

## Capítulo 3:

# Medida de la diferencia de color entre muestras uniformes mediante cámara

Dentro del esquema general del trabajo de tesis (Esquema 1.1), en este capítulo se tratan los siguientes apartados:

3. Medida de la diferencia de color entre muestras uniformes mediante cámara.

**3.1. Precisión de la medida, tolerancia instrumental y discrepancia con el espectrorradiómetro**

**3.2. Diferencias entre muestras de colores pálidos y oscuros mediante cámara 3CCD**

**3.3. Diferencias entre muestras de colores pálidos mediante cámara de sensor multicapa**

**3.4. Otras consideraciones sobre tolerancias: comparación con la repetitividad de las muestras Munsell**

3.4.1. Diseño del experimento

3.4.2. Resultados

**3.5. Aplicación a las pruebas de igualación en la producción textil**

Nuestro interés en este capítulo se centra en estudiar la capacidad de discriminación cromática que presenta la cámara como dispositivo de adquisición y su fiabilidad en la medida de pequeñas diferencias de color. El estudio se orienta a las aplicaciones de inspección industrial que analizan diferencias de color. Hacemos énfasis en que el objetivo de la medida es la magnitud de la diferencia de color, no la exactitud en la medida absoluta del color. Plantear

este objetivo tiene pleno sentido, sobre todo en aquellas aplicaciones en las que el problema es garantizar la uniformidad del color, no la fidelidad en la reproducción del color. En numerosos procesos industriales (por ejemplo en la inspección de igualaciones de color, los procesos Pasa/No pasa, etc.) la medida absoluta del color no es lo importante, sino la medida de la diferencia de color. De nuevo en este capítulo, compararemos los resultados obtenidos por la cámara con los resultados obtenidos utilizando el espectrorradiómetro como instrumento de referencia de alta precisión. Para calcular las diferencias de color, utilizamos dos formulaciones recomendadas por la CIE: la clásica fórmula CIELAB, donde la diferencia de color se representa por  $\Delta E_{ab}^*$  [Wyszecki 1982], [Berns 2000], [CIE 116:1995], [Westland 2004] y otra métrica más reciente, CIEDE2000, donde la diferencia de color se representa por  $\Delta E_{00}$  [Luo 2001], [CIE 142:2001], [Westland 2004].

En este capítulo se estudia la posibilidad de emplear un sistema de visión por cámara para inspeccionar la igualación de color en muestras uniformes, lo cual implica la detección de pequeñas diferencias de color entre ellas. Con frecuencia estas tareas de inspección son reservadas a operarios especializados con visión entrenada. Como campo de aplicación consideramos el caso específico del control de calidad del color en tejidos textiles. Por motivos culturales, los colores poco saturados son muy utilizados en la producción textil de mayor nivel de exigencia en calidad, dirigida principalmente a la confección de trajes. Los colores son, por lo general, grisáceos y oscuros, o bien, pálidos. Otros tipos de tejidos, así como otros sectores industriales relacionados con la ambientación y decoración utilizan asimismo colores poco saturados.

### ***3.1 Precisión de la medida, tolerancia instrumental y discrepancia con el espectrorradiómetro***

#### **REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS**

*El contenido de este apartado se encuentra en las publicaciones del compendio con las siguientes referencias:*

Millán, M. S., Valencia, E., Corbalán, M., "3CCD Camera's capability for measuring color differences: experiment in the nearly neutral region", *App. Opt.* **43**(36), 6523-6535 (2004).

**Valencia, E.**, Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", *J. Imaging Sci. Technol.* **49**(6), 605-619 (2005).

Para el nivel de incertidumbre asociado con el proceso de medida, consideramos un valor específico llamado el promedio de las diferencias de color respecto al color medio y que representamos por MCDM (de las iniciales en inglés, *the Mean Color Difference from the Mean*) [Berns 2000]. Para calcularlo se procede de la siguiente manera: Sea un conjunto de valores CIELAB  $(L_i^*, a_i^*, b_i^*)$  obtenidos midiendo repetidamente el color de una muestra, que suponemos uniforme, y sea  $(\bar{L}^*, \bar{a}^*, \bar{b}^*)$  su valor medio. Se calculan las diferencias de color entre cada medida y el valor medio hallado y luego se realiza el promedio de todas las diferencias de color. Este promedio de las diferencias de color define el valor MCDM. Cuanto mayor es el valor MCDM, peor es la precisión (expresada como una esfera). Aunque las diferencias de color sólo pueden ser positivas y, consecuentemente, la distribución de medidas que resulta está sesgada, es todavía razonable utilizar el valor MCDM como medida del error. Como señala Berns en [Berns 2000], los datos de diferencias de color están siempre sesgados hacia las mayores diferencias de color, lo que repercute en mayores valores del MCDM y, en todo caso, se acaba gravando por exceso, no por defecto, el error o precisión instrumental.

Nosotros calculamos el valor MCDM a partir de diez medidas del color tomadas del área central de una muestra Munsell. Estos valores son calculados para estimar la precisión tanto del instrumento de referencia como del dispositivo de adquisición, en nuestro caso, espectroradiómetro y cámara, respectivamente. En el caso de las medidas efectuadas con la cámara, cada medida individual  $(L_i^*, a_i^*, b_i^*)$  es, a su vez, el promedio de las coordenadas CIELAB de una ventana de 300x300 píxeles del área central de la imagen. Hemos repetido el procedimiento para un conjunto de diversas muestras Munsell y hemos observado estabilidad en el resultado final del MCDM obtenido. Siguiendo la notación establecida en [Berns 2000] el valor  $n\Delta E_{ab}^*$  es el valor MCDM en la métrica CIELAB. Análogamente, el valor  $n\Delta E_{00}$  es el valor MCDM en la métrica CIEDE2000.

De acuerdo con nuestros resultados experimentales hemos obtenido que el espectroradiómetro tiene una precisión, expresada mediante el valor MCDM, de  $0.025\Delta E_{ab}^*$  CIELAB y

$0.020\Delta E_{00}$  CIEDE2000. Para la cámara, los valores que representan la precisión son  $0.05\Delta E_{ab}^*$  CIELAB y  $0.06\Delta E_{00}$  CIEDE2000, cuando opera en condiciones de  $(gain, offset) = (255, 32)$ . Cuando capta en condiciones de  $(gain, offset) = (255, 0)$ , su precisión viene dada por  $0.1\Delta E_{ab}^*$  CIELAB y  $0.09\Delta E_{00}$  CIEDE2000 (Tabla 3.1).

Siguiendo una regla estadística ampliamente aceptada, se debe tomar como tolerancia instrumental un valor no inferior a diez veces el valor del error instrumental o precisión [Berns 2000]. Esta regla nos da un orden de magnitud de las tolerancias instrumentales de nuestros dispositivos (Tabla 3.1).

*Tabla 3.1 - Tabla resumen de precisión (MCDM) y tolerancia instrumental de los dispositivos utilizados.*

Instrumento	CIELAB		CIEDE2000	
	Precisión $n\Delta E_{ab}^*$	Tolerancia Instr.	Precisión $n\Delta E_{00}$	Tolerancia instr.
Espectrorradiómetro	0.025	0.25	0.020	0.20
Cámara 3CCD $(gain, offset) = (255, 32)$	0.05	0.5	0.06	0.6
Cámara 3CCD $(gain, offset) = (255, 0)$	0.10	1.0	0.09	0.9
Cámara CMOS Multicapa	0.103	1.0	0.080	0.8

El test utilizado para las medidas de las diferencias de color es el mismo que se ha descrito en la sección 2.4.2 del capítulo anterior. Tal y como se explicó allí, está formado por 160 muestras de la colección mate Munsell, de colores poco saturados, que se reúnen en dos grupos: el test de colores claros (o pálidos) de 90 muestras (Figura 2.20) y el test de colores oscuros (grisáceos) de 70 muestras (Figura 2.21). Ambos tests están compuestos por diez subgrupos distribuidos regularmente en el círculo de tono Munsell (Figura 3.1).

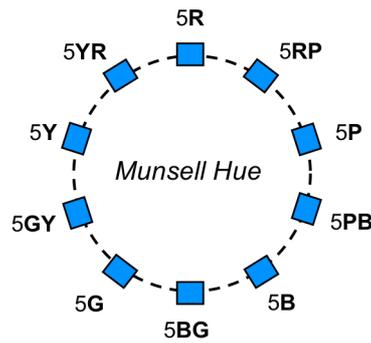


Figura 3.1 - Círculo de tono Munsell, sobre el que se marcan los centros de grupo de los test de muestras claras y oscuras

Cada subgrupo del test de muestras claras está formado por una muestra “centro de grupo” y sus ocho muestras vecinas más próximas (Figura 3.2) en las escalas de *Value Munsell*, *Hue Munsell* y *Chroma Munsell* que nos permite utilizar la colección Munsell. Así pues, un subgrupo de muestras claras está formado por muestras que tienen las siguientes características:

La muestra centro de grupo con *Value/Chroma Munsell* igual a 8.0/2.0.

Las muestras vecinas, que se obtienen, dentro del espacio Munsell, por variaciones de los valores correspondientes a la muestra centro de grupo en las siguientes cantidades:  $\pm 0.5$  y  $\pm 1.0$  en la componente *Chroma Munsell*,  $\pm 0.5$  en la componente *Value Munsell* y  $\pm 2.5$  en la componente *Hue Munsell* (Figura 3.2).

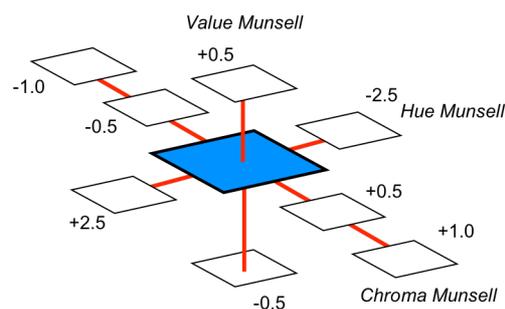


Figura 3.2 - Esquema de un subgrupo de muestras pertenecientes al test de colores claros.

Cada subgrupo del test de muestras oscuras está formado por una muestra “centro de grupo” y sus seis muestras vecinas más próximas en las escalas de *Value Munsell*, *Hue Munsell* y *Chroma Munsell* (Figura 3.3). Así pues, un subgrupo de muestras oscuras está formado por muestras que tienen las siguientes características:

La muestra centro de grupo con *Value/Chroma Munsell* igual a 4.0/2.0.

Las muestras vecinas, que se obtienen, dentro del espacio Munsell, por variaciones de los valores correspondientes a la muestra centro de grupo en las siguientes cantidades: -1.0 y +2.0 en la componente *Chroma Munsell*,  $\pm 1.0$  en la componente *Value Munsell* y  $\pm 2.5$  en la componente *Hue Munsell* (Figura 3.3).

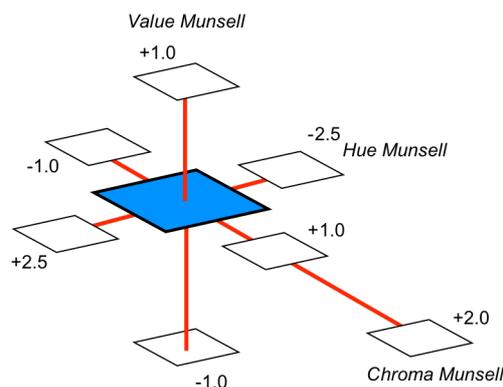


Figura 3.3 - Esquema de un subgrupo de muestras perteneciente al test de colores oscuros.

