

T 9/40

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
GRANADA**
N.º Documento 615034616
N.º Copia 216267345



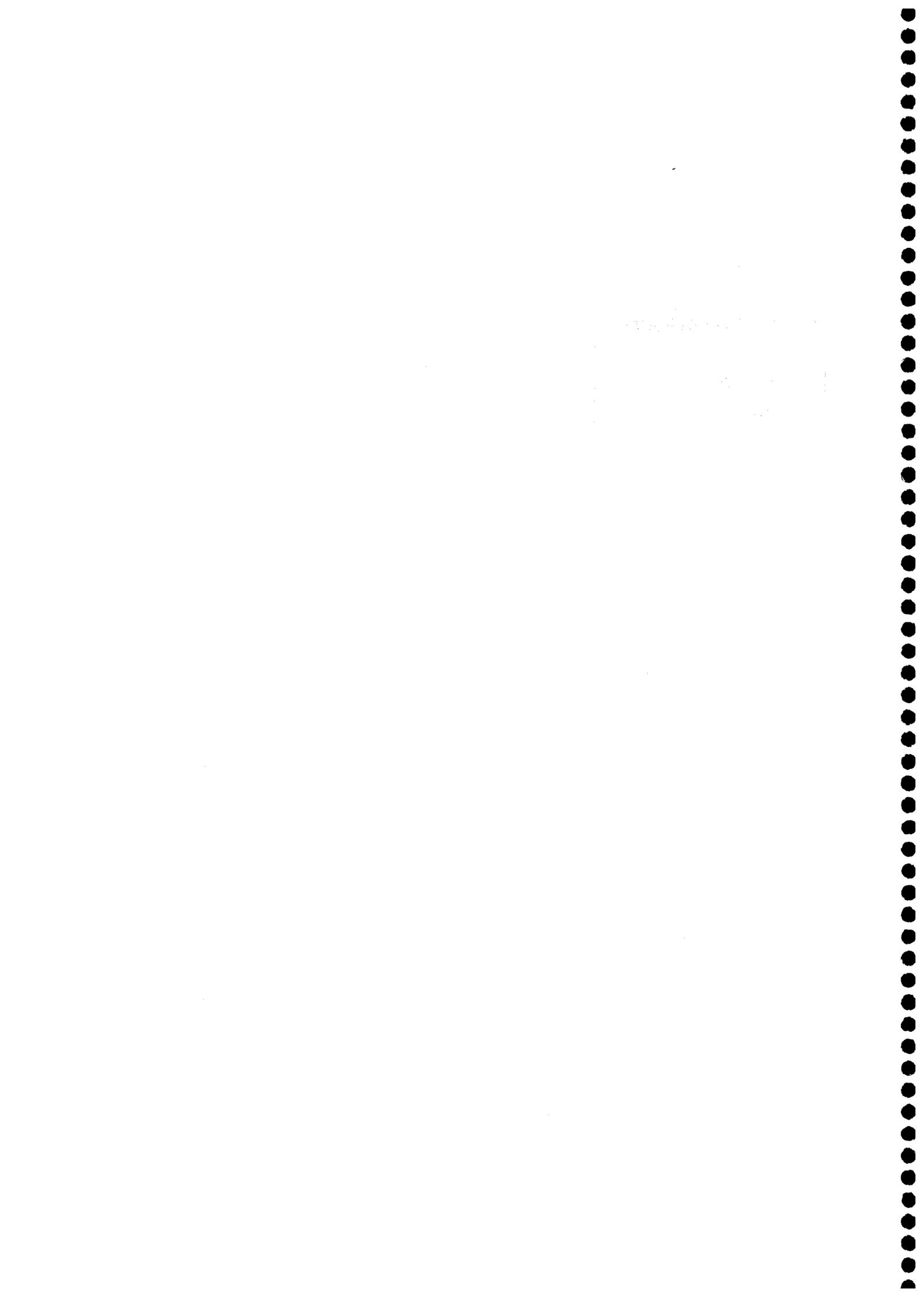
UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Fecha 23/01/2004
ENTRADA NUM. 173

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA

**DIFERENCIAS DE COLOR EN
MUESTRAS CON TEXTURA
SIMULADA**

UNIVERSIDAD DE GRANADA
07 ENE. 2004
COMISION DE DOCTORADO

MEMORIA DE DOCTORADO
RAFAEL HUERTAS ROA
GRANADA, DICIEMBRE 2003



DIFERENCIAS DE COLOR EN MUESTRAS CON TEXTURA SIMULADA

Visado en Granada a 29 de Diciembre de 2003

DIRECTORES DE LA MEMORIA DE DOCTORADO:

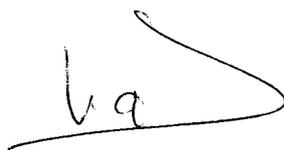
Fdo.: Dr. D. Manuel Melgosa Latorre.

Catedrático de Escuela Universitaria.
Área de Óptica. Universidad de Granada.



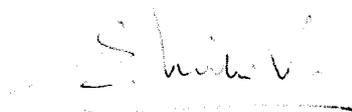
Fdo.: Dra. D^a. María del Mar Pérez Gómez.

