Caracterización colorimétrica de sensores digitales y su aplicación en documentación patrimonial de arte rupestre prehistórico

Adolfo Molada Tebar, José Luis Lerma García y Ángel Marqués Mateu
Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE),
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría,
Universitat Politècnica de València
admote@doctor.upv.es
jllerma@cgf.upv.es
amarques@cgf.upv.es

Resumen: El color desempeña un papel fundamental en tareas de documentación y conservación del patrimonio. Frecuentemente, la metodología empleada para el registro del color se limita a procesos subjetivos y dependientes de la experiencia del observador que afectan a los resultados. Aunque el empleo de imágenes digitales ha supuesto una mejora, el tratamiento del color debe abordarse con rigor desde un punto de vista colorimétrico. En este artículo se describe un procedimiento riguroso para la captura de la información cromática en espacios de color independientes del dispositivo mediante la caracterización colorimétrica de sensores digitales, según las recomendaciones de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Se ha desarrollado un *software* propio, denominado pyColourimetry. La metodología se ha aplicado con éxito sobre escenas de abrigos de arte rupestre levantino. Los resultados muestran que el proceso de caracterización es riguroso, no invasivo y de bajo coste, por lo que son de gran aplicabilidad en documentación de arte rupestre.

Palabras clave: Colorimetría, caracterización de sensores, espacios de color CIE, Python, arte rupestre.

Abstract: Colour plays a fundamental role in heritage documentation and conservation tasks. Frequently, the methodology used for the registration of colour is limited to subjective processes, dependent on the experience of the observer, thus limiting the results. Although the use of digital images is a great improvement, the treatment of colour must be rigorously approached from a colourimetric point of view. This paper aims at defining a rigorous procedure to accurately capture colour in device independent colour spaces through the colourimetric characterisation of digital sensors, following the recommendations of the Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). A specific software called pyColourimetry has been developed. The methodology has been successfully applied to scenes acquired in shelters of Levantine rock art. The results indicate that the characterization process is rigorous in the measurement of colour, non-invasive and low cost, being of great applicability in rock art documentation.

Keywords: Colourimetry, camera characterisation, CIE colour spaces, Python, rock art.

Introducción

La documentación del patrimonio no es una tarea trivial, sino que exige ser abordada con el mayor rigor posible. La aplicación de actuaciones específicas y óptimas para una correcta conservación y preservación del patrimonio cultural requiere de documentación exhaustiva, completa y precisa del bien, que refleje con la máxima fidelidad su estado. Esto es particularmente cierto en el caso de bienes culturales con alta vulnerabilidad o susceptibles de degradación a corto o largo plazo, como son los abrigos pictóricos de arte rupestre. La mayoría de estos yacimientos se encuentran en recintos abiertos, expuestos a numerosos factores ambientales o naturales, sin olvidar su degradación progresiva derivada de acciones antrópicas (Giesen *et al.*, 2014: 49).

Actualmente las labores de documentación han dejado de ser ámbito restringido a arqueólogos y con mayor frecuencia implican la acción coordinada de técnicos, investigadores y profesionales procedentes de múltiples disciplinas. Esta colaboración conlleva la introducción del uso de nuevas tecnologías que permiten alcanzar de manera efectiva las altas exigencias requeridas en este tipo de trabajos, como son las directrices europeas. Mediante imágenes digitales, junto con técnicas fotogramétricas, podemos obtener modelos 3D métricos, fotorrealistas y precisos de una forma relativamente fácil, rápida y económica (Balletti *et al.*, 2015: 215-222; Domingo *et al.*, 2013: 1879-1889).

Aunque el empleo de estas técnicas novedosas supone que cuestiones como la geometría queden resueltas, todavía quedan aspectos que deben ser abordados con mayor rigurosidad, como es el color. El color es un atributo descriptivo básico que suministra información relevante respecto al estado del objeto y es crucial en documentación patrimonial, especialmente en labores de conservación y preservación (Boochs *et al.*, 2014: 13; Korytkowski y Olejnik-Krugly, 2017: 333; Ruiz y Pereira, 2014: 338).

El problema fundamental es que el color es una cuestión de percepción y, hasta cierto punto, de interpretación subjetiva. Un mismo objeto puede ser percibido de forma diferente en función de la iluminación y del observador. Frecuentemente, la metodología empleada para el registro del color en documentación quedaba restringida a procesos subjetivos mediante cartas de color y dependientes de la experiencia del observador, lo que limita los resultados obtenidos (Ruiz y Pereira, 2014: 344). Aunque el empleo de imágenes digitales supone un nuevo enfoque en el registro del color, su empleo por sí mismas no es suficiente.

En este artículo se pretende medir el color de forma rigurosa, precisa y lo más próxima posible a la realidad mediante la caracterización colorimétrica de sensores digitales. El objetivo de la caracterización es transformar la señal dependiente del sensor a espacios de color independientes del dispositivo, adaptándose a las recomendaciones de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). De esta forma, se podrá emplear una cámara para el registro del color como si se tratara de un colorímetro (Martínez-Verdú *et al.*, 2003: 279-295). Como aspecto fundamental y novedoso de este trabajo, cabe destacar el desarrollo de *software* propio en código abierto para el tratamiento de datos colorimétricos y la caracterización de sensores, denominado pyColourimetry (Molada-Tebar *et al.*, 2017: 48-53).

