

Medidas espectrales y de color mediante la utilización de sensores optoelectrónicos de imagen

M. Vilaseca Ricart, M. de Lasarte Rigueiro,
M. Arjona Carbonell, J. Pujol Ramo, FM. Martínez-Verdú*

Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6)
Departamento de Óptica y Optometría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

*Departamento de Óptica, Universidad de Alicante (UA)

Palabras clave

Colorimetría. Imágenes multispectrales. Sensores optoelectrónicos de imagen. Resolución espacial. Cámaras CCD, Infrarrojo próximo

Introducción

Tanto la medida del color de objetos como la medida de sus propiedades espectrales, por ejemplo la reflectancia o la transmitancia, son de elevada aplicabilidad en ámbitos muy dispares como la arquitectura, el arte, el diseño o la industria. En consecuencia los problemas relacionados con la medida y especificación de estas cantidades afectan a sectores diversos¹⁻⁴ entre los que se encuentran la industria textil, química, bioquímica, farmacéutica y papelera, la automoción, alimentación, medicina, fotografía, multimedia etcétera.

Los avances más recientes de las tecnologías de la producción han provocado un interés creciente en la automatización de los procesos de medida, inspección y control de calidad de los productos desarrollados, que incluyen tanto medidas del color como espectrofotométricas. Además, la necesidad del cumplimiento de normativas de calidad también hace cada vez más necesario un control adecuado de estas magnitudes. De esta forma, las exigencias sobre las especificaciones de los sistemas comerciales de medida aumentan sistemáticamente, para que puedan obtenerse resultados con resolución espacial variable y personalizable, mayor rapidez y fundamentalmente poder disponer de instrumentos que permitan su implementación en sistemas automatizados.

La instrumentación convencional para la medida del color y de propiedades espectrales disponible en la actualidad es muy extensa y variada, e incluye desde colorímetros hasta

instrumentos espectrofotométricos más complejos. Los colorímetros proporcionan directamente los valores triestímulo de la muestra analizada para un iluminante, un observador patrón y una geometría determinada. Por otro lado, los instrumentos espectrofotométricos permiten la medida de diferentes cantidades espectrales, como por ejemplo de la reflectancia o transmitancia en el caso de los espectrofotómetros, o simplemente distribución de energía en cualquier unidad radiométrica que llega al sensor en el caso de los espectrorradiómetros. Adicionalmente a las medidas espectrales, estos instrumentos también permiten la medida del color puesto que a partir de éstas y con la ayuda de un ordenador se pueden calcular los valores triestímulo de la muestra analizada para diferentes iluminantes y observadores patrón⁵.

Todos los instrumentos de medida citados que se usan mayoritariamente en la actualidad realizan una integración del campo de observación¹ (Campos 1997) por lo que deben actuar sobre superficies cromáticamente o espectralmente uniformes y las áreas de medida suelen ser del orden de 10 mm de diámetro o superiores, aunque en algunos casos, como los instrumentos que están dotados con teleobjetivos (conocidos como teleespectrofotómetros o telecolorímetros) el área de medida puede ser pequeña (del orden de un milímetro para algunas distancias de trabajo). Otra limitación importante la constituye el hecho de que la medida en diferentes puntos de una superficie debe realizarse de forma secuencial, es decir, punto a

punto, no pudiéndose disponer de toda la información en una sola medida. Además, este tipo de instrumentos no permite su integración de manera sencilla en un sistema automatizado de producción⁶.

Una posibilidad para superar estas dificultades es desarrollar instrumentos para medidas espectrales y de color basados en sensores optoelectrónicos de imagen como cámaras CCD o CMOS, ya sean monocromáticas o de color⁷. Estas cámaras permiten obtener una alta resolución espacial (el tamaño típico de píxel es del orden de 10 μm) con lo que se superaría el problema de la uniformidad y homogeneidad de las superficies y se podría realizar la medida de todo el objeto a un tiempo, dando las coordenadas cromáticas o los espectros en distintas zonas a partir de la información de cada píxel. Esto también permitiría personalizar la resolución necesaria a la aplicación concreta que quiera realizarse. Además, estos instrumentos por su diseño y configuración podrían ser implementados en sistemas automatizados de producción.

Sin embargo las cámaras no son directamente un instrumento para la medida del color y mucho menos para la medida de cantidades espectrales. En general, para la medida del color de muestras se utilizan cámaras digitales de color, las cuales suministran información cromática de cada punto o píxel mediante los niveles de gris correspondientes a cada canal RGB. Esta respuesta debe ser caracterizada y perfilada a un espacio de especificación del color como por ejemplo el CIE-1931 XYZ para convertirla en una medida del color. Éste es un proceso complejo puesto que las cámaras y escáneres están diseñados para registrar imágenes y presentan una evidente falta de linealidad entre el estímulo y la respuesta, variación espectral en la relación respuesta-nivel de exposición, falta de homogeneidad espacial en la respuesta, variabilidad del nivel de reproducción del color en función del procesamiento del color, etcétera. Existen procedimientos, que buscan *ad hoc* la transformación o diccionario de color entre ambos lenguajes o espacios de color sin el conocimiento directo de sus características espectrales, mediante cartas de colores^{8,9}. En cambio, otros trabajos se centran más en el conocimiento directo y completo de las características espectrales¹⁰⁻¹² para así establecer mejor una transformación de color que permita analizar los problemas de reproducción del color de esta clase de dispositivos multimedia para así compensarlos adecuadamente.

Por otro lado, para la medida de cantidades espectrales a partir de cámaras digitales se

utiliza la técnica de las imágenes multispectrales, conocidas en inglés como *multispectral imaging*¹³⁻¹⁵, la cual consiste en registrar una escena a través de varios canales de adquisición o bandas espectrales con transmitancia diferente, de forma que los píxeles de las imágenes captadas contienen cierta información espectral de la escena. Esta característica permite reconstruir el espectro correspondiente a las muestras presentes en la imagen mediante la ayuda de algoritmos matemáticos específicos¹⁶⁻¹⁸. Por lo tanto, en un instrumento basado en la técnica de las imágenes multispectrales no será necesaria la utilización de una red de difracción, lo que disminuye el coste del aparato. El número de bandas espectrales implicadas en un sistema multispectral puede variar desde tres componentes por píxel, lo que corresponde a imágenes RGB de color, hasta algunos centenares de bandas, lo que corresponde a imágenes llamadas hiperespectrales. Para que el sistema multispectral de reconstrucción de espectros desarrollado sea útil y efectivo, el número de canales de adquisición ha de ser inferior al número de medidas espectrorradiométricas típicas que utilizan los espectrofotómetros convencionales.

En este trabajo se analizan los principales problemas y limitaciones relacionados con la transformación de un dispositivo digital de captura de imagen, formado por un sensor optoelectrónico (cámara CCD o CMOS), un objetivo, varios filtros, una tarjeta digitalizadora de imagen y un ordenador, en un instrumento para medir color y otras cantidades espectrales, presentando los resultados más relevantes obtenidos en nuestro laboratorio.

