

UTILIDAD DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES PARA EL REGISTRO E INVESTIGACIÓN DEL PATRIMONIO DOCUMENTAL HISTÓRICO

USE OF MULTISPECTRAL IMAGING FOR RECORDING AND RESEARCHING HISTORICAL DOCUMENTARY HERITAGE

Ana Reyes Pérez^a, Ana María López Montes^a, Rosa Gutiérrez Juan^a, Rafael Lorente Fernández^a y Natalia Tello Burgos^a

^aUniversidad de Granada, Facultad de Bellas Artes, Edificio Restauración, Av. de Andalucía 27, 18014 Granada. anarp@ugr.es; alopezmontes@ugr.es; mrosa_gi@hotmail.com; rafalorentefdez@hotmail.com; tellonatalia@gmail.com;

How to cite: Ana Reyes Pérez, Ana María López Montes, Rosa Gutiérrez Juan, Rafael Lorente Fernández, Natalia Tello Burgos. (2022). Utilidad de las imágenes multiespectrales para el registro e investigación del patrimonio documental histórico. En libro de actas: II Simposio de Patrimonio Cultural ICOMOS España. Cartagena, 17 - 19 de noviembre de 2022. <https://doi.org/10.4995/icomos2022.2022.15405>

Resumen

La actual revolución tecnológica ha establecido nuevas necesidades en la captura, registro e investigación de la documentación histórica, invalidando tecnologías previas como la digitalización convencional basada en el modelo de color RGB. Es por esto que se desarrolla la digitalización multi e hiperespectral.

La digitalización multi e hiperespectral es una técnica de análisis no invasiva que permite obtener de manera simultánea información espectral y espacial de un documento histórico a través de la recolección de datos en multitud de longitudes de onda diferentes. Esta herramienta se ha aplicado generalmente tanto a obras pictóricas como a restos arqueológicos, si bien apenas se han empleado en el patrimonio documental. Consecuentemente, el principal interés de esta investigación reside en el estudio de viabilidad de la técnica sobre dicha tipología patrimonial, así como la propuesta experimental sobre la captura y procesamiento de datos multiespectrales.

Palabras clave: *patrimonio documental, digitalización, multiespectral, hiperespectral*

Abstract

The current technological revolution has established new necessities related to the capture, record and research of historical documentation, invalidating previous technologies, such as the RGB colour model. Thus, multispectral and hyperspectral imaging were developed.

Multispectral and hyperspectral imaging are both non-invasive analytical techniques which provide spectral and spatial information of a historical document at the same time, through data collection in different wavelengths. These tools have been applied to paintings and archaeological remains, but they are barely employed in documental heritage. Consequently, this research's main interest lies in the viability study of techniques applied to documental heritage, as well as the experimental proposal relating to the capture and processing of multispectral data.

Keywords: *documental heritage, imaging, multispectral, hyperspectral*

1. Introducción

Las instituciones culturales, ya sean archivos, bibliotecas o museos, tienen dos tareas fundamentales: asegurar la accesibilidad de sus fondos y mantenerlos en condiciones óptimas de conservación para (Aalderink et al., 2009) poder transmitir el legado y facilitar su investigación. Partiendo de esta premisa, la digitalización convencional, basada en el modelo de color RGB, constituye una herramienta clave en el registro digital de obras con un elevado grado de fragilidad y deterioro. No obstante, y a consecuencia de la revolución tecnológica, la exigencia hacia este tipo de técnicas es cada vez mayor, especialmente en aquellos documentos de reseñable relevancia histórica, documental, técnica y/o artística. En estos casos de carácter excepcional la digitalización precisa la extracción de la mayor cantidad de información posible (la visible al ojo humano y aquella imperceptible) así como la búsqueda de precisión, exactitud y reproducibilidad en los datos de manera que sean perfectamente equiparables con las características del original. En consonancia con todos estos nuevos requisitos se ha desarrollado la digitalización multi o hiperespectral.

La digitalización multi o hiperespectral es un método de digitalización no invasivo que, entre otras múltiples funcionalidades, proporciona información sobre la composición material de los documentos históricos, los efectos producidos por su interacción con ciertos factores extrínsecos (luz, temperatura, humedad relativa, etc.), su evolución y envejecimiento natural (Marengo et al., 2011) y marcas invisibles al ojo humano que pueden ser de gran interés. En definitiva, conocimientos que el conservador-restaurador y otros profesionales asociados pueden emplear en su camino hacia la preservación del patrimonio documental.