Por último, cabe indicar que la metodología se ha aplicado con éxito sobre diferentes escenas pertenecientes a abrigos de arte rupestre levantino del Barranc de la Valltorta (Ares del Maestrat, Castellón), sin duda uno de los conjuntos pictóricos más singulares del arco mediterráneo de la península ibérica, incluido en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 1998.

Caracterización de sensores digitales

La incorporación de imágenes digitales ha supuesto un avance metodológico en las tareas de captura, almacenamiento y análisis en documentación del patrimonio. Sin embargo, los datos registrados directamente por el sensor de la cámara no pueden considerarse estrictamente colorimétricos. Aunque la mayoría de las cámaras digitales actuales trabajan en espacios de color basados en el sistema RGB, esta denominación constituye un marco genérico y en realidad el espacio RGB no es único, sino que es dependiente del sensor (Chang-Rak y Maeng-Sub, 1999: 585). Diferentes cámaras obtendrán diferentes señales, incluso para escenas idénticas tomadas bajo las mismas condiciones de exposición o iluminación.

Un enfoque al problema del registro preciso del color se basa en el uso de perfiles del International Color Consortium (ICC) durante el revelado crudo de imágenes digitales, o de forma simplificada, perfiles de cámara (Pereira Uzal, 2013; Iturbi *et al.*, 2018: 61-62). Una alternativa adecuada al empleo de perfiles de color es la caracterización colorimétrica de sensores digitales, que permite obtener resultados colorimétricamente precisos. La caracterización es un método objetivo, dado que los resultados no dependen del observador y, por tanto, no interviene ninguna interpretación subjetiva (Molada-Tebar *et al.*, 2018: 56).

Mediante la caracterización se establece la relación matemática entre la información procedente de la imagen digital que contiene la carta de color empleada como referencia y sus datos colorimétricos CIE previamente medidos (Barnard y Funt, 2002: 154-157; Pointer *et al.*, 2001: 67). De los diferentes modelos empleados en la caracterización, experiencias previas muestran que se obtienen buenos resultados a partir de un ajuste polinómico de segundo orden (Hong *et al.*, 2001: 76). Estos modelos ofrecen resultados similares al empleo de otras técnicas más complejas como son las redes neuronales, con la ventaja de la reducción de tiempo en procesamiento y entrenamiento del modelo (Chang-Rak y Maeng-Sub, 1999: 586; Cheung *et al.*, 2004: 25; Finlayson *et al.*, 2015: 1460).

De forma esquemática, puede ser considerada como el resultado de la combinación de dos métodos: directo e indirecto (figura 1). Disponemos de datos colorimétricos CIE XYZ obtenidos mediante instrumental específico –colorímetro o preferiblemente espectrofotómetro– de la carta de color de referencia –«medición directa»–, junto con los niveles digitales RGB registrados por el sensor de la cámara –«medición indirecta»–. Mediante la caracterización obtenemos las ecuaciones de transformación entre los datos de entrada RGB referidos a un espacio de color dependiente del sensor a uno independiente, de base física, como es el espacio CIE XYZ. Por último, dado que la mayoría de los dispositivos de visualización modernos están configurados para mostrar imágenes en el espacio sRGB, es necesario efectuar una última transformación para obtener la imagen final de salida en este espacio de color.

El empleo de cámaras caracterizadas ofrece numerosas ventajas en documentación patrimonial. Tras la caracterización, una cámara fotográfica digital convencional puede ser usada para el registro preciso del color, simulando un colorímetro (Martínez-Verdú *et al.*, 2003: 293). Esto significa no solo una considerable reducción de tiempo y costo, sino que permite el registro del color de escenas pictóricas completas, y su comparación con escenas obtenidas por diferentes sensores, épocas o condiciones de iluminación, al estar registradas en un mismo espacio de color e independiente del dispositivo.

No debe confundirse la caracterización con procesos de mejora o realce visual de imágenes. Mientras que la caracterización pretende el registro preciso del color, las técnicas de mejora o realce pretenden destacar o realzar las figuras pictóricas, o detectar especímenes que escapan a simple vista, por ejemplo, mediante imágenes multiespectrales. El objetivo fundamental de las

