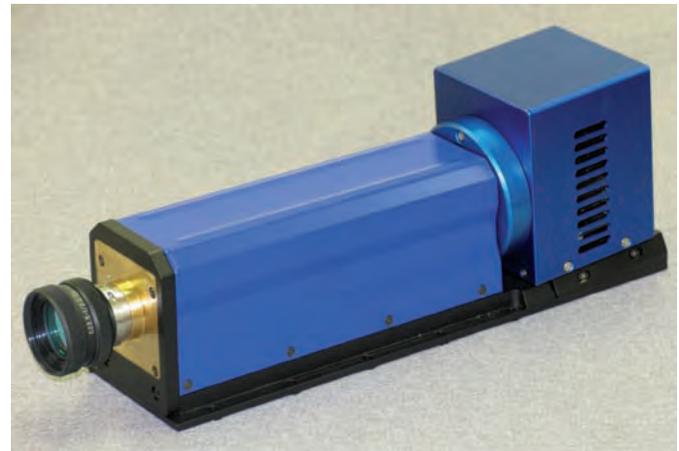


Fig. 8. Cámara hiperespectral para trabajar en espectro SWIR entre 900 y 2500nm (Imagen cedida por Xenics (www.xenics.com)).

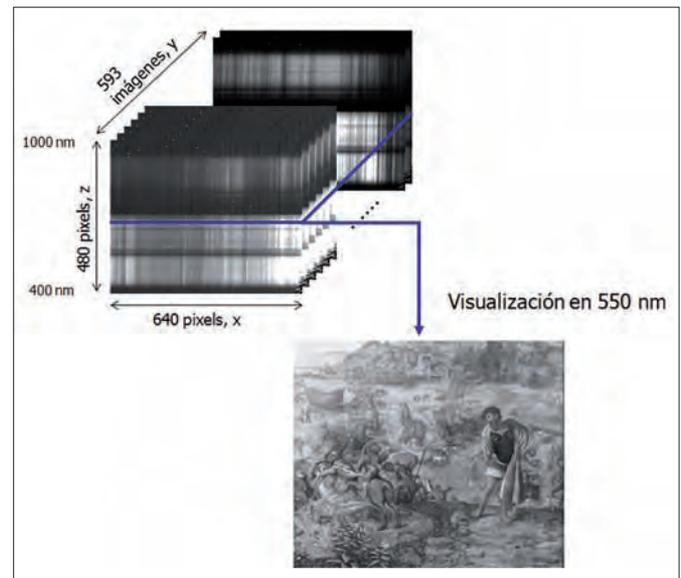


Fig. 9. Cubo espectral y selección de la imagen perteneciente a la longitud de onda de 550nm.

El espectrógrafo de imagen por tanto permite al sensor 2D de la cámara muestrear una dimensión espacial de una línea con el número de píxeles que tenga el sensor. Por tanto, los píxeles en la dimensión "X" corresponderán a la dimensión espacial de la línea capturada y las líneas en dirección "Y" corresponderán a cada una de las longitudes de onda. La imagen formada tiene el área espacial del tamaño del CCD de la cámara hiperespectral (Fig. 8) (Mao *et al.* 1997).

Por tanto una imagen en realidad será una serie de líneas de distintas longitudes de onda. La construcción de una serie de imágenes de distintas longitudes de onda se deberá hacer de la forma que se ha mencionado anteriormente al describir la utilización de cámaras lineales.

Una vez tomadas todas las imágenes de las distintas longitudes de onda se puede hacer diferentes evaluaciones de su contenido.