2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto ha consistido en profundizar en el estudio e investigación de la digitalización multi e hiperespectral en su aplicación al campo de la conservación y restauración del patrimonio documental histórico. A partir de este primer propósito se proponen los siguientes objetivos secundarios:

- Conocer los fundamentos y principios teóricos de la técnica, incluidos los materiales y métodos involucrados en su correcta ejecución: iluminante, objeto, dispositivo de captura, filtro y análisis o procesamiento de datos.
- Definir las diferencias principales entre digitalización multiespectral y digitalización hiperespectral así como seleccionar la metodología preferente.
- Determinar el uso que se puede dar en la actualidad a la imagen multi e hiperespectral como técnica de digitalización patrimonial a través de casos prácticos de estudio: el *Diario de Campo de Livingsstone*, el pigmento azul de índigo y un “Karaguiosis” o títere en cartón del teatro tradicional de sombras griego.
- Realizar un primer acercamiento a ciertas herramientas de análisis y procesamiento de datos multi e hiperespectrales.
- Difundir los resultados obtenidos a fin de contribuir con ello al conocimiento de la imagen multi e hiperespectral en la digitalización del patrimonio documental histórico.

3. Metodología

La metodología seguida en el desarrollo de la investigación se estructura en base a los objetivos previamente delimitados:

- Revisión bibliográfica de toda la documentación referida a la temática propuesta y evaluación de las conclusiones obtenidas por los diferentes investigadores. Para ello, se consultaron múltiples publicaciones de diferentes ámbitos o campos de estudio en consonancia con el carácter multidisciplinar de la investigación.
- Recopilación y estructuración de la información a fin de definir teóricamente la técnica y los elementos involucrados en la captura.
- Análisis de diferentes casos prácticos de digitalización multi e hiperespectral para determinar algunas de las aplicaciones de la técnica en el registro del patrimonio documental histórico.

- Extracción de las conclusiones pertinentes en cuanto a la idoneidad de la digitalización multi e hiperespectral para la conservación de documentos así como las posibles mejoras y avances futuros que se presupone que optimizarán la técnica.

4. Fundamentos y principios teóricos de la imagen multi/hiperespectral

La digitalización multi/hiperespectral es un método de análisis no invasivo que permite obtener de manera simultánea información espectral y espacial de un objeto (Fischer y Kakoulli, 2006) a través de la captura de múltiples imágenes digitales a diferentes longitudes de onda dentro de un amplio rango espectral que contempla la región visible del espectro electromagnético (400-800nm), la infrarroja cercana ($\pm 800-2500\text{nm}$) y la ultravioleta (10-400nm) (Aalderink et al., 2009). De esta manera, el resultado final del procedimiento consiste en un espectro parcial o completo por cada píxel de la imagen; una medida precisa de la porción de luz reflejada por un punto concreto de la superficie digitalizada a diversas longitudes de onda (Padoan et al., 2008). Dichas medidas suelen representarse como un *cubo espectral tridimensional* en el cual los ejes X e Y representan las coordenadas de los píxeles de la imagen (información espacial), mientras que el eje Z se corresponde con la reflectancia de dichos píxeles a diferentes longitudes de onda (información espectral) (Marengo et al., 2011).

Los profesionales del sector discriminan entre dos modalidades de digitalización en función del número de canales o intervalos que se incluyan en la captura y la contigüidad entre dichos canales en el espectro electromagnético. La imagen multispectral es aquella en la que el número de canales no suele ser superior a diez y no necesariamente se distribuyen de manera adyacente en el espectro electromagnético. En consecuencia, la información resultante es algo limitada, puesto que se pierden funcionalidades únicas de determinadas longitudes de onda. Por su parte, la imagen hiperespectral provee de un gran número de canales que cubren un rango espectral continuo; proporciona una curva completa por cada píxel que permite realizar estudios más completos (Padoan et al., 2009), por ello es la metodología preferente para la digitalización del patrimonio documental, al garantizar que la resolución espectral es suficiente y adecuada (Attas et al., 2003). Los elementos que intervienen en ambos procedimientos son comunes: iluminante, dispositivo de captura, filtros o dispersores y el propio objeto a digitalizar, además del procesamiento posterior de los datos resultantes.

