

Instrumental color measurements of automotive samples with convex cylindrical curvatures under diffuse lighting

Medidas instrumentales de color de muestras de automoción con curvaturas cilíndricas convexas bajo iluminación difusa

M. Melgosa^{1*}, F. J. Rodríguez-Pulido^{2,S}, L. Gómez-Robledo^{3,S}, M. Tejada-Casado³,
R. Bermejo^{4,S}, M. A. Murillo⁵, F. J. Heredia^{2,S}

1. Grupo de Investigación FQM381 de la Junta de Andalucía, Universidad de Granada, Granada (España).

2. Laboratorio de Color y Calidad de Alimentos, Área de Nutrición y Bromatología, Facultad de Farmacia, Universidad de Sevilla, Sevilla (España).

3. Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada (España)

4. Departamento de Química Física y Analítica, Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, Linares (España).

5. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Física, Cartago (Costa Rica).

(*) E-mail: mmelgosa@ugr.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 13/10/2023

Accepted: 19/10/2023

DOI: 10.7149/OPA.57.1.51166

ABSTRACT:

Although car bodies often have curved surfaces sprayed with solid or effect colors, instrumental color measurements of these surfaces are usually carried out on flat samples with multi-angle spectrophotometers. We used a DigiEye® instrument, equipped with diffuse lighting, to measure color in different areas on the surface of 22 car body samples (105 mm wide x 148 mm high), 10 with solid colors and 12 with effect colors. Each measured sample had 5 convex cylindrical curvatures with radii ranging from 50.4 mm to infinity (flat sample). On the average, color variations are 3-4 times greater in the effect samples than in the solid samples, as deduced from measurements in 27 mm x 36 mm rectangles and circular areas of 8 mm in diameter 32 mm apart. For solid color pairs, the color differences between analogous regions of 8 mm diameter were very similar (standard deviations below 0.2 CIELAB units). For samples pairs with solid colors there was a high linear correlation ($r > 0.95$) between the color differences measured with DigiEye® at 8 mm diameter analogous regions and BYK-mac measurements with 45°/110° geometry, but for color pairs with effect colors the linear correlation between measurements with these two instruments was always very low ($r < 0.5$).

Key words: Color difference, solid and effect color, curved sample, automotive sample.

RESUMEN: Aunque las carrocerías de los coches suelen ser superficies curvadas pintadas con colores sólidos o de efecto, las medidas instrumentales del color de estas superficies se suelen realizar sobre muestras planas con espectrofotómetros multiángulo. Hemos utilizado un DigiEye®, equipado con iluminación difusa, para medir el color en diferentes zonas sobre la superficie de 22 muestras de carrocerías de coches (105 mm ancho x 148 mm alto), 10 con colores sólidos y 12 con colores de efecto. Cada muestra medida tenía 5 curvaturas cilíndricas convexas con radios comprendidos entre 50.4 mm e infinito (muestra plana). Las variaciones de color son 3-4 veces mayores en las muestras de efecto respecto a las sólidas, según se deduce de medidas en rectángulos de 27 mm x 36 mm y en zonas circulares de 8 mm de diámetro separadas entre sí 32 mm. Para pares con colores sólidos las diferencias de color entre regiones análogas de 8 mm de diámetro son muy similares (desviaciones típicas inferiores a 0.2 unidades CIELAB). Para pares de muestras con colores sólidos hay una alta correlación lineal ($r > 0.95$) entre las diferencias de color medidas con DigiEye® en zonas análogas de 8 mm de diámetro y las medidas de BYK-mac con geometría 45°/110°, pero para pares con colores de efecto la correlación lineal entre las medidas de ambos instrumentos es siempre muy baja ($r < 0.5$).

Palabras clave: Diferencia de color, color sólido y de efecto, muestra curvada, carrocería.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] M. Melgosa, A. Trémeau, G. Cui, *Advanced color image processing and analysis (Chapter 3: Colour difference evaluation)*. Editor: C. Fernández-Maloigne, Springer (2013). ISBN: 978-1-4419-6189-1.
- [2] CIE 015:2018, *Colorimetry, 4th Edition*. CIE Central Bureau, Vienna (2018).
- [3] D. L. MacAdam, "Visual sensitivities to color differences in daylight," *J. Opt. Soc. Am.* **32**, 247-274 (1942).
- [4] G. Wyszecki, W. S. Stiles. *Color Science – Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition*. Capítulos 3 y 6. John Wiley & Sons Inc. (1982).
- [5] M. Melgosa, M. M. Pérez, A. El Moraghi, E. Hita, "Color discrimination results from a CRT device: Influence of luminance," *Color Res. Appl.* **24**, 38-44 (1999).
- [6] M. R. Luo, Q. Xu, M. Pointer, M. Melgosa, G. H. Cui, C. J. Li, K. D. Xiao, M. Huang, "A comprehensive test of colour-difference formulae and uniform colour spaces using available visual datasets," *Color Res. Appl.* **48**, 267-282 (2023).
- [7] J. F. Salmerón, L. Gómez-Robledo, M. A. Carvajal, R. Huertas, M. J. Moyano, B. Gordillo, A. J. Palma, F. J. Heredia, M. Melgosa, "Measuring the colour of virgin olive oils in a new colour scale using a low-cost portable electronic device," *J. Food Eng.* **111**, 247-254 (2012).
- [8] M. A. Murillo, F. J. Rodríguez-Pulido, F. J. Heredia, M. Melgosa, J. Pacheco, R. Vargas, E. F. Montero, D. Gutiérrez, "Color evolution during a coating process of pharmaceutical tablet cores by random spraying," *Color Res. Appl.* **44**, 160-167 (2019).
- [9] M. C. Murillo, A. B. García, T. Lafarga, M. Melgosa, R. Bermejo, "Color of extra virgin olive oils enriched with carotenoids from microalgae: influence of ultraviolet exposure and heating," *Grasas Aceites* **73**, e455 (2022).
- [10] CIE 175:2006, *A framework for the measurement of visual appearance*. CIE Central Bureau, Vienna (2006)
- [11] CIE 199:2011, *Methods for evaluating colour differences in images*. CIE Central Bureau, Vienna (2011).
- [12] A. Cruz, "Reflectancia de superficies cóncavas de aluminio anodizado," en Libro Conmemorativo de 25 Simposiums, Comité Español de Iluminación (2000), páginas 62-67. Simposio de Marbella, 1979. Editor: Cactus Press Ltd., Barcelona, Depósito Legal B-21210/2000.
- [13] R. Deeb, D. Muselet, M. Hebert, A. Trémeau, "Spectral reflectance estimation from one RGB image using self-interreflections in a concave object," *Appl. Opt.* **57**, 4918-4929 (2018).
- [14] CIE 242:2020, *Photometry of curved and flexible OLED and LED sources*. CIE Central Bureau, Vienna (2020).
- [15] G. Vladoic, D. Novakovic, N. Kasikovic, D. Avramovic, N. Milic, "Color appearance of textile materials applied to various geometrical shapes," *Text. Res. J.* **84**, 1191-1199 (2014).
- [16] R. He, K. Xiao, M. Pointer, M. Melgosa, Y. Bressler, "Optimizing parametric factors in CIELAB and CIEDE2000 color-difference formulas for 3D-printed spherical objects," *Materials* **15**, 4055 (2022).
- [17] M. Huang, J. Pan, Y. Wang, Y. Li, X. Hu, X. Li, D. Xiang, C. Hemingray, K. Xiao, "Influence of shape, size, and gloss on the perceived color difference of 3D printed objects," *J. Opt. Soc. Am. A* **39**, 916-926 (2022).
- [18] S. Mizushima, Y. Mizokami, "Diffuseness of illumination suitable for reproducing a faithful and ideal appearance of an object," *J. Opt. Soc. Am. A* **39**, 401-410 (2022).
- [19] E. Chorro, E. Perales, F. J. Burgos, O. Gómez, M. Vilaseca, V. Viqueira, J. Pujol, F. M. Martínez-Verdú, "The minimum number of measurements for colour, sparkle and graininess in gonio-apparent materials," *Color. Technol.* **131**, 303-309 (2015).
- [20] O. Gómez, E. Perales, E. Chorro, F. J. Burgos, V. Viqueira, M. Vilaseca, F. M. Martínez-Verdú, J. Pujol, "Visual and instrumental assessments of color differences in automotive coatings," *Color Res. Appl.* **41**, 384-391 (2016).