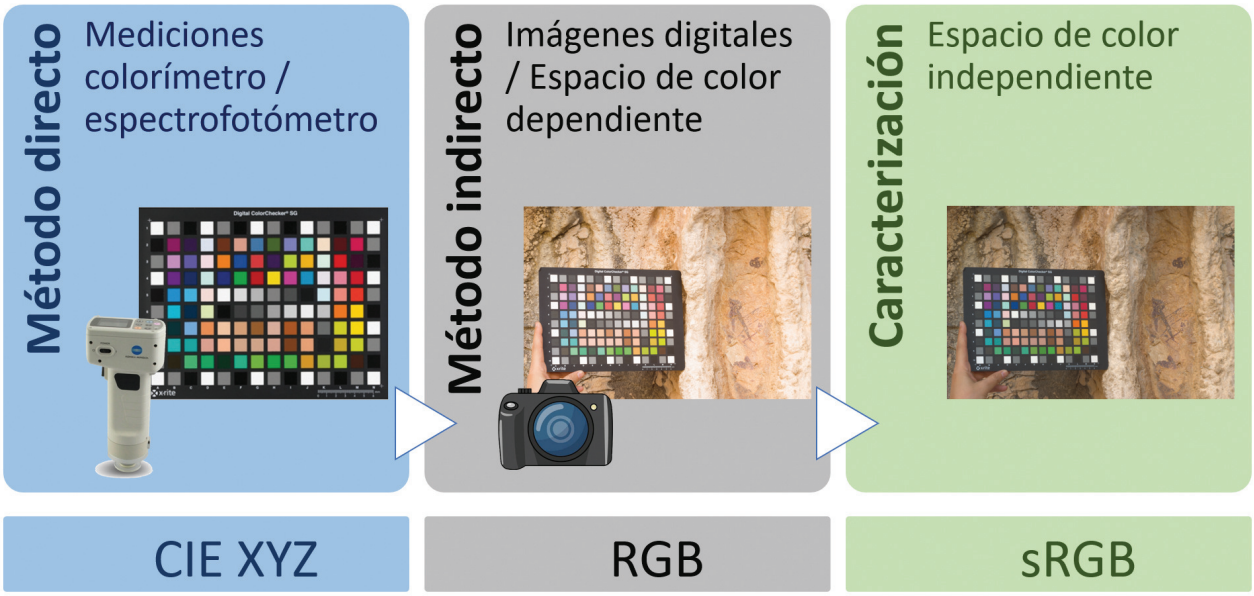

Figura 1. Esquema caracterización cámaras digitales. Combinación del método directo e indirecto.

técnicas de realce es facilitar la elaboración de calcos digitales, sacrificando la información rigurosa colorimétrica (Domingo *et al.*, 2015: 84; Fernández-Lozano *et al.*, 2017: 161-164).

Software para el tratamiento de datos colorimétricos y la caracterización de sensores: pyColourimetry

La caracterización de sensores requiere de *software* específico que permita trabajar de forma simultánea con datos colorimétricos y con imágenes digitales. El tratamiento de datos colorimétricos habitualmente se aborda con *software* propio del fabricante del instrumental. Para el tratamiento digital de imágenes las opciones son mucho más amplias. Sin embargo, especialmente en el *software* de edición de imágenes tipo Adobe Photoshop o GIMP, a pesar de su gran versatilidad y funcionabilidad, el tratamiento del color se basa en perfiles como método más avanzado, no permitiendo al usuario pleno control o acceso al engranaje interno durante las diferentes fases metodológicas. Por otro lado, la intervención del usuario se limita a la selección de la opción de realce de imágenes más adecuada bajo un criterio subjetivo.

Debido a esta carencia tecnológica se ha desarrollado *software* propio, denominado pyColourimetry, para el tratamiento de datos colorimétricos y la caracterización de sensores, que permite además trabajar con imágenes en formato *raw* o crudo (Molada-Tebar *et al.*, 2017: 48-53). El lenguaje de programación elegido es Python, un lenguaje multiplataforma, de código abierto, intuitivo, fácil de implementar y de amplia difusión en todo tipo de aplicaciones científicas (Python Software Foundation, 2010).

El sistema consiste en un conjunto de módulos –ficheros fuente Python con extensión .py– que pueden ser manejados por el usuario a través de la interfaz gráfica de usuario (GUI) implementada, pieza central del *software* (figura 2). La versión actual permite al usuario la obtención de medidas colorimétricas directas mediante el colorímetro CS-100A de Konica Minolta –*serialPort.py*–, el tratamiento de datos colorimétricos y transformaciones entre espacios de color –*myColour.py*–, la extracción de datos RGB crudos de la imagen, el cálculo de las ecuaciones de transformación para la caracterización de cámaras, el análisis estadístico de resultados –*characterisation.py*–, la aplicación de las ecuaciones de transformación sobre la imagen original y, finalmente, la obtención de la imagen de salida en el espacio de color sRGB –en formato TIF–, preparadas para ser visua-

lizadas con máxima calidad en cualquier dispositivo compatible con este espacio de color.

La GUI se ha diseñado de forma que sea atractiva, sencilla e intuitiva en su manejo para el usuario, pero sin perder funcionalidad, permitiendo al usuario un control pleno del flujo de trabajo para cada una de las fases durante la caracterización de cámaras. En la figura 3 se muestra a modo de ejemplo una captura de pantalla de la interfaz gráfica, en particular la extracción de datos crudos RGB de la imagen de entrada, en el que pueden observarse algunas de las principales opciones de los menús implementados.