4.1. El iluminante

La exposición a determinadas radiaciones puede constituir un riesgo potencial de degradación en los materiales fotosensibles de documentos gráficos por la acción oxidativa de la luz (Bacci et al., 2005). De ahí la necesidad de controlar las características de la luminaria (vinculada a la temperatura y la humedad relativa), la lámpara y la intensidad lumínica (Padoan et al., 2008). El sistema de iluminación más recomendado es el *SEPIA* propuesto por el Archivo Nacional de los Países Bajos. Este sistema sugiere el uso de dos fuentes de iluminación idénticas denominadas *TULIPS* colocadas a ambos lados del objeto a digitalizar con un ángulo de 45° con respecto a la normal de la superficie donde se sitúa el objeto (Padoan et al., 2008), buscando homogeneidad y uniformidad en la intensidad lumínica.

La naturaleza de la lámpara presenta mayor variabilidad: se emplean halogenuros de tungsteno (Attas et al., 2003), de cuarzo (Mansfield et al., 1999) o bien iluminación LED (Marengo et al., 2011), siendo esta última la opción más recomendable. La elección de un sistema de iluminación debe fundamentarse en la eficiencia y rango espectral del iluminante y en cuestiones de conservación preventiva.

4.2. El objeto

La digitalización multi/hiperespectral se fundamenta en la interacción entre la luz y la materia según el fenómeno físico de absorción-reflexión. Ante la aplicación de una determinada radiación electromagnética sobre el objeto, ciertas longitudes de onda serán absorbidas mientras que el resto serán reflejadas dotándole de sus características espectrales específicas o *huella espectral* única que posibilita su identificación. Sin embargo, existen ciertos factores que pueden variar notablemente las características espectrales iniciales de los materiales como, por ejemplo, su envejecimiento

natural (Mansfield et al., 1999), obstaculizando notablemente la caracterización compositiva de los documentos históricos que sean objeto de estudio.

4.3. El dispositivo de captura

La falta de criterios homogéneos en la digitalización multi/hiperespectral del patrimonio documental y archivístico es evidente, si bien existe cierta unanimidad en lo que respecta al dispositivo de captura, que en la mayoría de los casos consiste en una cámara monocromática de gama profesional con sensor CCD. Este dispositivo óptico cuenta con una serie de lentes y espejos que reflejan la imagen del documento a digitalizar y la proyecta enfocada sobre la superficie del microchip fotosensible denominado sensor CCD (*Charge Coupled Device*) compuesto por multitud de celdillas fotoeléctricas microscópicas, cada una de las cuales capta la luz de un punto de la imagen que incide sobre ella y la convierte en una señal eléctrica análoga a la intensidad de luz recibida.

4.4. El filtro

El filtro es el instrumento que permite discernir entre diversos canales o intervalos de longitud de onda dentro del espectro electromagnético durante la digitalización. En cuanto a su aplicación existen dos modos principales:

- Iluminar el objeto con una luz de amplio rango espectral y colocar, entre el objeto y el dispositivo de captura, un filtro que separe las diferentes longitudes de onda (Marengo et al., 2011). El principal inconveniente de esta alternativa reside en la imposibilidad de obtener imágenes multi/hiperespectrales de manera inmediata así como el tiempo final de captura. Del mismo modo, requiere de una potente iluminación que puede resultar perjudicial para la conservación del objeto (Balas et al., 2003).
- Filtrar la luz en su trayectoria desde el proyector hasta el objeto para que el correspondiente dispositivo capture la imagen (Marengo et al., 2011). La filtración de la luz deriva en que el objeto únicamente queda expuesto a una estrecha banda del espectro luminoso, el mínimo requerido para la captura, disminuyendo el daño que pueda producirse tras una exposición prolongada a la luz (Padoan et al., 2009).

4.5. Análisis de datos

La imagen multi/hiperespectral genera un gran volumen de datos que pueden ser difícil de manejar, visualizar, comparar e interpretar para extraer información de utilidad. Por este motivo, con el objetivo de reducir, comprimir y explotar al máximo posible las imágenes obtenidas (Fischer y Kakoulli, 2006), han de aplicarse ciertos métodos de análisis y clasificación (Mansfield et al., 1999), en su mayoría potentes algoritmos, que permiten detectar interrelaciones, incluso las más sutiles, entre los datos espectrales (Aalderink et al., 2009).