Catedrático de Escuela Universitaria.
Área de Óptica. Universidad de Granada.



Fdo.: Dr. D. Enrique Hita Villaverde.

Catedrático de Universidad.
Área de Óptica. Universidad de Granada.



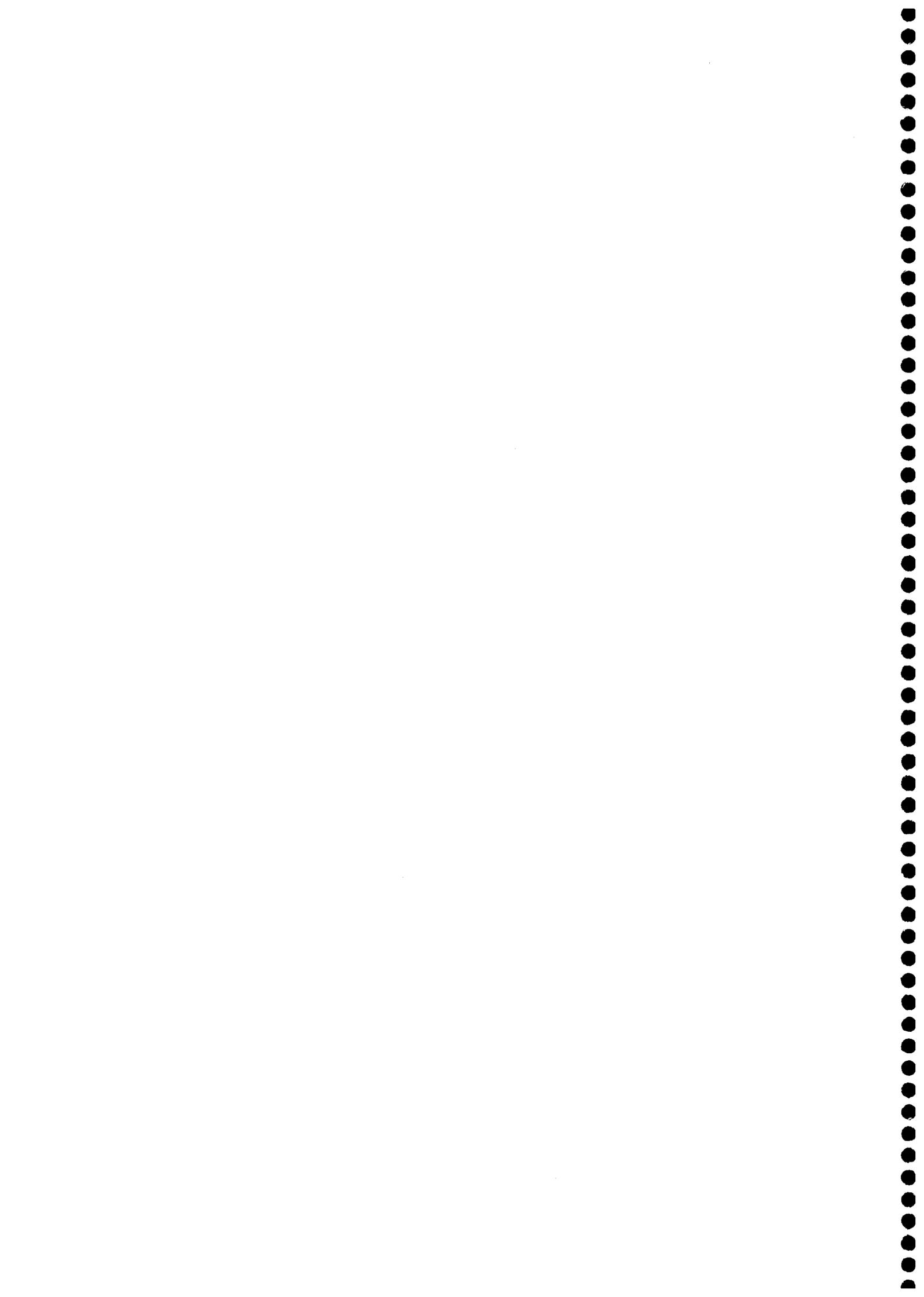
Memoria presentada para aspirar al grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS



Fdo.: RAFAEL HUERTAS ROA

Licenciando en Ciencias Físicas
Diplomado en Óptica y Optometría



La realización de la presente Tesis Doctoral ha supuesto para mi un reto y un estímulo constantes durante este último año. Me gustaría ser capaz de transmitir, en el contenido de esta Memoria, toda la ilusión y entusiasmo que he sentido durante su realización y escritura. Quiero desde estas líneas, en la presentación de la Memoria de Doctorado, mostrar mi satisfacción y alegría por el trabajo realizado. Así mismo expresar mi agradecimiento, de forma general, a todas aquellas personas que me han ayudado, de una u otra forma, a conseguir esta meta, que son muchas más de las que puedo recoger en esta presentación.

Agradezco al Ministerio de Educación y Cultura el apoyo económico que me ha prestando mediante la beca de Formación de Personal Universitario que he disfrutado durante estos últimos 4 años.