Al realizar las medidas de diferencias de color de las muestras, se compara cada una de las muestras vecinas con la muestra centro de grupo. Este proceso hace un total de 140 diferencias de color entre pares de muestras próximas (pequeñas diferencias de color) que se han evaluado separadamente con la cámara y con el instrumento de referencia. Las formulas CIELAB  $\Delta E_{ab}^*$  y CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  son empleadas para calcular las diferencias de color.

La comparación entre la diferencias de color medidas por la cámara y por el instrumento de referencia permite evaluar la discrepancia entre ambos instrumentos. La discrepancia absoluta  $D_i$  puede ser estimada simplemente restando la diferencia de color medida por el instrumento de referencia (*ref*) y la medida por el dispositivo de adquisición (*cam*), y tomando el valor absoluto, es decir,

$$D_i = |\Delta E_i(\text{ref}) - \Delta E_i(\text{cam})|, \quad (3.1)$$

donde el subíndice  $i = \{ab, 00\}$  indica la métrica CIELAB o CIEDE2000 empleada en la ecuación (3.1). La discrepancia relativa  $D_i^r$  es la discrepancia absoluta dividida por el valor medio  $\langle \cdot \rangle$  de las diferencias de color medidas por el instrumento de referencia y la cámara,

$$D_i^r = \frac{D_i}{\langle \Delta E_i(\text{ref}), \Delta E_i(\text{cam}) \rangle} = \frac{2|\Delta E_i(\text{ref}) - \Delta E_i(\text{cam})|}{\Delta E_i(\text{ref}) + \Delta E_i(\text{cam})}. \quad (3.2)$$

Estas discrepancias se emplean para evaluar el nivel de acuerdo o concordancia entre las diferencias de color medidas por la cámara y las medidas por el instrumento de referencia. Como el espectrorradiómetro que se emplea es de gran precisión y su tolerancia es baja ( $\leq 0.5\Delta E_{ab}^*$ ) los valores de las discrepancias permiten evaluar la confianza o fiabilidad que ofrece la cámara en la medida de la diferencia de color. Si el valor de la discrepancia absoluta no excede la incertidumbre, entonces las medidas efectuadas por uno y otro instrumento son coincidentes (son indistinguibles). Este es el caso ideal. De forma más realista, podemos considerar que, dado que la tolerancia de la cámara es buena (experimentalmente su valor se aproxima a  $1.0\Delta E_{ab}^*$ ), si la discrepancia absoluta es baja y cae dentro de la tolerancia de la cámara, entonces, la cámara sería un buen dispositivo para la medida de diferencias de color. Por otra parte, las discrepancias relativas proporcionan información acerca de la exactitud y la uniformidad del comportamiento de la cámara al medir diferencias de color producidas por distintos tipos de variaciones: tono (*Hue Munsell*), croma (*Chroma Munsell*) y luminancia (*Value Munsell*).

### **3.2 Diferencias entre muestras de colores pálidos y oscuros mediante cámara 3CCD**

#### **REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS**

*El contenido de este apartado se encuentra en las publicaciones del compendio con las siguientes referencias:*

Millán, M. S., Valencia, E., Corbalán, M., "3CCD Camera's capability for measuring color differences: experiment in the nearly neutral region", *App. Opt.* **43**(36), 6523-6535 (2004).

Valencia, E., Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", *J. Imaging Sci. Technol.* **49**(6), 605-619 (2005).

En este estudio se mantiene la configuración para la adquisición de medidas con el espectrorradiómetro y adquisición de imágenes mediante la cámara 3CCD que han sido descritas en la sección 2.4.1 del capítulo anterior y han sido utilizadas hasta el momento.

En la realización experimental, se ha medido la diferencia de color entre la muestra centro de grupo y cada una de sus muestras vecinas, repitiéndose las medidas para cada uno de los grupos de los tests de colores claros y colores oscuros descritos en la sección 2.4.2 (Figura 2.20 y Figura 2.21) y Figuras 3.1, 3.2 y 3.3. En las medidas efectuadas con la cámara se han estudiado dos configuraciones de  $(gain, offset) = \{(255, 0), (255, 32)\}$ . Se han obtenido las medidas de color con la transformación correspondiente a la caracterización espectral de la cámara (CSS sección 2.3.1, ecuación (2.5)), las diferencias de color con las fórmulas CIELAB y CIEDE2000 para ambas configuraciones de  $(gain, offset)$  y se han comparado los resultados [Millán 2004a]. Los resultados obtenidos con las dos fórmulas CIELAB y CIEDE2000 son muy similares, de modo que ambas métricas conducen a las mismas conclusiones. Puede confirmarse una ligera preferencia por la captación con  $(gain, offset) = (255, 32)$ , pero esta condición de captación no es crítica, por lo que existe una cierta tolerancia en estos valores de  $(gain, offset)$  sin que los resultados proporcionados por la cámara se vean seriamente alterados.

En este resumen mostramos los resultados obtenidos con la configuración de captación  $(gain, offset) = (255, 32)$ , para las dos aproximaciones CSS y UMG, cuyas transformaciones lineales de valores RGB a XYZ vienen dadas por la ecuación (2.5) y la ecuación (2.6), respectivamente. Estos resultados han sido publicados en [Valencia 2005c]. La Figura 3.4 presenta las diferencias de color CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  para el test de muestras de colores claros. Cada diagrama contiene el resultado obtenido para los diez centros de grupo situados sobre el círculo de tono Munsell. En cada diagrama circular, la dimensión radial representa la magnitud de la diferencia de color en las unidades CIEDE2000. Se dibujan circunferencias concéntricas que distan radialmente 4 unidades CIEDE2000. Se presenta un diagrama para cada una de las variaciones de la escala Munsell consideradas:  $\pm 0.5 Chroma$ ,  $\pm 1.0 Chroma$ ,  $+0.5 Value$ ,  $+2.5 Hue$ , a partir de la muestra centro de grupo. Sobre cada diagrama se representan las diferencias de color CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  que resultan de medir con el

espectrorradiómetro, con la cámara utilizando la transformación CSS (ecuación (2.5)) y la transformación UMG (ecuación (2.6)). De la Figura 3.4, se deduce que las diferencias de color medidas por la cámara (para ambas transformaciones lineales CSS y UMG) y por el espectrorradiómetro presentan un alto grado de concordancia en la estimación de las diferencias de color para el test de colores claros. Analizando más en detalle los diferentes diagramas, nosotros observamos que la mayor coincidencia se obtiene en la estimación de las diferencias de color correspondientes a la variación  $\pm 0.5$  *Value Munsell*. La Figura 3.5 muestra diagramas con representaciones análogas a las de la Figura 3.4 para el test de muestras de colores oscuros. De nuevo, los diagramas muestran un buen acuerdo entre las medidas de las diferencias de color obtenidas por el espectrorradiómetro y la cámara (en ambas transformaciones lineales – CSS y UMG).

Se ha calculado la discrepancia absoluta  $D_i$  (ecuación (3.1)) entre las medidas de las diferencias de color obtenidas con la cámara y con el espectrorradiómetro para la evaluación de colores claros y oscuros. Los resultados de esta experiencia se han publicado en [Valencia 2005c]. En la Tabla 3.2 se resumen los valores medios de dichas discrepancias absolutas para los diez subgrupos de tono, tanto del test de colores claros como para el test de colores oscuros. Las discrepancias  $D_{ab}$  están basadas en diferencias de color CIELAB, mientras que las discrepancias  $D_{00}$  lo están en diferencias de color CIEDE2000.

Como se aprecia en la Tabla 3.2, los valores medios de las discrepancias absolutas exceden, en general, el nivel de incertidumbre de la cámara ( $n\Delta E_{ab}^* = 0.05$  ó  $n\Delta E_{00} = 0.06$ ). Sin embargo, para el subconjunto de los colores claros, la mayoría de ellos están por debajo de la tolerancia de la cámara ( $0.5\Delta E_{ab}^*$  ó  $0.6\Delta E_{00}$ ). Este hecho, junto con el reducido valor de la tolerancia de la cámara, puede calificarse como un buen logro para el comportamiento de la cámara como dispositivo de medida de diferencias de color. En el caso de los colores oscuros, donde las variaciones mínimas en la escala de *Value Munsell* y *Chroma Munsell* son mayores, las discrepancias absolutas son algo más altas, corresponden a una estimulación muy inferior de los sensores de la cámara y a una mayor influencia del ruido de corriente oscura. Si consideramos el error mínimo calculado con la aproximación UMG para el conjunto de muestras Hardeberg (Hardeberg 1999) ( $\epsilon_{\min} = 1.423$  unidades CIELAB) como otra referencia

para la comparación, casi todas las discrepancias absolutas calculadas con la matriz UMG son inferiores a este valor.

### CIEDE2000 $\Delta E_{00}$ – Colores Claros

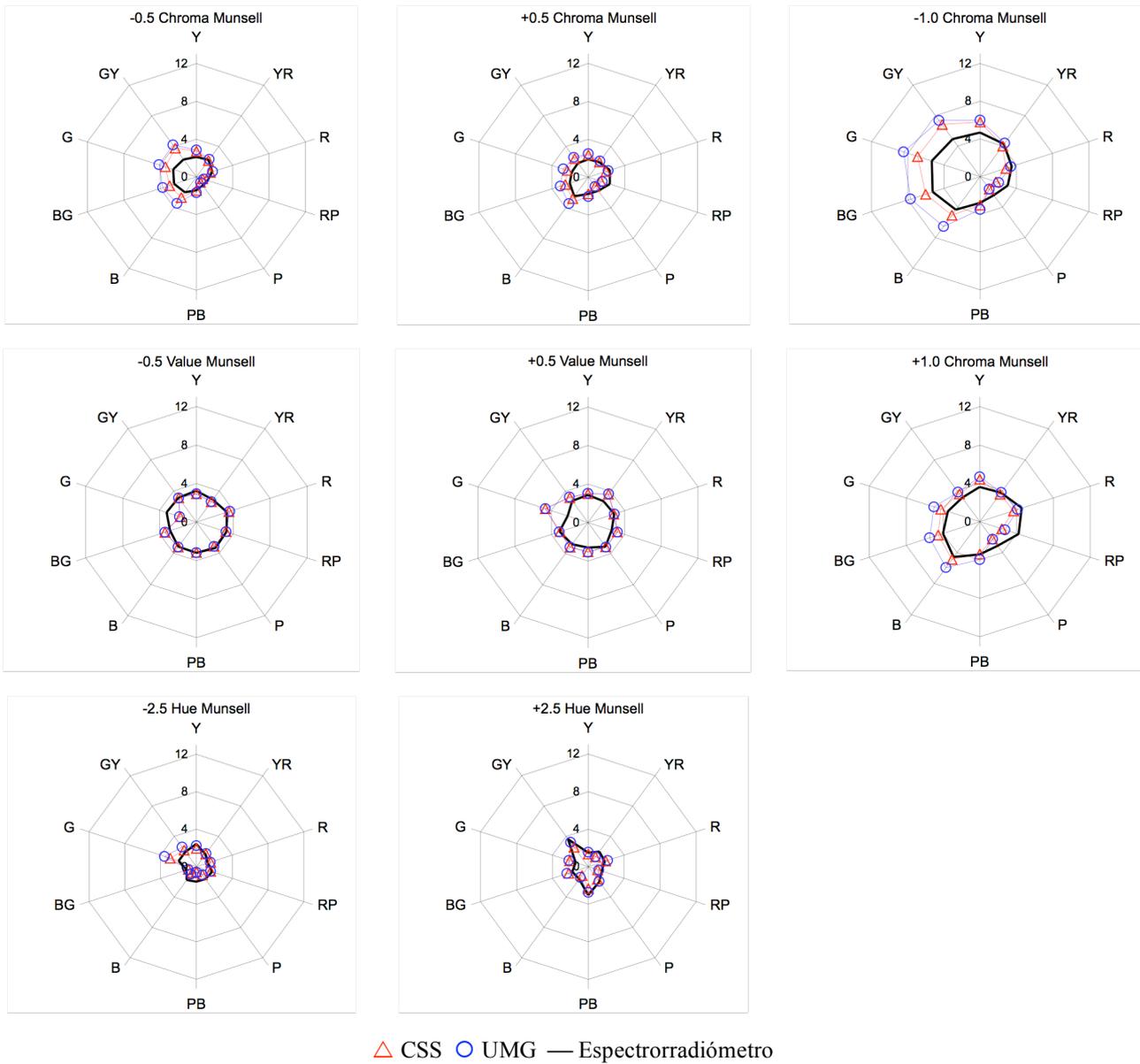


Figura 3.4 - Diferencias de color CIEDE2000 entre cada muestra centro de grupo y sus respectivas vecinas (colores claros). Medidas efectuadas con el espectrorradiómetro y con la cámara usando las transformaciones lineales CSS y UMG.

CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  – Colores Oscuros

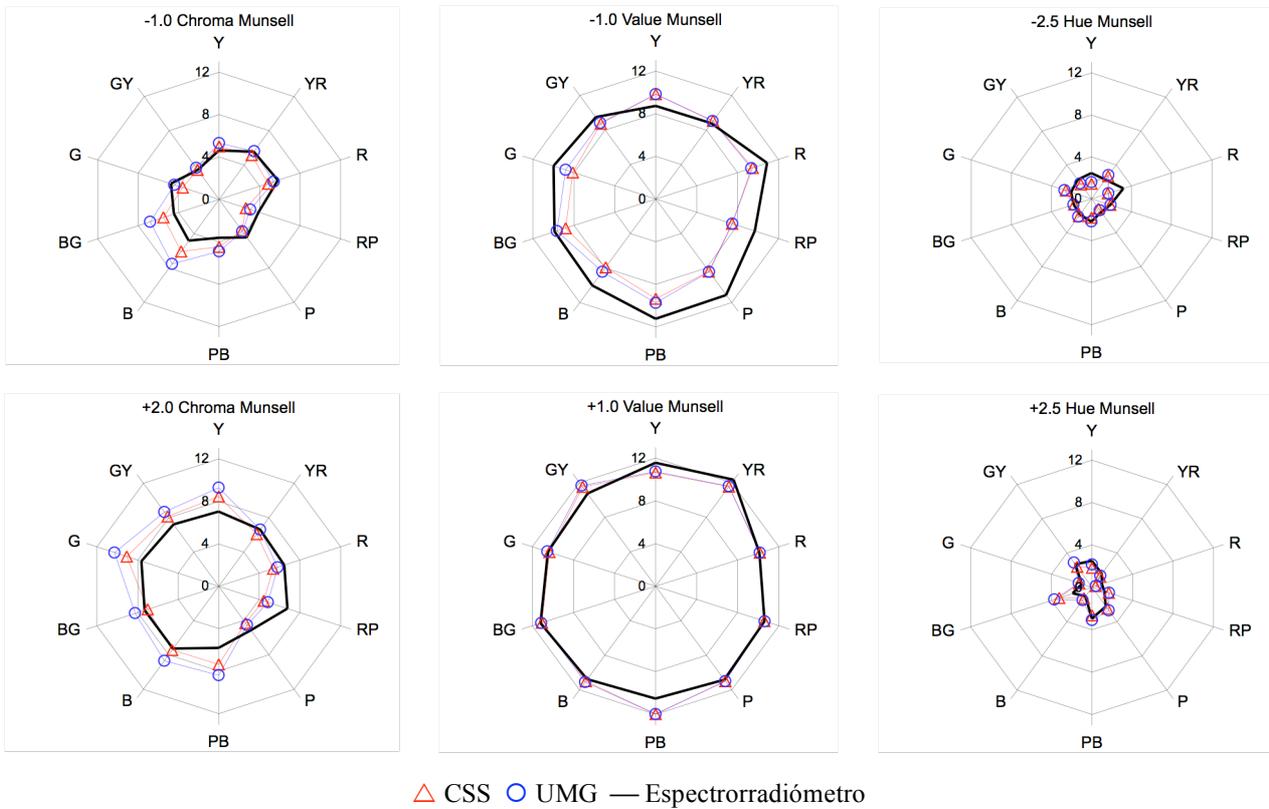


Figura 3.5 - Diferencias de color CIEDE2000 entre cada muestra centro de grupo y sus respectivas vecinas (colores oscuros). Medidas efectuadas con el espectrorradiómetro y con la cámara usando las transformaciones lineales CSS y UMG.

Tabla 3.2 - Resumen de los valores medios de las discrepancias absolutas entre las diferencias de color medidas por la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro para los diez subgrupos de tono Munsell. Valores extraídos de las Tablas III y IV de [Valencia 2005c].

		Colores Claros							
Centro de grupo		-2.5 Tono	+2.5 Tono	-1.0 Croma	-0.5 Croma	+0.5 Croma	+1.0 Croma	-0.5 Value	+0.5 Value
<math>\langle D_{00} \rangle</math>	CSS	0.508	0.517	0.936	0.548	0.461	0.682	0.332	0.540
	UMG	0.547	0.386	1434	0.812	0.638	0.949	0.320	0.562
<math>\langle D_{ab} \rangle</math>	CSS	0.448	0.485	0.595	0.339	0.300	0.436	0.532	0.793
	UMG	0.442	0.408	0.957	0.512	0.406	0.587	0.525	0.796

		Colores Oscuros					
Centro de grupo		-2.5 Tono	+2.5 Tono	-1.0 Croma	+2.0 Croma	-1.0 Value	+1.0 Value
<math>\langle D_{00} \rangle</math>	CSS	0.515	0.470	0.824	1077	1558	0.457
	UMG	0.444	0.502	0.967	1455	1305	0.448
<math>\langle D_{ab} \rangle</math>	CSS	0.452	0.402	0.547	0.949	1.838	0.814
	UMG	0.484	0.437	0.692	1.173	1.667	0.865

A continuación se han calculado las discrepancias relativas  $D'_i$  (ecuación (3.2)) para analizar la uniformidad del comportamiento de la cámara para los diferentes grupos de tono, tanto para el test de colores claros como de colores oscuros. Los resultados de esta experiencia se han publicado en [Valencia 2005c] tablas V y VI. Las discrepancias relativas correspondientes a las variaciones de *Hue*, *Chroma* y *Value Munsell* consideradas a partir de un centro de grupo se han promediado y el valor calculado (tanto en la métrica CIELAB como CIEDE2000) se ha graficado para los diferentes grupos de tono en la Figura 3.6. También se han promediado las discrepancias relativas para cada variación en los diez subgrupos de tono y el valor calculado está graficado en la Figura 3.7, tanto para el test de colores claros como para el de colores oscuros.

En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se han hallado los valores medios de las discrepancias relativas usando las métricas CIELAB y CIEDE2000 en el cálculo de las diferencias de color. También se han calculado tanto para la transformación lineal CSS como para la UMG. En la Figura 3.6, las discrepancias relativas son bajas y bastante uniformes alrededor del círculo de tonos para ambos conjuntos de muestras (claras y oscuras). Este hecho es también una buena característica del comportamiento de la cámara. En la Figura 3.6, los valores calculados usando la formulación CIEDE2000, graficados en la Figura 3.6(a), inducen comentarios similares a los generados usando la formulación CIELAB, graficados en la Figura 3.6(b). También los valores calculados usando las transformaciones CSS y UMG para la conversión de los valores RGB a XYZ, son valores próximos.

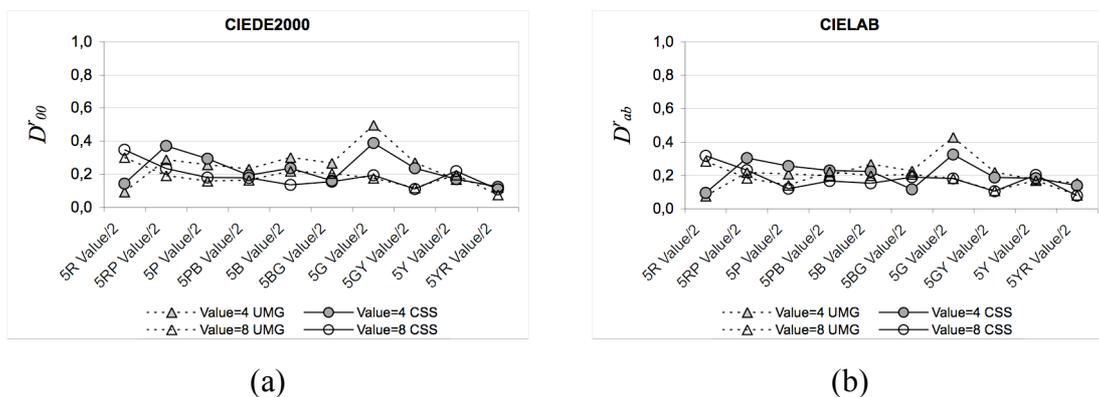


Figura 3.6 - Valores medios de las discrepancias relativas entre las medidas de diferencias de color obtenidas por la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro alrededor del círculo de tono Hue Munsell usando: (a) la métrica CIEDE2000 y (b) la métrica CIELAB. La etiqueta Value=4 representa el test de los colores oscuros y la etiqueta Value=8 representa el test de los colores claros. Los cálculos se han hecho para las dos aproximaciones dadas por las transformaciones CSS y UMG.