El algoritmo frecuentemente empleado en el procesamiento de datos multi e hiperespectrales es PCA (*Principal Component Analysis*). PCA proporciona nuevas variables a partir de los datos espectrales iniciales para describir el sistema de manera compacta y eficiente, separando la información útil del ruido, fluctuaciones arbitrarias y datos innecesarios para el análisis (Marengo et al., 2011). El algoritmo reasigna los valores espectrales de cada uno de los píxeles en términos de *componentes principales* que describen más eficazmente la variabilidad de los datos. Estos nuevos componentes siguen un orden jerárquico o de variabilidad decreciente, es decir, se organizan según la sustancialidad de la información contenida sobre los datos, de la más esencial hasta el momento en el que únicamente contiene ruido procedente de la secuencia (Bacci et al., 2005), pudiendo suprimir estos últimos y, con ello, reducir notablemente el número de datos con una pérdida mínima de información.

Aparte de PCA, existen otros procedimientos de análisis igualmente interesantes para la digitalización multi/hiperespectral como la creación de imágenes en falso color. En este procedimiento tres longitudes de onda significativas o bien tres componentes principales generados por PCA se sustituyen por cada uno de los canales RGB y se exhiben simultáneamente en la imagen final (Attas et al., 2003).

5. Usos de la imagen multi/hiperespectral para la conservación y restauración de documento

5.1. Visualización y documentación. El análisis multiespectral del Diario de Campo de Livingstone

La digitalización multi e hiperespectral ofrece imágenes que facilitan la legibilidad general del documento así como la visualización de la verjura y filigrana del papel (Padoan et al., 2008), además de posibles dibujos y trazos subyacentes.

Una problemática especialmente interesante se encuentra en el análisis y estudio de *palimpsestos* donde, la reutilización del soporte de escritura resulta en la existencia de un “doble texto”: el original y el superpuesto. Las tintas empleadas en cada caso suelen tener comportamientos espectrales diferentes conforme varía la longitud de onda, de manera que su contraste y transparencia van variando y permiten realizar el estudio simultáneo de ambos textos a través de esta digitalización. (Balas et al., 2003).

Un exitoso ejemplo de esta aplicación se encuentra en el estudio del Diario de Campo de Livingstone (1871). David Livingstone fue un explorador y misionero británico que en 1871 pasó varios meses incomunicado en una pequeña aldea del Congo y, ante la carencia de cualquier otro soporte, se vio obligado a utilizar un ejemplar del antiguo periódico *Standard* y tinta hecha a base de semillas para escribir su diario de campo. Dichas características intrínsecas del documento (soporte altamente lignificado y tintas de naturaleza orgánica), derivó en un rápido y grave deterioro y desvanecimiento del texto de Livingstone. La digitalización multiespectral del documento por parte de un equipo multidisciplinar de la Universidad de Londres dio como resultado un total de doce imágenes capturadas a diversas longitudes de onda (365, 450, 465, 505, 535, 593, 638, 700, 735, 780, 850 y 940nm) cuyo procesamiento a través de dos aplicaciones de código abierto, *Gerbil* e *HiperCube*, recupera la legibilidad del escrito.

El primero de los procesamientos se ejecutó con la aplicación *Gerbil* que permitió seleccionar un área de interés (ROI) que, en este caso, incluyó el texto original del periódico *Standard* y el superpuesto de Livingstone. A través de la selección de diferentes bandas espectrales se observan las diferencias entre las imágenes capturadas a diferentes longitudes de onda. El hecho más destacable en este sentido se encuentra en las imágenes correspondientes a 365nm y 940nm. Se puede apreciar que el texto de Livingstone es perfectamente discernible a menor longitud de onda (Figura 1.B) y se va invisibilizando conforme se avanza en el espectro electromagnético hasta que únicamente se pueden ver las grafías del periódico (Figura 1.C).

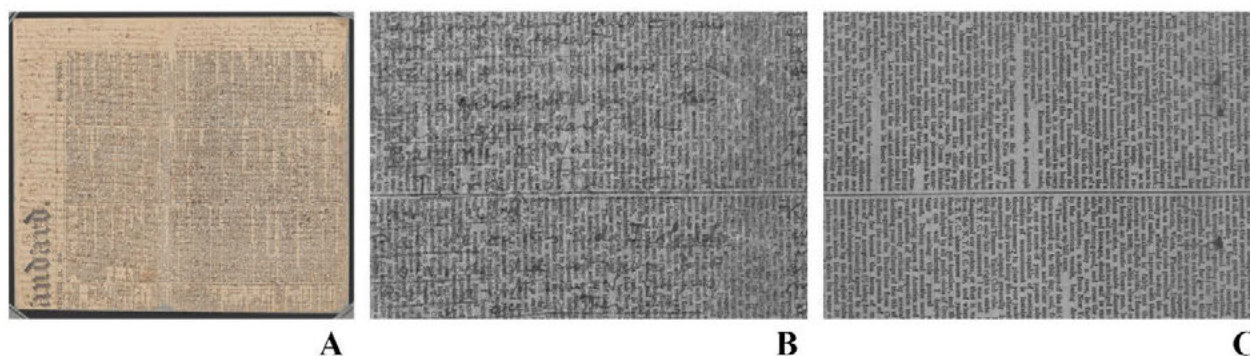


Fig. 1 Diario de Campo de Livingstone. De izquierda a derecha: A) Imagen RGB; B) Captura a 365nm; C) Captura a 940nm.