- [21] E. Chorro, E. Perales, V. Viqueira, F. M. Martínez-Verdú, "Study of color perceptibility of gonio-apparent panels with curvature angle," *Color Res. Appl.* **43**, 489-495 (2018).
- [22] CIE Technical Committee 8-17, "Methods for evaluating colour differences between 3D colour objects" (Chair: K. Xiao). <https://cie.co.at/technical-work/jtcs> (último acceso, 5 Marzo 2024).
- [23] CIE Joint Technical Committee 12 (D2/D1/D8), "The measurement of sparkle and graininess" (Chair: A. Ferrero). <https://cie.co.at/technical-work/jtcs> (último acceso, 5 Marzo 2024).
- [24] BYK. Catálogo 2019, páginas 101-103. <https://www.byk-instruments.com/es/catalog> (último acceso, 5 Marzo 2024).
- [25] Z. Huang, H. Xu, M. R. Luo, G. Cui, H. Feng, "Assessing total differences for effective samples having variations in color, coarseness, and glint," *Chin. Opt. Lett.* **8**, 717-720 (2010).
- [26] M. Melgosa, "Request for existing experimental datasets on color differences," *Color Res. Appl.* **32**, 159 (2007).
- [27] M. Melgosa, J. Martínez-García, L. Gómez-Robledo, E. Perales, F. M. Martínez-Verdú, T. Dauser, "Measuring color differences in automotive samples with lightness flop: A test of the AUDI2000 color-difference formula," *Opt. Express* **22**, 3458-3467 (2014).
- [28] J. Hutchings, R. Luo, W. Ji. "Calibrated colour imaging analysis of food" En: *Colour in food: improving quality* (Edited by D. B. MacDougall). Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC (2002).
- [29] R. S. Berns, *Billmeyer's and Saltzman Principles of Color Technology*, 3rd ed., p. 97. Wiley-Interscience (2000).
- [30] M. Huang, H. Liu, G. Cui, M. R. Luo, M. Melgosa, "Evaluation of threshold color differences using printed samples." *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 883-891 (2012).

1. Introducción

Al considerar la diferencia de color entre dos objetos o estímulos dados, suele distinguirse entre la diferencia percibida por observadores reales (ΔV) y la diferencia calculada a partir de medidas de color realizadas con instrumentos, usando lo que se denomina una 'fórmula de diferencia de color' (ΔE) [1]. La diferencia percibida (ΔV) es la respuesta subjetiva del sistema visual humano. Por el contrario, el resultado de una fórmula de diferencia de color (ΔE) es un valor objetivo basado en medidas instrumentales. En numerosas aplicaciones industriales se desea disponer de una fórmula de diferencia de color eficaz, capaz de predecir correctamente las diferencias visualmente percibidas por paneles de observadores con visión normal del color. De este modo en las cadenas de producción industrial se puede usar un control de calidad instrumental (objetivo) en lugar de una evaluación visual de personal especializado (subjetiva). Dicho control de calidad objetivo consiste simplemente en detectar si los valores de ΔE medidos están o no por debajo de una cierta tolerancia preestablecida. Actualmente CIEDE2000 es la fórmula de diferencia de color recomendada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para aplicaciones industriales, cuando las diferencias de color son pequeñas (menores de 5 unidades CIELAB) y las condiciones de iluminación y observación son las más habituales en los procesos industriales [2].