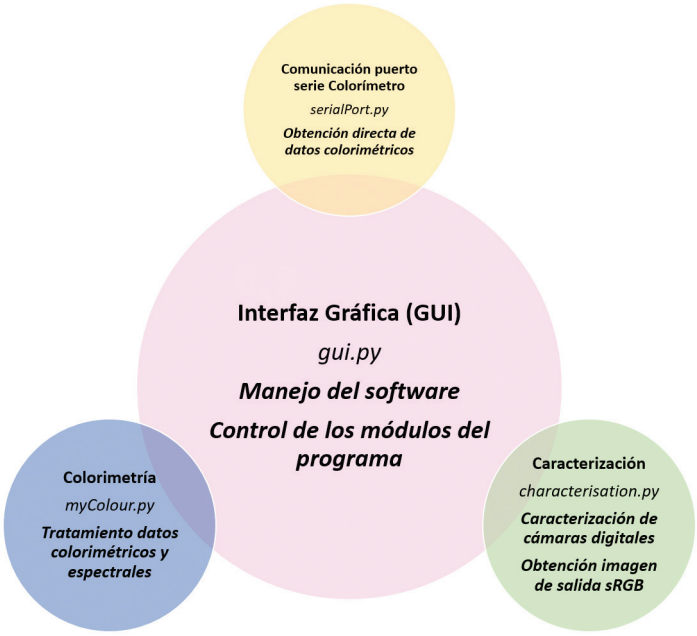

Figura 2. Principales módulos del *software* pyColourimetry.

Para asegurar el rigor colorimétrico se han considerado en todo momento las recomendaciones publicadas en el informe técnico publicado por la CIE en 2004. Se incluyen aspectos fundamentales tales como el iluminante, el observador, los estándares de referencia para la reflectancia, las condiciones de visión, la iluminación, las ecuaciones para el cálculo de valores triestímulo, las coordenadas de cromaticidad, los espacios de color, las diferencias de color y las fórmulas auxiliares (CIE 2004).

Todas estas características convierten a pyColourimetry en un *software* riguroso, versátil y de amplia funcionalidad para el tratamiento de datos colorimétricos y espectrales, así como para el

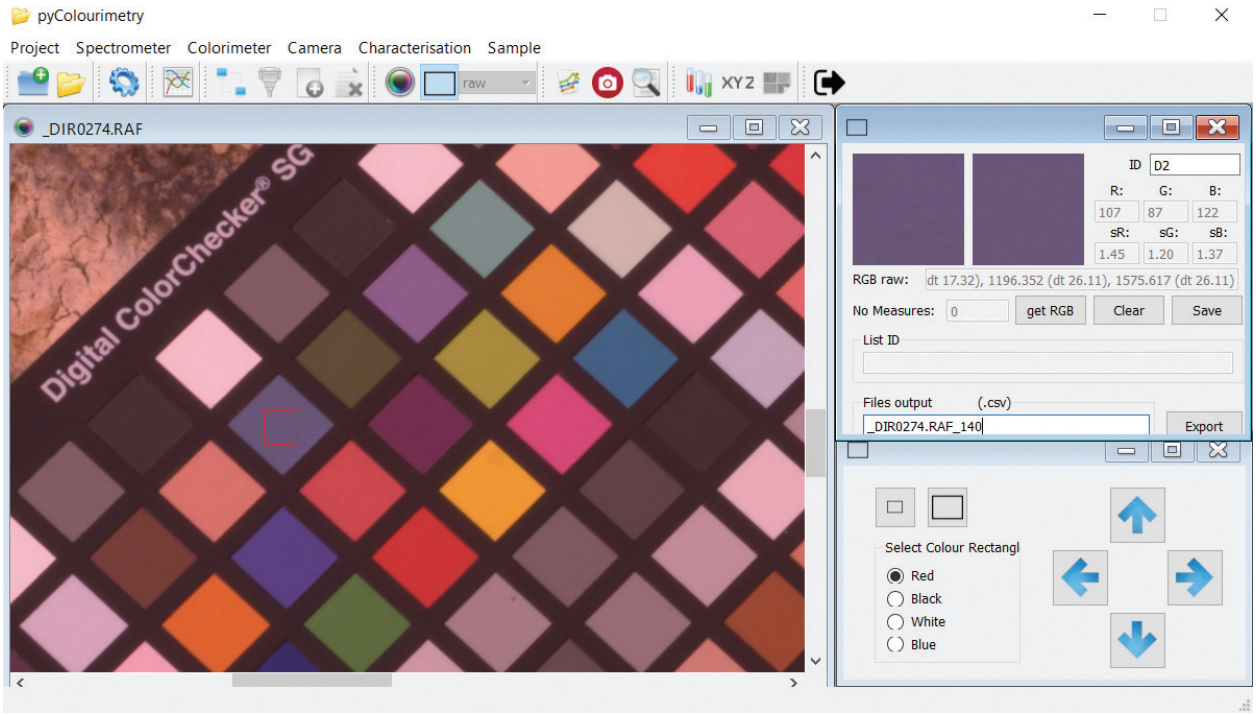

Figura 3. Ejemplo GUI de pyColourimetry. Extracción de datos RGB crudos.

procesamiento de imágenes crudas, donde el usuario tiene pleno control durante el proceso de caracterización, lo que permite el análisis y gestión de los resultados obtenidos en cada fase metodológica, y que puede ser usado en tareas relativas a la documentación patrimonial.