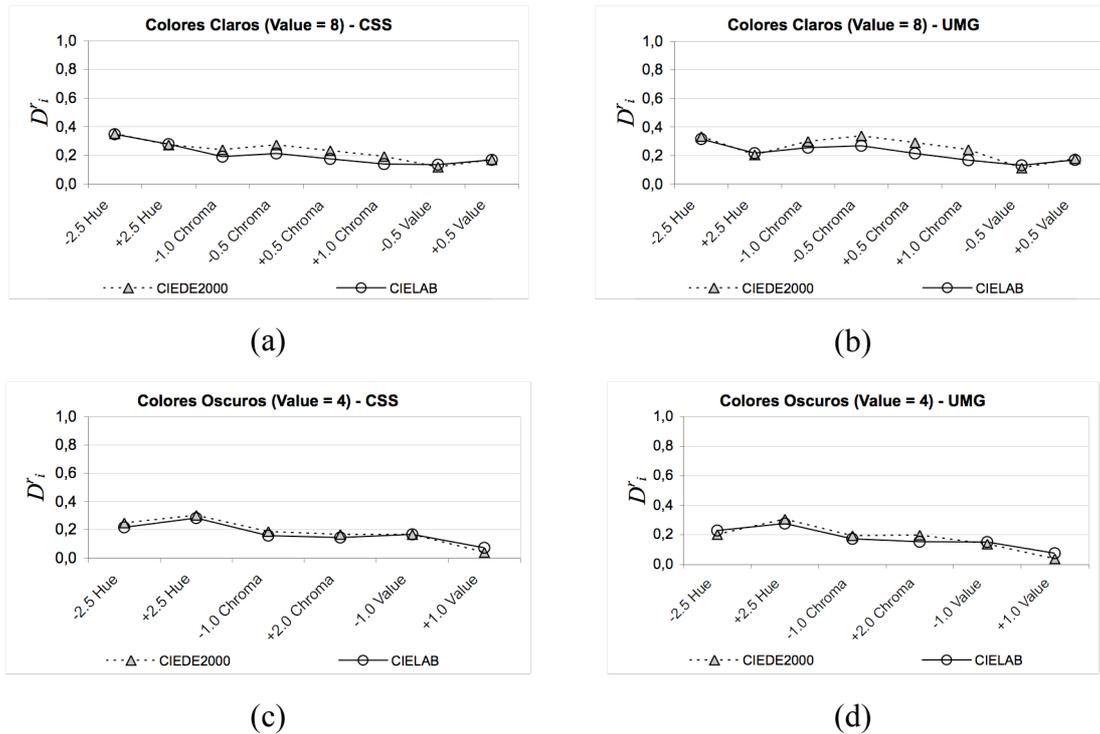


Figura 3.7 – Valores medios de las discrepancias relativas entre las medidas de diferencias de color obtenidas por la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro vs. las variaciones en las escalas Hue, Chroma y Value Munsell. (a) y (b) representan los valores obtenidos para el test de colores claros y (c) y (d) para el test de colores oscuros.

En la Figura 3.7, se observa de nuevo que las discrepancias relativas son bajas en la evaluación de las diferencias de color producidas por las diversas variaciones en las escalas de color Munsell. Se pueden apreciar discrepancias relativas ligeramente superiores en la evaluación de las variaciones de tono (*Hue Munsell*) que en las variaciones de luminancia (*Value Munsell*). Este hecho es común en ambos tests de colores seleccionados, los claros (Figura 3.7(a) y Figura 3.7(b)) y los oscuros (Figura 3.7(c) y Figura 3.7(d)). También hay una ligera diferencia entre los resultados obtenidos utilizando la formulación CIELAB y CIEDE2000 en la apreciación de las pequeñas variaciones de croma (inferiores a  $\pm 1.0$  *Chroma Munsell*). En tal caso, la formulación CIEDE2000 tiende a ser más sensible y hace que la discrepancia entre la cámara y el espectrorradiómetro sea superior a si se emplea la formulación CIELAB.

Los resultados presentados desde la Figura 3.4 a la Figura 3.7, calculados con los valores RGB experimentales obtenidos de la cámara, y transformados al espacio independiente del

dispositivo de los valores triestímulos XYZ usando las matrices de transformación lineal CSS y UMG, son muy aproximados y no pueden extraerse conclusiones a favor de una u otra transformación. Este hecho se interpreta como la poca influencia que tienen para esta cámara 3CCD las fuentes de ruido, lo que altera de forma insignificante los valores de las medidas de las diferencias de color.

En conclusión, los resultados demuestran que el sistema de visión basado en una cámara 3CCD es un buen instrumento para efectuar medidas de la diferencia de color entre dos muestras próximas. Esta característica, puede ser usada con ventaja en diversas aplicaciones de inspección y evaluación de la uniformidad de color.

### **3.3 Diferencias entre muestras de colores pálidos mediante cámara de sensor multicapa**

#### **REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS**

*El contenido de este apartado se encuentra en la publicación del compendio con la siguiente referencia:*

Millán, M. S., **Valencia, E.**, Corbalán, M., Gastón, G. "A comparison of a multi-layer silicon sensor camera and a 3CCD camera for measuring small colour differences" en *10th Congress of the International Colour Association – AIC Colour 05*, ISBN: 84-609-5162-6, 299-302, Granada, España, 2005.

El estudio planteado en este apartado es similar al del apartado anterior, pero sustituyendo la cámara 3CCD por la cámara Sigma SD9 de sensor CMOS multicapa. La configuración de la cámara es la descrita en el apartado 2.3.2, con una apertura del diafragma fijada en  $f/\# = 8$  y un tiempo de exposición de 1/30s, que permite mayor rango de captación de muestras. Se ha empleado la matriz de transformación de los valores RGB a valores triestímulos XYZ de la ecuación (2.7).

En las condiciones de captación fijadas, la cámara con sensor multicapa mostraba, pese a todo, una respuesta muy débil para las muestras de tonos oscuros, por lo que hubo que limitar la experiencia al test de colores claros. En este apartado se resumen los resultados del estudio

comparativo realizado para las dos cámaras, la de sensor multicapa y la 3CCD, y el instrumento de referencia, el espectrorradiómetro, para el test de colores claros.

Para las medidas con la cámara 3CCD se ha empleado la transformación basada en la caracterización CSS (ecuación (2.5)) y una configuración  $(gain, offset) = (255, 32)$ . Los valores de los cálculos de las diferencias de color, se han realizado empleando las formulaciones CIELAB  $\Delta E_{ab}^*$  y CIEDE2000  $\Delta E_{00}$ . Las condiciones de captación en esta experiencia son iguales que las empleadas en los apartados anteriores, con una geometría de iluminación/observación igual a 20/0 (ver Figura 2.18), un iluminante simulador de luz día  $D_{65}$ . Los resultados de esta experiencia están publicados en [Millán 2004a].

La Figura 3.8 presenta las diferencias de color CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  medidas para las variaciones de  $\pm 2.5$  Hue Munsell,  $\pm 0.5$  Chroma Munsell y  $\pm 0.5$  Value Munsell con respecto a la muestra centro de grupo. En esta figura, los valores experimentales medidos con el espectrorradiómetro están representados por la línea negra, los valores medidos con la cámara 3CCD se representan por círculos azules y los medidos con la cámara de sensor múltiple se presentan por triángulos rojos. En la figura se observa una mayor concordancia en la medida de las diferencias de color entre el espectrorradiómetro y la cámara 3CCD que entre el espectrorradiómetro y la cámara de sensor multicapa.

La discrepancia absoluta entre la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro es menor que 0.5 unidades CIELAB o 0.23 unidades CIEDE2000 en promedio, lo cual hace considerar la cámara 3CCD como un dispositivo con muy buenas características, porque está por debajo del nivel de tolerancia de la cámara 3CCD ( $0.50\Delta E_{ab}^*$  ó  $0.60\Delta E_{00}$ , véase Tabla 3.1). La discrepancia absoluta entre la cámara de sensor multicapa y el espectrorradiómetro es algo mayor, concretamente de 0.77 unidades CIELAB y de 0.26 unidades CIEDE2000 en promedio. Debido a que estos valores no son demasiado elevados y están dentro de los niveles de tolerancia de la cámara de sensor multicapa ( $1.03\Delta E_{ab}^*$  ó  $0.80\Delta E_{00}$ , véase Tabla 3.1) consideramos que esta cámara tiene unas características adecuadas para la medida de diferencias de color en muestras de colores claros.

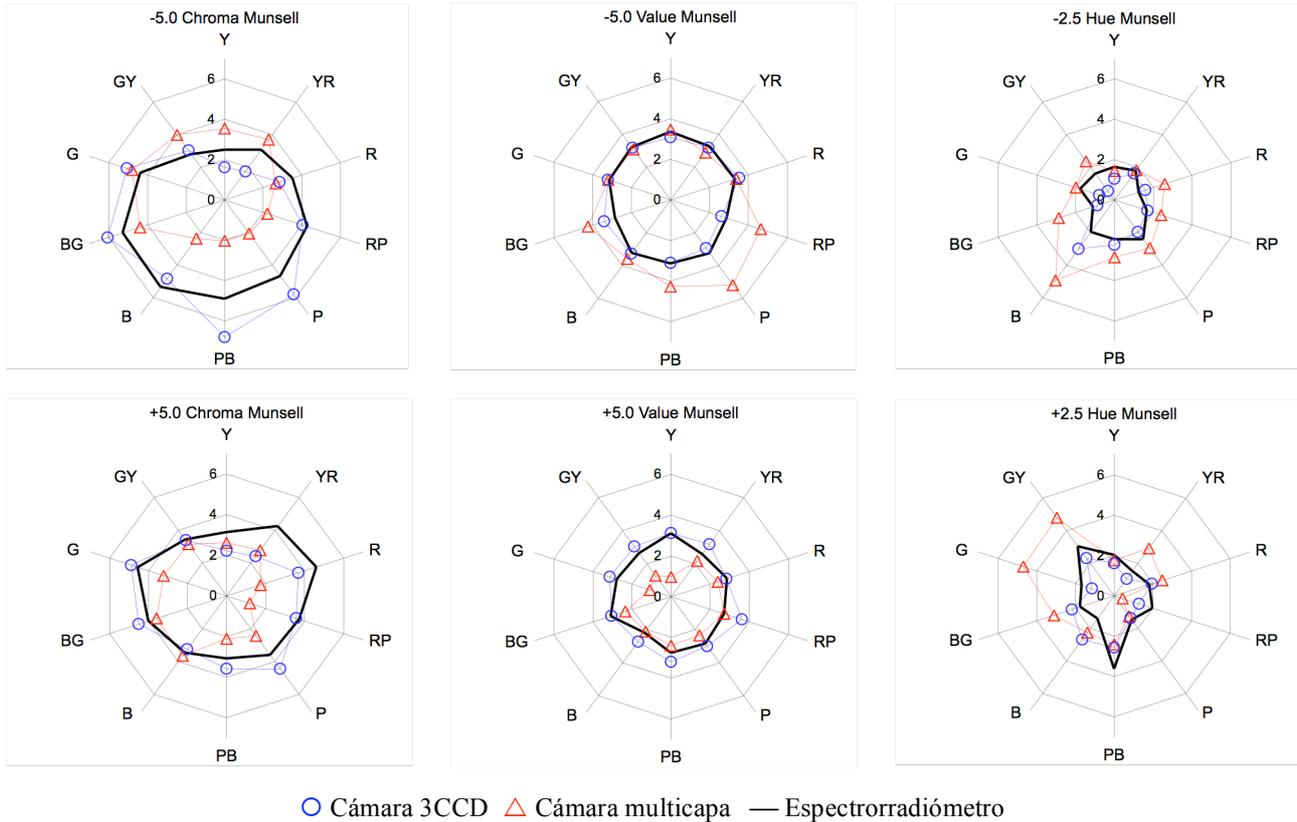


Figura 3.8 - Diferencias de color CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  medidas bajo una iluminación  $D_{65}$  usando un espectrorradiómetro (línea negra) una cámara 3CCD (círculos azules) y una cámara multicapa (triángulos rojos) para el test de colores claros.