Puede decirse que toda la colorimetría actualmente propuesta por la CIE [2] se basa en experimentos en que se utilizaron estímulos planos (2D) y muy homogéneos, como los obtenidos mediante colorímetros visuales [3], muestras de atlas de color, o muestras generadas mediante distintos procedimientos por diferentes investigadores [4-6]. Sin duda, esta colorimetría CIE ha sido de gran utilidad para lograr la actual especificación numérica del color, así como para el desarrollo de fórmulas de diferencia de color útiles en aplicaciones industriales [7-9]. Sin embargo, es evidente que en la vida real hay situaciones mucho más complejas a las que es necesario prestar atención como, por ejemplo, el estudio de diferencias de color en objetos tridimensionales (3D), la consideración de objetos 3D en los que además del color hay atributos perceptivos adicionales como el brillo, la traslucidez o la textura [10], imágenes complejas [11], etc. El interés por la colorimetría de superficies no planas no es totalmente nuevo [12, 13], si bien es cierto que en los últimos años se ha incrementado muy notablemente [14]. Por ejemplo, en la última década se han publicado trabajos sobre diferencias de color visuales e instrumentales en objetos 3D de distintos materiales [15-18], incluyendo materiales gonioaparentes (materiales cuya apariencia depende de la geometría de iluminación/observación, que suelen además tener ciertas texturas específicas) empleados principalmente en la industria de la automoción [19-21]. Actualmente CIE TC 8-14 [22] investiga sobre la evaluación de diferencias de color en objetos 3D y CIE JTC 12 [23] investiga sobre la medida visual e

instrumental de 'sparkle' y 'graininess' en materiales gonioaparentes. Los términos 'sparkle' y 'graininess' han sido traducidos al español [24] como 'destello' y 'granulado', respectivamente, siendo dos atributos perceptivos adicionales al color. El 'sparkle' se produce con iluminación direccional (pudiendo medirse tanto la intensidad como el área de los destellos) y el 'graininess' cuando la iluminación es difusa. Incluso en inglés la designación de estos atributos no está completamente fijada en la literatura actual: A veces, en lugar de 'sparkle' se usa el término 'glint' y en lugar de 'graininess' se usa el término 'coarseness' [25].

Siguiendo las recomendaciones de la CIE sobre evaluación de diferencias de color [26], la mayoría de los trabajos publicados se han centrado en el desarrollo de experimentos visuales (i.e. obtención de ΔV) y el estudio de las fórmulas de diferencia de color que mejor se ajustan a dichos resultados visuales [6, 27]. En la práctica las diferencias de color instrumentales (ΔE) se obtienen a partir de medidas realizadas con espectrofotómetros convencionales suponiendo muestras planas (2D). Sin embargo, en realidad el color de objetos 3D suele no ser uniforme, dependiendo de la forma y tamaño del objeto, así como de la geometría de iluminación y de observación del objeto, pudiendo además añadirse otros problemas adicionales, como son la presencia de texturas (e.g. 'sparkle' y 'graininess'). En el presente trabajo pretendemos realizar una cuantificación de la variabilidad instrumental del color de determinados objetos 3D (concretamente, muestras de automoción con curvaturas cilíndricas convexas) bajo iluminación difusa. Elegimos este tipo de iluminación simplemente por ser la situación experimental más sencilla. Estudiaremos las variaciones de color instrumentales (ΔE) tanto en muestras curvadas individuales como en pares de muestras curvadas, sin considerar la evaluación de diferencias de color percibidas visualmente por paneles de observadores (ΔV). Puesto que el objetivo general de la evaluación industrial de diferencias de color es 'medir lo que vemos' [24], tiene interés prestar atención a los cambios de color existentes en objetos o pares de objetos 3D. Hasta donde llega nuestro conocimiento, usualmente no se cuantifica la variabilidad instrumental de color existente en objetos 3D, por lo que los resultados del presente estudio pueden ser de utilidad, a pesar de ser dependientes de la geometría de iluminación y observación, así como también de la forma, tamaño y material de los objetos 3D que se consideran.

2. Materiales y métodos

Disponemos de un conjunto de 22 muestras metálicas rectangulares (105 mm ancho x 148 mm alto), que fueron elaboradas por la empresa AkzoNobel a petición de la empresa AUDI AG. El espesor de cada una de estas muestras es 0.3 mm, de modo que se pueden curvar sin dañarse, tal como describiremos más adelante. De estas 22 muestras, 10 (5 pares) están pintadas con colores sólidos (S) y 12 (6 pares) con colores de efecto (E). La Tabla 1 muestra las principales características colorimétricas de los 11 pares de muestras estudiados, a partir de las medidas realizadas sobre muestras planas con un espectrofotómetro BYK-mac de apertura 23 mm, suponiendo iluminante D65, observador patrón CIE 1964 (a veces llamado observador patrón de 10°) y geometría 45°/45°. Como puede observarse, para los tonos, rojo, amarillo, verde y azul tenemos un par de muestras con colores sólidos y otro par de muestras con colores de efecto, ambos con coordenadas relativamente similares. Además, tenemos un par de muestras sólidas de color blanco y dos pares de muestras de efecto de colores grises. Puede observarse que los valores de 'sparkle area', 'sparkle intensity' y 'coarseness' son pequeños o grandes según que las muestras tengan colores sólidos o de efecto, respectivamente. El instrumento BYK-mac, además de medir el color para distintas geometrías, también mide 'sparkle area' y 'sparkle intensity' (dos medidas de la magnitud del 'sparkle' o 'destello') y 'coarseness' (equivalente a 'graininess' o 'granulado'). Las diferencias de color de los 11 pares de muestras consideradas oscilan entre 2.3 y 9.2 unidades CIELAB, de modo que en este trabajo utilizaremos diferencias de color CIELAB en lugar de CIEDE2000, por tener situaciones en las que las diferencias de color son superiores a 5.0 unidades CIELAB [2].

Hemos considerado muestras con 5 curvaturas cilíndricas convexas, empleando distintos soportes con imanes de neodimio sobre los que se fijan los pares de muestras metálicas antes mencionados. La Figura 1 muestra las características geométricas de estos soportes y una foto de los 2 soportes con menores radios de curvatura. La Tabla 2 indica los valores de los parámetros correspondientes a las 5 curvaturas cilíndricas estudiadas que van de C0 (muestras planas) a C5 (muestras con el mínimo radio de curvatura). El rango de valores de radios de curvatura que hemos usado está relacionado con la necesidad de que los imanes sujeten las muestras correctamente, evitando que se dañen por una excesiva curvatura.