Nota: Adaptado de *Sin título*, de Doug Emery y Adrian S. Wisnicki, 2012, Livingstone Spectral Image Archive, (http://livingstone.library.ucla.edu/livingstone_archive/home.htm). CC BY-NC 3.0

Gerbil también ofrece la posibilidad de representar en una misma gráfica las huellas espectrales de todos los píxeles que componen la imagen, encontrando ciertas coincidencias y colaborando con ello en la caracterización de materiales. En la Figura 2 se pueden apreciar dos grandes filas de intensidades espectrales que, como se ha podido comprobar, se corresponden con el soporte celulósico y la tinta impresa del periódico. Los píxeles que se escapan de estas tendencias pertenecen, en la mayoría de los casos, a las grafías de Livingstone.

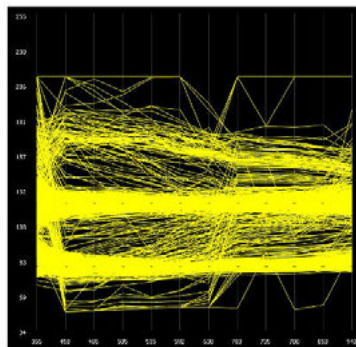


Fig. 2 Curvas espectrales de los píxeles digitalizados en el Diario de Campo de Livingstone

Tanto en *Gerbil* como en *HiperCube* se puede aplicar el algoritmo PCA para el cálculo de componentes principales a la hora de redimensionar los datos espectrales iniciales. En ambos casos se determina que a partir del tercer componente la información de interés es prácticamente nula, limitándose a ruido sin interés para el análisis. Es por ello que, para la creación de las imágenes en falso color RGB únicamente se seleccionan estos tres primeros componentes.

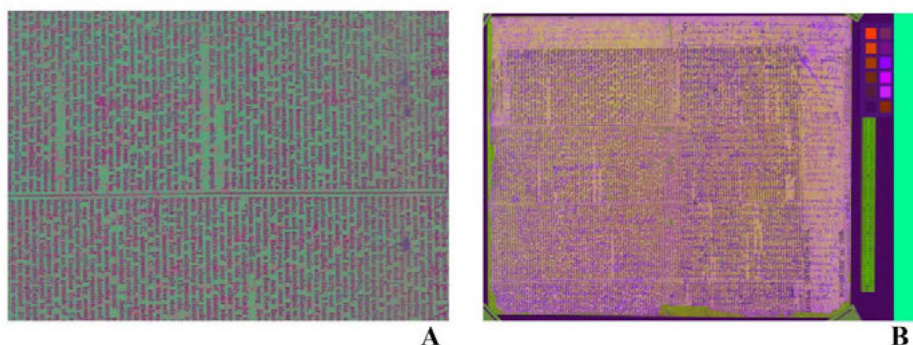


Fig. 3 Imágenes en falso color RGB según los resultados obtenidos en la aplicación de PCA. A la izquierda (A) con la aplicación *Gerbil* y a la derecha (B) con *HiperCube*. Nota: Adaptado de Sin título, de Doug Emery y Adrian S. Wisnicki, 2012, Livingstone Spectral Image Archive, (http://livingstone.library.ucla.edu/livingstone_archive/home.htm). CC BY-NC 3.0

5.2. Detección de alteraciones y estado de conservación. El estudio del azul de índigo

El comportamiento diferenciado de los materiales según la longitud de onda permite la visualización de ciertas alteraciones a través de la digitalización multi e hiperespectral. Entre ellas, las zonas de pliegue, por ser áreas donde la suciedad se acumula más frecuentemente (Attas et al., 2003) o un posible ataque biológico, donde las diferencias espectrales y colorimétricas de hongos y mohos en función de su origen y estado de desarrollo posibilita su estudio, cuantificación y ubicación espacial (Padoan et al., 2008) sobre el documento.