Muy notablemente, manifiesto mi agradecimiento y admiración a mis directores de Tesis: Manuel Melgosa Latorre, M^a Mar Pérez Gómez y Enrique Hita Villaverde. Cada uno de ellos, de una forma muy diferente, ha contribuido de la mejor forma posible, a que esta Memoria salga adelante. Manolo trabajando incansable y minuciosamente en todo el desarrollo de la Tesis, que no hubiera sido posible sin su tesón. M^a del Mar a mi lado diariamente aportando su constancia y ayuda en todo momento. Enrique animándome de forma incesante, y apoyándome incondicionalmente desde mi entrada en el Departamento. A todos ellos dedico afectuosamente esta Memoria; muy especialmente a Manolo, por los momentos difíciles que ha atravesado, durante los cuales también ha continuado trabajando tenazmente para que esta Memoria saliera adelante.

Dedico también esta Tesis a mis compañeras de despacho, Ana Yebra y M^a José Rivas, por su extraordinaria colaboración, realizando las interminables sesiones experimentales y prestándome su ayuda y apoyo en todo momento. También a M^a Mar Lázaro, compañera de despacho, de realización de Tesis, y de otras muchas vicisitudes. Mi mención a un antiguo compañero, Mohamed, con el que he compartido muchos momentos y a quien deseo lo mejor.

En general agradezco a todos los miembros del Departamento de Óptica, su apoyo, su amistad y su buen hacer diario, que de una u otra forma han repercutido en mi siempre de forma muy positiva.

También agradezco a Pedro García López, del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Granada, su inestimable ayuda en la realización del análisis estadístico de los resultados. Su disponibilidad y amabilidad son su mejor reseña.

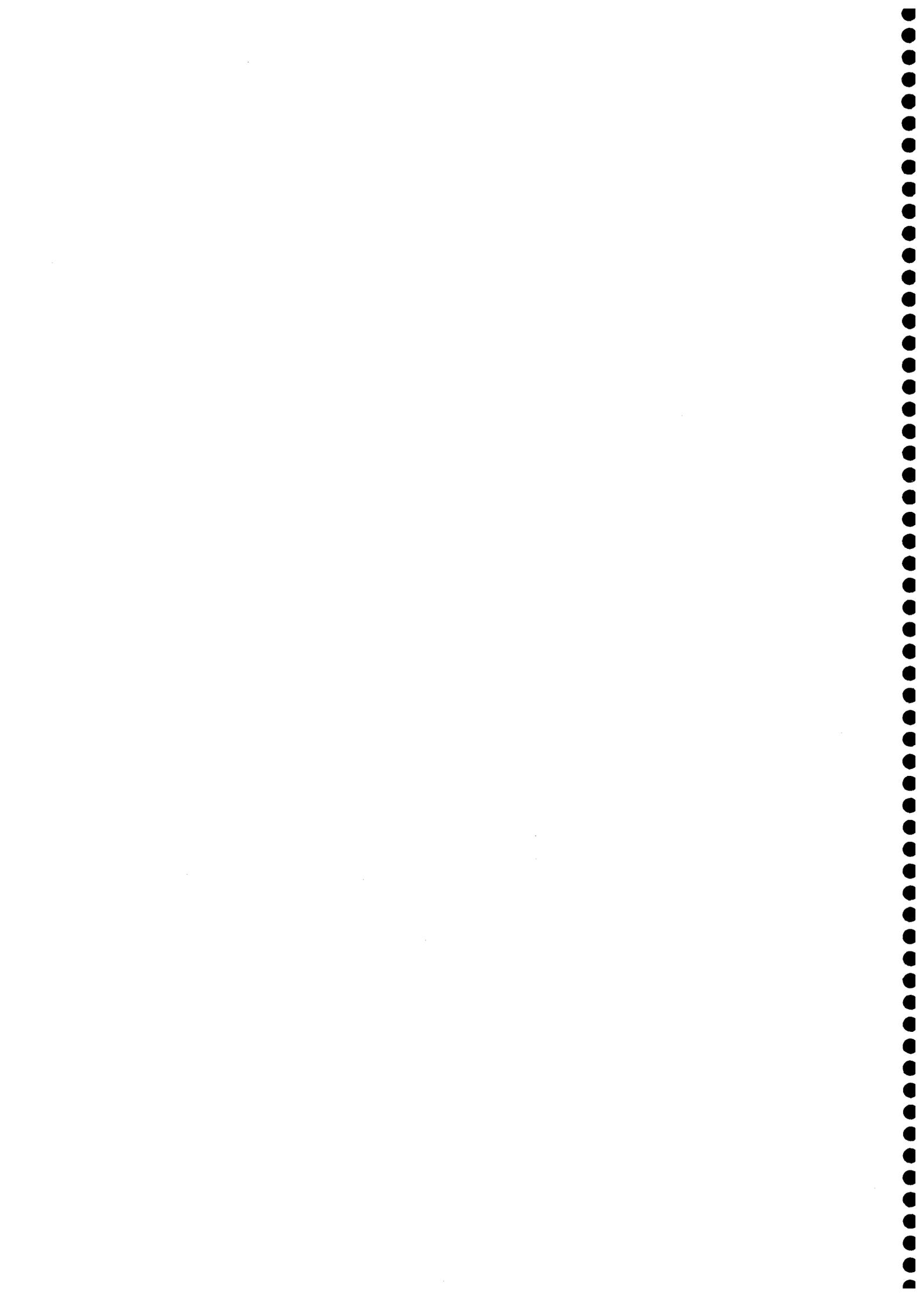
Tampoco puedo olvidar y dejar de agradecer la enorme ayuda prestada por Ramón Roa y Rafael Roa, así como su predisposición permanente para cuanto fuera necesario.