TABLA 1. Características de los 11 pares de muestras estudiados según medidas realizadas en muestras planas (2D) con un espectrofotómetro BYK-mac, suponiendo iluminante D65 y observador patrón CIE 1964. Las letras “S” y “E” de la columna “Tipo” indican muestras sólidas y de efecto, respectivamente. Las barras superiores indican valores promedio de las dos muestras de cada par. Las variables $\bar{S}_a, \bar{S}_i, \bar{G}$ indican ‘sparkle area’, ‘sparkle intensity’ y ‘coarseness’, respectivamente. Las coordenadas CIELAB ($L_{10}^*, a_{10}^*, b_{10}^*$) de las muestras y las diferencias de color de los pares ($\Delta E_{ab,10}^*$) se midieron con la geometría 45°/45° de BYK-mac: Iluminación a 45° y detección en dirección perpendicular a la muestra (‘face color’), Figura 2 (derecha).

Par	Tono	Tipo	\bar{L}_{10}^*	\bar{a}_{10}^*	\bar{b}_{10}^*	\bar{S}_a	\bar{S}_i	\bar{G}	$\Delta E_{ab,10}^*$
1	Rojo	S	25	49	30	0.2	0.4	0.7	5.5
2	Rojo	E	24	48	33	16.4	10.2	1.9	4.9
3	Amarillo	S	79	15	82	0	0	0.4	4.2
4	Amarillo	E	66	15	65	8.6	7.0	3.0	8.9
5	Verde	S	31	-43	0	0.3	0.5	0.6	2.3
6	Verde	E	40	-37	5	27.6	7.2	7.1	4.8
7	Azul	S	19	4	-37	1.0	0.4	0.6	3.4
8	Azul	E	21	3	-34	27.4	6.9	5.0	4.9
9	Blanco	S	89	-2	2	0	0	0.3	5.4
10	Gris Medio	E	44	0	1	28.8	19.1	8.3	9.2
11	Gris Claro	E	62	-3	-2	25.8	9.2	5.6	6.8



Fig. 1. Izquierda: Esquema de los soportes cilíndricos usados. Derecha: Foto de los soportes C3 y C4 (ver Tabla 2).

TABLA 2. Características geométricas de los soportes cilíndricos empleados (ver Figura 1)

Soporte	Flecha a (mm)	Cuerda b (mm)	Radio R (mm)
C0	0 ± 1	148 ± 1	Infinito
C1	16 ± 1	141 ± 1	163 ± 11
C2	26 ± 1	135 ± 1	101 ± 4
C3	34 ± 1	122 ± 1	72 ± 2
C4	44 ± 1	100 ± 1	50.4 ± 0.7

Hemos empleado el instrumento DigiEye® para iluminar las muestras y poder medir su color en distintas zonas, suponiendo iluminante D65 y observador patrón CIE 1964. La Figura 2 (izquierda) es un esquema del DigiEye® donde podemos ver que hay dos fuentes simétricas en la parte inferior, cuya luz se proyecta hacia arriba y se refleja en las paredes y cúpula del habitáculo, iluminando así de forma difusa las muestras situadas en la bandeja del instrumento. Una cámara, situada en posición cenital respecto a las muestras, permite capturar imágenes y medir el color de cada uno de los píxeles de la imagen. La calibración de la cámara se realiza mediante el uso de una carta de color certificada con valores triestímulo conocidos. A partir de la adquisición de una imagen de esta carta y a través de técnicas de regresión no lineales, el software que gobierna el equipo transforma las coordenadas RGB en unidades CIELAB [28]. En el caso del espectrofotómetro BYK-mac se ilumina a 45° respecto a la perpendicular a la muestra plana y se detecta la luz reflejada en 6 direcciones diferentes, cuya notación se indica en el esquema de la Figura 2 (derecha).

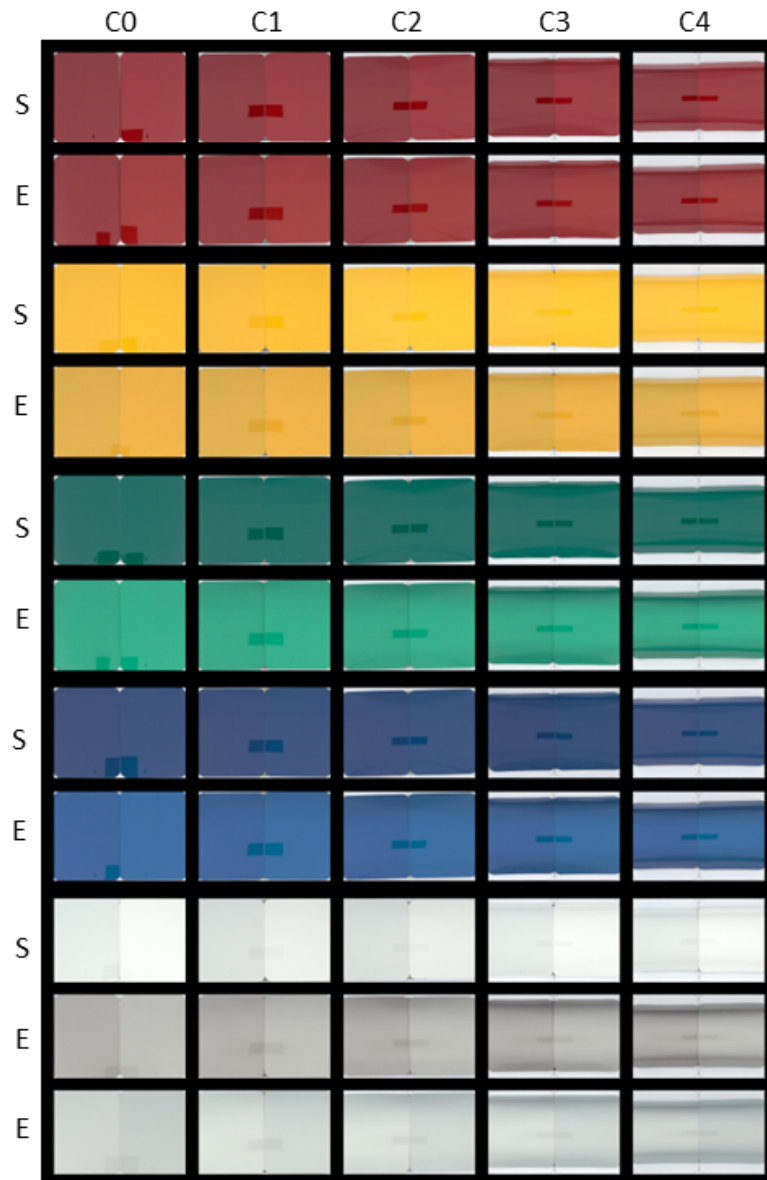
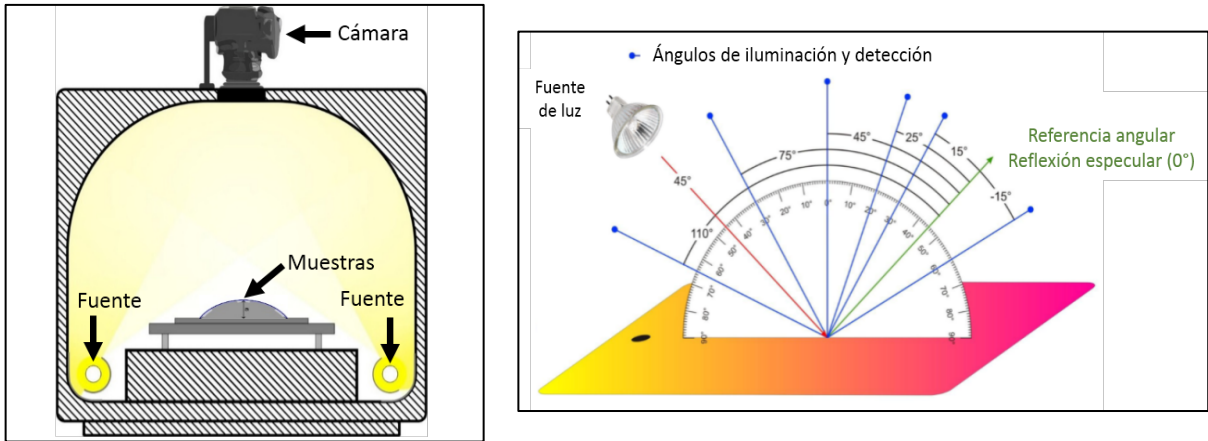