La imagen multi e hiperespectral también puede considerarse una herramienta útil para determinar las condiciones de conservación de las tintas ferrogálicas. La aplicación de algoritmos en el análisis de los datos permite distribuir especialmente su deterioro (Padoan et al., 2008), discriminar entre diferentes grados de corrosión (Aalderink et al., 2009) y monitorizar el proceso de envejecimiento.

También permite conocer el estado de envejecimiento de los materiales en caso de que se hayan producido cambios físico-químicos para obtener información sobre su estado de conservación y actuar en consecuencia de manera preventiva para no comprometer aún más su conservación.

Estos estudios tienen su base en la creación de bases de datos con muestras *ex profeso*, que repliquen a la mayor precisión y exactitud posible las características del documento original. A partir de este método de trabajo podrán desarrollarse nuevos procedimientos de análisis y caracterizar procesos de envejecimiento sin poner en riesgo la salvaguarda del documento original.

Nuestro equipo de investigación desarrolló un estudio más exhaustivo sobre el azul de índigo a través de técnicas de análisis químico e imágenes hiperespectrales (Tello et al., 2022).

El azul de índigo, empleado desde la antigüedad en la elaboración de obras de arte (pintura mural, pintura de caballete, documento gráfico, documentos textiles...) es objeto de numerosos estudios debido a sus particulares características. En este caso, se desarrolló un método para la identificación de los productos de degradación del azul de índigo a través de imágenes hiperespectrales y análisis posterior por el algoritmo PCA (Figura 4).

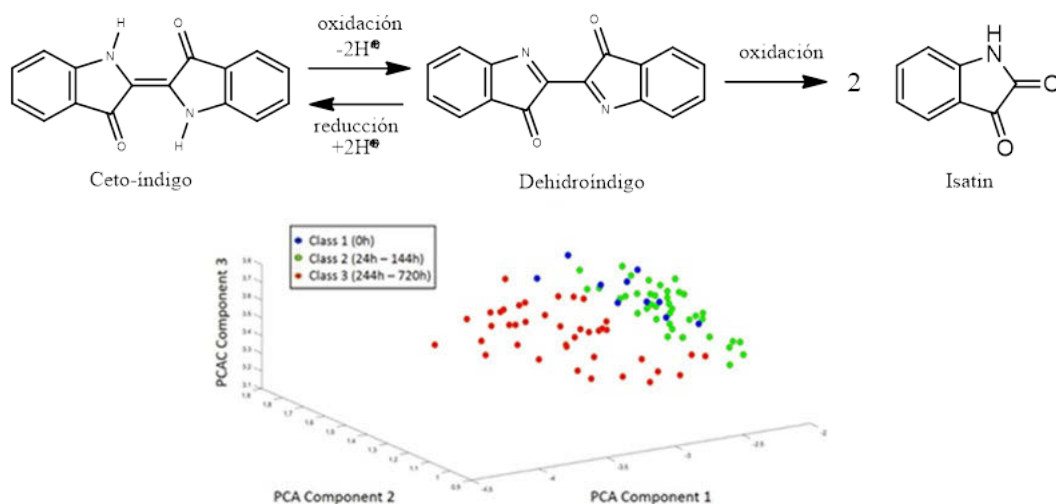


Fig. 4 Arriba: Proceso de degradación del componente principal del azul de índigo: La molécula de ceto-índigo (de color azul) se transforma por oxidación en dehidroíndigo (de color azul) y seguidamente en dos moléculas de isatin (de color amarillo). Abajo: resultado de las agrupaciones de muestras envejecidas según su estado de envejecimiento (análisis PCA) en relación a la oxidación del índigo. Grupo Class 1: muestras no deterioradas; grupo Class 2: muestras en leve estado de degradación; grupo Class 3: muestras en acusado estado de degradación

5.3. Monitorización de tratamientos de conservación y/o restauración. La limpieza de los títeres en cartón del teatro de sombras griego.

La monitorización y control de los tratamientos de conservación y/o restauración del patrimonio documental mediante su digitalización multi o hiperespectral puede ejecutarse de dos formas diferentes. En primer lugar, la captura en dos fases, antes y después de la intervención, de manera que a través de la comparativa de las imágenes se puedan determinar las diferencias colorimétricas e incluso modificaciones químicas producidas. No obstante, también existe la opción de realizar una monitorización a tiempo real, para lo cual el filtro se debe de colocar directamente sobre el iluminante e identificar previamente la longitud de onda en la que mejor se aprecian los cambios que se producen en el documento (Fischer y Kakoulli, 2006). Monitorización a tiempo real se suele emplear en la limpieza con láser. Considerando que la radiación ultravioleta aporta información sobre los estratos más superficiales y la infrarroja sobre aquellos de mayor profundidad, se deduce que si la limpieza es visible a mayores longitudes de onda, el daño producido o incidencia del tratamiento también será mayor (Balas et al., 2003).