Muy especialmente dedico esta Memoria de Doctorado a todos mis profesores en cada una de las etapas de mi formación. A ellos siempre les deberé mi formación académica y gran parte de mi formación humana. Mi recuerdo y cariño para todos ellos.

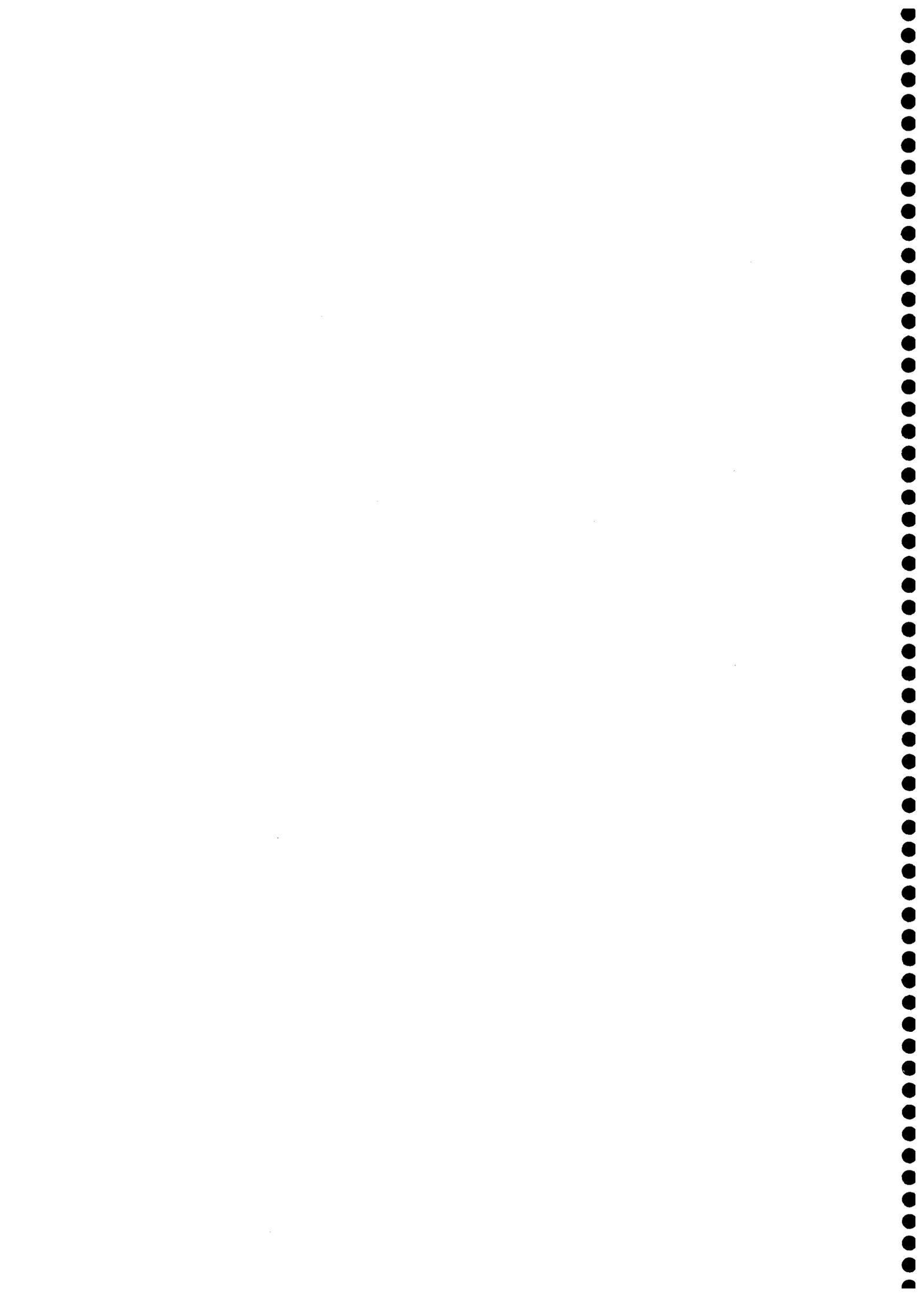
Mención excepcional merecen mis amigos, que constantemente me demuestran su apoyo y confianza: José Rafael, Antonio, Jorge, José Manuel, Pedro, María José, Mercedes, Iñaki, Carlos, Pablo, Jose, Teresa, Carolina, Salvador, Patricia, Aurora y todos los demás que no cito.

Por último, particularmente dedico con mucho cariño esta Tesis a mis padres y hermanos, y al resto de mi familia, porque siempre son los que más me ayudan en todas las circunstancias.