Fig. 3. Imágenes de los 11 pares de muestras obtenidas con DigiEye®. En las columnas consideramos cada una de las cinco curvaturas (ver Tabla 1). En las filas mostramos los pares de muestras con colores sólidos (S) y de efecto (E).

Todos los pares de muestras se situaron en la misma posición de la bandeja de DigiEye®, con el eje de los soportes cilíndricos en dirección horizontal. La Figura 3 muestra fotos obtenidas con DigiEye® para los 5 pares de muestras de colores sólidos (S) y los 6 pares de muestras de colores de efecto (E), para cada una de las 5 curvaturas consideradas: C0 (muestras planas) a C4 (muestras con mínimo radio de curvatura). En la Figura 3 aparecen unas zonas rectangulares oscuras, que son las imágenes especulares que producen las muestras de la abertura situada ante el objetivo de la cámara fotográfica. Lógicamente las medidas de color se realizaron en unas determinadas zonas fijas que siempre excluyen estas zonas oscuras.

La Figura 4 es un esquema de un par de muestras planas, en las que para cada muestra se distinguen varias zonas de medida de color: Una zona rectangular, de 300 píxeles x 400 píxeles (aproximadamente, 27 mm x 36 mm), y 5 zonas circulares de diámetro 89 píxeles (aproximadamente, 8 mm), designadas como P_i ($i=1,\dots,5$). En las muestras curvadas se mantienen estas mismas zonas de medida, elegidas de forma que siempre se evita la imagen especular de la apertura de la cámara fotográfica. Concretamente, la zona P5 se sitúa en el eje de simetría horizontal de la muestra, mientras que la zona P1 está lo más próxima posible al borde superior de la muestra, evitando que afecte a la medida la imagen especular que la muestra produce del borde superior de la bandeja de DigiEye®. La calibración de DigiEye® permite medir las coordenadas de color CIELAB (iluminante D65, observador patrón CIE 1964) en cada uno de los píxeles de la imagen de la muestra obtenida por la cámara.

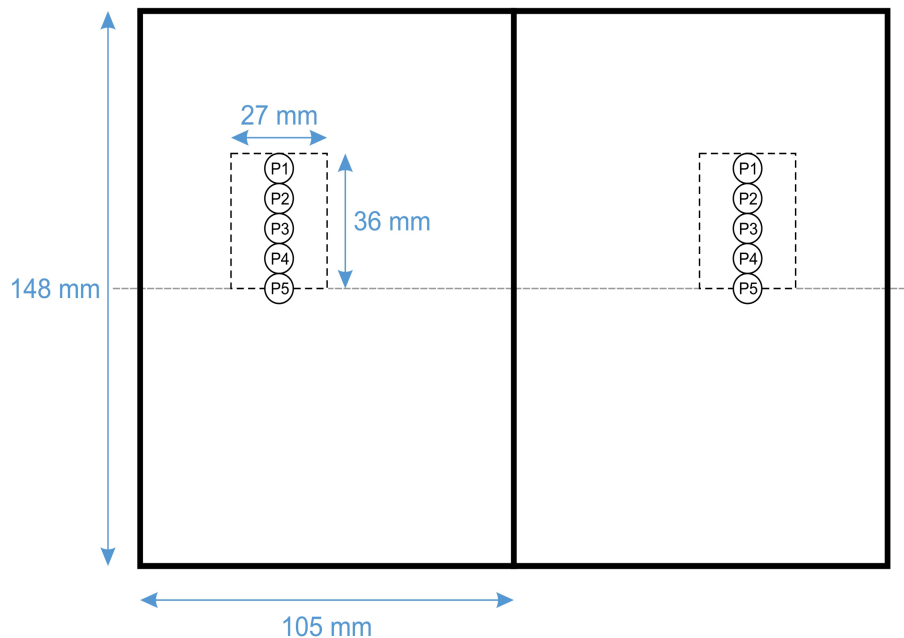


Fig. 4. Esquema de un par de muestras planas con indicación de las zonas consideradas para la medida del color de cada muestra mediante DigiEye®: Rectángulos de 300 píxeles x 400 píxeles (aproximadamente, 27 mm x 36 mm) y 5 zonas circulares de 89 píxeles de diámetro (aproximadamente, 8 mm), designadas como P1, ..., P5.

