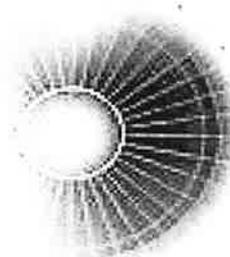
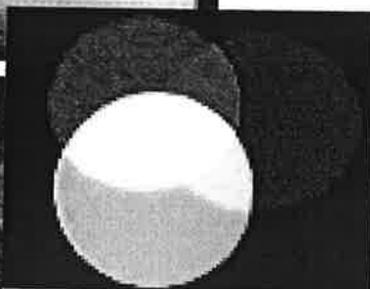
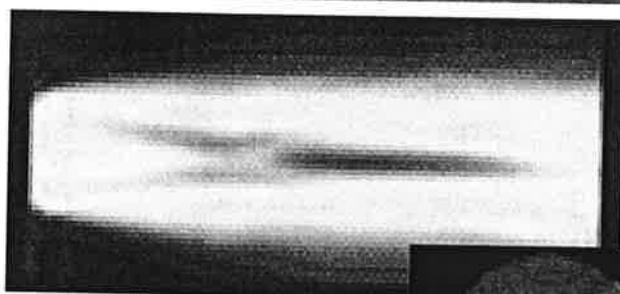
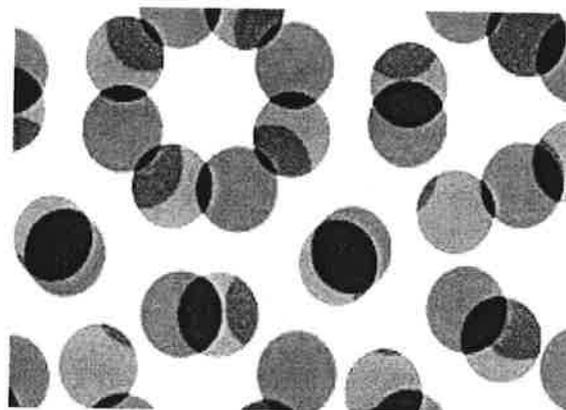
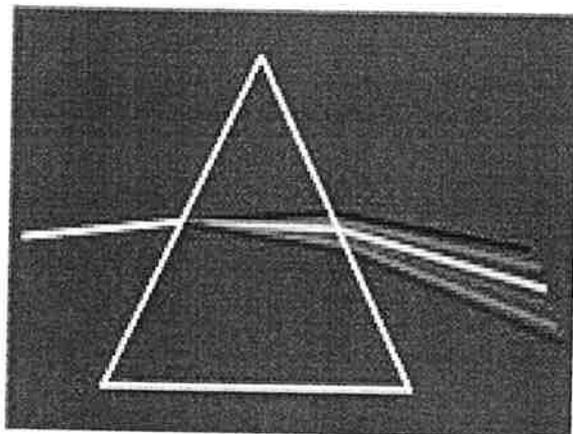


CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL COLOR

SEMINARIO 2009 DE LA RED TEMÁTICA



Título: Ciencia y Tecnología del Color. Seminario 2009 de la Red Temática.

Editores: Joaquín Campos Acosta y Rafael Huertas Roa, Red Temática
"Ciencia y Tecnología del Color"

Depósito Legal: GR-4029/2009

ISBN: 978-84-92680-77-1

Edita e Imprime: Copicentro Granada S.L.

Índice

1. *Color changes in a natural scene due to the interaction between the light and the atmosphere.* J. Romero, R. Luzon, J. Hernandez-Andres, J. L. Nieves 9
2. *Design, synthesis and preliminary evaluation of properties of electrochromic nanopigments.* E. Marchante, V. Marchante, E. Baena-Murillo, F.M. Martínez-Verdú 12
3. *Viability of dyeing of natural and synthetic fibers with nano-pigments in supercritical CO₂.* B. Micó, V. Marchante, E. Gilabert, F.M. Martínez-Verdú..... 17
4. *Gonio-espectrofotómetro para medida de BSDF con baja incertidumbre.* A. M. Rabal, J. L. Fontecha, A. Ferrero, A. Pons, J. Campos, A. Corróns..... 20
5. *Texture analysis for the evaluation of human irises reproduction in ocular prostheses and colored contact lenses.* J. Herrera Ramírez, M. Vilaseca Ricart, M. Arjona Carbonell, J. Pujol Ramo 24
6. *Applicability of Kubelka-Munk single-constant theory to cyanobacterial biofilms.* P. Sanmartín, B. Prieto, B. Silva, F.M. Martínez-Verdú, E. Gilabert 30
7. *Avances en la evaluación de diferencias de color.* L. Gómez-Robledo, R. Huertas, M. Melgosa, E. Hita, P. A. García, S. Morillas, C. Oleari, G. Cui 35