Caso de estudio: la Cova dels Cavalls

Se ha aplicado la metodología de caracterización de cámaras digitales sobre un conjunto de imágenes pertenecientes a la Cova dels Cavalls. Este abrigo está englobado dentro de uno de los conjuntos más singulares de arte rupestre levantino, pertenecientes al arco mediterráneo de la península ibérica, integrado dentro del Barranc de La Valltorta, en el término municipal de Tírig, Castellón (Martínez y Villaverde, 2002). Se trata, por tanto, de un ámbito de aplicación idóneo para el análisis del comportamiento de la caracterización en este tipo de escenarios de arte prehistórico.

Para la toma fotográfica se ha empleado una cámara digital DLSR Fujifilm IS PRO. Dispone de un sensor CCD integrado de alta sensibilidad y bajo ruido, con una profundidad de 14 bits/píxel, que permite trabajar en modo *raw* (extensión RAF).

Siempre es aconsejable trabajar con imágenes crudas en formato *raw*, frente al empleo de datos RGB procesados. En el flujo de trabajo típico con datos *raw* –denominado revelado *raw* en terminología fotográfica–, los datos RGB originales son transformados aplicando una serie de complejas operaciones como balance de blancos, restauración de píxeles –*demosaicing*– y transformaciones de color mediante filtros de color (CFA), siendo los más usuales los conocidos como filtros Bayer (Ramanath *et al.*, 2005: 35). Estas operaciones se aplican generalmente de modo automático, sin que el usuario intervenga, y, de hecho, el usuario no es conocedor de qué correcciones o en qué modo exactamente han sido aplicadas, dado que suelen ser procedimientos muy herméticos.

No hay que olvidar que la aplicación de estas correcciones automáticas tiene la finalidad de conseguir imágenes visualmente más atractivas para el usuario desde una perspectiva meramente fotográfica, donde los valores colorimétricos no son prioritarios. Puesto que la finalidad de la caracterización colorimétrica de cámaras es el rigor en el registro del color, trabajaremos con datos crudos al tratarse de la información más próxima a la que podemos acceder en relación a la señal registrada por el sensor.

Para este caso de estudio disponemos de un total de cuatro imágenes crudas correspondientes a la misma escena pictórica de arte rupestre, tomada en un breve intervalo de tiempo y dejando fija la ISO-100, la distancia focal –60 mm– y la apertura de la cámara –f/22–. El único parámetro que se ha modificado es el tiempo de exposición, lo que a efectos prácticos simula de manera aproximada diferentes condiciones lumínicas.

Las cuatro imágenes son 0272 (figura 4a), 0273 (figura 4b), 0274 (figura 4c) y 0275 (figura 4d), con exposiciones de 1, 1/2, 1/5 y 1/10 segundos respectivamente. Se puede observar claramente el efecto que tiene el cambio de exposición en el registro del color. El procesamiento de estas cuatro imágenes permitirá evaluar el comportamiento de la caracterización para escenas bajo diferente iluminación.

Para la caracterización es necesario que las imágenes contengan una carta de color como referencia colorimétrica, con un conjunto de fichas o parches de color con coordenadas triestímulo conocidas. Se ha optado por la X-Rite ColorChecker SG Digital Colour Chart, empleada con frecuencia en el procesado digital de imágenes. Contiene un total de 140 parches que cubren ampliamente la gama de color en el espectro visible.

Figura 4. Conjunto de imágenes originales: a) 0272 (1 s); b) 0273 (1/2 s); c) 0274 (1/5 s); d) 0275 (1/10 s).

Generalmente el fabricante de cada carta de color suministra información de los parches, aunque no siempre es información fácilmente accesible. Además, no suele ser práctica habitual que se especifique bajo qué condiciones concretas se ha efectuado la medición. Por tanto, para evitar errores disponemos de nuestros propios datos CIE XYZ para los parches de color de la X-Rite, adquiridos mediante un espectrofotómetro Konica Minolta CM-600d para el observador estándar de dos grados e iluminante D65.

Flujo de trabajo: fases metodológicas para la caracterización de cámaras

La mayoría de las cámaras tricromáticas digitales capturan el color en alguna variante del denominado espacio RGB. El problema es que este espacio no es único, por lo que la señal registrada por la cámara será dependiente del sensor que lleve incorporado. Esto implica que los valores RGB procedentes de la cámara no son por sí mismos datos estrictamente colorimétricos; es decir, no se corresponden con las coordenadas triestímulo basadas en el observador estándar CIE (Chang-Rak y Maeng-Sub, 1999: 585).