3. Resultados

3.a. Muestras individuales

La Figura 5 muestra los valores medios y desviaciones típicas de la variabilidad de color dentro de rectángulos de 27 mm x 36 mm (ver Figura 4), para muestras sólidas y de efecto con distintas curvaturas. Concretamente en el eje de ordenadas de la Figura 5 se representa la diferencia de color media respecto a la media, conocida como MCDM por sus iniciales en inglés ('mean color difference from the mean') [29], en unidades CIELAB, para los píxeles situados dentro del rectángulo mencionado. Vemos que en las muestras sólidas los valores promedio de la MCDM son aproximadamente de 1.0 unidades CIELAB y cambian muy poco con la curvatura (también las desviaciones típicas son pequeñas y muy similares para todas las curvaturas). Este resultado indica que las muestras sólidas medidas son muy uniformes en color, ya que el umbral de discriminación de color para el ojo humano tiene un valor en torno a 1.1 unidades CIELAB [30]. En cambio, en las muestras de efecto la MCDM aumenta considerablemente con la curvatura, tanto en promedio como en desviación típica, sin que esto pueda atribuirse a ningún tono en particular, lo que indica

que las muestras de efecto medidas tienen una variabilidad o gradiente de color que aumenta con la disminución del radio de curvatura, como era de esperar. Para la máxima curvatura (C4) la Figura 5 muestra una MCDM promedio de alrededor de 3 unidades CIELAB (claramente perceptible para el ojo humano), aproximadamente el triple que la obtenida para muestras sólidas.

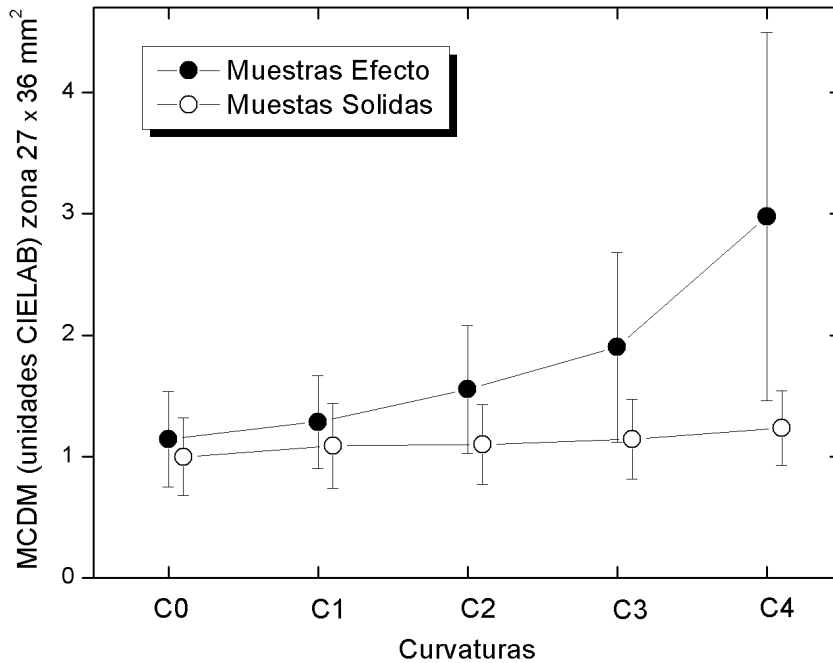


Fig. 5. Valores medios y desviaciones típicas (barras de error) de la variabilidad de color (medida mediante la MCDM [29] en unidades CIELAB) existente en los rectángulos de 27 mm x 36 mm de la Figura 4, para 10 muestras sólidas y 12 muestras de efecto con 5 curvaturas diferentes (Tabla 2).

Todos los pares de muestras se situaron en la misma posición de la bandeja de DigiEye®, con el eje de los soportes cilíndricos en dirección horizontal. La Figura 3 muestra fotos obtenidas con DigiEye® para los 5 pares de muestras de colores sólidos (S) y los 6 pares de muestras de colores de efecto (E), para cada una de las 5 curvaturas consideradas: C0 (muestras planas) a C4 (muestras con mínimo radio de curvatura). En la Figura 3 aparecen unas zonas rectangulares oscuras, que son las imágenes especulares que producen las muestras de la abertura situada ante el objetivo de la cámara fotográfica. Lógicamente las medidas de color se realizaron en unas determinadas zonas fijas que siempre excluyen estas zonas oscuras.

Para cada una de las 5 curvaturas consideradas (Tabla 2), las Figuras 6 y 7 muestran los valores medios y desviaciones típicas de las diferencias de color CIELAB entre la zona (P5) y las zonas P4, P3, P2 y P1 (ver Figura 4), para las muestras sólidas y de efecto. Como cabría esperar, las diferencias de color crecen conforme nos alejamos del eje de la muestra (zona P5) y también al pasar de C0 a C4. Es importante observar que en las Figura 6 y 7 las escalas de los ejes de ordenadas son muy diferentes, de modo que, si consideramos por ejemplo la máxima curvatura (C4), en las muestras de efecto la diferencia de color promedio P5-P1 es de unas 8 unidades CIELAB (Figura 7), mientras que en las muestras sólidas dicha diferencia es de unas 2 unidades CIELAB (Figura 6). O sea, en las muestras de efecto con curvatura C4 hay en promedio unas diferencias o gradientes de color que son unas 4 veces mayores que las existentes en muestras sólidas, lo cual es consistente con el resultado obtenido previamente a partir de la MCDM (Figura 5). Las desviaciones típicas son también en general mayores en las muestras de efecto que en las sólidas (Figuras 6 y 7).

En pocas palabras podría decirse que los resultados obtenidos en esta subsección indican que para muestras individuales las variaciones o gradientes de color generadas por las curvaturas pueden ser hasta 3-4 veces mayores en muestras de efecto que en muestras sólidas. Los gradientes de color en las muestras de efecto más curvadas son claramente perceptibles para el ojo humano [30].