Avances en la evaluación de diferencias de color

L. Gómez-Robledo⁽¹⁾, R. Huertas⁽¹⁾, M. Melgosa⁽¹⁾, E. Hita⁽¹⁾,
P. A. García⁽²⁾, S. Morillas⁽³⁾, C. Oleari⁽⁴⁾, G. Cui⁽⁵⁾

1. Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. 18071, Granada (España)
2. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. 18071, Granada (España)
3. Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022, Valencia (España)
4. Dipartimento di Fisica, Istituto Nazionale di Fisica per la Materia. Università degli Studi di Parma, I-43100, Parma (Italia)
5. Department of Colour Science, University of Leeds. Leeds LS2 9JT (Reino Unido)
Email de contacto: mmelgosa@ugr.es

Resumen

Presentamos las principales contribuciones en los últimos 4 años del Laboratorio de Colorimetría Básica y Aplicada (<http://www.ugr.es/~basapplcolor/>) de la Universidad de Granada, en el campo de la evaluación de diferencias de color. Entre ellas podemos destacar el análisis de la importancia de las distintas correcciones a CIELAB propuestas por la fórmula de diferencia de color CIEDE2000, la propuesta del índice STRESS para medir la relación entre diferencias de color visuales e instrumentales, la propuesta de dos nuevas fórmulas de diferencia de color basadas en el espacio OSA-UCS, el uso de una técnica de análisis difuso para detectar inconsistencias en bases de datos de diferencias de color, y algunos estudios sobre el rango de validez de la fórmula de diferencia de color CIEDE2000.

Palabras clave: Diferencias de color, CIEDE2000, STRESS, OSA-GP Euclídea, CIE TC 1-55, CIE TC 1-63.

1. Introducción

La última fórmula de diferencia de color recomendada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) se denomina CIEDE2000 y fue propuesta en el año 2001¹. Partiendo de la medida instrumental del color de un par de muestras, el principal objetivo de CIEDE2000, al igual que el de otras fórmulas de diferencia de color, es obtener un valor numérico proporcional a la diferencia de color percibida entre dichas muestras, suponiendo un observador con visión normal del color y unas condiciones de observación usuales en la industria. CIEDE2000 se basa en el sistema CIELAB², sobre el que propone dos tipos de correcciones: las que pretenden paliar determinadas deficiencias de CIELAB en la predicción de diferencias visuales de color, y las que pretenden incorporar la influencia de las condiciones de iluminación y observación sobre la evaluación visual de diferencias de color³.

Tras la propuesta de CIEDE2000, se han aprobado dentro de la División 1 (Visión y Color) de la CIE dos Comités Técnicos (TC's) relacionados con la evaluación industrial de diferencias de color, que están realizando actualmente sus trabajos: el CIE TC 1-55 "Uniform Colour Space for Industrial Colour-Difference Evaluation", y el CIE

TC 1-63 "Validity of the range of CIEDE2000". Nuestro laboratorio trabaja activamente en las tareas de ambos TC's en colaboración tanto con investigadores españoles como de otros países. La complejidad de la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 parece indicar que CIELAB no es el mejor espacio posible para el cálculo de diferencias de color, siendo la tarea del CIE TC 1-55 sugerir un nuevo espacio de color en el que las diferencias de color entre 0 y 5 unidades CIELAB puedan calcularse como una sencilla distancia Euclídea. A su vez, el CIE TC 1-63 estudia si el comportamiento de la fórmula CIEDE2000 es o no uniforme dentro del rango 0 a 5 unidades CIELAB, planteándose también la utilidad de dicha fórmula para diferencias de color por encima de 5 unidades CIELAB, que son importantes para algunas industrias. Por otra parte, la investigación sobre diferencias de color tiene también un campo de gran interés dentro de la División 8 de la CIE (Tecnología de la Imagen), en particular dentro del Comité Técnico 8-02 "Colour difference evaluation in images".