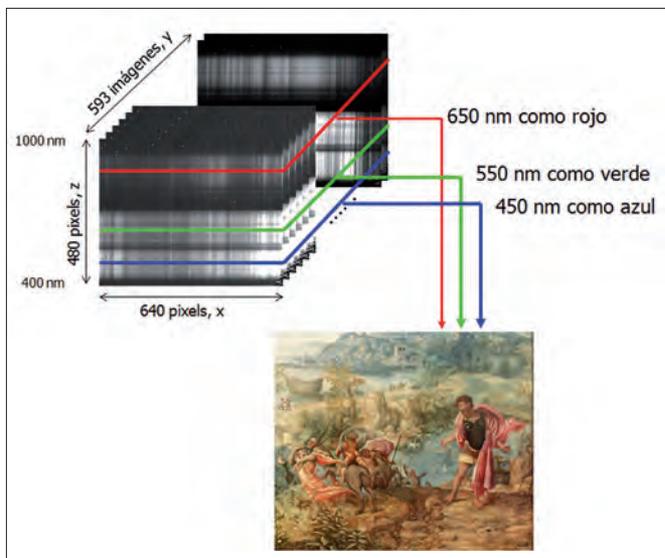


Fig. 10. Selección de diversas bandas espectrales y construcción de una imagen por combinación. En este caso imagen color RGB, compuesta por las bandas espectrales, de 650, 550, y 450nm.

Así, como se ve en la figura 9, a partir de la serie de imágenes obtenidas se puede tomar la imagen de una determinada longitud de onda para ver el aspecto presenta en esa longitud de onda. En el caso de esta figura se ha tomado la imagen correspondiente a la longitud de onda verde de 550nm.

Así mismo y mediante los programas adecuados es posible hacer combinaciones de imágenes. Del mismo modo que se obtiene una imagen en color a partir del espectro R, G y B, se puede construir una imagen en color pero sólo seleccionando una banda espectral concreta, como en este caso, donde se toma para el rojo la banda de 650nm, para el verde la de 550nm, y para el azul la de 450nm (Fig. 10). De esta forma se crearía una imagen de color parecida a la obtenida por una cámara color convencional. Sin embargo se pueden hacer múltiples combinaciones de imágenes, que permiten resaltar elementos de una obra de arte, según las necesidades requeridas por el investigador. Los programas más avanzados de análisis de imagen permiten construir imágenes por superposición de más de tres bandas espectrales.

Adicionalmente, la información del cubo imágenes hiperespectral permite conocer la curva espectral para cada uno de los píxeles de la imagen, y a partir de aquí la composición del material correspondiente al píxel analizado. En la siguiente figura se muestra el análisis de varios píxeles de la imagen y sus curvas espectrales (Fig. 11).

Aplicaciones de sistemas hiperespectrales

Aunque en el mundo del arte el número de aplicaciones hasta el momento es relativamente reducido en otros ámbitos de la ciencia y la industria los sistemas hiperespectrales están muy extendidos.

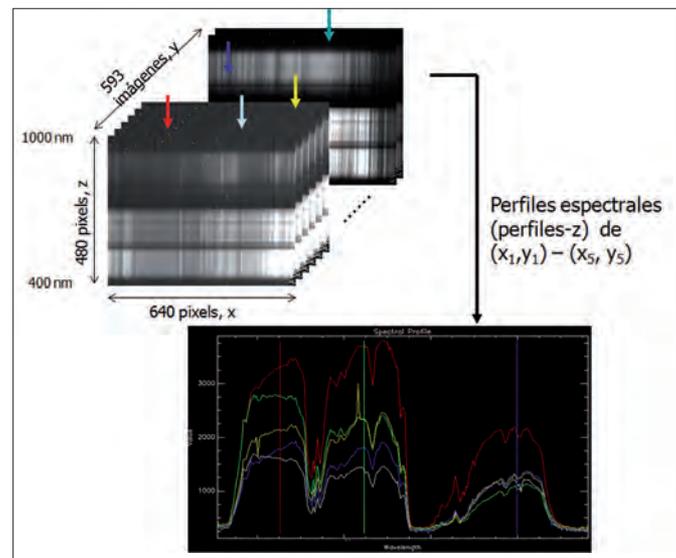


Fig. 11. Selección de píxeles de la imagen hiperespectral y representación de la curva espectral para cada píxel.

Sirvan lo siguientes ejemplos para recoger ideas sobre aplicaciones, que de alguna forma pueden extrapolarse a aplicaciones relacionadas directamente con las obras de arte.

