

## La caracterización espectroscópica no invasiva en la pintura: del colorímetro a las imágenes hiperespectrales

Josefina Pérez Arantegui | Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza

URL de la contribución <[www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5408](http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5408)>

### RESUMEN

Actualmente, la sociedad no puede prescindir o alejarse de nuestro espléndido patrimonio, al contrario, debe aproximarse a él a través de las tecnologías modernas, especialmente las digitales, maximizando a la vez su valor a través de la investigación y de las tecnologías de preservación avanzadas. Desde esta premisa, la introducción de técnicas no invasivas de caracterización espectroscópica resulta indispensable para el estudio de objetos de arte y la explotación futura de los resultados. La obtención de imágenes hiperespectrales de las obras de arte de un museo ofrece una valiosa y potente información digital tanto para la catalogación y el estudio actual de las mismas, de sus características artísticas y de su estado de conservación, como para futuras investigaciones que tengan que ver con su evolución, con la forma de preservarlas o con su difusión. Además, contribuyen a mostrar al público nuestro patrimonio de una forma diferente y acorde a las tecnologías de las que en este momento disfrutamos, por ejemplo, en forma de imágenes ocultas a simple vista. La ventaja principal de los sistemas de captación de imágenes hiperespectrales radica en tratarse de una técnica de estudio no invasiva que permite estudiar desde grandes áreas a objetos pequeños, ofreciendo una información espacial y espectral. Al trabajar además con instrumentación portátil, parece dirigida preferentemente al trabajo con obras de arte de extremada fragilidad, sea por el tipo de materiales que las compongan o por su singularidad.

### Palabras clave

Caracterización | Colorante | Espectroscopía | Imagen hiperespectral | Pigmento | Técnica no destructiva | Técnica no invasiva |



## Non-invasive spectroscopic characterization in paint: from the colorimeter to hyperspectral images

### ABSTRACT

At present, society cannot do without or separate itself from our splendid heritage; on the contrary, it must approach it through modern technologies, especially digital ones, while maximising its value through research and advanced preservation technologies. From this premise, the introduction of non-invasive spectroscopic characterisation techniques is indispensable for the study of art objects and the future exploitation of the results. Hyperspectral imaging of works of art in a museum offers valuable and powerful digital information for both the cataloguing and current study of the works, for the investigation of their artistic characteristics and their state of conservation and for future research related to their evolution, preservation or dissemination. They also help to show our heritage to the public in a different way and in accordance with the technologies that we currently enjoy, for example, in the form of images hidden from the naked eye. The main advantage of hyperspectral imaging systems lies in the fact that they are a non-invasive study technique that allows the study of large areas to small objects, offering spatial and spectral information. As it works with portable instrumentation, it seems to be preferably aimed at working with works of art that are extremely fragile, either because of the type of materials they are made of or because of their uniqueness.

### Key words

Characterization | Colorant | Spectroscopy | Hyperspectral image | Pigment | Non-destructive technique | Non-invasive technique |

**Cómo citar:** Pérez Arantegui, J. (2023) La caracterización espectroscópica no invasiva en la pintura: del colorímetro a las imágenes hiperspectrales. *revista PH*, n.º 110, pp. 178-191 <[www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5408](http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5408)> DOI 10.33349/2023.110.5408

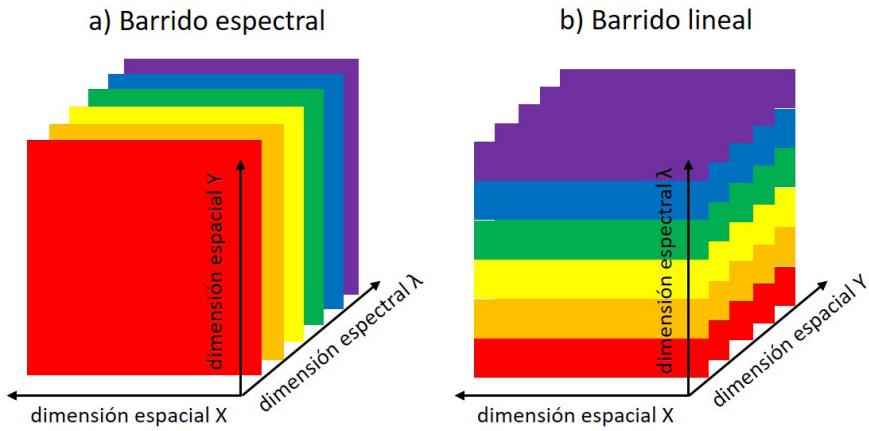
**Enviado:** 31/05/2023 | **Aceptado:** 30/06/2023 | **Publicado:** 10/10/2023

La sociedad actual necesita un acercamiento a nuestro espléndido patrimonio acorde a las tecnologías modernas, especialmente las digitales, y que a la vez maximice su valor a través de la investigación y de las tecnologías de preservación avanzadas. Desde esta premisa que creemos imprescindible, la introducción de técnicas no invasivas de caracterización espectroscópica resulta indispensable para el estudio de objetos de arte y la explotación futura de los resultados.

La toma de imágenes multiespectrales o hiperespectrales (“hyperspectral imaging”) se desarrolló inicialmente para la detección remota, por ejemplo, en astronomía o en ciencias ambientales a través de imágenes vía satélite o aérea, pero pronto se explotaron otras aplicaciones en biología, medicina, química, control de procesos industriales, etc. El término se acuñó a mediados de los años 80 con el desarrollo del “airborne imaging spectrometer” (AIS) por la NASA, que era capaz de tomar imágenes aéreas de amplias zonas terrestres, trabajando en la región del infrarrojo de onda corta (short-wavelength infrared, SWIR) entre 1200 y 2400 nm (Chiou 1985; Goetz et ál. 1985).