El objetivo de este trabajo es mostrar de forma muy resumida las principales y más recientes aportaciones del Laboratorio de Colorimetría Básica y Aplicada (Departamento de Óptica, Universidad de Granada) en el campo de la evaluación de

diferencias de color. Dejaremos al margen nuestros estudios de carácter más aplicado como, por ejemplo, color de suelos, color de aceites de oliva, etc., que han ocupado también una parte importante de nuestra investigación en los últimos años.

2. Recientes investigaciones

2.1. Correcciones a CIELAB en CIEDE2000

CIEDE2000 propone 5 correcciones a CIELAB, cada una de las cuales es estadísticamente significativa para un amplio conjunto de datos experimentales: 11273 pares de muestras, que constituyen el llamado "COM-Weighted", y proceden de 4 laboratorios diferentes. La corrección de croma, ya existente en la fórmula de diferencia de color CIE94⁴, es con diferencia la más importante de las 5 correcciones introducidas en CIEDE2000. Sin embargo, la corrección de grises de CIEDE2000 no es estadísticamente significativa para los datos de 2 de los 4 laboratorios, y las correcciones de claridad y término de rotación tampoco son estadísticamente significativas para 1 de los 4 laboratorios⁵.

Por otro lado, CIEDE2000 no puede considerarse en modo alguno una fórmula de diferencia de color definitiva⁶. Como mostraremos en la siguiente sección, el grado de ajuste de CIEDE2000 a los datos experimentales es bastante inferior al óptimo.

2.2. Relación entre diferencias de color percibidas y calculadas

El grado de ajuste de una fórmula de diferencia de color a unos determinados datos experimentales puede medirse por medio de distintos índices, siendo práctica habitual en los últimos años el uso de un índice, que combina 3 índices precedentes, y se denomina *PF/3*.

Hemos propuesto el uso de un índice alternativo a *PF/3*, denominado *STRESS* (STandardized RESidual Sum of Squares)⁷, cuya principal ventaja es que permite conocer si dos fórmulas de diferencia de color son o no significativamente distintas, respecto a un determinado conjunto de datos visuales. El índice *STRESS* es una herramienta estadística empleada en Multidimensional Scaling (una técnica estadística multivariante de visualización y exploración de datos⁸), y tiene propiedades bien conocidas, como el estar acotado entre 0 y 1. Un valor de *STRESS* 0 indica un ajuste perfecto entre los datos experimentales y las predicciones de una fórmula de diferencia de color.

La Figura 1 muestra los valores de *STRESS* porcentual obtenidos para el "COM-Weighted" usando CIEDE2000 y otras 3 fórmulas de diferencia de color más recientes que CIEDE2000⁹. Como puede observarse, se obtienen valores de *STRESS*

bastante altos (superiores al 25%), lo que puede deberse tanto a inconsistencias en los datos experimentales como a limitaciones del ajuste de las fórmulas de diferencia de color más avanzadas a los datos experimentales actualmente disponibles.

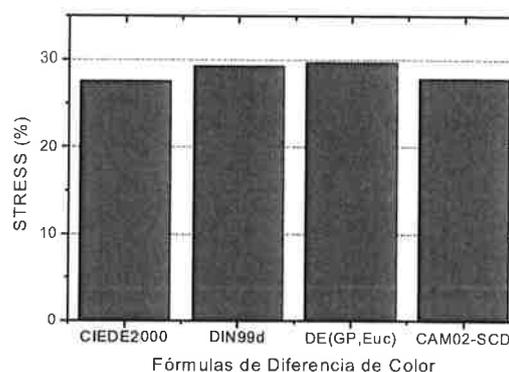


Figura 1. *STRESS* (%) para 11273 pares de muestras (datos "COM-Weighted") y 4 fórmulas de diferencia de color: CIEDE2000, DIN99d, DE(GP y Euc.) y CAM02-SCD.

2.3. Fórmula de diferencia de color basada en el espacio OSA-UCS

La complejidad de la fórmula CIEDE2000 hace pensar que probablemente CIELAB no es el espacio de color más adecuado sobre el que se debe construir una fórmula de diferencia de color que produzca bajos valores de *STRESS*, como es deseable. En 2006 propusimos una fórmula de diferencia de color basada no en CIELAB sino en el espacio OSA-UCS¹⁰. Esta fórmula tiene el formato de CIE94⁴, pero más recientemente hemos podido transformarla en una distancia Euclídea en el citado espacio¹¹, que conduce a resultados de *STRESS* muy similares a los logrados mediante la fórmula CIEDE2000.