Medidas de color

Sistema experimental

El sistema experimental completo utilizado para la medida del color está formado generalmente por un sensor optoelectrónico de imagen, un objetivo y una tarjeta digitalizadora de imágenes acoplada a un ordenador. Tal y como se ha mencionado anteriormente, para la medida del color es necesaria la utilización de cámaras digitales de color, es decir, que nos proporcionen tres señales diferentes RGB. Las cámaras digitales pueden utilizar diferentes arquitecturas de color¹⁹ para separar la luz incidente en el sensor en las distintas bandas espectrales. Fundamentalmente existen dos tipos de arquitectura:

1. *Tres sensores.* En este caso con los elementos ópticos que sean necesarios se hace llegar la radiación a tres sensores distintos con sensibilidad en la zona roja, verde o azul del espectro visible. Esta sensibilidad suele conseguirse situando un filtro delante de cada uno de ellos (fig. 1 (a))

2. *Un sensor.* Si la cámara CCD o CMOS tiene un único sensor, existen dos posibilidades para separar la luz en tres bandas espectrales. La primera es tomar tres imágenes de la escena con un filtro RGB distinto en cada caso (filtros estáticos). La segunda es situar tiras de filtros microscópicos sobre los píxeles del sensor (filtrado de color sobre píxel, *stripe filter*) (figs. 1 (b) y (c)).

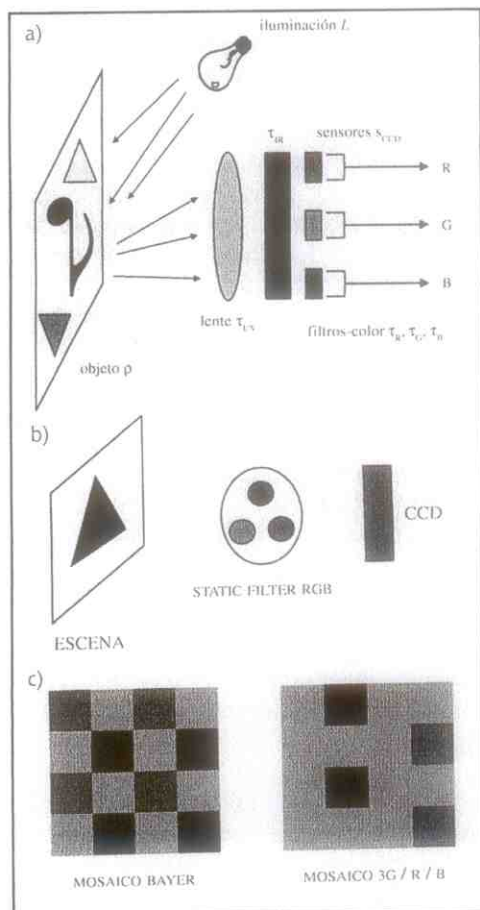


Fig. 1. Esquema básico de arquitectura de color de tres sensores (a) y de un sensor de filtros estáticos (b) y filtrado de color sobre píxel (c)

A partir de la arquitectura de color el sistema de captación de imágenes realizará la codificación del color, pesando el estímulo color, es decir, el producto de la distribución espectral de la fuente de iluminación por la transmitancia o reflectancia espectral del objeto, por la respuesta espectral de cada uno de los canales de la cámara. La integración será la respuesta RGB del sistema

optoelectrónico de imagen. Ahora bien estos valores RGB no son colorimétricos. Para conseguir que lo sean podemos utilizar dos métodos: buscar una transformación entre el espacio de color de la cámara y un espacio universal de color como el XYZ CIE-1931 (calibración de color) o establecer una transformación entre los espacios de color a partir de las características espectrales y espaciales del dispositivo (caracterización de color).

Son muchos los factores que pueden afectar a la respuesta del sistema: de tipo óptico como la focal del objetivo o el número de diafragma, de tipo electrónico como el tiempo de exposición, la ganancia, el offset o el balance de blanco y los asociados a las características de la cámara como la profundidad de digitalización (8 bits, 12 bits...) y finalmente la arquitectura de color utilizada. Tanto para calibrar como para caracterizar un dispositivo de captura de imágenes lo óptimo será trabajar en las condiciones de señal lo menos tratada posible (*raw*).

Por otro lado, debido a la no uniformidad en la respuesta de los píxeles que generalmente presentan los sensores optoelectrónicos de imagen, será necesaria la aplicación de una caracterización espacial previa a los procesos de calibración o caracterización de color anteriormente citados y que permiten transformar la cámara en un instrumento de medida del color.

Caracterización espacial

El objetivo de la caracterización espacial (*Flat Field correction*) es que la respuesta del sistema a un campo de iluminación homogéneo sea la misma para todos los píxeles de la cámara. En nuestro laboratorio hemos desarrollado un método de caracterización espacial de sensores optoelectrónicos²⁰ y para el cual se ha implementado el montaje que se muestra en la figura 2.

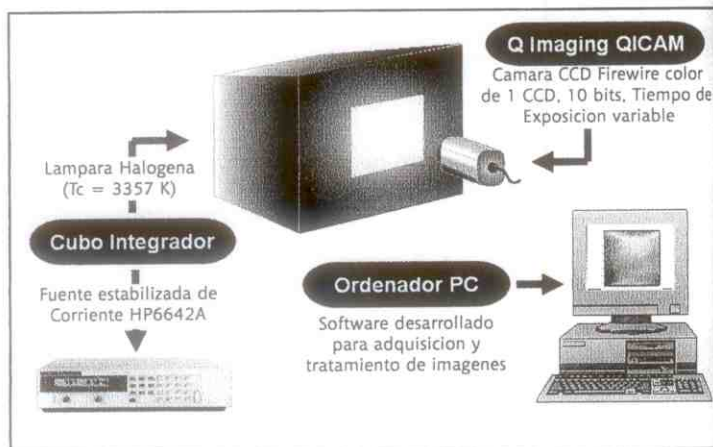


Fig. 2. Montaje experimental para la realización de la caracterización espacial de sensores optoelectrónicos de imagen.

Con una fuente de luz estabilizada (lámpara halógena, temperatura de color 3357K) se ilumina un cubo integrador obteniendo una superficie homogéneamente iluminada que es captada por el sistema a caracterizar. Hemos comprobado que con un algoritmo de corrección lineal, basado en una matriz de ganancia y una de offset, se obtiene una buena corrección. De esta forma los niveles de gris corregidos (ND_c) para cada píxel (i,j) se expresan como:

$$ND_c(i,j) = O(i,j) + G(i,j) \cdot ND(i,j) \quad [1]$$

donde $O(i,j)$ es la matriz de offset, $G(i,j)$ es la matriz de ganancia y $ND(i,j)$ es el nivel digital del píxel (i,j) sin corregir. Las matrices de ganancia y offset vienen dadas por:

$$G(i,j) = \frac{avg(ND_{gris}) - avg(ND_{osc})}{ND_{gris}(i,j) - ND_{osc}(i,j)} \quad [2]$$

$$O(i,j) = avg(ND_{osc}) - G(i,j) \cdot ND_{osc}(i,j)$$

donde ND_{gris} son los niveles digitales correspondientes a una imagen obtenida en la zona media de respuesta lineal de la cámara y ND_{osc} son los niveles de gris correspondientes a la imagen de oscuridad de la cámara. El efecto de la corrección espacial para una cámara de 10 bits de digitalización (QImaging, QICAM) pueden verse en la figura 3²¹.