Estos sistemas de captación de imágenes se aplicaron al área de patrimonio cultural e histórico a partir de finales de los años 90 (Baronti et ál. 1997, 1998). Su ventaja principal radica en tratarse de una técnica de estudio no invasiva que permite estudiar desde grandes áreas a objetos frágiles, ofreciendo una amplia información espacial ypectral. Desde esos años, el mayor número de aplicaciones en este campo se ha dirigido a la detección de posibles restos arqueológicos previa a la excavación, aunque en las últimas décadas se ha experimentado un creciente interés también en el estudio y la conservación de pinturas y manuscritos (Kubik 2007; Klein et ál. 2008; Liang 2012; Cucci, Delaney y Picollo 2016; Daniel et ál. 2016, 2017; Cucci et ál. 2020).

El objetivo que hay detrás de este análisis hiperespectral es la obtención no invasiva de los espectros correspondientes a un enorme número de puntos (pixeles) de la superficie de una obra de arte, no solo a unas pocas pequeñas áreas como puede ser el caso del estudio con un colorímetro, con un especlómetro con fibra óptica (como sucede en la “fiber optics reflectance spectroscopy”, FORS), un especlómetro de infrarrojo o con un instrumento de fluorescencia de Rayos X. Mediante una cámara adaptada, el “imaging” multiespectral o hiperespectral recoge imágenes de un objeto en una serie de ventanas espetrales. Los dos métodos más habituales para recoger estos millones de espectros, ya que se mide un espectro por cada pixel espacial, aparecen en las imágenes de la página siguiente. En la imagen a, las dimensiones (x, y) del sensor corresponden al área recogida en la imagen y el espectro se registra en cada pixel haciendo un barrido de las longitudes de onda requeridas. En la b, una dimensión del sensor corresponde a una línea (x) del área a estudiar y la otra dimensión a las diferentes longitu-



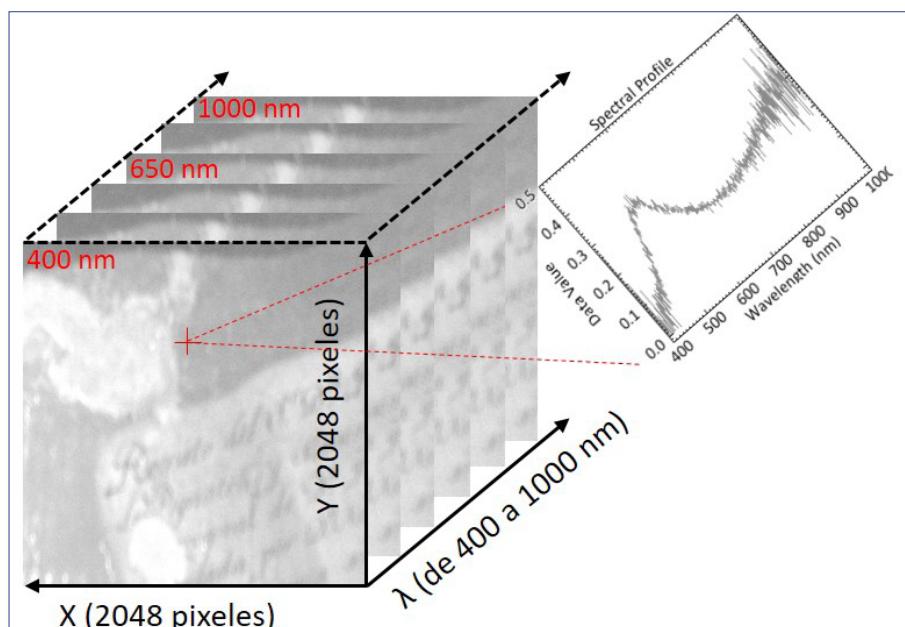
des de onda que formarán el espectro, de esta forma la imagen se genera haciendo un barrido en la segunda dimensión espacial (y) y dando lugar al área estudiada. En este caso, el movimiento de la cámara o del objeto de estudio está sincronizado con la adquisición de datos por la cámara y necesitan de un sistema de barrido.

La distinción entre multiespectral e hiperespectral no es muy clara. En general, se habla de hiperespectral cuando la imagen consiste en una serie de canales espectrales divididos mucho más finamente que en el multiespectral (bandas) y, por tanto, en este primer caso se trabaja con un espectro continuo en longitudes de onda y con una mucho mejor resoluciónpectral. De hecho, actualmente se prefiere el término “imaging spectroscopy”, o espectroscopía de imagen, sugerido por los grupos de investigación del proyecto AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer) por resultar menos confuso, evitando ambos prefijos.

Las imágenes pueden recogerse con luz de la zona del ultravioleta (200-400 nm), del visible (400-750 nm) o del infrarrojo (750-2500 nm, infrarrojo cercano) o, incluso, en modo de fluorescencia en el ultravioleta. La información resultante de la toma de este tipo de imágenes es un conjunto de datos de tres dimensiones, a veces llamado “hipercubo”, que contiene una imagen de reflectanciapectral (en escala de grises) a cada longitud de onda medida y que puede ofrecer por cada pixel registrado de la imagen un espectro de reflectancia para todo el rango de longitudes de onda de trabajo (p. 182).

El valor de la reflectanciapectral es la proporción de luz reflejada por un objeto a una determinada longitud de onda y es el parámetro más habitual registrado por el espectrógrafo del sistema hiperespectral. Este valor y, sobre todo, el espectro de reflectancia completo en un rango de longitudes de onda concreto han sido muy útiles para la identificación de algunos