Existen también otros posibles espacios sobre los que construir nuevas fórmulas de diferencia de color, siendo esta una tarea sobre la que actualmente trabaja el CIE TC 1-55. Por ejemplo, podría adoptarse como punto de partida un espacio de color basado en CIECAM02 (el último modelo de apariencia de color propuesto por la CIE)¹², o también espacios del tipo denominado IPT¹³.

2.4. Detección de inconsistencias en bases de datos de diferencias de color

La fiabilidad de los datos experimentales sobre los que se desarrolla una fórmula de diferencia de color es un tema de gran importancia. Algunos de los datos empleados en el desarrollo de CIEDE2000 no fueron correctamente empleados¹⁴. Incluso la compatibilidad de los datos aportados por los 4 laboratorios para formar el "COM-Weighted" ha sido objeto de debate^{10,11}. Recientemente el CIE TC 1-55 ha solicitado nuevos datos

experimentales de diferencias de color con los que evaluar el mérito de las actuales fórmulas de diferencia de color, y desarrollar otras nuevas¹⁵.

A partir de técnicas de análisis difuso, hemos desarrollado un método que permite asociar un grado de consistencia a cada par de muestras de un conjunto dado¹⁶. Aplicando este método a los pares de muestras empleados en el desarrollo de la fórmula CIEDE2000 (COM-Weighted) obtuvimos que son muy pocos los pares de muestras con un bajo grado de consistencia con sus vecinos (figura 2). Además los pares con escasa consistencia tenían en la mayoría de los casos muy pequeñas diferencias de color (concretamente, los pares con $FM < 0.2$ tienen una diferencia de color inferior a 1.36 unidades CIEDE2000), y además las diferencias de color percibidas son sobreestimadas respecto a los valores calculados con CIEDE2000.

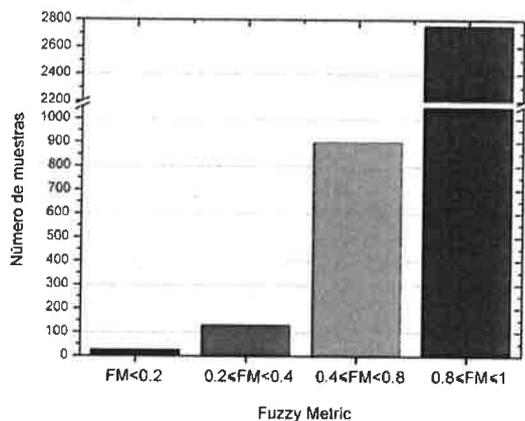


Figura 2. Número de pares de muestras del COM Unweighted en función de su valor FM (Fuzzy Metric), indicativo del grado de consistencia con sus pares vecinos.

2.5. Rango de validez de CIEDE2000

Realmente en el desarrollo de CIEDE2000 se emplearon un total de 3657 pares de muestras de color (COM-Unweighted), procedentes de 4 laboratorios. A fin de que esos 4 laboratorios tuvieran una misma importancia en el desarrollo de CIEDE2000, los pares de muestras de algunos de ellos fueron repetidos varias veces, dando lugar a 11273 pares de muestras (COM-Weighted). Dentro del COM-Unweighted hay 469 pares de muestras (12.8%) con una diferencia de color por encima de 5 unidades CIELAB, que es el máximo tamaño de diferencias de color para el que se recomienda el uso de la fórmula CIEDE2000.

Referencias y enlaces

1. CIE Publication 142-2001. Technical Report: Improvement to industrial colour-difference evaluation. CIE Central Bureau, Vienna (2001).
2. CIE Publication 15:2004. Colorimetry. 3rd Edition. CIE Central Bureau, Vienna (2001).

Hemos analizado¹⁷ el comportamiento de CIEDE2000 y otras fórmulas de diferencia de color para los datos COM-Unweighted, considerando distintos rangos de diferencia de color (figura 3). Nuestros resultados indican que el comportamiento de todas las actuales fórmulas de diferencia de color se deteriora ostensiblemente (es decir, los valores de *STRESS* aumentan fuertemente) para diferencias de color muy pequeñas, próximas al umbral de color. Nuestros análisis apuntan a que la causa de este fenómeno está en la sobreestimación visual de las diferencias de color muy pequeñas. Por otro lado, en un experimento diferente¹⁸ obtuvimos que los valores de *STRESS* también aumentan notoriamente cuando se consideran grandes diferencias de color, si bien en este caso el resultado se explica por una subestimación de las diferencias visuales respecto a las instrumentales.