De acuerdo con los resultados experimentales ambas cámaras tienen buenas características para medir pequeñas diferencias de color proporcionando resultados próximos a los del instrumento de referencia. La cámara 3CCD (para la configuración de  $(gain, offset) = (255, 32)$ ) es la que presenta un mejor comportamiento, lo cual concuerda con su mayor valor en el parámetro de bondad Vora-Trussell  $\nu = 0.916$ , mientras que la cámara de sensor multicapa (configurada con un tiempo de exposición de 1/30 seg y una apertura  $f/\# = 8$ ) tiene un valor  $\nu = 0.827$ . Recordamos que estos valores indican que la cámara 3CCD tiene una sensibilidad espectral más cercana a las funciones de igualación de color del ser humano que la cámara de sensor multicapa. No obstante, podemos decir que el comportamiento de la cámara de sensor multicapa es bueno en el rango de colores aplicable y que representa una buena solución de compromiso entre las prestaciones ofrecidas y el precio de la cámara.

### **3.4 Otras consideraciones sobre tolerancias: comparación con la repetitividad de las muestras Munsell)**

#### **REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS**

*El contenido de este apartado se encuentra en la publicación del compendio con la siguiente referencia:*

**Valencia, E.**, Millán, M. S., "Diferencias de color entre dos ejemplares del atlas de color Munsell", *Opt. Pura y Apl.* **38**(2), 57-65 (2005).

En los apartados anteriores hemos comparado el comportamiento de la cámara 3CCD, de la cámara de sensor multicapa y del espectrorradiómetro en la realización de medidas de diferencias de color. Hemos analizado los resultados teniendo en cuenta la precisión, la tolerancia instrumental, la discrepancia absoluta y la discrepancia relativa con un instrumento de referencia de elevada precisión como es el espectrorradiómetro. En este apartado nos planteamos realizar la comparación con una perspectiva distinta.

Sabemos que el uso de atlas o cartas de color está muy extendido para la especificación del color en diversos ámbitos de la industria. Pero la reproducción impresa de estas cartas depende de numerosos factores que hace que la repetitividad del color de las muestras presente ciertas limitaciones. Además, las muestras de un atlas pueden experimentar variaciones en su color de referencia, dependiendo de su antigüedad, horas de uso, condiciones de almacenamiento, estado de conservación, etc. Por esta razón, aunque dos personas empleen el mismo atlas de referencia, puede suceder que una determinada especificación de color se corresponda con muestras cuyo color real no sea idéntico, dependiendo de la colección o libro concreto en el que se encuentren. Así pues, existe una incertidumbre en la definición del color asociada al ejemplar concreto del atlas que se utiliza. En esta experiencia analizamos las variaciones de color en material impreso debidas principalmente a la distinta edición, si bien no se excluye la incidencia de otras causas como el envejecimiento y el uso. El problema es tanto más grave por cuanto el material impreso del que se trata es un atlas de color, que se usa como referencia para especificar el color, mediante la asignación de valores a los atributos perceptibles de claridad, tono y croma.

Para llevar a cabo el análisis mediremos las diferencias de color existentes entre pares de muestras que tienen la misma especificación pero que pertenecen a distintos ejemplares del atlas de color Munsell. Utilizamos el espectrorradiómetro como único instrumento de medida y una iluminación determinada. Empleamos la fórmula CIELAB para el cálculo de las diferencias de color,  $\Delta E_{ab}^*$  y  $\Delta E_{00}$  respectivamente. Compararemos las diferencias de color medidas y calculadas de esta manera con otras distancias:

- el error instrumental y
- la distancia o diferencia de color de cada una de las muestras del par con sus vecinas más próximas dentro de la colección a la que pertenece.

### 3.4.1 Diseño del experimento

Se comparan las muestras mate de dos libros Munsell distintos: la colección de muestras casi neutras (*Nearly Neutral Munsell Collection*) y el libro de color (*Munsell Book of Colors*). Estos dos libros fueron adquiridos simultáneamente (fecha de certificación 07/2002, fecha de vencimiento 07/2004) y se han conservado juntos en nuestro laboratorio, en las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad controladas. Las medidas se realizaron en 10/2004.

El test de muestras a analizar es un conjunto de muestras mate que está formado por diez subgrupos distribuidos de forma regular alrededor del círculo de tono *Hue* Munsell. Cada subgrupo  $H_i$ , con  $i = (5R, 5YR, 5Y, 5GY, 5G, 5BG, 5B, 5PB, 5P, 5RP)$  está formado por un conjunto de muestras cuyos valores de luminancia (*Value Munsell*) y de Croma (*Chroma Munsell*) son  $(V/C)_i = (6/2, 7/1, 7/2, 7/4, 8/2)$ . La muestra centro del grupo es  $H_i$  con valor de  $(V/C)_i = 7/2$  y, alrededor de ella, se distribuyen las cuatro muestras vecinas. Todas las muestras del test están contenidas tanto en la colección Munsell de colores casi neutros, como en el libro de colores Munsell. De este modo, se puede cubrir el objetivo de medir la diferencia de color, o el error, que presentan los pares de muestras con igual especificación pero pertenecientes a dos ejemplares distintos del atlas Munsell.

Se han establecido las siguientes condiciones de trabajo: una cabina de observación con iluminación controlada proveniente de un simulador  $D_{65}$  (lámpara fluorescente F40/T12 con temperatura correlacionada de color 6438K y observador de  $10^\circ$ ). Se ha utilizado una geometría de iluminación/observación aproximada de 45/0. Como blanco de referencia se utiliza la placa Photoresearch RS-3. Como instrumento de medida, se ha empleado únicamente el espectrorradiómetro *Photo Research PR-715*. Todas las medidas fueron efectuadas en el mismo día, tres meses después de la fecha límite de vencimiento de la certificación por el laboratorio Munsell fabricante. De cada muestra se obtuvo su reflectancia espectral, los valores triestímulos CIE XYZ y las coordenadas CIELAB en las condiciones de iluminación y observación descritas. Se calcularon las diferencias de color en la métrica CIELAB y en la métrica CIEDE2000.

Recordamos que el error instrumental del espectrorradiómetro al medir las coordenadas CIELAB de cada muestra, expresado en términos MCDM (Tabla 3.1) es de  $\Delta E_{ab}^* = 0.025$  unidades CIELAB y  $\Delta E_{00} = 0.020$  unidades CIEDE2000.

### 3.4.2 Resultados

Los resultados de esta experiencia están publicados en (Valencia 2005c). En la Figura 3.9 se representan los resultados de las diferencias de color CIELAB  $\Delta E_{ab}^*$  (línea azul) y CIEDE2000  $\Delta E_{00}$  (línea roja) obtenidas para los pares de muestras con la misma especificación nominal pertenecientes a los dos ejemplares de libros Munsell. En dicha figura se presentan, sobre cinco diagramas circulares de tono *Hue Munsell*, las diferencias de color obtenidas para cada uno de los valores  $(V/C)_i = (6/2, 7/1, 7/2, 7/4, 8/2)$ , con  $i = (5R, 5YR, 5Y, 5GY, 5G, 5BG, 5B, 5PB, 5P, 5RP)$ . De esta forma, la Figura 3.9(a) para los pares de muestras con  $(V/C)_i = 8/2$ , la Figura 3.9(b) para los pares de muestras con  $(V/C)_i = 7/1$ , la Figura 3.9(c) presenta las diferencias de color para los pares muestras con  $(V/C)_i = 7/2$ , la Figura 3.9(d) para los pares de muestras con  $(V/C)_i = 7/4$ , y la Figura 3.9(e) para los pares de muestras con  $(V/C)_i = 6/2$ . En cada diagrama circular, la dimensión radial representa la magnitud de la diferencia de color en las unidades correspondientes al gráfico considerado

(CIELAB para el gráfico azul y CIEDE2000 para el gráfico rojo). Las diferencias de color medidas en CIEDE2000 son de menor magnitud que las medidas en CIELAB. Todos los valores de diferencias de color medidos son, en general, muy superiores al error instrumental.

Como característica común, se observa en estas figuras que las diferencias de color más altas se dan en la amplia región de los tonos cálidos: rojos, naranjas, amarillos y amarillo verdosos (R, YR, Y y GY), mientras que las diferencias más pequeñas se dan para los tonos fríos: púrpura y verde (P y G). Las diferencias de color en la región de tonos azules, entre el verde y el púrpura, tienen valores intermedios, relativamente bajos en comparación con la región ya señalada del amarillo-rojo. La media global de las diferencias es relativamente baja, con un valor de 0.59 y una desviación estándar de 0.34 en unidades CIELAB y de 0.44 y una desviación estándar de 0.26 en unidades CIEDE2000. Los tonos cálidos (R, YR, Y y GY) tienen en media diferencias de color mayores a 0.9 unidades CIELAB (la mayor diferencia se obtiene para el tono Y cuyo valor medio es de 1.05) lo que representa valores por encima del umbral justamente perceptible, situado entre 0.38 y 0.73 unidades CIELAB [Melgosa 2001]. Quiere esto decir que, en esta región cromática, las diferencias de color entre los pares de muestras de igual especificación, pertenecientes a los dos libros Munsell considerados, pueden ser percibidas por una persona que observe las dos muestras, puestas una al lado de la otra, en las condiciones adecuadas. Si bien es cierto que las diferencias de color medidas por nosotros en esta región no alcanzan el valor supraumbral de 1.75 unidades CIELAB [Melgosa 1997], relacionado con la tolerancia de color o aceptabilidad de la diferencia de color, también es cierto que no distan mucho. En el caso de un atlas parece razonable elevar el nivel de exigencia, por parte del fabricante, en la reproducción del color de las muestras que componen el atlas y en la conservación de sus atributos durante un periodo de vida útil relativamente largo. Este periodo de vida debe ser tenido en cuenta por los usuarios del atlas.