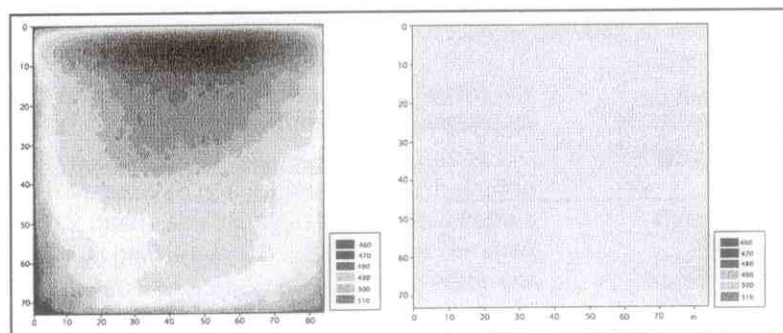


Fig. 3. Representación gráfica de los niveles digitales de una imagen del campo homogéneo de luminancia sin corregir (izquierda) y una vez corregido (derecha).

Para cuantificar el efecto de la corrección espacial podemos usar el cociente entre la desviación estándar del nivel medio de la imagen y el nivel medio de la misma (SNUQ). En la tabla I se indican los valores de este parámetro para una cámara de 10 bits de digitalización (QImaging, QICAM).

Tabla I. Valores de SNUQ para la imagen no corregida (INC) y la imagen corregida (IC) representadas en la figura 3

	INC SNUQ	IC SNUQ
Canal R	1,14	0,07
Canal G	1,46	0,05
Canal B	1,85	0,12

Calibración de color

La primera alternativa para la transformación de una cámara digital en un instrumento de medida del color es la calibración. La calibración de un sistema de captura de imágenes consiste en obtener una transformación entre los valores triestímulo XYZ de una gama suficientemente amplia de colores (como puede ser por ejemplo la carta Color-Checker) y los valores digitales obtenidos al medir estos mismos colores para los tres canales de la cámara RGB. Esta transformación puede obtenerse a partir de una regresión polinómica. Se trata de un problema de inversión de una matriz no cuadrada que puede resolverse mediante el uso de la pseudoinversa^{8,9}.

En la ecuación [3] se muestra un ejemplo de obtención de los valores triestímulo XYZ a partir de una regresión polinómica multidimensional no lineal.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \dots & m_{1,11} \\ m_{2,1} & \dots & m_{2,11} \\ m_{3,1} & \dots & m_{3,11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ R \\ G \\ B \\ RG \\ RB \\ GB \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ RGB \end{bmatrix} \quad [3]$$

La matriz de coeficiente M puede calcularse mediante la pseudoinversa de acuerdo con la ecuación [4]

$$M = [m_{i,j}]_{3 \times 11} = [(V^t \cdot V)^{-1} \cdot V^t \cdot D] \quad [4]$$

donde

$$V = \begin{bmatrix} 1 & R_x & G_x & B_x & R_x G_x & R_x B_x & G_x B_x & R_x^2 & G_x^2 & B_x^2 & R_x G_x B_x \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & R_y & G_y & B_y & R_y G_y & R_y B_y & G_y B_y & R_y^2 & G_y^2 & B_y^2 & R_y G_y B_y \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} \quad [5]$$

son matrices obtenidas con los valores triestímulo XYZ y digitales RGB de las N muestras de calibración medidas.

Una de las limitaciones más importantes utilizando la calibración de dispositivos es que éstos únicamente nos servirán para la medida del color en las mismas condiciones (iluminación, geometría...) en las que se habrán calibrado.

Caracterización de color

La caracterización de un dispositivo de captura de imágenes como dispositivo para la medida del color tiene fundamentalmente dos etapas: caracterización espectral y caracterización colorimétrica. En nuestro laboratorio hemos desarrollado una metodología completa para la caracterización de dispositivos de captura de imágenes como instrumentos para la medida del color que a continuación exponemos^{10-12,21}.

Caracterización espectral

La caracterización espectral de un dispositivo de captura, consiste en la obtención de las seudofunciones de igualación del sistema. Debido a que estas funciones de igualación no son combinaciones lineales exactas de las funciones de igualación de la CIE XYZ mantendremos en todo momento el término seudo para notarlas.

El primer paso para la obtención de las seudofunciones de igualación es la obtención de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica, que describen la respuesta del dispositivo captador de imágenes frente a estímulos monocromáticos de diferente energía radiante $H(\lambda)$. Para ello podemos utilizar el dispositivo experimental mostrado en la figura 4.

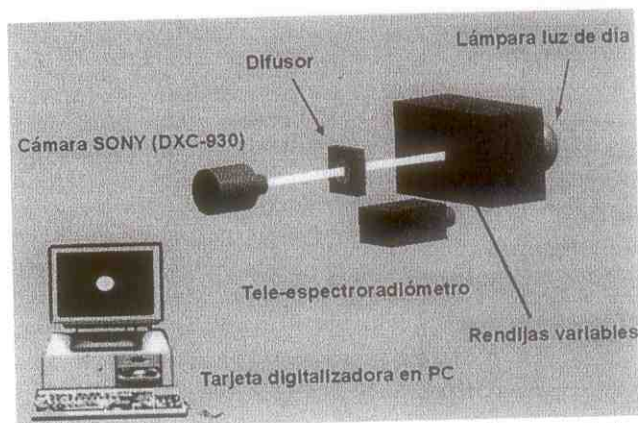


Fig. 4. Dispositivo experimental para la caracterización espectral de sensores optoelectrónicos de imagen.