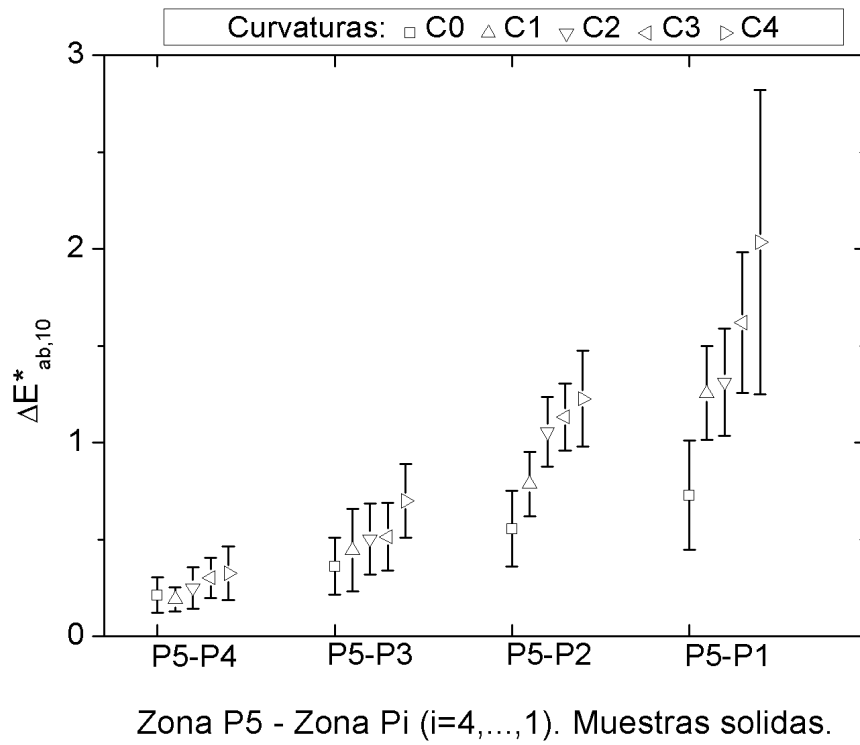


Figura 6. Diferencias de color CIELAB respecto a la zona central (P5) para distintas curvaturas en muestras sólidas. Las barras de error indican desviaciones típicas.

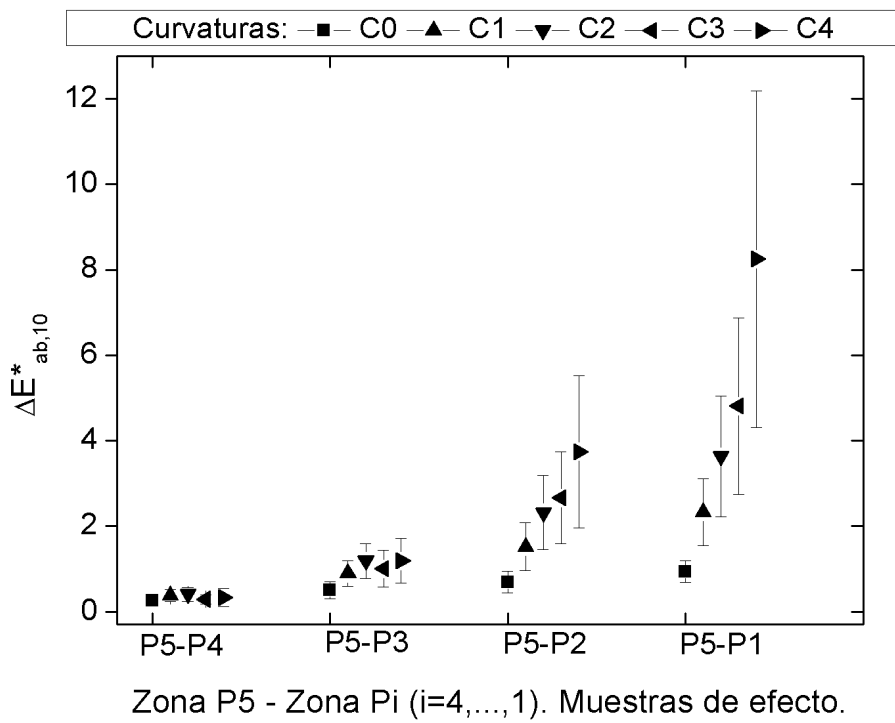


Figura 7. Diferencias de color CIELAB respecto a la zona central (P5) para distintas curvaturas en muestras de efecto. Las barras de error indican desviaciones típicas.

3.b. Pares de muestras

Nos preguntamos ahora qué sucede con las diferencias de color al considerar zonas homólogas de las 2 muestras de un par; o sea, zonas P1-P1, ..., P5-P5 (ver Figura 4). La Figura 8 muestra que las diferencias de color CIELAB entre las zonas homólogas de un par de muestras son casi idénticas en el caso de muestras sólidas, ya que la desviación típica promedio es casi constante e inferior a 0.2 unidades CIELAB. En cambio, para muestras de efecto las diferencias de color entre zonas homólogas presentan una variabilidad que aumenta con la curvatura, si bien la desviación típica no es muy elevada (como máximo unas 0.5 unidades CIELAB para la curvatura C4). Estos resultados podrían entenderse si pensamos que, al desplazamos verticalmente desde la zona P5 hacia la zona P1, la diferencia o gradiente de color es similar en ambas muestras del par, en particular si se trata de muestras sólidas. De hecho, las dos muestras de cada par son en realidad bastante similares entre sí (Tabla 1).