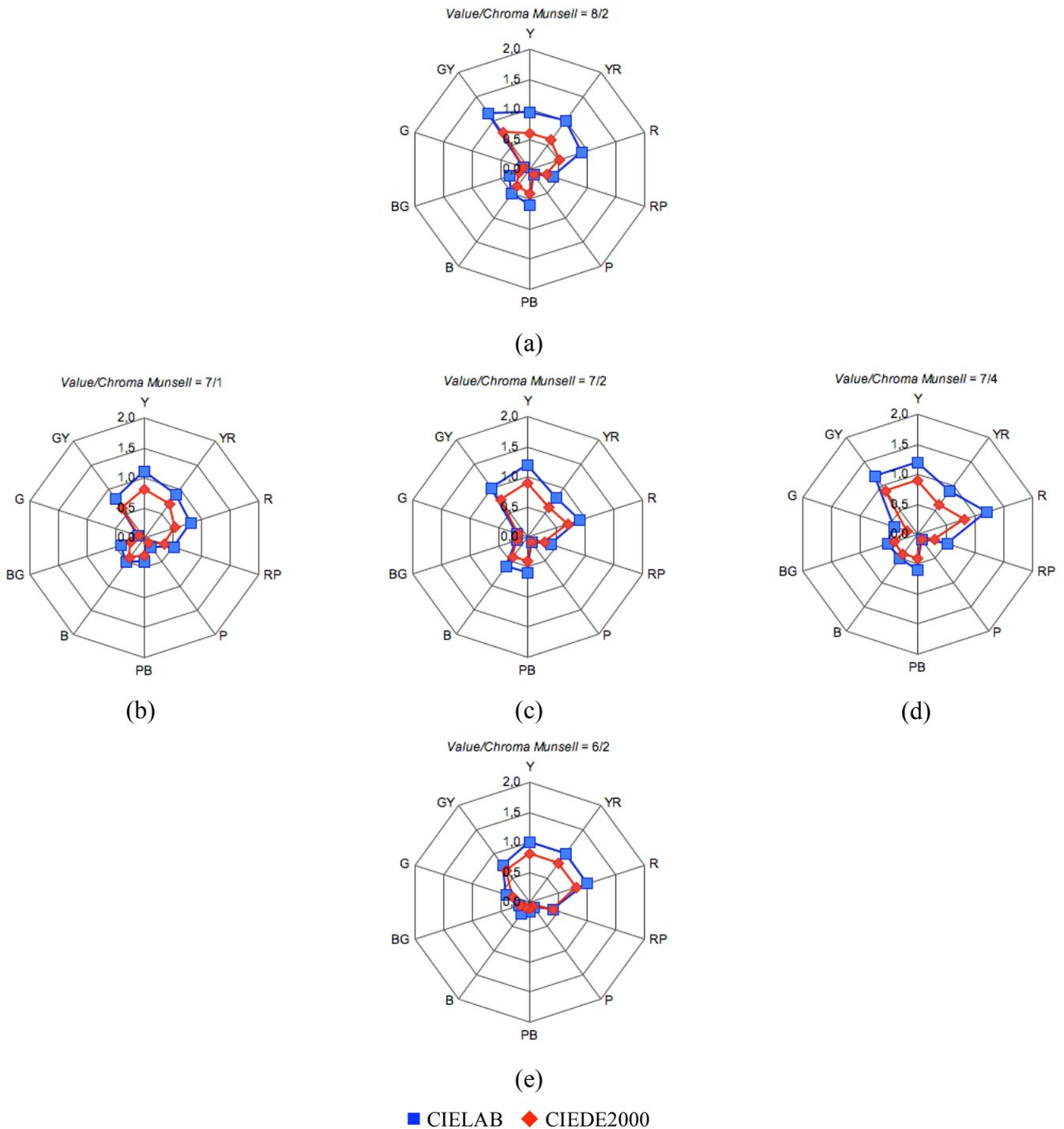


Figura 3.9 - Diferencias de color (CIELAB en azul, CIEDE2000 en rojo) entre pares de muestras de igual denominación Munsell pertenecientes a dos ejemplares de libros Munsell diferentes. Valores agrupados por  $(V/C)_i$  igual a: (a) 8/2, (b) 7/1, (c) 7/2, (d) 7/4 y (e) 6/2

Profundizando un poco más, nos preguntamos qué tipo de variación, en las dimensiones de luminancia, croma y tono, es la que más influye en la diferencia de color medida entre muestras con la misma especificación de color pero pertenecientes a libros Munsell distintos.

En [Valencia 2005a] se incluyen, para la métrica CIELAB las relaciones  $(\Delta L^*/\Delta E_{ab}^*)$ ,  $(\Delta C_{ab}^*/\Delta E_{ab}^*)$ ,  $(\Delta H_{ab}^*/\Delta E_{ab}^*)$  y para CIEDE2000, las relaciones  $(\Delta L'/\Delta E_{00})$ ,  $(\Delta C'/\Delta E_{00})$ ,  $(\Delta H'/\Delta E_{00})$ . En general, se observa que la variación de la luminancia es la que tiene mayor peso en la diferencia de color medida entre las muestras de ambos libros. Las otras variaciones de croma y tono tienen un peso relativo en la diferencia de color muy similar entre sí y muy inferior al de la luminancia. Este efecto nos lleva a concluir que incluso en las regiones de tono de mayor diferencia de color entre ambos libros, estas diferencias se deben fundamentalmente a variaciones de luminancia (claro-oscuro), permaneciendo bastante estable la cromaticidad dada por el tono y el croma de las muestras. No obstante, podemos señalar el caso curioso del tono púrpura (P) que, por una parte, obtiene las menores diferencias de color para los pares de muestras de ambos libros (media de 0.105 unidades CIEDE2000) y, por otra parte, tiene más repartido el peso relativo de las variaciones de luminancia, croma y tono.

La Figura 3.10 ilustra directamente los valores de la luminancia versus el croma para las muestras de cada grupo  $H_i$  en los dos libros seleccionados. En cada uno de los diez diagramas se representan elementos en forma de cruz, que corresponden al centro de grupo y a sus vecinos. Los elementos dibujados en línea roja unen los puntos correspondientes a las muestras extraídas del *Munsell Color Book*. Los elementos dibujados en línea azul unen los puntos correspondientes a las muestras extraídas del libro *Nearly Neutral Munsell Collection*. En cada figura, cabe resaltar la diferente posición de estos elementos en cruz que, aun siendo similares en forma, aparecen afectados por un desplazamiento relacionado principalmente con la luminancia ( $L$ ). Este desplazamiento es máximo en el tono amarillo verdoso (5GY) y mínimo en los tonos púrpura (5P) y verde (5G).

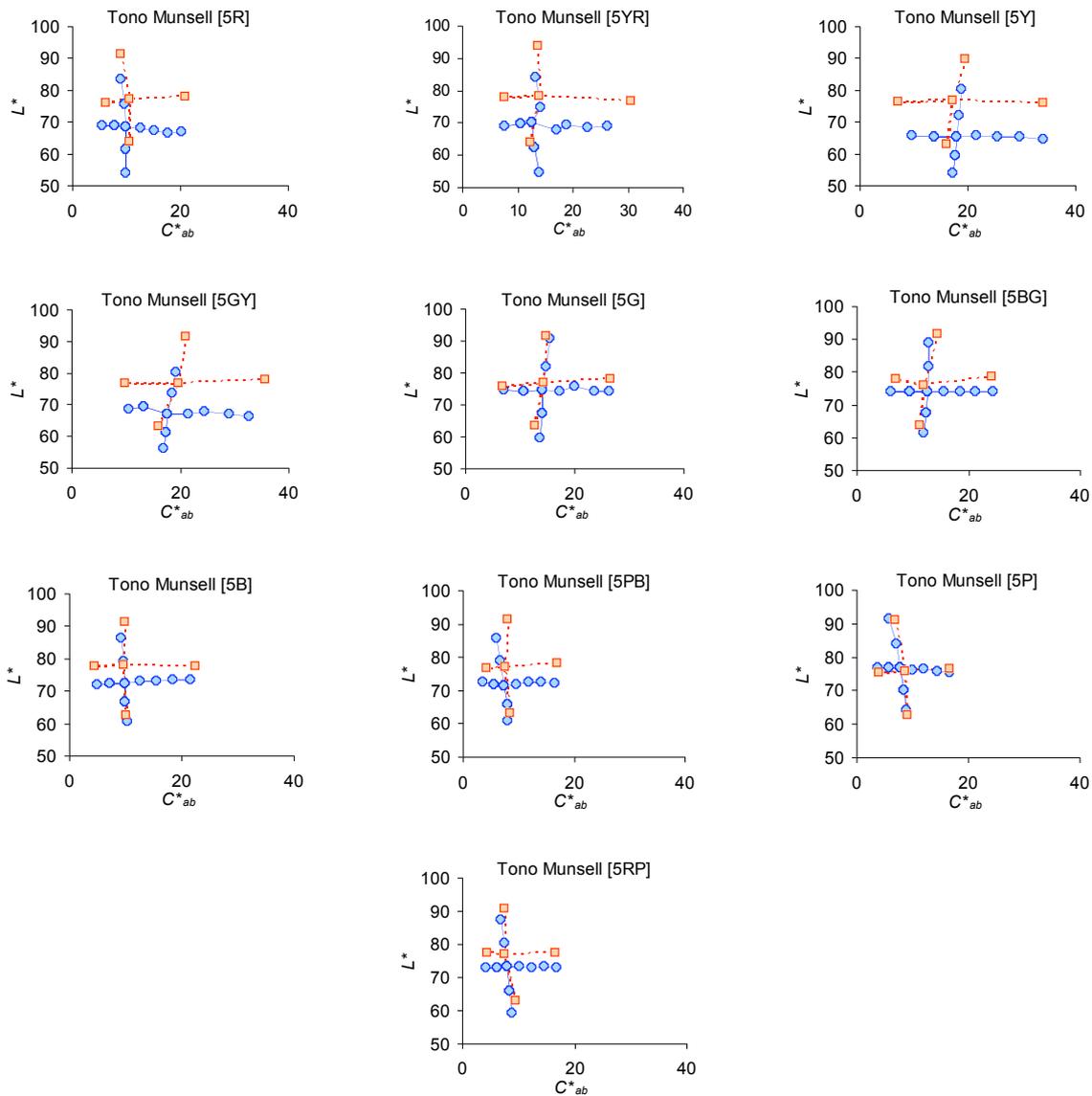
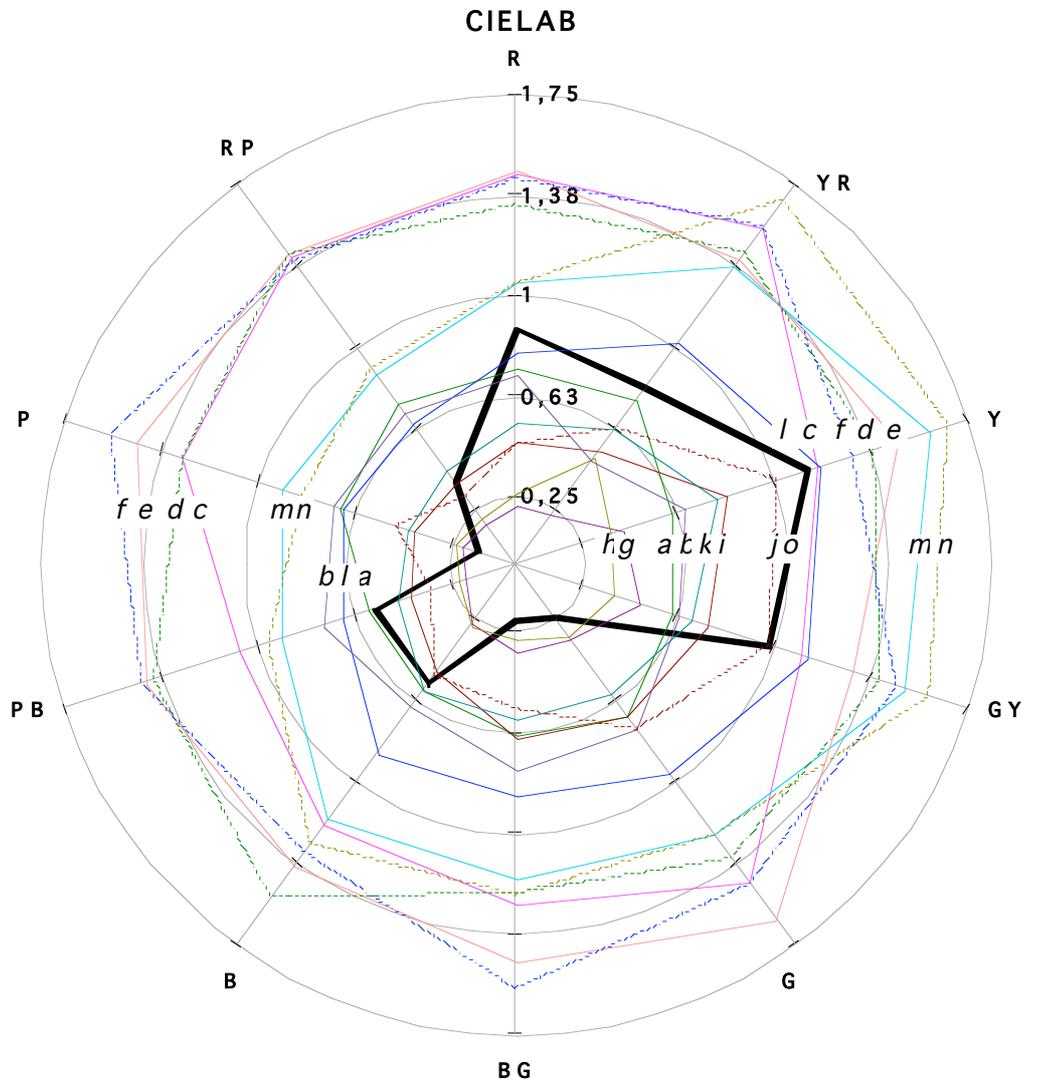


Figura 3.10 - Diagramas de los valores de Luminancia versus Croma para los diez grupos de tono  $H_i$ . En rojo se representan los grupos del libro Munsell de Color y en azul los grupos del libro Munsell de Colores Casi Neutros.