Mediante un monocromador obtenemos luz monocromática, cuya intensidad es variada cambiando la anchura de las rendijas del monocromador. La imagen de esta luz sobre un difusor es captada por el dispositivo a caracterizar

$$NDR_{\lambda K} = a_{\lambda K} + \frac{b_{\lambda K}}{1 + \exp\left(-\frac{H_{\lambda K} - c_{\lambda K}}{d_{\lambda K}}\right)} \quad [6]$$

$$K = R, G, B$$

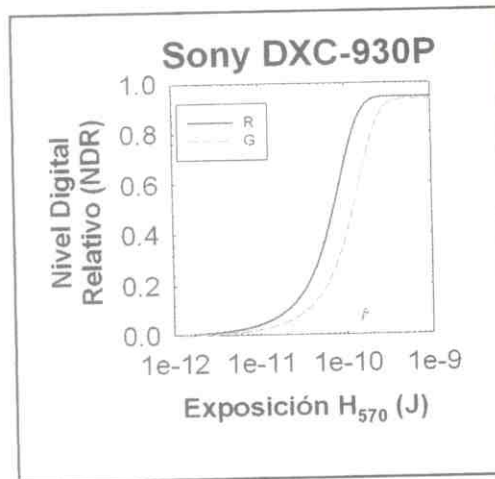


Fig. 5. Funciones espectrales de conversión optoelectrónica para la cámara Sony DXC-930P correspondientes a una longitud de onda de 570 nm. No aparece la respuesta correspondiente al canal azul porque para este dispositivo el canal no es sensible a esta longitud de onda.

ya la energía de la misma se mide con la ayuda de un telespectrofotómetro.

Las funciones espectrales de conversión optoelectrónica obtenidas (fig. 5) pueden ajustarse a funciones sigmoide de cuatro parámetros ($a_{\lambda K}$, $b_{\lambda K}$, $c_{\lambda K}$, $d_{\lambda K}$) que tienen la expresión siguiente:

donde NDR es el nivel digital relativo y H representa la energía incidente.

A partir de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica podemos calcular la responsividad, que es el cociente entre la respuesta del sistema y la exposición para exposiciones constantes, para cada longitud de onda y para cada canal (fig. 6). Normalizando estas responsividades para cada longitud de onda se puede calcular la sensibilidad espectral relativa (fig. 7a).

Normalizando los valores de la responsividad espectral para cada valor de la exposición, se obtienen las sensibilidades espectrales relativas del dispositivo de captación de imágenes.



Fig. 6. cámara



Fig. 7 (b) p:

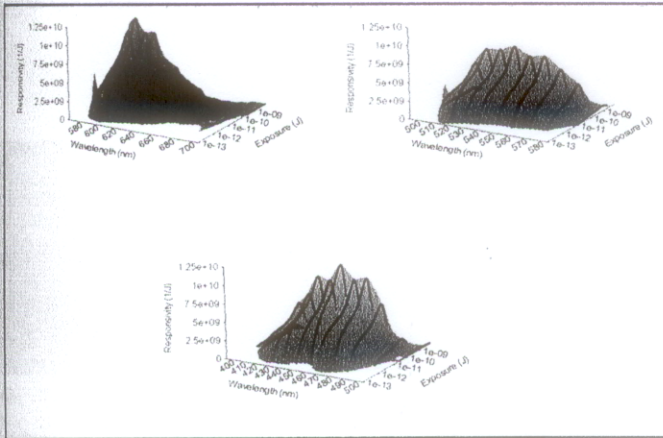


Fig. 6. Responsividad espectral para cada uno de los canales RGB de la cámara Sony DXC-930P.

Aplicando un balance de blanco al blanco equienergético y realizando una normalización conjunta de las sensibilidades espectrales obtenemos las seudofunciones de igualación del color (fig. 7b)¹⁰.

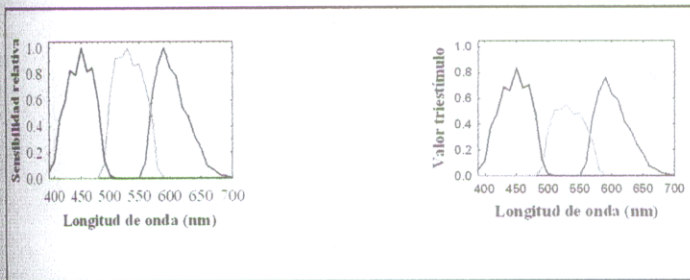


Fig. 7. Sensibilidades espectrales relativas (a) y seudofunciones de igualación (b) para la cámara SonyDXC-930P.

Caracterización colorimétrica

La caracterización colorimétrica se inicia con la obtención del perfil colorimétrico que nos permita pasar del espacio RGB del dispositivo de captura al espacio XYZ de la CIE. Este perfil se obtiene mediante un ajuste por mínimos cuadrados de las funciones de igualación del color de nuestro sistema de adquisición de imágenes a las funciones de igualación del color del observador patrón CIE-1931. La igualación no es exacta, no puede serlo porque las curvas de la cámara no son combinación lineal de las curvas del

observador patrón. Ello implica que quedarán errores sistemáticos que al igual que los errores de escalado deberán ser compensados al final¹¹ (fig. 8).

Una vez obtenido el perfil, el siguiente paso en la caracterización colorimétrica es la aplicación de un algoritmo de adaptación luminosa que permita aumentar el rango dinámico de la cámara, de forma que pueda captar correctamente todos los colores de una escena cuyas luminancias pueden variar entre 10000:1. Para ello será necesario cambiar el número de diafragma (*N*) o el tiempo de exposición (*t_{exp}*) y encontrar la relación entre los valores digitales de la cámara RGB y la luminancia del estímulo, para los diferentes valores de *N* y *t_{exp}* considerados. En el modelo que hemos aplicado¹², esta relación es lineal y la pendiente y ordenada en el origen tienen una variación cuadrática en función de *N* o del *t_{exp}*.

Teniendo en cuenta estos factores es posible obtener los valores triestímulo a partir de los valores RGB de la cámara de acuerdo con la ecuación [7]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} m_r(N) & 0 & 0 \\ 0 & m_g(N) & 0 \\ 0 & 0 & m_b(N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_r(N) \\ b_g(N) \\ b_b(N) \end{bmatrix} \left\{ \frac{cd}{m^2} \right\} \quad [7]$$

donde **M** es la matriz correspondiente al perfil colorimétrico obtenido y *m* y *h* representan la pendiente y la ordenada en el origen de las rectas obtenidas al aplicar el balance de adaptación luminosa.

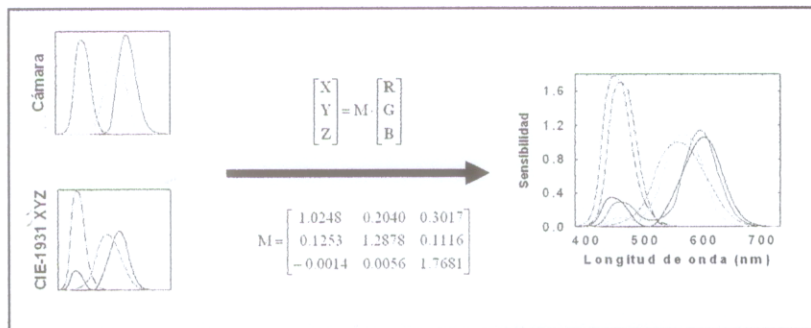


Fig. 8. Esquema gráfico de la obtención del perfil colorimétrico. En las figuras de la izquierda se representa las seudofunciones de igualación de una cámara CCD y las funciones de igualación del observador patrón CIE-1931. En la figura de la derecha se representa el ajuste obtenido y las funciones de igualación del color del observador CIE-1931. La matriz *M* que permite pasar del espacio RGB del dispositivo de captura a la XYZ corresponde en este caso particular a la obtenida para la cámara Sony-930P