Dado que esta tecnología se inició en el análisis del territorio mediante inspección aérea, es en este campo de la teledetección donde se han desarrollado más aplicaciones. Cabe destacar, entre muchas otras, la determinación de formaciones geológicas, cartografía de yacimientos minerales, determinación de extensiones con presencia de agua no superficial y control de flujos de agua dulce en zonas costeras. En cuanto a estudios realizados en teledetección no relacionados con geología, se puede destacar la determinación y cartografía de especies vegetales, estudio del estrés hídrico de las plantas, determinación de áreas con afectación de lluvia ácida, y por tanto el control de contaminantes.

En la industria farmacéutica, se están utilizando los sistemas hiperespectrales infrarrojos en la determinación de la composición de la materia prima antes de la fabricación de las píldoras, y el mismo proceso en los comprimidos y pastillas una vez ya elaboradas, con el fin de que el contenido de estas corresponda a las proporciones adecuadas de componentes.

En reciclaje de materiales las técnicas multispectrales y hiperespectrales se utilizan tanto en la determinación de tipos de papel, diferenciación de vidrio y selección de plásticos; en este caso es especialmente útil ya que el único método posible de diferenciar los residuos compuestos por distintos tipos de plásticos es mediante sistemas hiperespectrales en el infrarrojo (Giró S., 2009). Se puede llegar a determinar con absoluta precisión las diferencias entre PET, PEAD, PEBD, PVC, PP y PS.

Esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones relacionadas con la madera, especialmente para la determinación de tipos de madera, localización de enfermedades y hongos, y clasificación de ésta a partir de su grado de humedad. En aplica-



Fig. 12a. Sistema de reciclaje de plásticos basado en la aplicación de la técnica hiperespectral.

ciones relacionadas con la fabricación del papel se está utilizando como método de identificación del grado de humedad del papel, ya que la calidad del papel depende del grado de humedad en el momento de su fabricación.

Los sistemas hiperespectrales basados en luz visible son muy útiles para determinar el color preciso de cualquier elemento, se ha visto como una técnica fundamental para determinar la igualdad de color en procesos de tonificación de cerámicas, de cambios de color en elementos textiles o clasificación de aluminio pintado y en cualquier tipo de proceso donde se deba asegurar la igualdad de color entre lotes de producción.

Uno de los campos donde se está utilizando con creciente interés es en el entorno de la alimentación, especialmente, en la determinación de la madurez de la fruta. Mediante sistemas infrarrojos se puede llegar a determinar la cantidad de los diferentes azúcares que componen la fruta y por tanto su nivel de madurez en el momento de la selección. Así mismo, estos sistemas se han mostrado especialmente útiles en la localización de defectos debidos a golpes o enfermedades en productos hortofrutícolas.

Por último los sistemas hiperespectrales están tomando un gran protagonismo en el entorno biomédico. Se están realizando investigaciones con excelentes resultados en la determinación de melanomas, en exploraciones ginecológicas utilizándolos como colposcopio, y también en determinación y localización de enfermedades vasculares, por la facilidad de ver venas y arterias a través de la piel mediante combinación de determinadas longitudes de onda.

Todas estas aplicaciones son sólo una pequeña muestra de la infinidad de posibilidades que actualmente tienen los sistemas hiperespectrales.

Aplicaciones de los sistemas hiperespectrales en el mundo del arte

Basándose en las aplicaciones resueltas en otros campos industriales y científicos se han ido aplicando esas experiencias en el