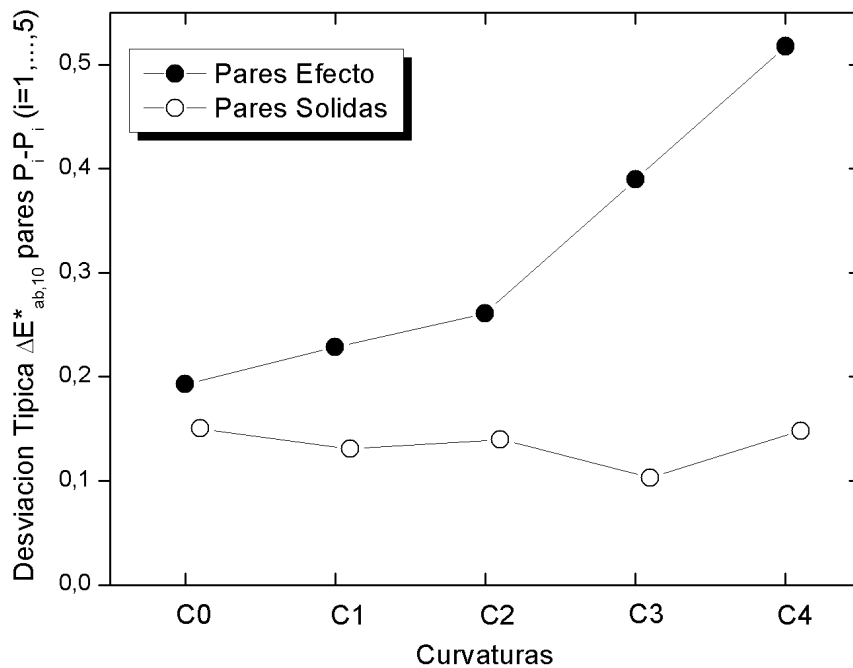


Fig. 8. Desviaciones típicas promedio de las diferencias de color CIELAB entre zonas homólogas (i.e. P1-P1,...,P5-P5) para los pares de muestras sólidas y muestras de efecto.

Analizaremos a continuación la relación entre las medidas de diferencias de color de pares de muestras realizadas mediante DigiEye® para distintas curvaturas y las medidas realizadas con un espectrofotómetro multiángulo BYK-mac sobre muestras planas. En la industria de automoción lo habitual es utilizar el espectrofotómetro BYK-mac, que da coordenadas de color para 6 ángulos de detección, como muestra la Figura 2 derecha. Los coeficientes de correlación lineal entre las medidas de color de ambos instrumentos se indican en las Tablas 3 y 4 para los pares de muestras sólidas y muestras de efecto estudiados, respectivamente. Puede observarse que hay una alta correlación lineal entre las medidas de ambos instrumentos para los pares de muestras sólidas (Tabla 3), obteniéndose la mejor correlación para la geometría de iluminación a 45° y detección a 110°. Este resultado es muy razonable ya que esta geometría se aproxima a la retroreflexión (ver Figura 2, derecha) y es muy similar a la iluminación difusa y detección cenital de DigiEye® (ver Figura 2, izquierda), con la zona de medida ligeramente desplazada respecto al eje óptico de la cámara para evitar la reflexión especular de la cámara. En cambio, desafortunadamente, la Tabla 4 indica que los coeficientes de correlación lineal para las muestras de efecto son muy bajos para todas las curvaturas y todas las geometrías del BYK-mac. Por tanto, la mejor recomendación que podríamos hacer para medir diferencias de color en pares de muestras de efecto sería considerar las 6 geometrías del BYK-mac y una fórmula de diferencia de color tipo AUDI2000, como se ha hecho en trabajos previos [27].

TABLA 3. Coeficientes de correlación lineal entre las diferencias de color CIELAB de los 5 pares de muestras sólidas medidas con DigiEye® (promedio de las zonas homólogos P5-P5 a P1-P1) para las curvaturas C0,...,C4 (Tabla 1) y las medidas realizadas mediante un espectrofotómetro BYK-mac (muestras planas, 6 geometrías de detección indicadas en Fig. 2 derecha y columna 1).

		DigiEye®				
		C0	C1	C2	C3	C4
BYK-mac	-15°	0.857	0.875	0.874	0.871	0.875
	+15°	0.882	0.899	0.898	0.895	0.896
	+25°	0.911	0.925	0.923	0.922	0.922
	+45°	0.926	0.939	0.938	0.936	0.938
	+75°	0.948	0.956	0.954	0.955	0.952
	+110°	0.966	0.969	0.969	0.970	0.964

TABLA 4. Coeficientes de correlación lineal entre las diferencias de color CIELAB de los 6 pares de muestras de efecto, medidas con DigiEye® (promedio de las zonas homólogos P5-P5 a P1-P1) para las curvaturas C0,..., C4 (Tabla 1) y las medidas realizadas mediante un espectrofotómetro BYK-mac (muestras planas, 6 geometrías de detección indicadas en Fig. 2 derecha y columna 1).

		DigiEye®				
		C0	C1	C2	C3	C4
BYK-mac	-15°	0.118	0.155	0.209	0.144	0.248
	15°	0.022	0.017	0.079	0.006	0.099
	25°	0.453	0.452	0.434	0.443	0.518
	45°	0.322	0.324	0.306	0.332	0.361
	75°	0.319	0.316	0.298	0.333	0.277
	110°	0.145	0.138	0.126	0.158	0.096

3. Conclusión

Aportamos información sobre la medida instrumental del color en muestras tridimensionales de automoción pintadas con colores sólidos y de efecto. Más concretamente, cuantificamos las variaciones o gradientes de color existentes en 22 muestras de automoción con distintas curvaturas cilíndricas convexas bajo iluminación difusa, obteniendo que son hasta 3-4 veces mayores para muestras sólidas que para muestras de efecto. Para pares de muestras sólidas las diferencias de color obtenidas son muy parecidas cuando se miden regiones análogas, lo que podría ser una posible buena práctica a la hora de cuantificar la diferencia de color entre dos objetos tridimensionales de una misma forma y tamaño. Para pares de muestras sólidas se obtiene una buena correlación lineal entre las medidas realizadas con DigiEye® y BYK-mac, pero no sucede lo mismo para el caso de pares de muestras de efecto. Pensamos que no es posible extrapolar directamente las conclusiones del presente trabajo a objetos con otras formas y tamaños bajo iluminaciones distintas a la difusa, de manera que se requieren futuras investigaciones sobre la medida del color y de las diferencias de color en objetos tridimensionales.

Agradecimientos

Ministerio de Ciencia e Innovación y Agencia Estatal de Investigación de España, proyecto PID2022-138031NB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”; proyecto PID2019-107816GB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.