Finalmente para tener medidas absolutas del color, es decir, valores triestímulo en cd/m² es

necesario realizar una última corrección. Para ello se miden los valores triestímulo de una carta de colores como puede ser la Color Checker con un instrumento convencional de medida del color y se comparan con los obtenidos con el sistema captador de imágenes. Se obtiene una relación lineal de forma que los valores triestímulo absolutos vienen dados por:

$$t'_{xyz} = A_c + B_c \cdot t_{xyz} \quad [8]$$

donde t'_{xyz} son los valores triestímulo absolutos, t_{xyz} son los valores triestímulo antes de la corrección y A_c y B_c son las matrices de corrección. En las ecuaciones 9 y 10 pueden verse los valores de la corrección obtenidos para la cámara Sony-930P.

$$B_c = \begin{bmatrix} b_x & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 \\ 0 & 0 & b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1851 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1577 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1937 \end{bmatrix} \quad [9]$$

$$A_c = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -32.65 \\ -35.02 \\ -30.10 \end{bmatrix} \quad [10]$$

Medidas espectrales

Sistema experimental

Los sistemas multispectrales están formados generalmente por un sensor optoelectrónico de imagen con varias bandas espectrales, un objetivo, una tarjeta digitalizadora acoplada a un ordenador y adicionalmente un sistema de iluminación si se desea obtener información de objetos no emisores de luz. Para conseguir los distintos canales de adquisición con diferentes características espectrales, los sistemas multispectrales pueden adoptar diferentes técnicas. En primer lugar, se puede utilizar una cámara monocromática acoplada a una rueda giratoria de filtros de distinta transmitancia (fig. 9 (a))²². Por otro lado, un sistema más evolucionado que el anterior pero también mucho más caro, consiste en poner delante de la cámara monocromática un filtro de cristal líquido sintonizable²³, el cual permite variar sus características de transmisión espectral según la tensión a la que es sometido (fig. 9 (b)). Por último, otra opción consiste en utilizar una cámara

de color RGB con un filtro suplementario delante, lo cual permite doblar el número de canales existentes²⁴.

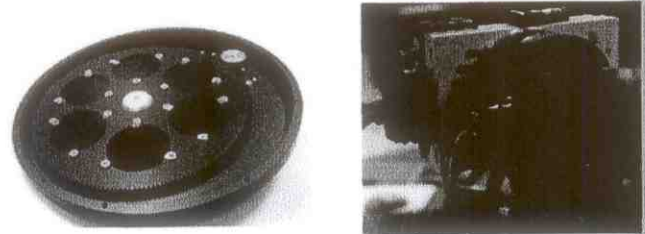


Fig. 9. Rueda giratoria de filtros multispectrales (a) y filtro sintonizable acoplado a una cámara (b).

A partir de los niveles digitales medidos con el sensor a través de los distintos canales del sistema multispectral y aplicando convenientemente diferentes algoritmos matemáticos, es posible reconstruir las curvas de reflectancia o transmitancia espectral o equivalentemente de distribución de energía en algún tipo de unidades radiométricas en el caso de medir objetos emisivos.

De igual forma que con los dispositivos de medida del color descritos en el apartado anterior, para trabajar con sistemas multispectrales es preciso tener un control muy elevado de las señales medidas por lo que es preferible trabajar con una configuración de la cámara que modifique las señales lo menos posible (*raw*).

Además, debido a que se pretenden reconstruir espectros de cualquier zona de la imagen captada con el sensor y puesto que éste no presenta uniformidad en la respuesta de los píxeles, también será necesario realizar un proceso de caracterización espacial de la cámara digital antes de utilizarla como sistema espectrofotométrico de medida.

Métodos matemáticos de reconstrucción

Actualmente existen muchos métodos matemáticos de reconstrucción de espectros de muestras a partir de medidas de un sistema multispectral. Básicamente, estos pueden clasificarse entre métodos de interpolación y métodos de estimación. El fundamento de los primeros se basa en interpolar valores muestreados de la reflectancia, o equivalentemente de la magnitud espectral analizada, obtenidos a partir de la utilización de canales de adquisición con un perfil de transmitancia casi monocromático. Entre los métodos de este tipo más utilizados se encuentran la interpolación lineal, cúbica, cúbica de Spline, transformación discreta de

Fourier y transformación discreta modificada de seno^{17,18,25}.

Por otro lado, los métodos de estimación no necesitan trabajar con canales monocromáticos sino que se pueden aplicar mediante filtros de cualquier forma, aunque el perfil de transmitancia de los filtros utilizados puede repercutir en el grado de reconstrucción de los espectros conseguido. En general estos algoritmos reconstruyen los espectros a partir de las respuestas de la cámara (X) mediante la aplicación de alguna matriz calculada a partir de un proceso de inversión o regresión, tal y como se puede observar en la ecuación [11]:

$$\tilde{r} = \mathbf{M}_T \mathbf{X} \quad [11]$$

donde \tilde{r} es la magnitud espectral estimada (por ejemplo la reflectancia), \mathbf{M}_T es la matriz de transformación convenientemente calculada según el método empleado y X es un vector columna que representa las m respuestas de la cámara correspondientes a los m canales (X) para la muestra analizada, es decir:

$$X_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} i(\lambda)r(\lambda)\tau(\lambda)F_i(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad [12]$$

siendo $i(\lambda)$ es la radiancia espectral del iluminante, $r(\lambda)$ la reflectancia espectral de la muestra (o magnitud espectral equivalente), $t(\lambda)$ es la transmitancia espectral del camino óptico (normalmente considerada 1), $F_i(\lambda)$ es la transmitancia espectral de los filtros multispectrales de cada canal y $S(\lambda)$ es la sensibilidad espectral de la cámara.

Dentro de este segundo grupo de algoritmos se encuentran la pseudoinversa de Moore-Penrose^{26,27}, la pseudoinversa con suavización¹⁶, la estimación de Wiener^{17,27}, métodos no lineales^{8,16} y el análisis de componentes principales^{23,24}. Muchos de estos métodos necesitan ser entrenados con un conjunto de muestras con curvas espectrales conocidas y parecidas a las que se quieren analizar para que posteriormente puedan reconstruir bien los perfiles. Este hecho constituye una cierta limitación en la utilización de estos tipos de sistemas debido a que es necesario tener un cierto conocimiento previo de las muestras que se medirán. Todos ellos son fácilmente implementables con el software comercial Matlab[®]²⁵.

Los trabajos desarrollados por nuestro grupo en este ámbito demuestran que se obtienen mejores resultados de reconstrucción con la utilización de los métodos de estimación puesto que tienen en cuenta información espectral integrada de toda la región analizada debido a que utilizan filtros con una gran anchura espectral de transmitancia²⁸. En los métodos de interpolación la información queda sesgada debido a la discretización de la información al utilizar canales monocromáticos.