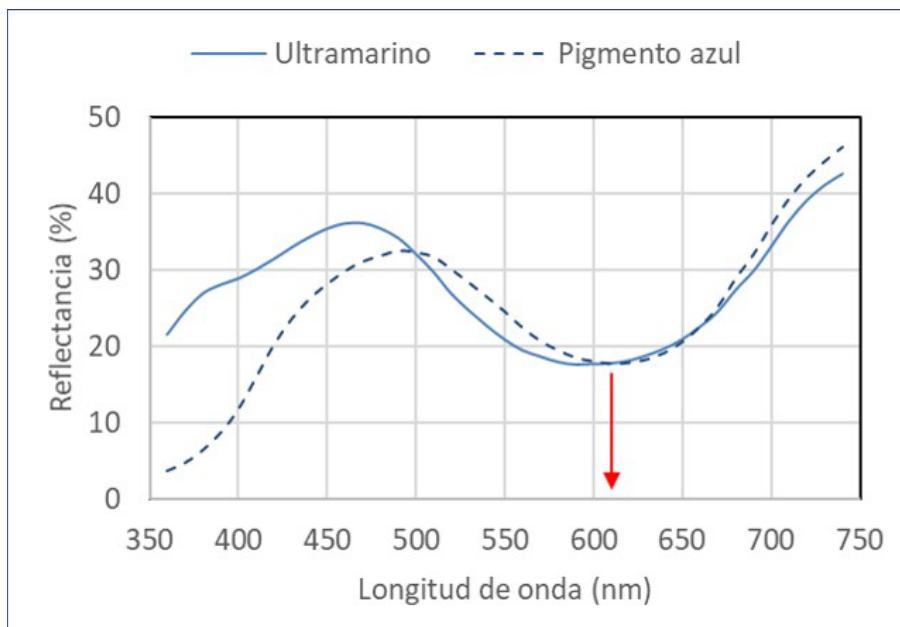
Adquisición de datos hiperespectrales: a) El área del sensor es usada para recoger las dos dimensiones espaciales de un objeto a una longitud de onda determinada. La tercera dimensión (el espectro) se consigue repitiendo esta toma para cada banda espectral; b) Una de las dimensiones del sensor se usa para registrar una dimensión espacial (una línea) del objeto y por otra parte la información espectral se proyecta en distintas partes del sensor (así la segunda dimensión del sensor captura la dimensión espectral), a la vez que el objeto se barre espacialmente línea por línea | fuente adaptación de la autora a partir de Klein et al. 2008



"Hipercubo" resultado de una medida hiperespectral  
| fuente adaptación de la autora a partir de Klein  
et ál. 2008

materiales de patrimonio, especialmente pigmentos. Técnicas de uso sencillo como la espectroscopía de reflectancia con fibra óptica, FORS, permiten registrar los correspondientes espectros de manera no invasiva y pueden compararse con otros recogidos en materiales conocidos que sirven de referencia para identificar su origen. Trabajando con radiación en el ultravioleta-visible o en el visible-infrarrojo cercano, el resultado es un espectro de reflectancia de bandas anchas, que aparentemente tiene poca información analítica, pero que se puede comparar en sus mínimos de reflectancia (máximos de absorbancia) o en sus puntos de inflexión con otros compuestos de naturaleza conocida. En la imagen de la página siguiente se presenta el espectro del pigmento azul ultramarino sintético y la identificación de otro pigmento azul por compartir su característica principal de poseer una banda ancha con un mínimo en torno a 610 nm.

Dado que el número de datos que se manejan en este tipo de imágenes hiperespectrales es muy elevado, tanto para el tratamiento de los espectros como de las imágenes se recurre a complejos métodos matemáticos y estadísticos para interpretar los resultados, clasificarlos y compararlos, sea entre sí o con otros de referencia (Baronti et ál. 1997; Sciutto et ál. 2012; Cesaratto et ál. 2013; Hedjam y Cheriet 2013; Rohani et ál. 2018; Kleynhans et ál. 2020; Vermeulen et ál. 2021). Paralelamente, para una acertada identificación de los materiales, estos deben enfrentarse a una base de datos espectrales construida especialmente a tal fin. Además, gracias a la imagen, se podrá establecer la distribución de un pigmento en particular en una obra, por ejemplo, a través de correlaciones matemáticas.



Espectro de reflectancia (%) entre 360 y 740 nm del pigmento azul ultramarino y de otro azul por identificar

Las aplicaciones y los casos de estudio en los que estos sistemas multi- o hiper-espectrales se han usado con objetos de arte son numerosos en la actualidad. Una primera aplicación fue la comparación cualitativa de las imágenes banda a banda, por ejemplo, para identificar zonas compuestas por materiales diferentes, degradaciones naturales del material, intervenciones anteriores en sus procesos de conservación o bocetos preparatorios (Liang, Saunders y Cupitt 2005; Cornelis et ál. 2010; Daffara y Fontana 2011; Elias, Mas y Cotte 2011; Chaban et ál. 2017). En archivos y bibliotecas públicas, también estas imágenes espectrales pueden ser de gran ayuda, tanto para facilitar el estudio de documentos a personas investigadoras y público en general como para preservarlos para el futuro (Conde et ál. 2004; France 2011), ya que se trata de un método no invasivo y que permite el estudio posterior de las imágenes sin tener que volver a manejar el documento, además de poder seguir la evolución de documentos expuestos al público.

La obtención de imágenes con un número mucho mayor de bandas (hiper-spectrales) ofrece también la posibilidad de extraer información espectral para la identificación de materiales, por ejemplo, pigmentos, aglutinantes o barnices. Así pueden estudiarse los materiales usados para el boceto o la escritura (Attas et ál. 2003; Goltz et ál. 2009), la preparación (Dooley et ál. 2013) o la coloración (Karagiannis et ál. 2007; Delaney et ál. 2010, 2014; Ricciardi et ál. 2013; Deborah, George y Hardeberg 2019), especialmente si no se trabaja sólo con luz visible y se amplía el espectro hasta el infrarrojo cercano (Near Infrared - Short-wave Infrared, NIR-SWIR) (Dooley et ál. 2013; Rosi et ál. 2013a, 2013b; Delaney et ál. 2016). Además, la información

recogida en el “hipercubo” también permite seguir la evolución de una obra de arte, tanto para conocer su estado antes de su restauración como posteriormente su posible deterioro (Landi y Maino 2011; Granero-Montagud et ál. 2013; Mass et ál. 2013).

Sin embargo, a pesar de la mucha información espacial y espectral que contienen estas imágenes, suele ser necesario utilizar otras técnicas espectrales complementarias cuando se quiere hacer un estudio analítico en profundidad. Para ello, se suele recurrir a la espectroscopía Raman o a la fluorescencia de Rayos X para identificar con seguridad los materiales componentes de las obras de arte (Sciutto et ál. 2012; Delaney et ál. 2014; Legrand et ál. 2014; Mounier et ál. 2014; Daniel et ál. 2016, 2017; Favero et ál. 2017; MacLennan et ál. 2019; D'Elia et ál. 2020).

