

# Sistema multiespectral basado en LEDs en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo. Aplicación al estudio y conservación de obras de arte.

Jorge Herrera-Ramirez<sup>1\*</sup>, Meritxell Vilaseca<sup>1</sup>, Francisco J. Burgos<sup>1</sup>,

Rosa Senserrich<sup>2</sup>, Lúdia Font<sup>2</sup>, Jaume Pujol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6) - Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).  
Terrassa, España.

<sup>2</sup>Museo de Historia de Barcelona (MUHBA), Barcelona, España.

[jorge.alexis.herrera@cd6.upc.edu](mailto:jorge.alexis.herrera@cd6.upc.edu)

**Resumen:** Este trabajo muestra el diseño e implementación de un sistema de imágenes multiespectral basado en diodos emisores de luz (LED) que cubre los rangos de longitudes de onda desde los 370nm a los 1600nm. El sistema permite la estimación del espectro de reflectancia pixel a pixel, a partir de la información de 23 canales espectrales dados por una iluminación LED multiplexada. La información de reflectancia se estima usando dos métodos diferentes: a través de interpolación a partir de las respuestas digitales de los sensores de imagen y por medio del método de la pseudoinversa. Los resultados de simulaciones y de medidas experimentales fueron validados mediante métricas de ajuste entre espectros y diferencias de color, mostrando la cercanía entre las simulaciones y las mediciones y un buen desempeño del equipo. Este sistema está siendo usado para el estudio de las pinturas al fresco de la Capilla de San Miguel del Museo-Monasterio de Pedralbes en la ciudad de Barcelona.

## 1. Introducción

Los sistemas multiespectrales ofrecen la ventaja de combinar la característica de una alta resolución espacial de las imágenes captadas con cámaras digitales actuales y un acceso a información espectral comparable a los espectrómetros convencionales. Esta naturaleza los ha hecho atractivos para su aplicación en tan numerosos y diversos campos como son el estudio de obras de arte, la industria de alimentos, entre otros [1–3]. La manera de implementarlos es muy variada, incluyendo ruedas de filtros de color junto con cámaras monocromáticas, cámaras digitales con filtros sintonizables acusto-ópticos o de cristal líquido, usando espectrómetros de escaneo por líneas combinado con cámaras digitales [2–4]. Todos estos tipos de sistemas presentan sus ventajas y desventajas en cuanto a la velocidad, resolución espacial y espectral en la medida. Sin embargo, tienen en común la necesidad de un sistema de iluminación regularmente caro y complejo. Con el actual desarrollo y disponibilidad comercial de la tecnología LED se abre una nueva vía para desarrollar estos sistemas. La tecnología de iluminación LED es muy barata y eficiente, tiene un ciclo de vida largo y está evolucionando constantemente. Estos elementos tienen emisión espectral estrecha y se pueden encontrar en variadas longitudes de onda en los diferentes rangos espectrales del ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR). Éstos permiten la iluminación de la escena con un amplio número de diferentes longitudes de onda o combinaciones de ellas a necesidad, de una manera rápida y en sincronía con los sensores de imagen. Estas características han hecho que se haya incrementado el número de publicaciones que incluyen la exploración de este tipo de fuentes de luz intentado disminuir el tiempo de adquisición y los costos al emplear elementos comerciales de fácil acceso [5], [6].

Atendiendo a las ventajas mencionadas se ha puesto en marcha un sistema multiespectral basado en iluminación LED que cubre el rango de longitudes de onda desde los 370nm hasta 1600nm [7], [8]. El sistema se ha validado inicialmente por medio de simulaciones incluyendo condiciones de ruido en la adquisición, y más adelante con