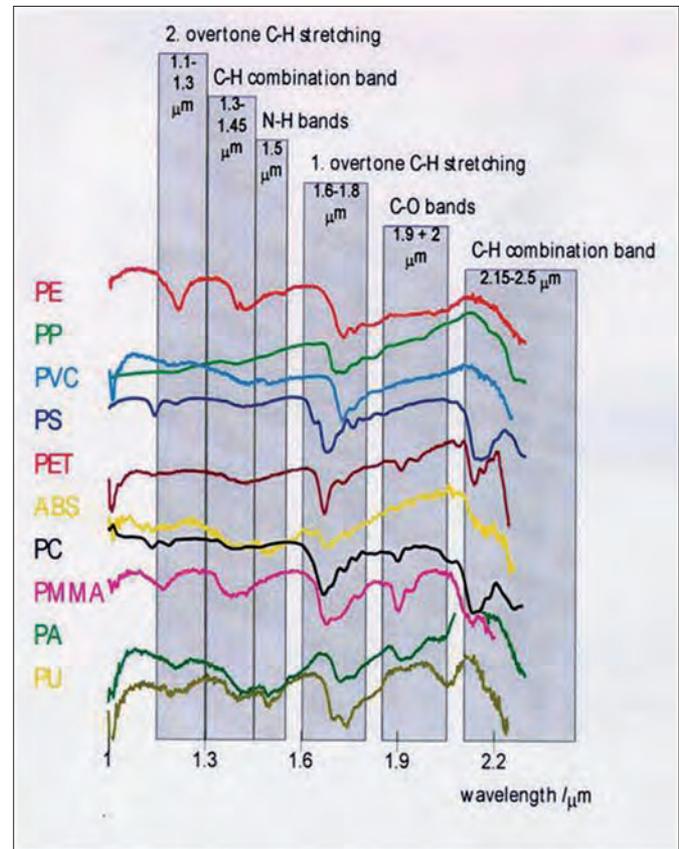


Fig. 12b. Imagen original e imagen de los tipos de plásticos.

mundo del arte. Así se tiene constancia de la aplicación de sistemas hiperespectrales en la identificación de pigmentos. Esto se ha realizado por comparación a través de bases de datos espectrales especializadas. Esta tecnología presenta la ventaja de no tener que sacar muestras de los lienzos (Creagh y Bradley, 2007).

También hay experiencias relacionadas con el monitoreo de cambios de color, coincidencia de colores y documentación de la reflectancia en IR y de la fluorescencia inducida en UV.

Se han hecho ya muchos trabajos donde se miden la reflectancia de los pigmentos en el espectro visible entre 400 y 700nm, pero se ha descubierto que algunos pigmentos sólo pueden discriminarse en bandas espectrales del infrarrojo cercano (NIR). Uno de los trabajos aún por realizar es definir claramente las características espectrales de los pigmentos y esta es una labor que se puede y se debe hacer con sistemas hiperespectrales.

Aparte de la identificación de los pigmentos, la imagen hiperespectral genera un método preciso de registro digital para la conservación del arte. Esto puede utilizarse para controlar los cambios o daños en las pinturas, ya que la documentación digital resiste mejor el deterioro que las fotografías utilizadas en la actualidad, y da mucha más información que las imágenes digitales en color.

También puede dar constancia de los daños producidos en los procesos de restauración. Del mismo modo el método hiperespectral puede descubrir los procesos de retoque que han sufrido

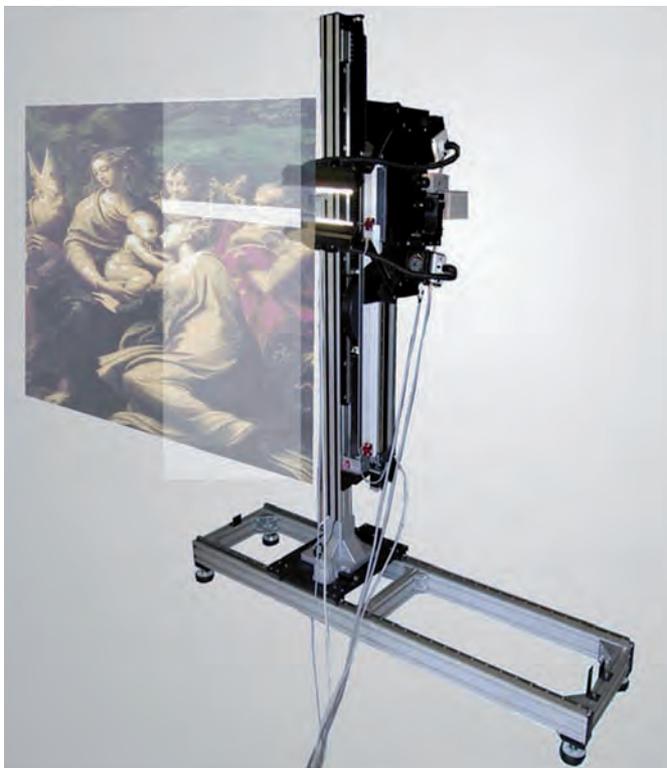


Fig. 13. Sistema utilizado para hacer la captura hiperespectral mediante desplazamiento de la cámara a lo largo de la obra de arte.