En este contexto, la obtención de imágenes hiperespectrales de las obras de arte ofrece una valiosa y potente información digital, tanto para la catalogación y el estudio actual de las mismas, de sus características artísticas y de su estado de conservación como para futuras investigaciones que tengan que ver con su evolución, con la forma de preservarlas o con su difusión y exposición al público.

### **PROFUNDIZAR EN LA PINTURA DE GOYA A TRAVÉS DE LA ESPECTROSCOPÍA DE IMAGEN**

Aunque muchas de las pinturas de Francisco de Goya se encuentran en el Museo del Prado, también Zaragoza y sus alrededores cuentan con una serie de obras de significativo interés para conocer el trabajo de este importante pintor y también grabador. La mayor parte se encuentra depositada en el Museo de Zaragoza y en el Museo Goya de esta ciudad. De ahí surgió la posibilidad de estudiar varias de sus pinturas, en algunos de los casos pensando en una potencial restauración posterior.

Las obras estudiadas correspondían a varias etapas de la vida del pintor. Unas pertenecen al periodo temprano (1760-1775), anterior a su traslado a Madrid, como su primer *Autorretrato* (hacia 1775). Otras fueron creadas en algunas de sus visitas a Zaragoza, como el *Éxtasis de San Antonio Abad* (1780), *La Escuela* (1780-1785) y el retrato de *Juan Martín de Goicoechea y Galarza* (1790). En último lugar, se estudió un pequeño borrador encuadrado en su etapa del final del siglo XVIII, de temática fantástica, la *Visión fantasmal* (hacia 1801).

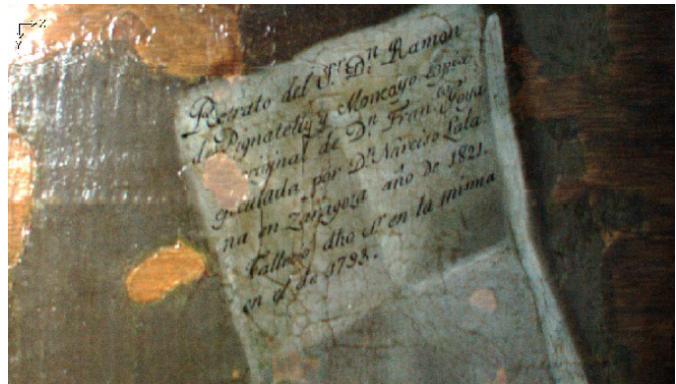
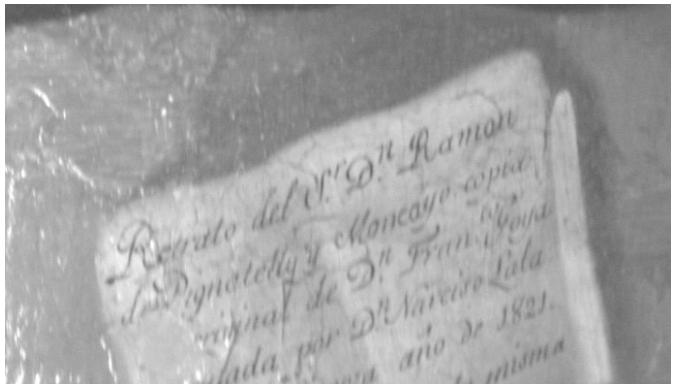
En el caso de este proyecto de caracterización, se trabajó con sistemas espectrales con dos tipos diferentes de barrido para registrar los datos de las áreas analizadas, pudiendo así además comparar las ventajas e incon-

Color	Pigmento	Autorretrato	San Antonio Abad	La Escuela	Juan M. de Goicoechea	Visión fantasmal
Rojo	Bermellón	x	x	x	x	x
	Ocre rojo	x	x	x	x	x
Marrón	Ocre naranja oscuro	x	x	x		x
	Tierra de Siena			x		
Amarillo	Ocre amarillo	x	x			
	Amarillo de Nápoles		x			
	Oropimente					x?
Azul	Azul de Prusia		x		x	x
Blanco	Blanco de plomo	x		x	x	x?
	Calcita			x	x	
Negro	Negro de carbono	x			x	x

Tabla 1. Resumen de algunos de los pigmentos encontrados en varias pinturas realizadas por Francisco de Goya

venientes de ambos (Daniel et ál. 2016). En uno de ellos, la cámara se desplaza linealmente a lo largo del objeto a estudiar mediante un carril metálico a la vez que registra la imagen; puede hacerlo horizontal o verticalmente. En el segundo sistema, el barrido se lleva a cabo por el giro de un pequeño espejo que recoge los datos de un extremo al otro del área estudiada, sin que exista desplazamiento de la cámara ni del objeto. En los dos sistemas de barrido, la imagen obtenida es del tipo de la imagen b de la página 181. El primero de los sistemas es ventajoso para estudiar pinturas o áreas de gran tamaño, ya que la longitud del carril de más de un metro y la distancia perpendicular a la superficie a estudiar a la que se coloque permiten obtener una correcta imagen de áreas de varios metros cuadrados. Este tipo de barrido facilita además una iluminación homogénea y constante del objeto. Sin embargo, el segundo sistema está pensado para el análisis de áreas pequeñas (para que el ángulo de barrido del espejo sea pequeño y no se distorsione la imagen), pero su tamaño y su peso lo hacen mucho más manejable y fácil de mover para realizar medidas *in situ*. En ambos casos, los espectros se recogían entre 400 y 1000 nm.

El registro de las imágenes espectrales permitió la caracterización de algunos de los pigmentos usados por Goya en estas pinturas (ver tabla superior) mediante la clasificación y la comparación de los espectros con otros obtenidos con materiales de referencia y que sirvieron para crear una base de datos, indispensable para poder realizar una correcta identificación (Daniel et ál. 2016, 2017; Pérez Arantegui 2022). A pesar de la mucha información analítica que contienen estas imágenes, los espectros de reflectancia entre 400 y 1000 nm presentan limitaciones para identificar algunos pigmentos, especialmente los blancos y los negros, por ello se recurrió a complementar la investigación con la utilización *in situ* de la espectroscopía Raman y la fluorescencia de Rayos X, ambas mediante instrumentación portátil, para asegurar las conclusiones.