Particularmente dedico esta Memoria de Doctorado a una persona muy especial, María, que pese a todo siempre me ha animado para seguir adelante con este trabajo y con otros muchos proyectos. Por su admiración, su apoyo, sus ánimos y su cariño.





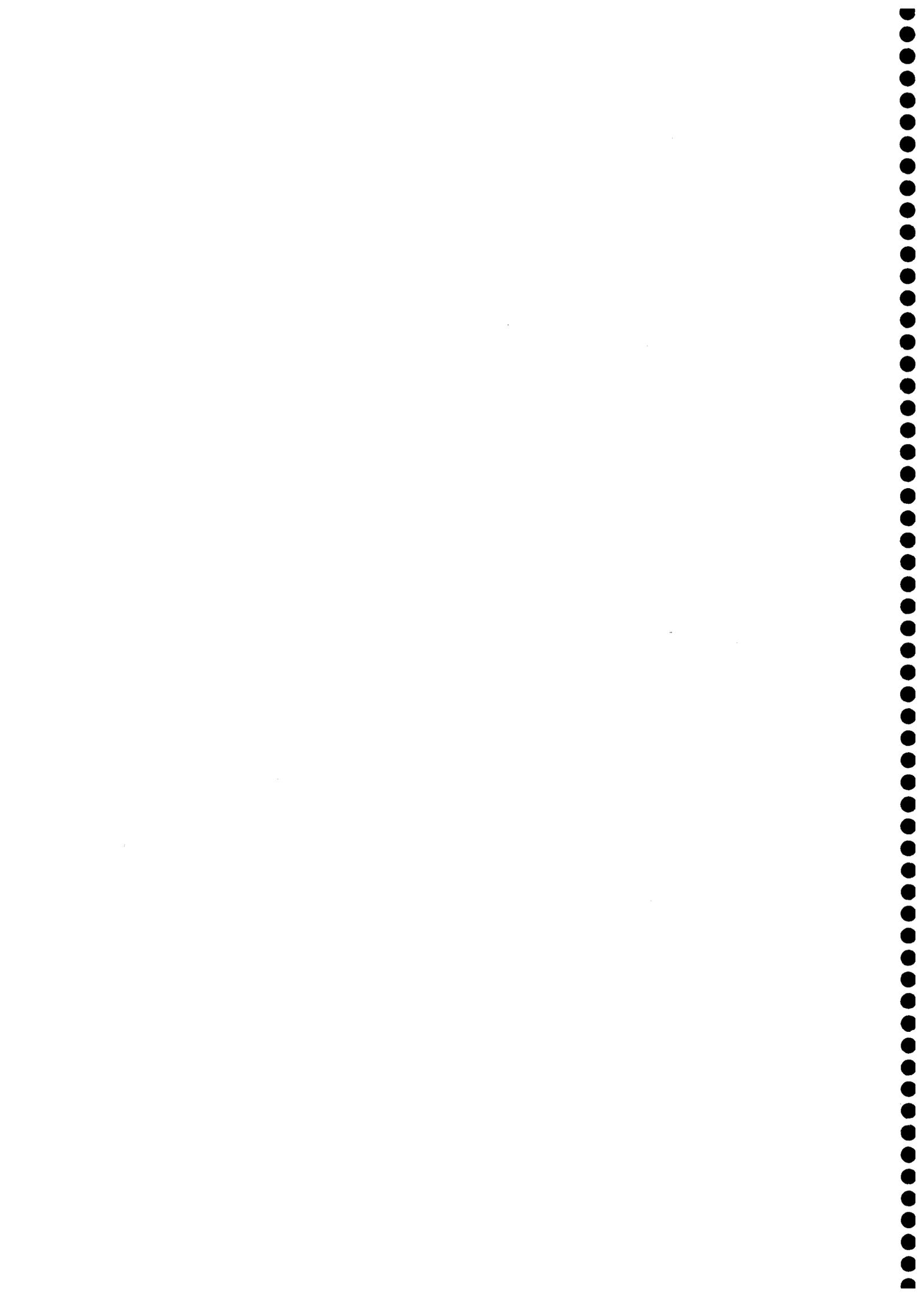


ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Trabajos Relacionados con la Textura.....	20
2.2 Trabajos sobre los Errores en la Medida del Color.....	33
3. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Dispositivo Experimental de Observación.....	45
3.2 Calibrado del Monitor	46
3.3 Diseño del Programa Informático DCTR.....	48
Calibrado y búsqueda de los valores DAC.....	51
Configuración y diseño del test	53
Presentación del test y salvado de los resultados	54
3.4 Textura	59
3.5 Selección de los Centros	64
3.6 Observadores y Sesiones	65
3.7 Dispositivo Experimental de Medida del Color	68
Espectrorradiómetro	68
3.8 Procedimientos de Cálculo y Software Utilizado	72
Cálculo del factor PF/3 (Performance Factor).....	73
Cálculo de los errores.....	76
Software utilizado.....	78