También se han empleado como imágenes de control para las limpiezas en de superficies de documentos gráficos que poseían marcas imperceptibles al ojo humano pero de interés histórico, por lo que debía de respetarse, y en la ayuda de toma de decisiones para determinar el criterio de intervención sobre materiales sumamente frágiles (papeles translúcidos) que habían perdido su coloración original. Estas aplicaciones se realizaron durante la restauración de un “Karaguisis” (pieza fundamental del teatro de sombras griego realizadas en cartón y papel translúcido), realizada por nuestro grupo de investigación (López-Montes et al., 2020).

Durante la digitalización de la obra por imágenes hiperespectrales, se detectaron textos y marcas sobre la superficie de cartón que debían respetarse durante la limpieza. Por ese motivo, se tuvieron presentes durante toda la ejecución del proceso que condicionó los materiales a emplear y el nivel de limpieza, revisando, antes y después la permanencia de

los textos “invisibles” (Figura 5.A). Igualmente se recurrió a la información obtenida por las imágenes hiperespectrales para hacer una recreación teórica de los colores originales que debieron de tener los papeles translúcidos que el autor añadió en las zonas horadadas del cartón para conseguir efectos coloridos y dramáticos durante las representaciones (Figura 5.B). Finalmente se respetó el estado actual del títere realizando una intervención conservativa con criterios arqueológicos pero acompañando la documentación generada con una hipótesis de los colores originales basada en los datos científicos.

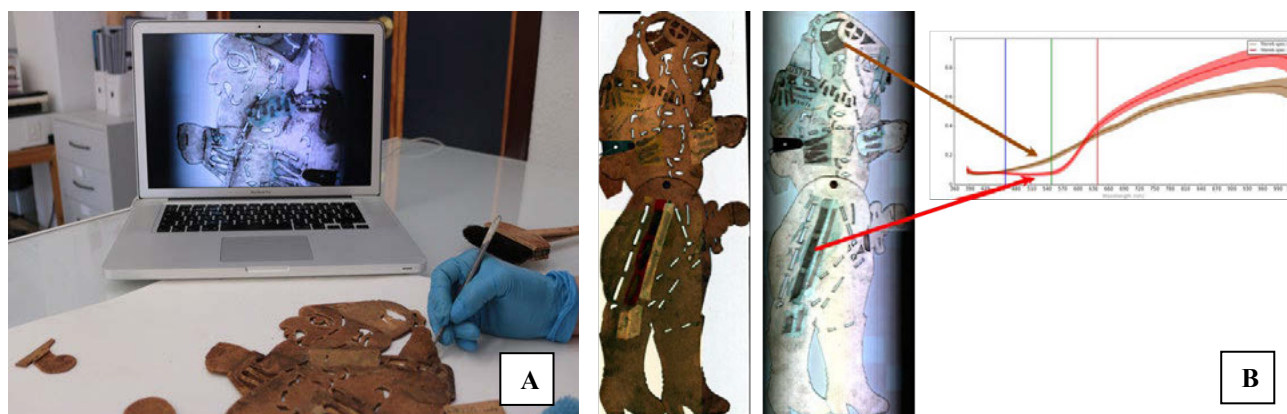


Fig. 5 A) Proceso de limpieza superficial mecánica con control de imágenes hiperespectrales: B) comparación de los espectros obtenidos de dos zonas de color desvanecido en papel translúcido

6. Conclusiones

Esta investigación confirma la hipótesis de la digitalización multi e hiperespectral como una herramienta de gran interés y utilidad en el estudio, análisis, investigación y tratamiento del patrimonio gráfico y documental, principalmente en la caracterización material de la obra, diagnóstico de su estado de conservación e identificación de alteraciones a fin de ralentizar el proceso de deterioro del objeto mediante tratamientos de restauración oportunos. No obstante, debe señalarse que la aplicación sistemática de esta técnica no se considera como una opción viable para las instituciones culturales a consecuencia del elevado coste que supone la digitalización multi e hiperespectral. Por lo tanto, esta metodología de captura se limita a documentos de gran valor que merecen el esfuerzo, gasto, dedicación y espacio en el registro de datos. Para grandes volúmenes de documentos, se aconseja mantener la metodología simplificada con imágenes RGB. Por otra parte, se han conseguido esclarecer los principios y fundamentos teóricos de la digitalización multi e hiperespectral, base esencial a la hora de profundizar en aspectos más complejos como el post procesamiento de los datos a través de algoritmos específicos. Del mismo modo, se han presentado casos prácticos de digitalización y análisis de datos espectrales que denotan las múltiples y variadas aplicaciones que tiene la técnica para el estudio de documentos con valor patrimonial.