A la izquierda, imagen a 639 nm; a la derecha, imagen en falso color (combinando las imágenes de 900, 650 y 550 nm)

Además de los espectros en cada punto del área estudiada, las imágenes registradas a distintas longitudes de onda (imagen izquierda) o las imágenes generadas combinando varias longitudes de onda (imagen derecha) facilitan el estudio en profundidad de la pintura, tanto observando el cambio de pigmentos que aparentemente parecerían ser iguales como evidenciando la presencia de zonas retocadas o alteradas. Las dos combinaciones habituales son una en la zona del visible, la RGB (Red-Green-Blue), y otra que utiliza también el infrarrojo, la imagen en falso color. La primera combina, por ejemplo, la imagen de 670 nm para el rojo, la de 550 nm para el verde y la de 448 nm para el azul. En la segunda, las longitudes de onda elegidas para el rojo, el verde y azul se desplazan a valores mayores de los teóricos, hacia el infrarrojo, por ejemplo, 900 nm para el rojo, 650 nm para el verde y 550 nm para el azul, por eso las imágenes se denominan “en falso color”.

La investigación de estas pinturas facilitó, por ejemplo, la toma de decisiones para su posterior restauración, como en el caso del *Autorretrato* o del *Éxtasis de San Antonio Abad*, así como profundizar en los pigmentos usados por este reconocido pintor, que permanecerán a lo largo de su carrera y que compartirá con otros artistas contemporáneos suyos.

#### EL “MUNDO FLOTANTE”: EL COLOR EN LA ESTAMPA JAPONESA DE ESTILO UKIYO-E

Por la posibilidad que ofrecen las imágenes especktrales de ser una metodología de estudio no invasiva y con instrumentación portátil, parece dirigida preferentemente a la investigación de obras de arte de extremada fragilidad, sea por el tipo de materiales que las compongan o por su singularidad. Por ello, uno de los proyectos de investigación con espectroscopía de imagen se centró en los materiales de arte de Asia oriental depositados en el Museo de Zaragoza. El fondo de arte de Asia oriental procede de la colección formada por Federico Torralba y es uno de los más importantes conjuntos de esta

naturaleza en España, con más de un millar de objetos artísticos (desde el s. III al XX), procedentes, en su mayor parte, de China, Japón, Sudeste Asiático o Nepal (Torralba Soriano et ál. 2003). Este legado ingresó en el Museo de Zaragoza mediante un pacto sucesorio, en 2001, acompañado de su biblioteca personal especializada en la materia. Además, el fondo de obras asiáticas se ha ampliado en los últimos años con nuevas cesiones y donaciones.

Este conjunto, de gran belleza y excepcionalidad, posee una gran coherencia interna y es un ejemplo perfecto del colecciónismo privado de arte asiático en nuestro país (VV.AA. 2003). Sobresale una exquisita colección de lacas japonesas, con más de dos centenares de objetos decorados con urushi (cajas, mobiliario, adornos personales, etc.). La cerámica y la porcelana china están representadas con ejemplos de todas las familias ornamentales, aunque destaca la presencia de tres *mingqi* de la dinastía Tang, así como una selección de celadones de las dinastías Song y Yuan. El fondo cuenta con una abundante selección de estampas y libros ilustrados de la escuela pictórica japonesa *ukiyo-e*, con obra de autores principales como Hokusai, Hiroshige o Harunobu (Barlés Báguena y Almazán Tomás 2007; Almazán Tomás y Barlés Báguena 2013). Finalmente, la colección se completa con un interesante conjunto de tankas, mandalas y una serie de pinturas y caligrafías en kakemono, así como un repertorio de escultura bódica en distintos materiales. De toda esta colección, por su magnífico colorido y por su calidad artística, el proyecto de investigación a través de imágenes hiperespectrales se centró en el estudio y análisis de las estampas y libros ilustrados.

Desde 2017 y en colaboración con el grupo de investigación del Dr. F. Daniel del IRAMAT-CRP2A, CNRS-Université Bordeaux Montaigne (Francia), se han estudiado casi cincuenta estampas diferentes de diversos autores, recogiendo desde algunas de las obras polícromas más antiguas conservadas en el museo, de la segunda mitad del siglo XVIII, hasta otras de comienzos del siglo XX. Todas ellas corresponden al estilo conocido como *ukiyo-e* (“del mundo flotante” o de la vida cotidiana). La estampación en Japón se realizaba mediante planchas de madera, una por cada color, que se preparaban a partir del dibujo inicial en tinta y donde se podían combinar, a veces, hasta más de diez colores; como consecuencia, cada uno de los pigmentos aparece como una sutil capa de color sobre el papel. La caracterización de estas obras se realizó apoyándose en las imágenes espectrales, pero se complementó con otras técnicas analíticas no invasivas como la fluorescencia de Rayos X, la espectroscopía Raman y la espectroscopía en el infrarrojo cercano para la correcta clasificación de los materiales. Las mayores dificultades se encontraron en la identificación de los materiales que producían los colores amarillos, especialmente aquellos de naturaleza orgánica.