Para la caracterización de la cámara necesitamos una imagen de entrada –preferiblemente en formato crudo–, las coordenadas CIE XYZ de la carta de color usada como referencia y los datos RGB extraídos de la imagen correspondientes a los parches seleccionados. Estos dos conjuntos de datos, los RGB y sus correspondientes CIE XYZ, serán los que se empleen para la determinación de los parámetros de transformación entre ambos espacios de color (Molada-Tebar *et al.*, 2018: 49-50; Westland *et al.*, 2012: 143-157).

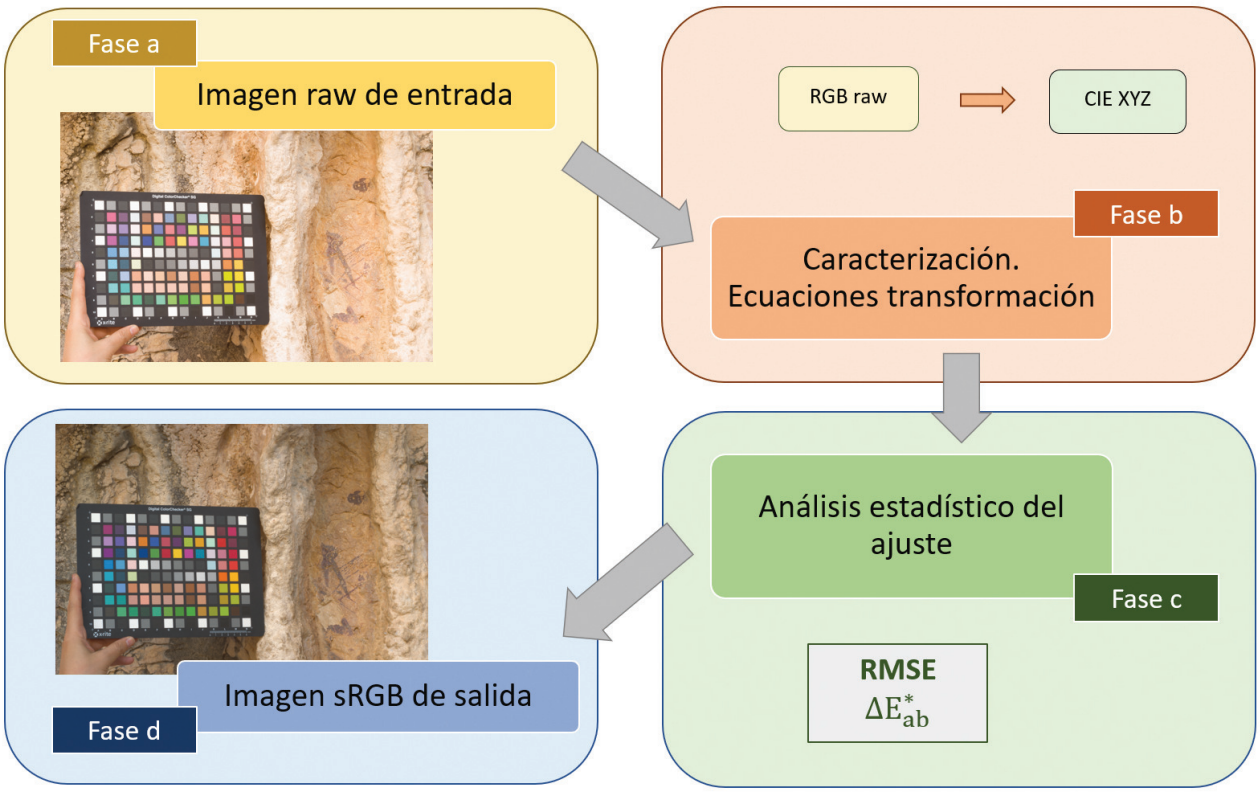

Figura 5. Fases metodológicas para la caracterización colorimétrica de cámaras digitales.

Podemos dividir el proceso de caracterización en cuatro fases: extracción de datos RGB de la imagen digital, obtención de las ecuaciones de transformación, análisis estadístico del ajuste y obtención de la imagen de salida sRGB (figura 5). A continuación, en líneas generales, resumimos los principales ítems para cada una de las fases metodológicas.

— Fase a. Extracción de datos RGB crudos de la imagen que contiene la carta de color. pyColourimetry permite acceder a los valores crudos sin interpolación almacenados directamente por el sensor de la cámara mediante la herramienta DCRAW.

— Fase b. Obtención de las ecuaciones de transformación (caracterización). Aunque los datos RGB crudos tienden a ser lineales, se obtienen mejores resultados aplicando polinomios de segundo orden mediante un ajuste por mínimos cuadrados. Se desaconseja emplear polinomios de orden mayor, aunque los residuos disminuyan al aumentar el grado del polinomio, por la saturación cromática que pueden tener en los datos RGB transformados, cuyo origen es el sobreajuste del modelo polinómico (Molada-Tebar *et al.*, 2018: 56).