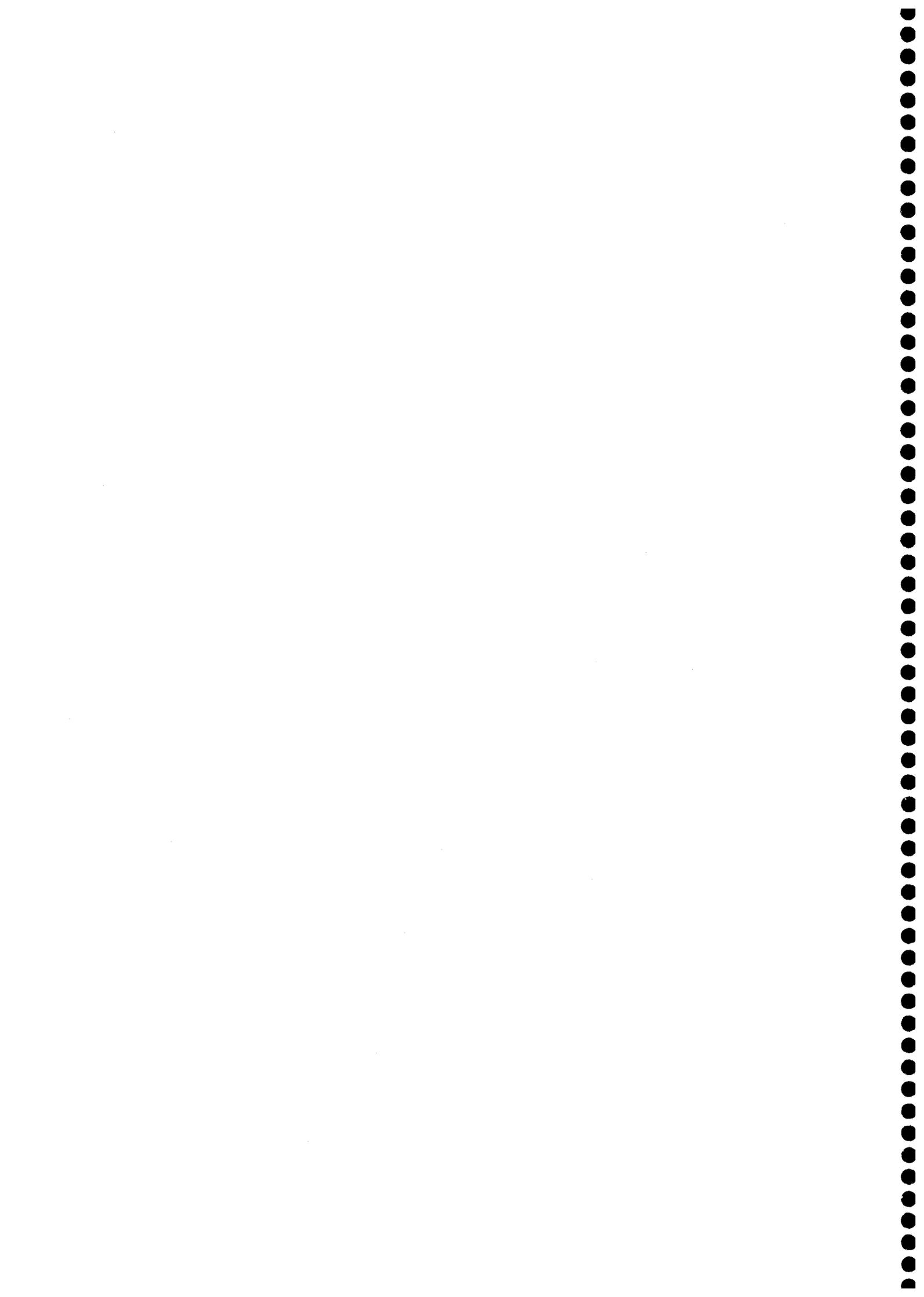
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
4.1 <i>Análisis Estadístico Inicial</i>	84
<i>Validación del modelo</i>	85
<i>Resultados iniciales</i>	90
4.2 <i>Análisis de los Observadores</i>	94
<i>Aprendizaje de los observadores</i>	95
<i>Variabilidad intra-observador</i>	99
<i>Precisión y exactitud individuales</i>	109
<i>Variabilidad inter-observador</i>	110
<i>Precisión y exactitud</i>	116
<i>Análisis de la tolerancia visual por observadores</i>	117
4.3 <i>Análisis de los Centros</i>	133
4.4 <i>Análisis de las Coordenadas CIELAB de las Tolerancias</i>	147
<i>Corrección de las diferencias de color en croma y tono</i>	155
4.5 <i>Influencia de la Textura: Tipo, Superficie y Grosor</i>	169
<i>Influencia del grosor de la textura</i>	170
<i>Influencia de la superficie de la textura</i>	174
<i>Influencia del tipo de textura</i>	177
4.6 <i>Ajuste de los Coeficientes Paramétricos</i>	190
4.7 <i>Análisis de las Medidas Instrumentales</i>	195
5. CONCLUSIONES	217
6. REFERENCIAS.....	223
APÉNDICES.....	245
1. <i>Ecuaciones para el Cálculo de Errores</i>	245
2. <i>Tablas de Tolerancias</i>	249
3. <i>Fórmulas CIE94 y CIEDE2000</i>	263
4. <i>Tablas de Coeficientes de Correlación</i>	267







CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la Física nos interesa estudiar el mundo que nos rodea. Así, respecto al color, en la vida diaria es frecuente que los objetos que observamos presenten un color que no es completamente homogéneo. Por otro lado, en las aplicaciones industriales del color tampoco las muestras empleadas normalmente son completamente homogéneas. Suele decirse entonces que las muestras presentan “textura”, que es una propiedad inherente a los objetos, de la misma forma que lo es el color. La presencia de textura origina heterogeneidades en los objetos, lo que afecta a la percepción visual.