Este proyecto permitió identificar los pigmentos y colorantes utilizados en la estampa *ukiyo-e* (a partir de la segunda mitad del periodo Edo, 1603-1867)



Detalle del mes de mayo: serie *Bijin jūni kagetsu* (Bellezas de los doce meses) por Miyagawa Shuntei, editado en Tokio y fechado en 1898-1899

y verificar el uso de materiales históricamente conocidos y la introducción de otros nuevos; datos estos que incluyen también una importante información sobre el comercio y las relaciones políticas con el este asiático (Biron et ál. 2018, 2020; Mounier et ál. 2018; Pérez-Arantegui et ál. 2018; Pérez-Arantegui, Gallego y Díez de Pinos 2022). Paralelamente, en el proyecto quedaron establecidos unos patrones de color en cada estampa que permiten estudiar la futura evolución de los pigmentos y su estado de conservación. Entre las conclusiones obtenidas, se puede destacar, por ejemplo, el uso temporalmente continuo del índigo como colorante azul y, sin embargo, la sustitución del tradicional azul de la commelina (muy inestable a la luz) por el azul de Prusia en el segundo cuarto del siglo XIX. También se puede señalar la constatación del uso de varios materiales para producir el color rojo, desde el tradicional rojo de cártamo, que se sustituye por la cochinilla al comenzar el periodo Meiji (1868), pasando por el bermellón (usado esporádicamente a partir de la segunda mitad del siglo XIX), hasta la introducción de los rojos sintéticos, como el rojo de naftol, a finales del siglo XIX.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almazán Tomás, D. y Barlés Báguena, E. (2013) Hiroshige, maestro del paisaje del grabado japonés: fortuna, crítica y colecciónismo en España. En: Álvaro Zamora, M.I., Lomba Serrano, C. y Pano Gracia, J.L. (coord.) *Estudios de historia del arte: Libro homenaje a Gonzalo M. Borrás Gualis*. Zaragoza: Institución Fernando el Católico, Diputación de Zaragoza, pp. 79-98. Disponible en: [https://ifc.dpz.es/recursos/publicaciones/32/98/\\_ebook.pdf](https://ifc.dpz.es/recursos/publicaciones/32/98/_ebook.pdf) [Consulta: 17/07/2023]
- Attas, M., Cloutis, E., Collins, C., Goltz, D., Majzels, C., Mansfield, J.R. y Mantsch, H.H. (2003) Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation: investigation of drawing constituents. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, n.º 2, pp. 127-136. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00024-4)
- Barlés Báguena, E. y Almazán Tomás, D. (2007) *Estampas japonesas: historia del grabado japonés y de su presencia en España*. Zaragoza: Fundación CAI-ASC, Fundación Torralba-Fortún
- Baronti, S., Casini, A., Lotti, F. y Porcinai, S. (1997) Principal component analysis of visible and near-infrared multispectral images of works of art. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 39, pp. 103-114
- Baronti, S., Casini, A., Lotti, F. y Porcinai, S. (1998) Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis. *Applied Optics*, vol., 37, pp. 1299-1309
- Biron, C., Le Bourdon, G., Pérez-Arantegui, J., Servant, L., Chapoulie, R. y Daniel, F. (2018) Probing some organic ukiyo-e Japanese pigments and mixtures using non-invasive and mobile infrared spectroscopies. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, n.º 410, pp. 7043-7054. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1305-2>
- Biron, C., Mounier, A., Pérez-Arantegui, J., Le Bourdon, G., Servant, L., Chapoulie, R., Roldán, C., Almazán, D., Díez-de-Pinos, N. y Daniel, F. (2020) Colours of the “images of the floating world”: non-invasive analyses of Japanese ukiyo-e woodblock prints (18th and 19th centuries) and new contributions to the insight of oriental materials. *Microchemical Journal*, vol. 152, 104374. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104374>
- Cesaratto, A., Nevin, A., Valentini, G., Brambilla, L., Castiglioni, C., Toniolo, L., Fratelli, M. y Comelli, D. (2013) A novel classification method for multispectral imaging combined with portable Raman spectroscopy for the analysis of a painting by Vincent Van Gogh. *Applied Spectroscopy*, vol. 67, n.º 11, pp. 1234-1241. Doi: <https://doi.org/10.1366/13-07032>
- Chaban, A., Deiana, R., Parisatto, M. y Asscher, Y. (2017) Analysis of on-site multispectral images: a case study of degraded wall paintings in Sarno Baths, Pompeii. *Acta Artis Academica, Proceedings of the Conference ALMA*, pp. 151-160
- Chiou, W.C. (1985) NASA image-based geological expert system-development project for hyperspectral image-analysis. *Applied Optics*, vol. 24, n.º 14, pp. 2085-2091. Doi: <https://doi.org/10.1364/AO.24.002085>
- Conde, J., Haneishi, H., Yamaguchi, M., Ohyama, N. y Baez, J. (2004) Spectral reflectance estimation of ancient Mexican codices, multispectral images approach. *Revista mexicana de física*, vol. 50, n.º 5, pp. 484-489
- Cornelis, B., Dooms, A., Leen, F., Munteanu, A. y Schelkens, P. (2010) Multispectral imaging for digital painting analysis: A Gauguin case study. En: Tescher, A.G. (ed.) *Applications of digital image processing XXXIII. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, vol. 7798, 77980I. Doi: <https://doi.org/10.1117/12.862975>
- Cucci, C., Delaney, J.K. y Picollo, M. (2016) Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: Old master paintings and illuminated manuscripts. *Accounts of Chemical Research*, vol. 49, n.º 10, pp. 2070-2079. Doi: [10.1021/acs.accounts.6b00048](https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00048)
- Cucci, C., Picollo, M., Chiarantini, L., Uda, G., Fiori, L., De Nigris, B. y Osanna, M. (2020) Remote-sensing hyperspectral imaging for applications in archaeological areas: Non-invasive investigations on wall paintings and on mural inscriptions in the Pompeii site. *Microchemical Journal*, vol. 158, 105082. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105082>
- Daffara, C. y Fontana, R. (2011) Multispectral Infrared reflectography to differentiate features in paintings. *Microscopy and Microanalysis*, vol. 17, n.º 5, pp. 691-695. Doi: <https://doi.org/10.1017/S1431927611000031>
- Daniel, F., Mounier, A., Pérez-Arantegui, J., Pardos, C., Prieto-Taboada, N., Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S. y Castro, K. (2016) Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain). *Microchemical Journal*, vol. 126, pp. 113-120. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.044>
- Daniel, F., Mounier, A., Pérez-Arantegui, J., Pardos, C., Prieto-Taboada, N., Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S. y Castro, K. (2017) Comparison between non-invasive methods used on paintings by Goya and his contemporaries: hyperspectral imaging vs. point-by-point spectroscopic analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 409, n.º 16, pp. 4047-4056. Doi: [10.1007/s00216-017-0351-5](https://doi.org/10.1007/s00216-017-0351-5)
- Deborah, H., George, S. y Hardeberg J.Y. (2019) Spectral divergence based pigment discrimination and mapping: A case study on The Scream (1893) by Edvard Munch. *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 58, n.º 1-2, pp. 90-107. Doi: <https://doi.org/10.1080/019>