Sistema multispectral en el infrarrojo próximo

Las técnicas multispectrales han sido generalmente utilizadas en el rango visible del espectro electromagnético pero no en otras zonas. Debido a que los sensores optoelectrónicos de imagen convencionales presentan un grado de sensibilidad destacable entre 800 y 1000 nm, es decir, en el infrarrojo próximo (NIR), pueden ser utilizados para realizar medidas espectrales en esta región. La información espectral contenida en el NIR está relacionada con la composición química del material analizado debido a que en esta región existen picos de absorción correspondientes a vibraciones específicas de moléculas. Por esta razón, las medidas espectrales en esta región son de gran aplicabilidad y se utilizan para detectar diferentes componentes de los materiales como sustancias biológicas (proteínas, fibra, agua, grasa...) u otros constituyentes químicos (presentes en materiales textiles, plásticos, productos petroquímicos...) en el campo conocido como tecnología NIR²⁹.

Debido a las razones expuestas, en nuestro laboratorio hemos implementado un sistema multispectral de medida de espectros de reflectancia de muestras en esta región del espectro^{28,30,31}. La configuración básica de nuestro sistema puede verse en la figura 10, en la que se observan los distintos elementos que lo conforman: una cámara CCD acoplada a un objetivo, dos filtros pasabanda que eliminan la radiación no comprendida en la región

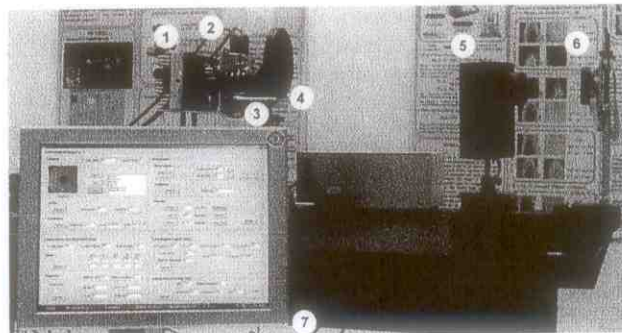


Fig. 10. Dispositivo experimental utilizado para obtener las imágenes multispectrales en la región NIR. (1: Cámara CCD, 2: Objetivo automatizado, 3: filtros pasabanda infrarrojo y visible, 4: rueda giratoria de filtros multispectrales, 5: lámpara halógena, 6: soporte de la lámpara halógena, 7: ordenador PC e aplicación de software desarrollada para controlar el dispositivo).

espectral analizada, una rueda giratoria de filtros multispectrales, una lámpara halógena utilizada para iluminar las muestras y finalmente un soporte para colocarlas.

Nuestro grupo investigador ha realizado simulaciones numéricas para determinar la influencia que todos los elementos que constituyen el sistema tienen sobre las reconstrucciones conseguidas. En este sentido, se han optimizado los perfiles espectrales de transmitancia de los filtros a utilizar así también como la emisión espectral o temperatura de color de la lámpara halógena utilizada y la profundidad de digitalización de las cámaras necesaria para obtener buenas reconstrucciones. En la figura 11 se observan los filtros multispectrales y la radiancia espectral de la lámpara utilizada finalmente en el sistema de adquisición.

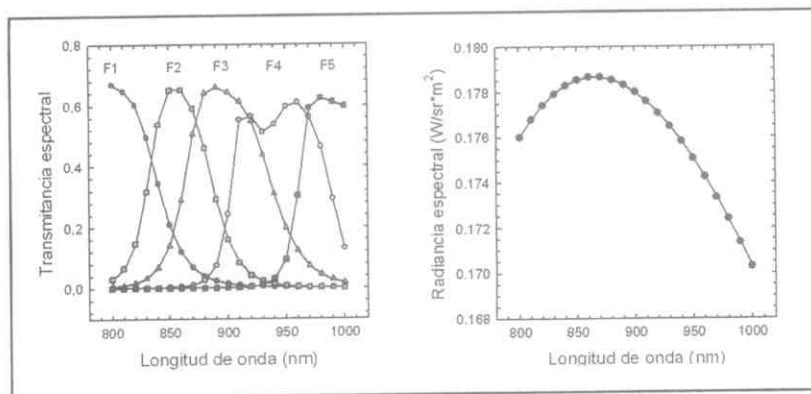


Fig. 11. Transmitancia espectral de los filtros multispectrales (a) y radiancia espectral de la lámpara halógena utilizada (b).

En los estudios llevados a cabo también se ha determinado que el número de canales óptimo para obtener buenas reconstrucciones en el NIR es de cinco. Igualmente, se ha visto que los métodos matemáticos de reconstrucción que proporcionan mejores resultados son la seudoinversa, métodos no lineales y el análisis de componentes principales.

Por otro lado, también hemos desarrollado un modelo de adaptación luminosa²² que permite eliminar la dependencia de los niveles digitales medidos con el tiempo de exposición y el número de diafragma utilizados y transformarlos a respuestas de la cámara teóricas (ecuación [12]). El sistema difiere del utilizado en dispositivos para medidas de color y aplica una transformación lineal sobre los niveles digitales. Los parámetros del ajuste lineal encontrado (pendiente y offset) dependen del tiempo de exposición y del número de diafragma utilizados y han sido calculados teniendo en cuenta un conjunto de muestras patrón con curvas espectrales conocidas. Los ajustes aplicados pueden desarrollarse para todos los canales

conjuntamente (transformaciones tipo 1) (fig. 12 (a)) o para cada uno de ellos por separado (transformaciones tipo 2) (fig. 12 (b)). Debido a que las transformaciones de tipo 2 permiten tener en cuenta la influencia que la longitud de onda tiene sobre el número de diafragma (N) y también errores sistemáticos presentes en el sistema que tienen diferentes efectos en las bandas multispectrales, este segundo tipo de transformaciones proporciona reconstrucciones con una exactitud mucho más elevada que utilizando las transformaciones de tipo 1.

El sistema multispectral presentado ha sido utilizado para reconstruir los espectros de reflectancia de un conjunto de 80 muestras, formado por objetos tanto naturales como manufacturados (muestras textiles, plásticos,

muestras de mármol, madera, papel, plantas, piel y diferentes alimentos). Algunos ejemplos específicos de las reconstrucciones obtenidas se muestran en la figura 13.

Tal y como se puede ver las reconstrucciones conseguidas son muy buenas. Para todas las muestras analizadas se obtienen en promedio valores de porcentaje de reconstrucción superiores a 99.8% o equivalentemente valores de Root

Mean Square Error inferiores a 1,7 ($RMSE \times 100$) (ecuación [13]). Estos valores garantizan muy buenos resultados de reconstrucción teniendo en cuenta que los valores que representan unas reconstrucciones exactas son las siguientes $P_{rec} > 99.9\%$ y $(RMSE \times 100) < 1$.