mediciones sobre muestras de pinturas preparadas con la técnica del fresco. Junto al hardware necesario se han generado rutinas computacionales que permiten la visualización de la información y su procesamiento. Específicamente, para la estimación de los espectros se han usado dos métodos: en primer lugar la interpolación con splines cúbicos y en segundo lugar el método de estimación espectral de la pseudoinversa (PSE), que se basa en el aprendizaje a partir de un conjunto de entrenamiento de reflectancias y las respectivas respuestas digitales de la cámara [3]. En la evaluación de los resultados en estimación espectral se han usado métricas de ajuste entre espectros, específicamente el error medio cuadrático (RMSE) [3] y el coeficiente de bondad de ajuste (GFC) [9], y en términos colorimétricos a través de la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 (DE00). Los resultados experimentales que se obtienen cuando el sistema se aplica a la evaluación de obras de arte muestran la potencialidad del sistema y la bondad del equipo en la velocidad de adquisición y costos.

## 2. Montaje Experimental

El sistema está compuesto de dos módulos que cubren áreas específicas del espectro debido a las respuestas espectrales de las cámaras que tiene cada uno (Fig. 1a). El primer módulo consta de una cámara CCD monocromática, refrigerada, de 12 bits de profundidad y 16 grupos de LEDs, cada grupo con un pico de longitud de onda de emisión diferente y que cubren el rango espectral de los 370nm a 910nm. El segundo módulo está compuesto de una cámara InGaAs de 14 bits de profundidad y 7 grupos de LEDs sobre el rango de los 900nm hasta los 1600nm.

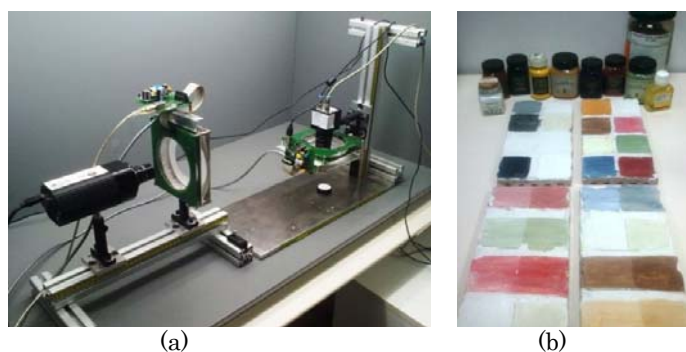


Figura 1: a) Montaje experimental. b) Paleta de colores al fresco.

Para el uso del sistema en el estudio de obras de arte que se propone se ha generado una paleta con los colores empleados regularmente y usando la técnica de pintura al fresco que simulan los colores que se encuentran en las pinturas murales reales analizadas posteriormente con el sistema, en concreto las pinturas de la Capilla de San Miguel del Museo-Monasterio de Pedralbes en la ciudad de Barcelona. Estos colores incluyen pigmentos como el azul índigo, el rojo Venecia, el amarillo ocre, el negro hueso, entre otros (Fig. 1b).

## 3. Metodología

La tarea principal de cálculo en un sistema multiespectral es la recuperación de los espectros de reflectancia de una muestra a partir de las respuestas digitales del sistema. En general, los métodos de reconstrucción se pueden describir como procedimientos de mapeo entre respuestas digitales y espectros de reflectancia. Matricialmente se puede expresar como:  $r = Dx$ , donde  $r$  es el vector de reflectancias reconstruido,  $D$  la matriz de transformación y  $x$  el vector de respuestas digitales del sistema. En el caso del método PSE esta matriz  $D$  da una solución que minimiza el error cuadrático para un conjunto de entrenamiento y sus respectivas respuestas digitales. Esta matriz  $D$  viene dada por:

$$D = R_i X_i^T (X_i X_i^T)^{-1}, \quad (1)$$

siendo  $R_i$  y  $X_i$  las matrices de reflectancias y respuestas digitales del conjunto de colores que se usa como entrenamiento del sistema, respectivamente; y  $X_i^T (X_i X_i^T)^{-1}$  la pseudoinversa

de Moore-Penrose de la matriz  $X$ . Por otro lado, en la interpolación por splines cúbicos, ya que no se necesita entrenamiento, el resultado es la interpolación directa de los valores provenientes de la división de las respuestas digitales de las muestras entre las de un blanco de referencia, ambos medidos bajo las mismas condiciones.