Principalmente como consecuencia de los trabajos en la industria textil (donde la textura es manifiesta), se sabe que la textura afecta de forma significativa a la percepción de las diferencias de color por observadores con visión normal del color. Concretamente se sabe que la presencia de texturas hace que las tolerancias visuales de claridad sean más holgadas, y se procura tener en cuenta este efecto en algunas de las fórmulas de diferencia de color más recientes (CMC (Clarke et al., 1984), CIE94 (CIE, 1995), BFD (Luo et al., 1987), CIEDE2000 (CIE, 2001)).

Es evidente que la consideración de muestras homogéneas es una simplificación excesiva, que resulta apropiada para el estudio de muchos fenómenos tanto en colorimetría, como en otros campos. Sin embargo es necesario, sobre todo para algunas aplicaciones industriales, abordar el estudio de las muestras con textura. Consciente de esta necesidad la CIE ha pedido (Robertson, 1978; Witt, 1995) que se estudie la textura entre los principales factores paramétricos que influyen en la percepción de diferencias de

color.

Actualmente son escasos, y bastante recientes, los trabajos que abordan la interacción entre color y textura y, hasta donde llega nuestro conocimiento, ninguno estudia cómo afectan a las tolerancias de color (de claridad, croma y tono) texturas que varíen de forma sistemática o gradual. Este es el principal objetivo de este trabajo de Tesis Doctoral.

Nuestro deseo de que la textura tenga variaciones graduales bien controladas nos lleva a trabajar con “texturas simuladas” en un monitor CRT. Gracias a la versatilidad de estos dispositivos para experiencias de colorimetría, podemos controlar adecuadamente las heterogeneidades o texturas simuladas que aparecen en las muestras observadas, lo que sería sin duda muy complicado si hubiéramos trabajado con objetos de color.

Al comenzar el diseño del experimento nos planteamos qué tipo de texturas simuladas debíamos emplear (e.g. hilos lineales, cruzados, puntos aleatorios, etc.) La ausencia de trabajos específicos en la literatura previa nos permitía usar cualquier tipo de textura y optamos por la textura de puntos aleatorios, pues se trata de una textura muy simple y bastante realista, en la que el número de parámetros a variar sistemáticamente (superficie de la textura o cantidad de puntos, grosor de la textura o tamaño de los puntos, y tipo de variaciones sobre el fondo de los puntos) podía dar lugar a un número razonable de observaciones y medidas experimentales. Pensamos estudiar los 5 centros CIE 1978 (Robertson, 1978) con 5 observadores. En última instancia el objetivo era cuantificar el efecto de la textura (de cada una de sus variables específicas) sobre las diferencias de color y, en su caso, proponer coeficientes paramétricos adecuados a la presencia de texturas, en las más recientes fórmulas de diferencia de color: CIE94 y CIEDE2000.

Una vez decididos los centros a estudiar, el número de observadores y el uso de texturas simuladas de puntos aleatorios, nos parecía evidente que el tamaño de los puntos de la textura y el porcentaje de superficie del estímulo que cubrían, eran parámetros a variar sistemáticamente. Quedaba por determinar qué tipo de variación sobre el fondo debían presentar los puntos aleatorios. Nos pareció oportuno que los puntos aleatorios tuvieran variaciones relativas al fondo de las muestras en claridad y croma, ascendente y descendientemente, que llamamos “texturas relativas”. También convenimos en que

fueran sencillamente puntos negros, que llamamos “textura absoluta”. Por otro lado, también nos pareció adecuado que los pares de muestras a comparar tuvieran diferencias en sólo un atributo del color (ΔL^* , ΔC^* , ΔH^*), con vistas de nuevo a que el estudio fuera sistemático y pudieran resultar más directas las correcciones a las fórmulas de diferencia de color.

Ciertamente la consideración sólo de texturas de puntos aleatorios, con las variables indicadas en el párrafo anterior, supone una restricción importante en el estudio genérico de la interacción textura-color. No obstante, esta restricción es actualmente válida en nuestra opinión, por la escasez de trabajos al respecto, y supone un avance respecto a estudios previos en los que no hay variaciones sistemáticas de las texturas. En estos estudios solamente se incorporan 1 ó 2 plantillas de texturas, obtenidas a partir de unas ciertas muestras escaneadas.