Porcentaje de reconstrucción

$$P_{rec} = \left[1 - \frac{\sum_{\lambda_{med}} (r - \tilde{r})^2}{\sum_{\lambda_{med}} (r)^2} \right] \times 100$$

Root Mean Square Error:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N_k} \sum_{\lambda_{med}} (r - \tilde{r})^2 \right]^{1/2}$$

donde r son los valores de reflectancia medidos, \tilde{r} los valores reconstruidos y N_k el número de longitudes de onda en las que se han realizado las medidas.

Adicionalmente a las reconstrucciones espectrales, el sistema presentado también ha sido utilizado para desarrollar un sistema de visualización en color de imágenes

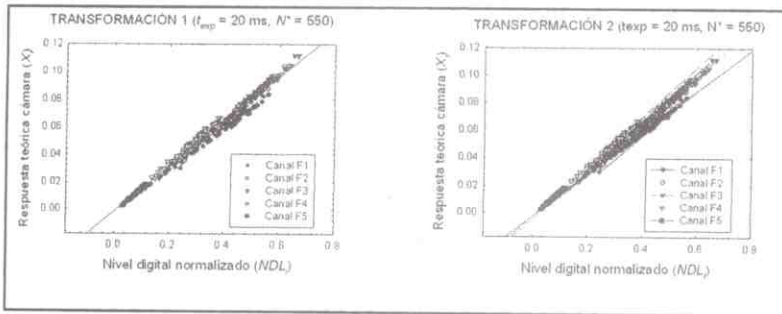


Fig. 12. Transformaciones lineales del modelo de adaptación luminosa obtenidas para $t_{exp} = 20 \text{ ms}$ y $N^* = 550$ con las transformaciones tipo 1 (a) y las transformaciones tipo 2 (b). N^* no corresponde al valor real de número de diafragma sino a un paso del motor utilizado para variar automáticamente la apertura del objetivo utilizado.

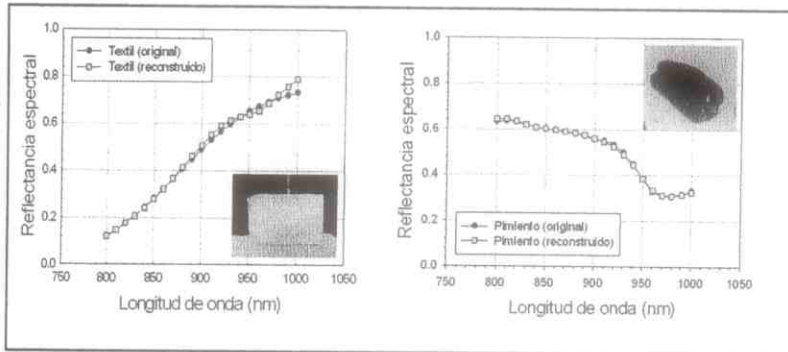


Fig. 13. Reflectancia espectral original y reconstruida para algunas muestras: muestra textil (a) y pimienta (b).

multiespectrales pertenecientes a la región NIR del espectro electromagnético, la cual es invisible para el ojo humano. A partir de la combinación de las distintas imágenes monocromáticas adquiridas se obtiene una imagen seudocoloreada, la cual proporciona información asociada a toda la región espectral analizada y no solamente a un canal. Esta metodología aporta aplicaciones de interés como puede ser la detección y diferenciación de objetos con la misma apariencia en el visible pero distintas características espectrales en el infrarrojo, marcación de objetos mediante marcas infrarrojas para temas relacionados con autenticidad y seguridad etcétera. En la figura 14 se muestran varios ejemplos de seudocoloreación posibles de un paisaje utilizando algunas de las técnicas implementadas^{31,32}.

Conclusiones

Los dispositivos captadores de imágenes, formados por

un sensor optoelectrónico de imagen (cámara CCD o CMOS), un objetivo, una tarjeta digitalizadora de imágenes y un ordenador tipo PC pueden ser caracterizados para que se comporten como instrumentos para la medida del color. Adicionalmente, si se dispone de varios canales de adquisición también pueden ser utilizados para realizar medidas espectrofotométricas o espectrorradiométricas.

Para poder realizar medidas mediante una cámara digital, en primer lugar es necesaria su correcta caracterización espacial. Posteriormente y para realizar medidas de color puede realizarse una calibración, relacionando los valores triestímulo XYZ medidos con un instrumento convencional y los valores digitales RGB de la cámara o

una caracterización de color completa que comprende la espectral y colorimétrica. La calibración permitirá obtener un instrumento que deberá funcionar en las condiciones de iluminación y geometría en las que se haya realizado la calibración, mientras que con la caracterización se podrá obtener un instrumento más universal para la medida del color.

Por otro lado, si disponemos de varios canales de adquisición, la aplicación de ciertos algoritmos matemáticos de reconstrucción sobre las respuestas de la cámara puede

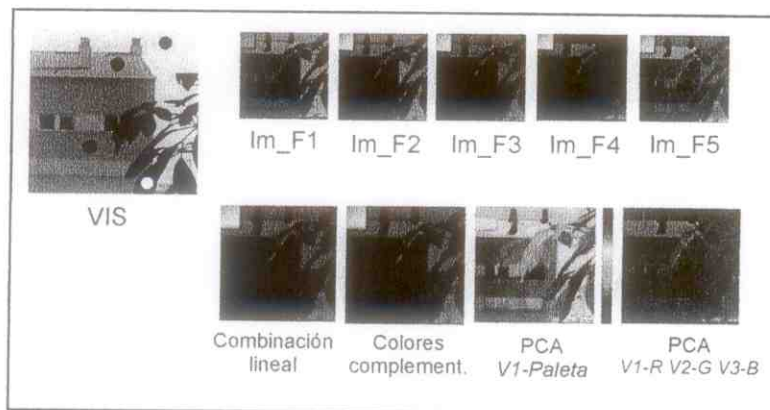


Fig. 14. Imágenes seudocoloreadas NIR obtenidas a partir de la utilización de diferentes métodos.

proporcionarnos información espectral de las muestras analizadas.

Los instrumentos para medidas del color y espectrales basados en sensores optoelectrónicos de imagen pueden contribuir a superar las principales limitaciones de los instrumentos convencionales. Como principales ventajas podemos señalar la posibilidad de realizar la medida de grandes superficies simultáneamente y poder conocer el color o el espectro de cada píxel. Además gracias a la configuración y funcionamiento de estos sensores pueden ser implementados fácilmente en los sistemas automatizados de producción pudiendo realizar medidas *on line*.