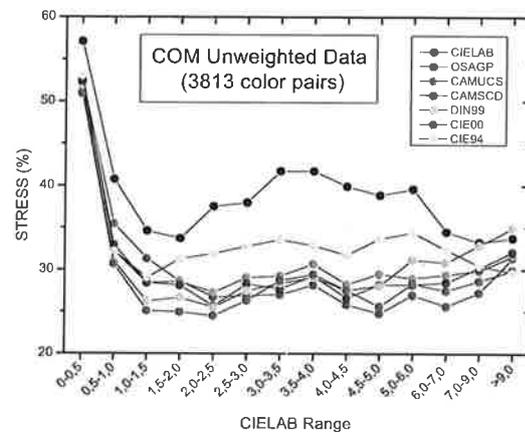


Figura 3. *STRESS* (%) para 3813 pares de muestras (datos COM-Unweighted), considerando distintos rangos de diferencias de color CIELAB y 7 fórmulas de diferencia de color propuestas después de CIELAB.

Agradecimientos

To Prof. Roy S. Berns, Munsell Color Science Laboratory, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York, (USA).

Proyecto FIS2007-64266, Ministerio de Educación y Ciencia (España), cofinanciado con fondos FEDER.

3. M. Melgosa, M. M. Pérez, A. Yebra, R. Huertas, E. Hita, "Some reflections and recent international recommendations on color-difference evaluation". *Óptica Pura y Aplicada*, **34**, 1-10 (2001).
4. CIE Publication 116. Technical Report: Industrial colour-difference evaluation. CIE Central Bureau, Vienna (1995).
5. M. Melgosa, R. Huertas, M. J. Rivas, P. A. García, A. González, M. Vik. G. Cui. "Significación estadística de las correcciones introducidas en las fórmulas de diferencia de color CIE94 y CIEDE2000". *Libro de Actas del VIII Congreso Nacional del Color*, Madrid, 27-28 (2007).
6. R. G. Kuehni. "Color difference formulas: An unsatisfactory state of affairs". *Color Research and Application*, **33**, 324-326 (2008).
7. P. A. García, R. Huertas, M. Melgosa, G. Cui. "Measurement of the relationship between perceived and computed color differences". *Journal Optical Society of America A*, **24**, 1823-1829 (2007).
8. J.B. Kruskal, M. Wish. Multidimensional Scaling. SAGE University, Newbury Park, CA. (1978).
9. M. Melgosa, R. Huertas, R. S. Berns. "Performance of recent advanced color-difference formulae using the Standardized Residual Sum of Squares index". *Journal Optical Society of America A*, **25**, 1828-1834 (2008).
10. R. Huertas, M. Melgosa, C. Oleari. "Performance of a color-difference formula based on OSA-UCS space using small-medium color differences". *Journal Optical Society of America A*, **23**, 2077-2084 (2006).
11. C. Oleari, M. Melgosa, R. Huertas. "Euclidean color-difference formula for small-medium color differences in log-compressed OSA-UCS space". *Journal Optical Society of America A*, **26**, 121-134 (2009).
12. M. R. Luo, G. Cui, C. Li. "Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model". *Color Research and Application*, **31**, 320-330 (2006).
13. R. S. Berns. "Generalized industrial color-difference space based on multi-stage color vision and line-element integration". *Óptica Pura y Aplicada*, **41**, 301-311 (2008).
14. M. Melgosa, R. Huertas, P. A. García. "Performance of CIEDE2000 color difference models for the RIT-DuPont dataset". *Proceeding of the AIC 2007 meeting*, Hangzhou (China), 293-295 (2007).
15. M. Melgosa. "Request for existing experimental datasets on color differences". *Color Research and Application*, **32**, 159 (2007).
16. S. Morillas, L. Gómez-Robledo, R. Huertas, M. Melgosa. "Fuzzy analysis for detection of unreliable data in the experimental datasets employed at the development of the CIEDE2000 colour-difference formula". *Journal of Modern Optics*, **56**, 1447-1456 (2009).
17. M. Melgosa, R. Huertas, P. A. García. "Analysis of color-differences with different magnitudes using the visual data employed at CIEDE2000 development". *Proceeding of the AIC 2008 meeting*, Stockholm (Sweden), 279-280 (2008).
18. R. Huertas, M. J. Rivas, M. Melgosa. "Assessing large color differences using 3 step color series". *Proceeding of the 4th European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (CGIV 2008)*, 85-88 (2008).