— Fase c. Análisis de los resultados tras el ajuste. La calidad del ajuste se efectuará mediante la evaluación estadística de los residuos CIE XYZ y del error medio cuadrático (RMS). Dado que el espacio de color CIE XYZ, por definición, no es visualmente uniforme –no representan igual las diferencias percibidas para los estímulos de color sobre la totalidad del dominio cromático–, además se requiere examinar las diferencias de color entre las coordenadas triestímulo teóricas de la carta y las predichas tras el ajuste. En colorimetría básica las diferencias de color se obtienen en el espacio CIELAB, al ser perceptualmente más uniforme. De las fórmulas disponibles para el cálculo de las diferencias de color, se ha optado por la ΔE^*_{ab} o CIE76 (CIE, 2004: 18), ya que se ajusta mejor al tipo de datos y a las condiciones de medición en los yacimientos arqueológicos.

— Fase d. Aplicación de las ecuaciones de transformación para la obtención de la imagen caracterizada en el espacio de color sRGB. Aplicamos los coeficientes de la transformación sobre la imagen de entrada y obtenemos las coordenadas triestímulo CIE XYZ de los píxeles. Dado que la mayoría de los dispositivos no están preparados para trabajar con imágenes en este espacio de color, transformaremos las coordenadas al espacio sRGB que sí es compatible con la mayoría de los dispositivos.

Desde un punto de vista colorimétrico, el flujo de trabajo propuesto es riguroso al tratarse de una metodología en la que no interviene la subjetividad del observador. Se trabaja directamente con datos crudos, evitando así cualquier procesado previo de los datos procedentes de la cámara. Por otra parte, el análisis estadístico de los residuos y las diferencias de color contribuye a que el usuario pueda seleccionar el ajuste óptimo que aplicar para cada caso en particular.

Mediante la caracterización colorimétrica de cámaras digitales logramos transformar los datos de entrada RGB dependientes del sensor al espacio de color independiente CIE XYZ. De este modo logramos un registro preciso y riguroso del color, en un espacio de base física e independiente del dispositivo, de escenas completas de arte rupestre.

Resultados

Las ecuaciones de transformación entre el espacio RGB dependiente de la cámara y los valores CIE XYZ teóricos de los parches se han efectuado mediante un ajuste mínimo cuadrático, empleando un modelo polinomial de segundo orden. Un primer análisis de resultados debe realizarse evaluando los errores medios cuadráticos (RMS) de los residuos en unidades CIE XYZ junto con los valores para las diferencias de color ΔE^*_{ab} alcanzados tras el ajuste (tabla 1). Los residuos de menor valor se obtienen en la imagen 0274 –en torno a 2 unidades CIE XYZ–, mientras que los valores más elevados se alcanzan en la imagen 0272, que, como puede observarse en la tabla 1, para las coordenadas Y, Z están en torno a 4 unidades CIE.

Tabla 1. Valores RMS y diferencias de color

Imagen	*Tiempo exposición*	*RMS CIE*			*Media (CIE76)*
		X	*Y*	*Z*	
0272	1 s	3 187	3 929	3 972	5.48
0273	1/2 s	2 479	2 443	2 825	3.67
0274	1/5 s	2 185	2 096	2 308	3.26
0275	1/10 s	2 651	2 649	3 075	3.70

Si comparamos ambas imágenes, los valores alcanzados para los residuos tienen sentido desde un punto de vista colorimétrico y son los resultados esperados. La imagen 0272 se observa claramente que está sobreexpuesta (figura 4a), mientras que la exposición para la imagen 0274 podemos decir que se acerca a valores normales (figura 4c).

Por otra parte, los valores de las diferencias de color ΔE^*_{ab} obtenidos siguen esta misma tendencia. La menor ΔE^*_{ab} media se corresponde a la imagen 0274, con un valor de 3,26, mientras que el valor de la imagen 0272 supera las 5 unidades. El peor resultado se obtiene en la imagen sobreexpuesta, frente al mejor resultado obtenido en la imagen con exposición normal. Valores superio-

Figura 6. Imágenes sRGB obtenidas tras la caracterización: a) 0272c; b) 0273c; c) 0274c; d) 0275c.

res a 4 unidades CIELAB para ΔE^*_{ab} indican que los resultados no son satisfactorios para la caracterización de esta imagen (Molada-Tebar *et al.*, 2018: 49).

Una vez analizados los valores de los residuos y las diferencias de color ΔE^*_{ab} alcanzadas, podemos efectuar un análisis visual de las imágenes sRGB de salida obtenidas tras la caracterización (figuras 6a, 6b, 6c y 6d). Los resultados son claramente satisfactorios. Independientemente de las condiciones de iluminación, las diferencias de color entre imágenes son prácticamente imperceptibles a simple vista, incluso para la imagen sobreexpuesta.

Discusión

El empleo de imágenes digitales ha supuesto una notable mejora en los trabajos relacionados con la documentación, conservación y preservación del patrimonio cultural. Sin embargo, su empleo por sí mismo no garantiza un correcto registro del color. Se requiere la adopción de técnicas rigurosas que ofrezcan resultados precisos que permitan registrar el color lo más próximo posible a la realidad (Balletti *et al.*, 2015: 215-222).