los cuadros. En este proceso de retoque puede ser interesante utilizar las técnicas hiperespectrales para seleccionar el pigmento más similar al original, con el fin de que no se produzcan efectos de metamerismo, o lo que es lo mismo, la posibilidad de que un color que parece igual con una fuente de luz, sea distinto con otro tipo de iluminación.

La utilización de sistemas hiperespectrales en el ultravioleta se utiliza cuando el efecto a comprobar ocurre en estas longitudes de onda, este es el caso por ejemplo en ocasiones en que se puede revelar información acerca de partes que han sido pintadas encima del lienzo original y en la detección de ciertos barnices y resinas que sólo son visibles en longitudes de onda UV.

La identificación de pigmentos en las obras de arte abren claramente el camino para distinguir las partes de las obras originales, y aquellas partes que han sido retocadas o restauradas, ya que cada época ha utilizado distintas composiciones en la confección de los colores, además es posible que los pigmentos hayan tenido un cambio en sus características químicas a través de los años y por tanto tengan una respuesta distinta dependiendo del tiempo. Esto serviría también por tanto para la autenticación de obras de arte.

En cuanto a los estudios de obras de arte por reflectografía realizada hasta este momento se ha basado en cámaras infrarrojas que capturan el espectro entre los 900 y los 2500 nm. Sin embargo, existe un importante trabajo a hacer para determinar exactamente qué bandas espectrales son las que realmente pueden dar más



Fig. 14. A. Imagen de palimpsesto en color. B, C y D. Imágenes de palimpsesto en diferentes bandas espectrales. Se resalta la visión de los textos superpuestos según la banda espectral (imagen procedente de Forth Photonics).



Fig. 15. Sistema hiperespectral sobre microscopio analizando composición de cortes transversales de pintura.

información del substrato de las obras y también investigar sobre qué combinaciones de bandas espectrales pueden abrir caminos a nuevos descubrimientos.

En el análisis de palimpsestos, (pergaminos o escritos antiguos sobre los que se ha escrito más de una vez y que conservan restos de los textos primitivos) esta tecnología se ha mostrado especialmente útil al poder seleccionar distintas longitudes de onda que eliminan parcialmente el texto moderno y resaltan el texto antiguo (Fig. 14).

Una ventaja adicional de los métodos hiperespectrales es el trabajo a distintas escalas, hasta el momento se ha hablado del trabajo macroscópico, utilizando los sistemas de forma parecida a las cámaras de fotografía, sin embargo los sistemas hiperespectrales pueden conectarse a un microscopio y hacer determinaciones a nivel microscópico como se muestra en la siguiente figura, y de esta forma determinar los componentes a escala microscópica (Fig. 15).

Se abren nuevos e interesantes caminos también en aplicaciones de exterior, relacionados con la conservación de edificios

históricos, ya que mediante esta tecnología se pueden diferenciar tipos de rocas que constituyen los edificios o monumentos, su grado de deterioro, la influencia de microorganismos en su estado y el grado de humedad.

Como se puede ver, son diversas las aplicaciones actuales de los sistemas hiperespectrales en el entorno del arte, pero sin embargo se abre una perspectiva realmente de dimensiones impresionantes, acerca de las posibilidades futuras que esta tecnología puede tener.

Conclusiones

La tecnología de captura de imagen digital está siguiendo una constante evolución tanto en resolución como en calidad de las imágenes. La necesidad de archivo y divulgación global de imágenes de obras de arte hacen de esta tecnología una necesidad ineludible.