71360.2018.1560756

- Delaney, J.K., Ricciardi, P., Glinsman, L.D., Facini, M., Thoury, M., Palmer, M. y de la Rie, E.R. (2014) Use of imaging spectroscopy, fiber optic reflectance spectroscopy, and X-ray fluorescence to map and identify pigments in illuminated manuscripts. *Studies in Conservation*, vol. 59, n.º 2, pp. 91-101. Doi: <https://doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000078>
- Delaney, J.K., Ricciardi, P., Glinsman, L., Palmer, M. y Burke, J. (2016) Use of near infrared reflectance imaging spectroscopy to map wool and silk fibres in historic tapestries. *Analytical Methods*, n.º 44, pp. 7886-7890. Doi: <https://doi.org/10.1039/c6ay02066f>
- Delaney, J.K., Zeibel, J.G., Thoury, M., Littleton, R., Palmer, M., Morales, K.M., de la Rie, E.R. y Hoenigswald, A. (2010) Visible and Infrared imaging spectroscopy of Picasso's harlequin musician: Mapping and identification of artist materials in situ. *Applied Spectroscopy*, vol. 64, n.º 6, pp. 584-594. Doi: 10.1366/000370210791414443
- D'Elia, E., Buscaglia, P., Piccirillo, A., Picollo, M., Casini, A., Cucci, C., Stefani, L., Romano, F. P., Caliri, C. y Gulmini, M. (2020) Macro X-ray fluorescence and VNIR hyperspectral imaging in the investigation of two panels by Marco d'Oggiono. *Microchemical Journal*, vol. 154, pp. 104541. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104541>
- Dooley, K.A., Lomax, S., Zeibel, J.G., Miliani, C., Ricciardi, P., Hoenigswald, A., Loew, M. y Delaney, J.K. (2013) Mapping of egg yolk and animal skin glue paint binders in Early Renaissance paintings using near infrared reflectance imaging spectroscopy. *Analyst*, n.º 17, pp. 4838-4848. Doi: <https://doi.org/10.1039/C3AN00926B>
- Elias, M., Mas, N. y Cotte, P. (2011) Review of several optical non-destructive analyses of an easel painting. Complementarity and crosschecking of the results. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, n.º 4, pp. 335-345
- Favero, P.A., Mass, J., Delaney, J.K., Woll, A.R., Hull, A.M., Dooley, K.A. y Finnefrock, A.C. (2017) Reflectance imaging spectroscopy and synchrotron radiation X-ray fluorescence mapping used in a technical study of The Blue Room by Pablo Picasso. *Heritage Science*, vol. 5, n.º 13. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0126-5>
- France, F.G. (2011) Advanced spectral imaging for non-invasive microanalysis of cultural heritage materials: Review of application to documents in the US Library of Congress. *Applied Spectroscopy*, vol. 65, n.º 6, pp. 565-574. Doi: <https://doi.org/10.1366/11-06295>
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E. y Rock, B.N. (1985) Imaging spectrometry for earth remote-sensing. *Science*, vol., 228, n.º 4704, pp. 1147-1153. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.228.4704.1147>

- Goltz, D., Attas, M., Cloutis, E., Young, G. y Begin, P. (2009) Visible (420-720 nm) hyperspectral imaging techniques to assess inks in historical documents. *Restaurator-International journal for the preservation of library and archival material*, vol. 30, n.º 3, pp. 199-221. Doi: <https://doi.org/10.1515/rest.013>
- Granero-Montagud, L., Portales, C., Pastor-Carbonell, B., Ribes-Gomez, E., Gutierrez-Lucas, A., Tornari, V., Papadakis, V., Groves, R.M., Sirmacek, B., Bonazza, A., Ozga, I., Vermeiren, J., van der Zanden, K., Foster, M., Aswendt, P., Borreman, A., Ward, J.D., Cardoso, A., Aguiar, L., Alves, F., Ropret, P., Luzon-Nogue, J.M. y Dietz, C. (2013) Deterioration estimation of paintings by means of combined 3D and hyperspectral data analysis. En: Pezzati, L. y Targowski, P. (ed.) *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV. Proceedings of SPIE*, vol. 8790, UNSP 879008
- Hedjam, R. y Cheriet, M. (2013) Historical document image restoration using multispectral imaging system. *Pattern Recognition*, vol. 46, n.º 8, pp. 2297-2312. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.12.015>
- Karagiannis, G., Salpistis, C., Sergiadis, G. y Chrysoulakis, Y. (2007) Nondestructive multispectral reflectoscopy between 800 and 1900 nm: An instrument for the investigation of the stratigraphy in paintings. *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, n.º 6, 065112. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.2744236>
- Klein, M.E., Aalderink, B.J., Padoan, R., De Bruin, G. y Steemers, T.A.G. (2008) Quantitative hyperspectral reflectance imaging. *Sensors*, vol. 8, n.º 9 pp. 5576-5618. Doi: <https://doi.org/10.3390/s8095576>
- Kleynhans, T., Schmidt Patterson, C.M., Dooley, K.A., Messinger, D.W. y Delaney, J.K. (2020) An alternative approach to mapping pigments in paintings with hyperspectral reflectance image cubes using artificial intelligence. *Heritage Science*, 8, 84. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00427-7>
- Kubik, M. (2007) Hyperspectral Imaging: A New Technique for the Non-Invasive Study of Artworks. En: Creagh, D. y Bradley, D. (ed.) *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, vol. II. Amsterdam: Elsevier, pp. 199-260
- Liang, H., Saunders, D. y Cupitt, J. (2005) A new multispectral imaging system for examining paintings. *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 49, n.º 6, pp. 551-562
- Liang, H. (2012) Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. *Applied Physics A*, vol. 106, n.º 2, pp. 309-323. Doi: 10.1007/s00339-011-6689-1