Los resultados obtenidos gracias a la caracterización colorimétrica de cámaras digitales mediante polinomios de segundo orden muestran que se trata de un método apto para el registro del color en documentación de arte rupestre. Es un método riguroso y objetivo desde un punto de vista colorimétrico al prescindir de la subjetividad del observador mediante la combinación de técnicas directas e indirectas (Molada-Tebar *et al.*, 2018: 47-57).

Los errores RMS tienden a disminuir en las imágenes a medida que nos acercamos a valores adecuados de exposición (tabla 1). Por ello recalcamos la importancia de una buena exposición en el proceso de la toma fotográfica. El color depende, entre otros factores, de la iluminación, las características intrínsecas del propio objeto, el efecto del contorno o la geometría. La iluminación es sin duda un factor determinante. Si debido a la sobreexposición en la imagen se produce una pérdida de cromaticidad de los parches de la carta de color (figura 4a), conllevará asociado un peor ajuste de los datos al modelo definido mediante polinomios.

De forma análoga, llegamos a la misma conclusión atendiendo a los valores de las diferencias de color ΔE^*_{ab}. De nuevo, se aprecia el efecto que tiene la iluminación en las imágenes caracterizadas. Los valores ΔE^*_{ab} alcanzados suponen la no aceptación de la imagen 0272c caracterizada –con un valor de 5,48 unidades CIELAB–, mientras que el mejor resultado se obtiene con la imagen 0274.

Podemos comparar las imágenes originales (figura 4) con sus correspondientes imágenes tras la caracterización (figura 6). Independientemente de las diferentes condiciones de iluminación forzadas al cambiar la exposición de la cámara, se observa que todas las imágenes caracterizadas han sido llevadas con éxito al mismo rango cromático, con diferencias visuales casi imperceptibles, en uno de los espacios de color CIE típicos definidos para el observador estándar de dos grados e iluminación D65. Únicamente en la imagen 0272c caracterizada se observa una ligera saturación, mayor que en el resto de las imágenes, debido a la sobreexposición de los datos originales. Es precisamente en dicha imagen donde se ajusta peor el modelo polinómico y se obtienen, asimismo, las mayores diferencias de color ΔE^*_{ab}.

Dado el papel crítico de la iluminación durante el proceso de caracterización, es evidente que si se desea alcanzar los mejores resultados, el tiempo de exposición, junto con el resto de los parámetros de la cámara, deben ser tenidos en cuenta en el momento de la toma fotográfica.

Conclusión

Es innegable la importancia del color en documentación del patrimonio. El registro preciso del color suministra información descriptiva básica que permite, entre otros aspectos, la correcta discriminación entre el pigmento y el soporte, así como analizar su estado en un periodo concreto y su degradación con el paso del tiempo. Dada su trascendencia, la medida y el tratamiento del color no pueden efectuarse de una forma trivial, sino que exigen ser abordados mediante procedimientos rigurosos desde una perspectiva colorimétrica. En vista de los resultados alcanzados, la metodología expuesta en este artículo para la caracterización de sensores cumple con la rigurosidad requerida en el tratamiento del color, si bien es fundamental prestar especial atención a una correcta exposición de cada una de las imágenes.

El procedimiento proporciona un registro correcto, preciso y objetivo del color, lo más próximo posible a la realidad. Mediante la caracterización a partir de imágenes RGB procedentes de una cámara digital convencional podemos obtener imágenes en un espacio de color sRGB independiente del sensor, calculadas a partir de coordenadas triestímulo colorimétricas, con mayor rigurosidad cuanto mejor expuesta haya sido la toma. La caracterización de cámaras digitales puede usarse en combinación con otras técnicas para el estudio y conservación del patrimonio, como son el escaneado láser, la fotogrametría o las aplicaciones de realidad aumentada; metodologías ampliamente usadas en documentación y difusión del patrimonio cultural.

El *software* desarrollado, pyColourimetry, en proceso constante de mejora y optimización, cubre la carencia de programas comerciales que no permiten el tratamiento de datos colorimétricos e imágenes crudas de forma conjunta. Es una herramienta versátil, de manejo intuitivo, donde el usuario tiene pleno control durante cada una de las fases metodológicas. Facilita la adquisición de datos, la medida de coordenadas colorimétricas, el ajuste polinómico para la caracterización y la

obtención final de imágenes sRGB. Esto lo convierte en un *software* con elevadas prestaciones que puede aplicarse con éxito en las labores de documentación, conservación y preservación del patrimonio cultural, tanto en trabajos de producción como de investigación.

Agradecimientos

Esta investigación está financiada en parte gracias al Programa de Ayudas de Investigación y Desarrollo PAID-01-16 de la Universitat Politècnica de València, mediante una beca FPI-UPV-2016 Sub 1. Los autores además agradecen el soporte financiero del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto «Análisis espectrofotométrico y calibración de cámaras aplicado al estudio de arte rupestre» (HAR2014-59873-R). Asimismo, los autores agradecen a la Dirección General de Cultura y Patrimonio de la Conselleria d'Educació, Investigació, Cultura i Esport, de la Generalitat Valenciana, la autorización para llevar a cabo la documentación arqueológica 3D de la Cova del Cavalls de Tírig.