Por último, compararemos las diferencias de color entre los pares compuestos por los centros de grupo, con igual denominación pero pertenecientes a distinto ejemplar Munsell, con las diferencias de color entre cada centro de grupo del par con los vecinos inmediatos de su mismo libro. Con ello pretendemos conocer si la diferencia de color debida al cambio de libro puede ser alguna vez mayor que las distancias a las muestras más próximas dentro de un mismo libro.

En la Figura 3.11 se muestra un diagrama circular, en el que se representan las diferencias de color CIELAB y CIEDE2000 con respecto a los centros de grupo  $H_i 7/2$ . La línea gruesa negra (etiquetada con la letra  $o$ ) corresponde a las diferencias medidas entre pares de muestras (centros de grupo) de igual especificación pero de libro distinto. En trazos continuos, finos y de diferente color, se representan las diferencias de color entre el centro y los vecinos de cada grupo extraídos del libro Munsell de colores casi neutros. En trazos similares, pero discontinuos, se representan las diferencias de color entre el centro y los vecinos de cada grupo extraídos del libro Munsell de color.

Del análisis de la Figura 3.11 se deduce que la incertidumbre en la definición del color asociada al cambio de libro (línea de trazo grueso,  $o$ ) puede ser superior a la variación de color entre muestras vecinas de un mismo ejemplar (líneas de trazo fino). Tan sólo para los tonos verde (5G), verde azulado (5BG) y púrpura (5P) la diferencia de color asociada al cambio de libro es inferior a las distancias de la muestra (centro de grupo) a todos sus vecinos inmediatos en ambos libros. En los restantes tonos se presentan mayores y más variados niveles de incertidumbre. Así, por ejemplo, en el otro extremo, los tonos 5GY, 5Y, 5YR, 5R, 5PB y 5B, presentan una diferencia de color asociada al cambio de libro superior a las diferencias de color introducidas por variaciones de (-1.0 *Chroma Munsell*) en ambos libros Munsell (líneas  $i$  y  $j$  en la Figura 3.11).



[a] -0,5 Value	[d] -1,0 Value	[g] -0,5 Chroma	[j] -1,0 Chroma	[m] +2,0 Chroma
[b] +0,5 Value	[e] +1,0 Value	[h] -0,5 Chroma	[k] +1,0 Chroma	[n] +2,0 Chroma
[c] -1,0 Value	[f] +1,0 Value	[i] -1,0 Chroma	[l] +1,5 Chroma	[o] igual referenc

(a)

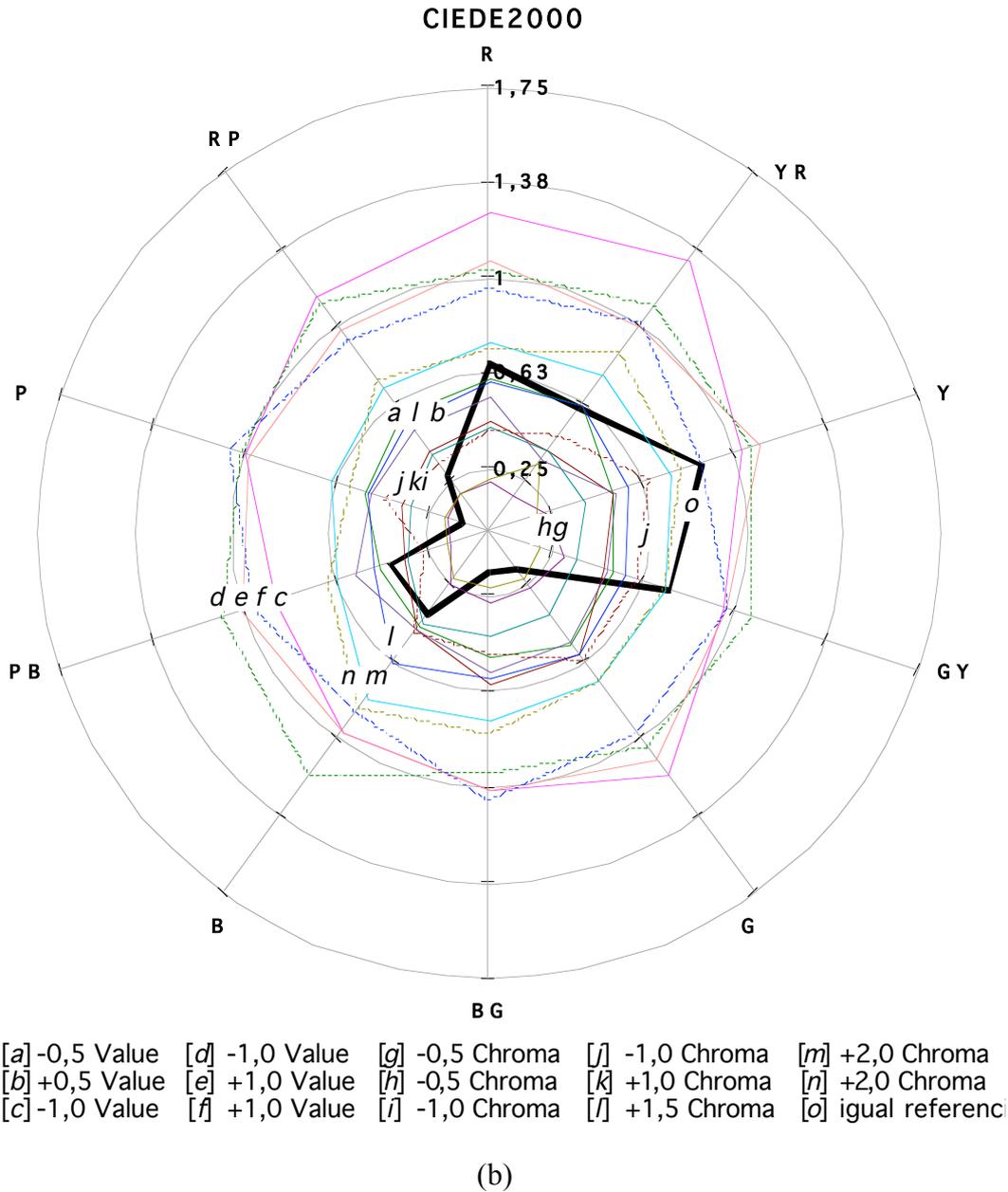


Figura 3.11 - Diferencias de color CIELAB (a) y CIEDE2000 (b) entre cada centro de grupo ( $H_i$  7/2) y otra muestra correspondiente a: una muestra de igual especificación nominal que el centro de grupo pero de distinto libro Munsell (trazo grueso negro), o bien, una muestra que representa una variación de Value Munsell y Chroma Munsell en los libros Munsell de color (trazos finos discontinuos) y Munsell de colores casi neutros (trazos finos continuos).

De esta experiencia se concluye que, para los dos ejemplares de libros Munsell analizados existe una diferencia de color perceptible entre pares de muestras con la misma especificación Munsell de color. Los ejemplares (*Nearly Neutral Munsell Collection* y *Munsell Book of Colors*) contienen muestras mate, con algo más de dos años de antigüedad en el momento de efectuar las medidas, tiempo que superaba en tres meses la fecha de vencimiento de la

certificación establecida por el fabricante. En la prueba de muestras analizadas, esta diferencia de color es muy pequeña en los tonos fríos (verde, verde azulado y púrpura), pero es comparativamente elevada en los tonos cálidos (amarillo-rojo), llegando a alcanzar en estos últimos el valor de 1.0 unidad CIELAB. La variación en luminancia es la dimensión que incide con mayor peso relativo en la diferencia de color existente entre muestras con la misma especificación y de libro distinto. Las incidencias relativas de las variaciones de croma y tono son mucho menores que la de la luminancia y están más equilibradas.

En los casos de mayor diferencia de color debida al cambio de libro, se llega a dar la circunstancia de que esta distancia es superior a la que existe entre una muestra y sus vecinas, dentro de un mismo libro. Este hecho constituye una fuente de incertidumbre o ambigüedad que, en general, no es evaluada por los usuarios de estos atlas y que puede dar lugar a errores inaceptables en la especificación de un color. De hecho, si comparamos estos valores de incertidumbre con la incertidumbre MCDM proporcionada por las medidas de las cámaras, en particular de la cámara 3CCD, y de las discrepancias de la cámara con el espectrorradiómetro en la medida de las diferencias de color, constatamos nuevamente que los resultados experimentales obtenidos con la cámara 3CCD son muy buenos (sección 3.2), con unos niveles de incertidumbre que caen dentro de los que vienen a aceptarse en numerosas tareas prácticas de inspección basadas en el uso de colecciones estándar de muestras, como el caso del atlas Munsell.

### **3.5 Aplicación a las pruebas de igualación en la producción textil**

#### **REFERENCIA A LAS PUBLICACIONES DE ESTA TESIS**

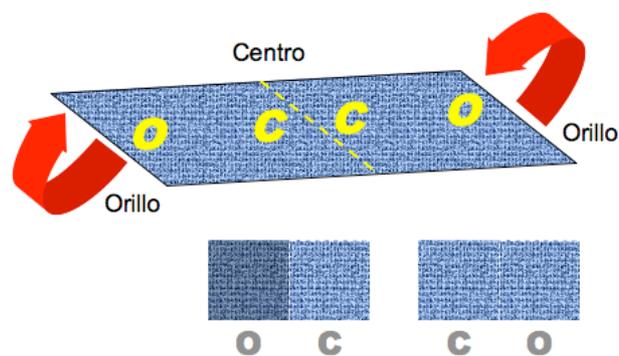
*El contenido de este apartado se encuentra en la publicación del compendio con la siguiente referencia:*

**Valencia, E.,** Millán, M. S., "Small color differences in the very pale and dark grayish regions measured by camera", *J. Imaging Sci. Technol.* **49**(6), 605-619 (2005).

De los resultados obtenidos en las secciones anteriores se deriva que el sistema de visión basado en la cámara presenta características prometedoras para cumplir con los requisitos de la inspección automática en las pruebas de igualación de color. Un ejemplo de prueba de este

tipo consiste en evaluar la uniformidad del color en tejidos textiles. En nuestro trabajo hemos aplicado un sistema de visión basado en la cámara 3CCD para realizar esta prueba de inspección.

Una tarea común en la inspección textil es la comparación del color entre el centro y los extremos, tanto izquierdo como derecho, de la anchura usable de una pieza de tela (generalmente mide 159 centímetros). Esta evaluación es conocida como la prueba de igualación del color centro-orillo (Figura 3.12).