Actualmente la precisión de estos instrumentos, es decir la repetitividad en las medidas, es muy buena, sin embargo la exactitud esta limitada. En cuanto a las medidas de color, utilizando una metodología de caracterización se obtiene una exactitud del orden de cinco unidades CIELAB, disponiendo de un instrumento flexible delante de cualquier variación de parámetros básicos. Esta exactitud puede aumentar utilizando una metodología de calibración, llegando a dos unidades CIELAB, pero en este caso será necesario repetir la calibración siempre que cambien las condiciones de trabajo. En cuanto a las medidas espectrales es necesario tener un conocimiento previo de las muestras que se van a analizar para poder entrenar el sistema. En estas condiciones y dependiendo de la variabilidad de los espectros de las muestras la exactitud conseguida puede variar significativamente. En el caso del sistema que hemos desarrollado para aplicaciones en el infrarrojo próximo, los resultados obtenidos presentan porcentajes de reconstrucción superiores a 99,8% y valores de (RMSE x 100) inferiores a 1,7.

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la financiación del proyecto DPI2002-00118. M. Vilaseca y M. De Lasarte agradecen a la Generalitat de Catalunya la beca doctoral que han recibido

Bibliografía

1. Campos J, Hita E, Romero J, Melgosa M, Artigas JM, Capilla P, Felipe A, Verdú FM, Pujol J, Negueruela I, Jimenez Del Barco L. Avances y tendencias recientes en colorimetría. *Optica Pura y Aplicada* 1997;30:3-34.

2. Berns RS. Billmeyer & Saltzman's principles of color technology 3rd Ed. John Wiley and Sons. New York, 2000.
3. Schmitt F, Aitken G, Alquíé G, Brettel H, Chouikha MB, Colantoni P, Cotte P, Cupitt J, De Deyne C, Dupraz D, Lahanier C, Liang H, Pilay R, Ribés A, Saunders D. Crisatel multispectral imaging system. En Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association (Granada, España), Vol. 1, 2005, pp. 463-468.
4. Tsumura N. Appearance reproduction and multi-spectral imaging. En Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association (Granada, España), Vol. 1, 2005, pp. 119-123.
5. Capilla P, Artigas JM, Pujol J. Fundamentos de Colorimetría. Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia, 2002.
6. Pujol J, Arjona M, Vilaseca M, Sanabria F, Martínez-Verdú FM. Desarrollo de un colorímetro basado en una cámara CCD-RGB convencional para la calibración de pantallas de televisión de gran formato. En Actas del VI Congreso Nacional de Color (Sevilla, España), 2002, pp. 189-190.
7. Holst G. Solid-State Cameras. En Handbook of Optics. The Optical Society of America Vol. III MacGraw Hill, New York, 2001.
8. Hong G, Luo RM, Rhodes PA. A study of digital camera characterization based on polynomial modelling. *Color Res Appl* 2001;26:76-84.
9. Sharma G. Targetless scanner color calibration. *J Imaging Sci Technol* 2000;44:301-307.
10. Martínez-Verdú FM, Pujol J, Capilla P. Calculation of the color matching functions of digital cameras from their complete spectral sensitivities. *J Imaging Sci Technol* 2002;46:15-25.
11. Martínez-Verdú FM, Pujol J, Capilla P. Characterization of a digital camera as an absolute tristimulus colorimeter. *J Imaging Sci. Technol* 2003;47:279-295.
12. Martínez-Verdú FM, Pujol J, Vilaseca M, Capilla P. Reproduction model with luminance adaptation for digital cameras. En Proceedings of the IS&T First European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (Aachen, Alemania), Vol. 1, 2004, pp. 529-533.
13. Miyake Y. Multispectral imaging: past, present and future. En Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association (Granada, España), Vol. 1, 2005, pp. 477-479.
14. Hill B. (R)evolution of color imaging systems". en Proceedings of the IS&T First European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (Aachen, Alemanis), vol. 1, 2002, pp. 473-479.
15. Burns PD, Berns RS. Analysis of multispectral image capture. En Proceedings of the IS&T/SID Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications (Scottsdale, Arizona), 1996, pp. 19-22.
16. Herzog PG, Knipp D, Stiebig H, König F. Colorimetric characterization of novel multiple-channel sensors for imaging and metrology. *J Electron Imag* 1999;8:342-353.
17. König F, Praefcke W. The practice of multispectral image acquisition. En EUROPTO Conference on Electronic Imaging: Processing, Printing and Publishing in Color (Zürich, Suiza), Proc. SPIE 3409, 1998, pp. 34-41.
18. Keusen T. Multispectral color system with an encoding format compatible with the conventional tristimulus model. *J Imaging Sci Technol* 1996;40:510-515.

19. Martínez-Verdu FM. Escáneres y cámaras electrónicas. En *Tecnología del Color 2002*. Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia, 2002.
20. Arjona M, Novella ML, De Lasarte M, Pujol J, Vilaseca M. Caracterización espacial de dispositivos de adquisición de imágenes para su utilización en la medida del color. En *Actas del VII Congreso Nacional de Color* (Pamplona, España), 2004a, pp. 173-174.
21. Pujol J, De Lasarte M, Arjona M, Vilaseca M, Martínez-Verdú FM, De Fez D, Viqueira V. Performance analysis of different optoelectronic imaging sensors for applications in color measurements. *Proceedings of the Interim meeting of the Internacional Colour Association* (Porto Alegre, Brasil), Vol. 1, 2004, pp. 143-146.
22. Arjona M, Vilaseca M, Pujol J. Multispectral system for recovering near-infrared reflectance spectra. En *Proceedings of the IS&T Second European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision* (Aachen, Alemania), 2004b, pp. 409-413.
23. Hardeberg JY, Schmitt F, Brettel YH. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter. *Opt Eng* 2002;40:2532-2548.
24. Imai F, Berns RS. Comparative analysis of spectral reflectance reconstruction in various spaces using a trichromatic camera system. *J Imaging Sci Technol* 2000;44:280-287.
25. Hanselman DB. Littlefield, Matlab 5. A comprehensive tutorial and reference. Prentice Hall, New Jersey, 1998.
26. Albert A. Regression and the Moore-Penrose pseudoinverse. Academic Press, New York, 1972.
27. Hardeberg JY. Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches, tesis doctoral, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 1999.
28. Vilaseca M, Pujol J, Arjona M. Spectral-reflectance reconstruction in the near-infrared region by use of conventional charge-coupled-device camera measurements. *Appl Opt* 2003;42:1788-1797.
29. Burns DA, Ciurczak EW. *Handbook of Near-Infrared Analysis*. Marcel Dekker, New York, 2001.
30. Vilaseca M, Pujol J, Arjona M. Illuminant influence on the reconstruction of near-infrared spectra. *J Imaging Sci Technol* 2004; 48:111-119.
31. Vilaseca M, Pujol J, Arjona M, Martínez-Verdú FM. Color visualization system for near-infrared multispectral images. *J Imaging Sci Technol* 2005;49:246-255.
32. Scribner DA, Warren P, Schuler JM, Satyshur M, Kruer MR. Infrared color vision: an approach to sensor fusion. *Optics & Photonics News* 1998;9(8):27-32.