Las nuevas metodologías de trabajo son cada vez más multidisciplinarias y pueden utilizarse en distintos campos de la ciencia, la industria y la cultura. Una de estas nuevas tecnologías es la espectrografía de imagen hiperespectral.

Se ha descrito su método de funcionamiento y las bases utilizadas, y se han enumerado las distintas aplicaciones en diversos campos de la ciencia y de la técnica, que pueden servir como punto de partida para la investigación de aplicaciones similares en el mundo del arte.

Las aplicaciones de la espectrografía de imagen hiperespectral en el entorno del arte aún no son muy numerosas, pero están empezando a ser utilizadas por los principales museos y centros de restauración más prestigiosos a nivel mundial.

Se puede concluir por tanto, que esta es una tecnología de aplicación reciente pero con un futuro espectacular.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mis compañeros de la empresa INFAIMON sus sugerencias y aporte de material relacionado con las aplicaciones hiperespectrales tanto a nivel general, como en particular en relación con el mundo del arte.

Así mismo, agradecer muy sinceramente a Araceli Gabaldón por todo lo que he aprendido con relación a la restauración de obras de arte, creo sinceramente que es un pozo de ciencia y una de las más destacadas especialistas de nuestro país. Ha sido un placer y un honor colaborar con ella durante todos estos años y en especial en el desarrollo del proyecto VARIM.

Finalmente, agradecer a Marian del Egado por la oportunidad que me ha dado de poner esta nueva tecnología al alcance de todos los profesionales del arte, que puedan estar interesados en estos nuevos métodos de trabajo.

Bibliografía

AIKIO, M. (1992): Optinen komponentti (An optical component), Finish Patent Application N° 921564, April 8th.

CREAGH D. y BRADLE D. (2007): *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*. Vol. 2, Elsevier.

DESCOUR, M. R. y SHEN, S. S. (2000): Imaging Spectrometry VI, Proceedings of the Conference on Imagign Spectrometry VI, Proc SPIE, Vol. 4132.

DOMÉNECH A.: DOMÉNECH M. T. y COSTA V. (2009): *Electrochemical methods in archaeometry, conservation and restoration*. Springer.

GABALDÓN, A. (2006): "Líneas de investigación en el Departamento de Estudios Físicos del IPHE en 2006". En Arbor. *Ciencia, pensamiento, cultura*, Vol. CLXXXII, N° 717, Madrid.

GIRÓ, S. (2009): "Soluciones de visión artificial para aplicaciones industriales específicas". Rev. *Automática y Robótica*. Julio 2009, N° 409: 63-66.

GREEN, R. O.; EASTWOOD, M. L.; SARTURE, C. M.; CHRIEN, T. G.; ARONSSON, M.; CHIPPENDALE, B. J.; FAUST, J. A.; PAVRI, B. E.; CHOVI, C. J.; SOLIS, M.; OLAH, M. R. y WILLIAMS, O. (1998): Imaging spectroscopy ans Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), Remote Sensing of Environment. Vol. 65, N° 3, Sept: 227-248.

MAO, C.; SEAL, M. y HEITSCHMIDT, G. (1997): Airbone hiperespectral image aquisition with digital CCD video camera. Proc of the 16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment, Welasco Texas, April 29-May 1, 1997: 129-140.

TORRES, J.; POSSE, A; MENÉNDEZ, J. M. (2008): "Descripción del sistema VARIM: captación y composición automática del mosaico reflectográfico", *Bienes Culturales*, N° 8, Madrid, Instituto del Patrimonio Cultural de España: 89-97.

VAN ASPEREN DE BOE, J. R. (1970): *A contribution to the examination of earlier European paintings*. Tesis Doctoral, Universidad de Amsterdam.

WILLOUGHBY, C. T.; FOLKMAN, M. A. y FIGUEROA, M. A. (1996): Application of hiperespectral imaging spectrometer systems to industrial inspection, Proc SPIE, Vol. 2599: 264-272.

WOLFE, W. L. (1997): *Introduction to imaging spectrometers*, SPIE Optical Engineering Press.

ISBN-13: 978-84-8163-461-3
9 788481 814613