- Landi, M. y Maino, G. (2011) Multispectral imaging and digital restoration for paintings documentation. En: Maino, G. y Foresti, G.L. (ed.) *Image Analysis and Processing-ICIAP 2011, PT II*. Springer, pp. 464-474 (Lecture Notes in Computer Science -LNCS-, vol. 6978)
- Legrand, S., Vanmeert, F., Van der Snickt, G., Alfeld, M., De Nolf, W., Dik, J. y Janssens, K. (2014) Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods: from scanning infra-red spectroscopy to computed X-ray laminography. *Heritage Science*, vol. 2, n.º 13
- MacLennan, D., Trentelman, K., Szafran, Y., Woollett, A.T., Delaney, J.K., Janssens, K. y Dik, J. (2019) Rembrandt's an old man in military costume: combining hyperspectral and MA-XRF imaging to understand how two paintings were painted on a single panel. *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 58, n.º 1-2, pp. 54-68. Doi: <https://doi.org/10.1080/01971360.2018.1540245>
- Mass, J.L., Opila, R., Buckley, B., Cotte, M., Church, J. y Mehta, A. (2013) The photodegradation of cadmium yellow paints in Henri Matisse's *Le Bonheur de vivre* (1905-1906). *Applied Physics A*, vol. 111, pp. 59-68
- Mounier, A., Le Bourdon, G., Aupetit, C., Belin, C., Servant, L., Lazare, S., Lefrais, Y. y Daniel, F. (2014) Hyperspectral imaging, spectrofluorimetry, FORS and XRF for the non-invasive study of medieval miniatures materials. *Heritage Science*, vol. 2, 24
- Mounier, A., Le Bourdon, G., Aupetit, C., Lazare, S., Biron, C., Pérez-Arantegui, J., Almazán, D., Aramendia, J., Prieto-Taboada, N., Fdez-Ortíz de Vallejuelo, S. y Daniel, F. (2018) Red and blue colours on 18th-19th century Japanese woodblock prints: In situ analyses by spectrofluorimetry and complementary non-invasive spectroscopic methods. *Microchemical Journal*, vol. 140, pp. 129-141. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.04.023>
- Pérez-Arantegui, J. (2022) Goya dans les musées de Saragosse (Espagne): contributions analytiques non invasives à l'étude de l'œuvre du peintre. *Technè*, n.º 53, pp. 22-29. Disponible en: <https://journals.openedition.org/techne/10774> [Consulta: 17/07/2023]
- Pérez-Arantegui, J., Rupérez, D., Almazán, D. y Díez-de-Pinos, N. (2018) Colours and pigments in late ukiyo-e art works: A preliminary non-invasive study of Japanese woodblock prints to interpret hyperspectral images using in-situ point-by-point diffuse reflectance spectroscopy. *Microchemical Journal*, vol. 139, pp. 94-109. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.015>
- Pérez Arantegui, J., Gallego, C. y Díez de Pinos, N. (2022) Aportaciones analíticas al conocimiento y la conservación de la colección de arte de Asia oriental en el museo de Zaragoza. En: Lorenzo Lizalde, J.I. y Rodanés Vicente, J.M. (ed.) *Actas del IV Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés (CAPA)*. Zaragoza: Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias de Aragón, pp. 497-508
- Ricciardi, P., Delaney, J.K., Facini, M. y Glinsman, L. (2013) Use of imaging spectroscopy and in situ analytical methods for the characterization of the materials and techniques of 15th century illuminated manuscripts. *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 52, n.º 1, pp. 13-29. Doi: <https://doi.org/10.1179/0197136012Z.0000000004>
- Rohani, N., Pouyet, E., Walton, M., Cossairt, O. y Katsaggelos, A. K. (2018) Nonlinear Unmixing of Hyperspectral Datasets for the Study of Painted Works of Art. *Angewandte Chemie-International Edition*, vol. 57, n.º 34, pp. 10910-10914. Doi: [10.1002/anie.201805135](https://doi.org/10.1002/anie.201805135)
- Rosi, F., Harig, R., Miliani, C., Braun, R., Sali, D., Daveri, A., Brunetti, B.G. y Sgamellotti, A. (2013a) Mid-infrared hyperspectral imaging of painting materials. En: Pezzati, L. y Targowski, P. (ed.) *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV. Proceedings of SPIE*, 8790, UNSP 87900Q. Doi: <https://doi.org/10.1117/12.2020477>
- Rosi, F., Miliani, C., Braun, R., Harig, R., Sali, D., Brunetti, B.G. y Sgamellotti, A. (2013b) Noninvasive Analysis of Paintings by Mid-infrared Hyperspectral Imaging. *Angewandte Chemie-International Edition*, vol. 52, n.º 20, pp. 5258-5261. Doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201209929>
- Sciutto, G., Oliveri, P., Prati, S., Quaranta, M., Bersani, S. y Mazzeo, R. (2012) An advanced multivariate approach for processing X-ray fluorescence spectral and hyperspectral data from non-invasive in situ analyses on painted surfaces. *Analytica Chimica Acta*, vol. 752, pp. 30-38. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.09.035>
- Torralba Soriano, F., Ulibarri Arganda, J., Barlés Bágüena, E., Navarro Polo, S. y Beltrán Lloris, M., (2003) Museo de Zaragoza: la Colección de Arte Oriental Federico Torralba. *Artigrama*, n.º 18, pp. 125-160. Disponible en: <http://www.unizar.es/artigrama/pdf/18/2monografico/04.pdf> [Consulta: 17/07/2023]
- Vermeulen, M., Smith, K., Eremin, K., Rayner, G. y Walton, M. (2021) Application of uniform manifold approximation and projection (UMAP) in spectral imaging of artworks. *Spectrochimica Acta Part A*, vol. 252, n.º 5, 119547. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119547>
- VV.AA. (2003) Monográfico: Las colecciones de Arte extremo oriental en España. *Artigrama*, n.º 18. Disponible en: [https://www.unizar.es/artigrama/html\\_dig/18.html](https://www.unizar.es/artigrama/html_dig/18.html) [Consulta: 17/07/2023]