Para evaluar el desempeño del sistema en la estimación de espectros se usaron tres métricas diferentes. Dos métricas que sirven para comparar las curvas espectrales estimadas con respecto a los espectros originales o de referencia. El RMSE que es una métrica ampliamente utilizada para la evaluación espectral y el GFC. Este último está basado en la desigualdad de Schwartz, tiene valores entre 0 y 1, y requiere valores de  $GFC \geq 0.999$  y  $GFC \geq 0.9999$  para que los ajustes se consideren buenos y excelentes, respectivamente. La tercera métrica es la fórmula DE00 usada sobre las reconstrucciones en el rango VIS como una evaluación colorimétrica.

#### 4. Resultados y discusión

Las simulaciones preliminares se realizaron usando el método PSE y considerando condiciones de ruido aditivo aleatorio de magnitud 2% y el efecto de la digitalización de las cámaras. En las medidas experimentales se llevaron a cabo adquisiciones sobre la paleta de colores generada por medio de la técnica de pintura al fresco y utilizando los métodos de estimación tanto de interpolación como de PSE. La Tabla 1 muestra los valores promedio de las métricas propuestas para su evaluación. Se puede ver como el sistema en las mediciones reales mantiene un desempeño muy similar al que se había obtenido en las simulaciones preliminares, mostrando que el sistema en su puesta a punto está dentro de las condiciones consideradas en la simulación o aún más, por debajo de ellas.

Valores promedio	Módulo 1			Módulo 2	
	DE00	RMSE x 100	GFC	RMSE x 100	GFC
Simulación/PSE	1.0169	1.1701	0.9995	2.1150	0.9976
Med. Exp./PSE	0.9886	1.0942	0.9999	1.9709	0.9996
Med. Exp./Interp	2.1937	1.8307	0.9994	5.5712	0.9968

Tabla 1: valores promedio de las métricas para evaluar los resultados en estimación espectral. (Med. Exp: Mediciones Experimentales; Interp: Interpolación con Splines; PSE: pseudoinversa).

La Fig. 2 muestra la comparación gráfica de los espectros provenientes de la medición experimental de una de las muestras de la paleta de colores construida. Aquí se evidencia como el método de PSE tiene una mejor reconstrucción que la interpolación, hecho que es corroborado numéricamente en la Tabla 1. Así mismo, se hace evidente que el módulo 2 tiene un desempeño más bajo que el primer módulo, tanto usando interpolación como PSE, y esto está asociado a la menor cantidad de LEDs de este módulo. Sin embargo, hay que considerar que el método PSE es dependiente del conjunto de entrenamiento que se haya usado, por lo tanto, el método de interpolación sigue siendo valioso debido a que no se necesita ningún tipo de conocimiento a priori de las muestras.

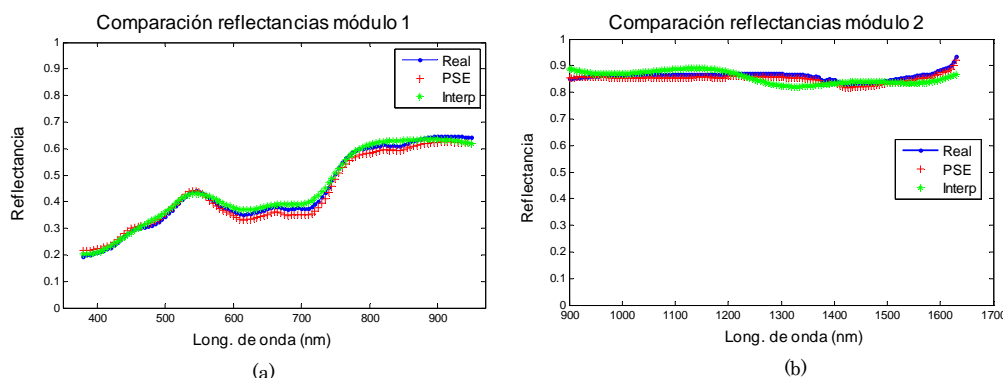


Figura 2: Medición experimental, comparación de espectros estimados por PSE e interpolación.