Por último, señalar que la digitalización multi e hiperespectral es una técnica en plena fase de desarrollo, lo cual la convierte en una línea de investigación de gran relevancia e interés, con múltiples opciones de optimización a partir de la información hasta ahora conocida.

7. Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a las instituciones y organismos públicos que han financiado los proyectos I+D al amparo de los cuales se ha podido desarrollar la investigación: el proyecto A-HUM-164-UGR18 financiado por FEDER/Junta de Andalucía-Consejería de Economía y Conocimiento, y el Programa de Ayudas para la Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Universidades, del que es beneficiaria Ana Reyes Pérez en la Universidad de Granada (FPU20/02198). Agradecer igualmente al Dr. Jesús Robledano Arillo de la Universidad Carlos III de Madrid por haber dirigido el análisis multiespectral del Diario de Campo de Livingstone.

Referencias

- Aalderink, B.J., Klein, M.E., Padoan, R., Bruin, G., Steemers T.A.G. (2009) Clearing the Image: A Quantitative Analysis of Historical Documents Using Hyperspectral Measurements. *The Book and Paper Group Annual*, 28, 115-119.
- Attas, M., Cloutis, E., Collins, C., Goltz, D., Majzels, C., Mansfield, J.R., Mantsch, H.H. (2003) Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation: investigation of drawing constituents. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 127. [http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00024-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00024-4)
- Bacci, M., Casini, A., Cucci, C., Muzzi, A., Porcinai, S. (2005) A study on a set of drawings by Parmigianino: integration of art-historical analysis with imaging spectroscopy. *Journal of Cultural Heritage*, 6(4), 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.07.002>
- Balas, C., Papadakis, V., Papadakis, N., Papadakis, A., Vazgiouraki, E., Themelis, G. (2003) A novel hyper-spectral imaging apparatus for the non-destructive analysis of objects of artistic and historic value. *Journal of Cultural Heritage*, 4(1), 330-337. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01216-5](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01216-5)
- Fischer, C., Kakoulli I. (2006) Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. *Studies in Conservation*, 51(1), 3-16. <https://doi.org/10.1179/sic.2006.51.Supplement-1.3>
- López-Montes, A., Tejera, A., Lorente, R., Gutiérrez, R., Carmona, J.L., Calero, A., Espejo, T. Blanc, R.(2020) Restauración del Karaguiosis, títere de sombra griego en cartón y papel traslúcido de Eugenios Spazaris. 21ª Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo, 85-96. Ed. Museo Nacional Reina Sofía, Madrid.
- Mansfield, J.R., Sowa, M.G., Majzels, C., Collins, C., Cloutis, E., Mantsch, H.H. (1999) Near infrared spectroscopic reflectance imaging: supervised vs. unsupervised analysis using an art conservation application. *Vibrational Spectroscopy*, 19(1), 33-45. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(99\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(99)00004-1)
- Marengo, E., Manfredi, M., Zerbinati, O., Robotti, E., Mazzucco, E., Gosetti, F., Shor, P. (2011) Development of a technique based on multi-spectral imaging for monitoring the conservation of cultural heritage objects. *Analytica Chimica Acta*, 706(2), 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.08.045>
- Padoan, R., Klein, M.E., Bruin, G., Aalderink, B.J., Steemers, T.A.G. (2009) Monitoring Aging Processes of Archival Documents by Means of Quantitative Hyperspectral Imaging: A Part of the Hyperspectral Project at the Nationaal Archief (National Archives of Netherlands). *The Book and Paper Group Annual*, 28, 63-71.
- Padoan, R., Steemers, T.A.G., Klein, M.E., Aalderink, B.J., Bruin, G.(2008) Quantitative hyperspectral imaging of historical documents: technique and applications. National Archive of Netherlands.
- Tello, N., López-Montes, A., Valero, E.M., Nieves, J.L. Blanc, R. (2022). Characterization of the evolution of Indigo Blue by multispectral imaging. *Color Research and Application*, 47(2), 486-497. <http://doi.org/10.1002/col.22721>.