*Figura 3.12 - Obtención de los dos pares de muestras centro-orillo para la evaluación de la uniformidad del color en la inspección de tejidos textiles.*

Dos pares de muestras centro-orillo, es decir, el par lado izquierdo-centro y el par lado derecho-centro, se evalúan siempre juntos en un punto de la longitud total de la pieza de tela. La prueba se realiza varias veces a lo largo de toda la pieza de tela fabricada (50 m., 200 m., etc.). Generalmente, la diferencia de color entre las muestras de un par centro-orillo es estimada visualmente por una persona entrenada en esta tarea. Si la diferencia de color se percibe visualmente, una determinada extensión del tejido es rechazada. Esta inspección es difícil de realizar, es subjetiva y requiere de una persona de visión muy entrenada en la evaluación del color.

El nivel de exigencia de uniformidad del color suele ser muy alto en la industria textil, pero es difícil de comprobar que se satisface porque las muestras a las que se les aplica el control de calidad tienen a menudo colores muy oscuros y poco saturados (por ejemplo, fabricación de tejidos para trajes de caballero y señora), pueden presentar diferencias de color muy sutiles,

pueden estar presentes efectos relacionados con la textura, etc. En esta aplicación, la evaluación de las muestras textiles es más compleja que las muestras de color Munsell porque la textura del tejido adiciona variaciones en la información del color.

Se ha empleado el sistema de visión basado en la cámara 3CCD para evaluar ocho pares centro-orillo de tejidos con colores en la región de tonos oscuros poco saturados. También se emplea el espectrorradiómetro como instrumento de referencia. Se mantienen la geometría de observación/iluminación, el sistema de iluminación y la configuración de la cámara tal y como se han descrito en la sección 2.4.1 del capítulo anterior. Los pares de muestras analizados constituyen casos reales que han sido facilitados por empresas productoras del sector textil. Los resultados están publicados en el artículo [Valencia 2005c].

Debido a que las muestras son texturadas, en primer lugar hemos analizado la variabilidad expresada como MCDM usando la formulación CIEDE2000. Se ha calculado el valor MCDM para las medidas efectuadas por el espectrorradiómetro y por la cámara en diez posiciones diferentes de cada uno de los lados del par centro-orillo. Los lados del par se identifican como lado A y lado B. En este caso, cada medida individual  $(L_i^*, a_i^*, b_i^*)$  registrada con la cámara, es el promedio de los valores CIELAB de los píxeles que conforman una zona de 300x300 píxeles en el centro del área captada del tejido. Aunque se han calculado los valores XYZ usando ambas transformaciones CSS y UMG (ecuación (2.5) y (2.6)), los resultados difieren muy poco entre sí y, por esta razón, sólo presentamos los obtenidos usando la matriz de transformación lineal UMG. Debido a que cada par de muestras se extrae de una misma pieza de tela, es de esperar que las variabilidades sean similares para ambos lados. En la Figura 3.13 se representan las variabilidades de cada lado. Se han etiquetado los pares centro-orillo como Marino 1, Marino 2, Azul 1, Azul 2, Negro 1, Negro 2, Verde 1, Verde 2. Como habíamos anticipado, las variabilidades de ambos lados, representadas por triángulos y rombos, son muy similares en todos los casos. La influencia de la textura puede apreciarse en la magnitud de los valores MCDM, especialmente por los altos valores que presenta la cámara, que mide el color píxel a píxel, respecto a los valores del espectrorradiómetro, que integra la medida en el área correspondiente a la apertura de 1°.

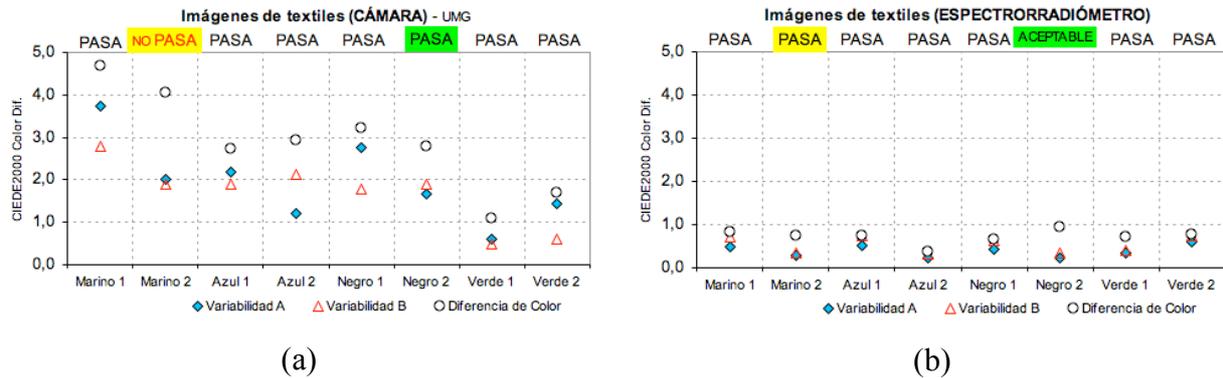


Figura 3.13 - Evaluación de la prueba de uniformidad del color en pares de muestras centro-orillo medidas con la (a) cámara y (b) espectrorradiómetro. La variabilidad (♦ Lado A △ Lado B) y la diferencia de color (○) CIEDE2000

Las diferencias de color entre los lados A y B para cada par de muestras, se han medido según el siguiente procedimiento: se calculan las diferencias de color entre un punto de un lado de la muestra y cada uno de los diez puntos medidos del otro lado de la muestra; luego, se repite el mismo procedimiento para los nueve puntos restantes del primer lado de la muestra, hasta completar las 100 medidas individuales de diferencias de color entre el lado A al lado B del par a evaluar. Como paso siguiente, se halla el valor medio de las diferencias de color y se compara con la variabilidad (expresada como MCDM) de ambos lados del par. Los promedios de las diferencias de color medidas por el espectrorradiómetro y por la cámara están representados mediante círculos en la Figura 3.13. Si el valor medio de las diferencias de color entre ambos lados es claramente superior que las variabilidades – dependiendo del nivel estándar de calidad establecido – se clasifican los pares de la muestra centro-orillo como diferentes, y el resultado de la inspección es “no pasa”. De lo contrario, la muestra es aceptada y el resultado es “pasa” en la prueba de igualación del color. Como nivel de calidad, en esta experiencia se ha considerado que al tomar una muestra de un par centro-orillo obtenemos un resultado de “no pasa” cuando el valor medio de las diferencias de color entre los lados es superior al umbral, justamente perceptible y además es mayor que dos veces el valor superior de la variabilidad de alguno de los lados (Figura 3.13).

La media de las diferencias de color, la discrepancia absoluta entre la cámara y el espectrorradiómetro, y los resultados de la prueba pasa-no pasa obtenidos en esta experiencia están contenidos en el artículo [Valencia 2005c], tabla VII.

La precisión del instrumento de referencia y el nivel estándar de calidad tienen una influencia decisiva en el resultado final. Así, por ejemplo, de manera alternativa al criterio utilizado por nosotros, se podría considerar el nivel supraumbral de discriminación visual del color, de 0.887 unidades CIELAB [Melgosa 1997] como un nivel o factor de calidad.

Se ha observado que las diferencias de color obtenidas por la cámara son generalmente superiores que las obtenidas por el espectrorradiómetro. Puede ser que la imagen píxelada captada por la cámara dote a este sistema de medida de una mayor sensibilidad a las texturas. El espectrorradiómetro realiza una integración del área que mide, mientras que la cámara está más influenciada por las variaciones de color que genera la estructura del tejido, la cual se registra en los píxeles de la imagen. Por otra parte, ambos instrumentos producen resultados finales similares en cuanto a la decisión “pasa”-“no pasa”. Hay un caso (muestra Negro 2) de los ocho casos analizados en la experiencia, en el que la decisión final a partir de las medidas con el espectrorradiómetro difiere de la que se adopta a partir de las medidas con la cámara (“aceptable” según el espectrorradiómetro y “pasa” según la cámara). Es de notar que este caso es, si cabe, más difícil ya que se trata de muestras de color negro y el valor obtenido está cercano al límite establecido en este trabajo. Muy probablemente la diferencia de color de este par cae dentro del supraumbral de tolerancia o aceptabilidad (1.75 unidades CIELAB) [Melgosa 1997].

Para acercarse más al comportamiento de la cámara al del espectrorradiómetro, se han filtrado las imágenes registradas por la cámara para introducir una cierta suavización o integración en el área de la muestra. Dos clases de filtros se han aplicado.

Uno de ellos es un filtro de suavizado. Cada imagen se ha suavizado sutilmente usando una máscara Gaussiana de 5x5 píxeles antes de calcular los valores medios  $\bar{L}^*$   $\bar{a}^*$   $\bar{b}^*$ . Este filtro promedia el efecto de la textura dentro del área correspondiente al tamaño medio de los hilos, tanto de urdimbre como de trama, que se sitúa en torno a los 5 píxeles en las imágenes captadas en nuestra experiencia.

Alternativamente, se ha evaluado el valor de la componente  $L^*$  en los píxeles de la imagen y se ha calculado el histograma acumulado, no considerando como valores experimentales los

píxeles que están por debajo del 20% (considerados sombra) y por encima al 80% (considerados brillo). Este filtro se asemeja a un filtro de mediana. De las imágenes filtradas, hemos recalculado los valores de variabilidad y de diferencias de color obtenidos por el sistema que emplea la cámara.

Se ha construido una tabla de resultados (Tabla 3.3). La tabla contiene los valores de las discrepancias absolutas entre la medida obtenida por el espectrorradiómetro y por la cámara analizando los tres casos: sin filtro, aplicando el filtro de suavizado y aplicando el filtro de  $\pm 20\%$ . Se puede concluir que, en general, los valores de las discrepancias absolutas se reducen cuando se integran las áreas de las imágenes captadas de las muestras por la cámara. Para ambos filtros, por tanto, los resultados obtenidos por la cámara se acercan ligeramente a los obtenidos por el espectrorradiómetro. El resultado final de “pasa” o “no pasa” se mantiene igual. Esta idea de introducir un suavizado de la imagen se retomará más adelante, en el capítulo siguiente, como un paso más a tener en cuenta para esta aplicación.

*Tabla 3.3 - Discrepancias absolutas de las diferencias de color en las pruebas de parejas centro-orillo sin filtro, con filtro de suavizado y con filtro de  $\pm 20\%$*

Par de muestras Extremo-Centro ( $L^*a^*b^*$ )	Diferencias de Color discrepancia absoluta		
	Sin filtro	Filtro de suavizado	Filtro ( $\pm 20\%$ )
Marino 1 (17,5 : 0,7 : -4,8)	3,86	1,94	1,70
Marino 2 (17,6 : 0,6 : -5,2)	2,39	1,63	1,98
Azul 1 (18,3 : 0,6 : -5,4)	2,00	1,55	3,97
Azul 2 (18,2 : 0,6 : -5,1)	2,57	1,53	2,43
Negro 1 (16,3 : 1,0 : -2,6)	2,55	2,05	2,39
Negro 2 (16,1 : 0,9 : -2,4)	1,86	1,24	1,66
Verde 1 (33,4 : -0,4 : 8,9)	0,38	0,21	0,25
Verde 2 (32,4 : -0,4 : 8,9)	0,94	0,03	0,93