En general, las métricas usadas dan como resultado un buen desempeño del equipo con, por ejemplo, valores promedio en diferencias de color cercanas a 1, para el método PSE, o cercanas a 2, para el método de interpolación. Indicar que tal y como ya se ha mencionado, el módulo 2 tiene un desempeño menor.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema multiespectral basado en iluminación LED para el estudio de obras de arte. Además de la adecuación del hardware necesario, cámaras, bancos ópticos y fuentes LED, se han desarrollado las rutinas computacionales para cálculo, manipulación y visualización de la información. Para el acceso a la información espectral se han implementado computacionalmente dos métodos de reconstrucción: el método PSE y el de interpolación por splines cúbicos. Los resultados de estas reconstrucciones se evaluaron por medio de diferentes métricas, tanto de comparación de espectros como de evaluación colorimétrica. Preliminarmente, el sistema se validó a través de simulaciones considerando condiciones de ruido y de influencia de la digitalización de las cámaras, posteriormente, se realizaron medidas sobre muestras de una paleta de colores típicos de obras de arte creadas con la técnica del fresco. Las métricas de evaluación muestran como resultado general que el sistema multiespectral está dentro de lo esperado en las simulaciones con un desempeño en reconstrucción bastante bueno, en el caso de diferencias de color con valores cercanos a la unidad. Actualmente el sistema está siendo usado para el estudio las pinturas murales góticas de la Capilla de San Miguel del Monasterio de Pedralbes (Barcelona). Los resultados obtenidos hasta el momento en cuanto a estimación espectral son similares a los obtenidos utilizando la paleta de colores descrita.

## Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia mediante los proyectos DPI2008-06455-C02-01, DPI2011-30090-C02-01 y la Unión Europea. Jorge Herrera agradece a la Generalitat de Cataluña por la beca predoctoral recibida

## Bibliografía

- [1] D. Ariana, D. Guyer, and B. Shrestha, "Integrating multispectral reflectance and fluorescence imaging for defect detection on apples," *Computers and Electronics in Agriculture* 50, 148-161 (2006).
- [2] C. Bonifazzi et al., "A scanning device for VIS-NIR multispectral imaging of paintings," *Journal of Optics A Pure and Applied Optics* 10, 064011 (2008).
- [3] M. Vilaseca et al., "Characterization of the human iris spectral reflectance with a multispectral imaging system.," *App. Optics* 47, 5622-5630 (2008).
- [4] N. Gat, "Imaging spectroscopy using tunable filters: a review," *Proc. SPIE* 4056, 50-64 (2000).
- [5] M. Brydegaard, Z. Guan, and S. Svanberg, "Broad-band multispectral microscope for imaging transmission spectroscopy employing an array of light-emitting diodes," *American Journal of Physics* 77, 104 (2009).
- [6] Ó. Martínez, M. Vilaseca, M. Arjona, C. Pizarro, and J. Pujol, "Use of Light-Emitting Diodes in Multispectral Systems Design: Variability of Spectral Power Distribution According to Angle and Time of Usage," *J. Imaging Sci. Technol.* 55, 050501-1-8 (2011).
- [7] J. Herrera, M. Vilaseca, and J. Pujol, "Multispectral imaging system with multiplexed LED illumination for spectral and color measurements," in *AIC 2011*, 406-409 (2011).
- [8] J. Herrera, M. Vilaseca, and J. Pujol, "Automatic multispectral ultraviolet, visible and near-infrared capturing system for the study of artwork," *Proc. SPIE* 7869, 1-7 (2011).
- [9] J. Hernández-Andrés, J. Romero, and R. L. Lee, "Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain.," *JOSA A* 18, 412-420 (2001).