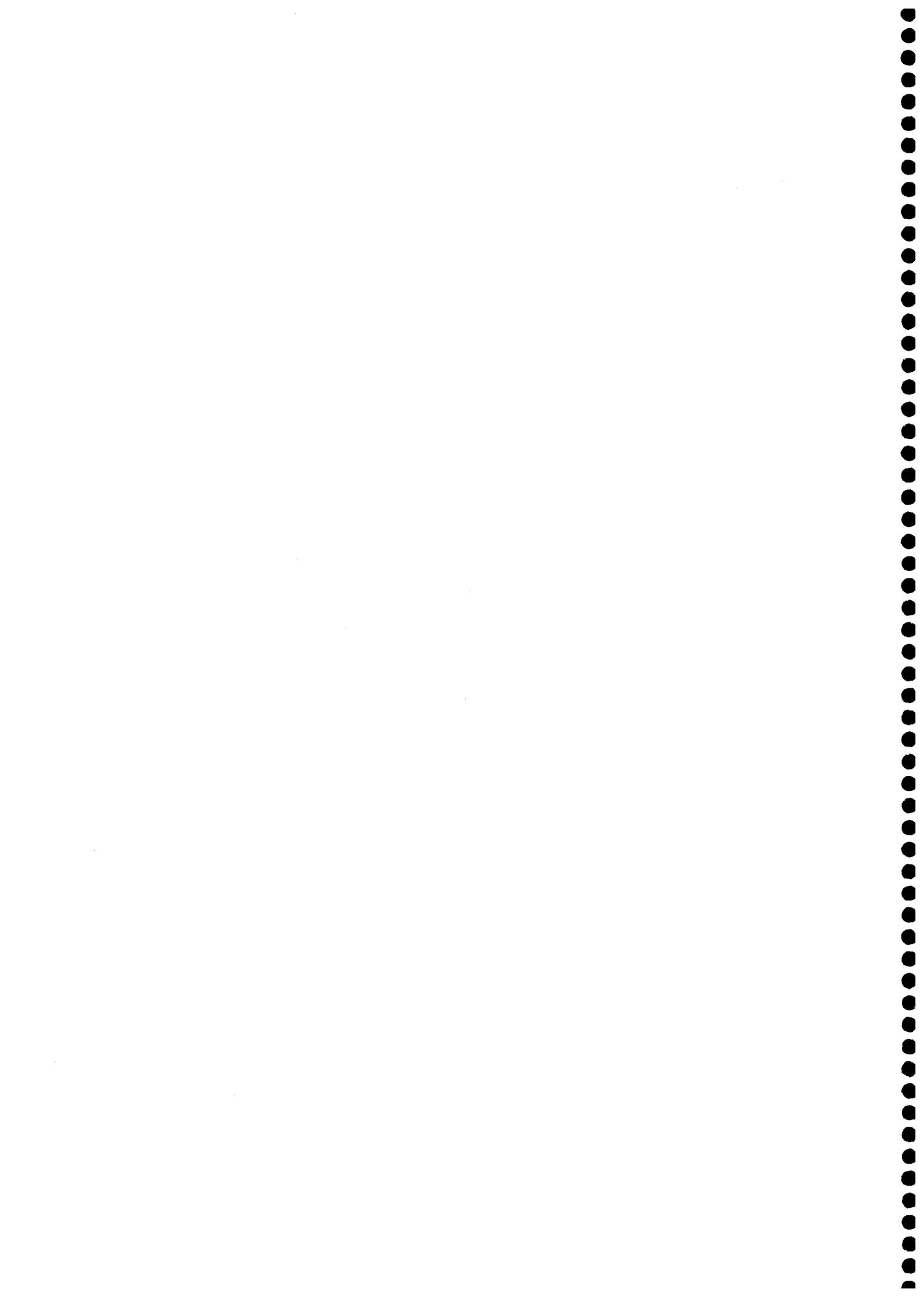
Además de la influencia de las texturas simuladas sobre las diferencias de color, es evidente que también la medida instrumental del color se ve afectada por la presencia de texturas. Este problema, también de gran interés para la industria, nos ha llevado a estudiar de qué forma varían las coordenadas de color de las 5 muestras utilizadas (centros CIE 1978) por la presencia de las texturas elegidas. También nos planteamos cuál será la influencia de las texturas sobre los errores propios de las medidas instrumentales, así como la propagación de estos errores desde los valores triestímulo hasta las coordenadas CIELAB.

Conforme a los objetivos mencionados, la presente Memoria de Doctorado se estructura en 6 Capítulos. En el Capítulo 2 describimos los antecedentes en investigación sobre este tema, mediante la revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con el estudio de la textura, y también con el estudio de los errores en colorimetría. En el Capítulo 3 describimos toda la metodología instrumental y matemática que hemos utilizado para llevar a cabo este trabajo. Los resultados obtenidos experimentalmente son analizados en el Capítulo 4, que lo hemos dividido en 7 Apartados. En el Apartado 1 realizamos un análisis estadístico inicial de las tolerancias visuales obtenidas. En los siguientes apartados estudiamos la influencia sobre las tolerancias visuales, de cada una de las variables que hemos considerado: observador, centro de color, coordenada fundamental (L^* , C^* o h) de la diferencia de color entre las muestras, y parámetros de la

textura: grosor de la textura, superficie ocupada por la textura y tipo de textura. En el último apartado, el séptimo, analizamos las medidas instrumentales, con sus errores, de las muestras con textura. Las conclusiones del análisis de los resultados se hallan en el Capítulo 5. En el Capítulo 6 listamos todas las referencias bibliográficas que utilizamos a lo largo de toda la Memoria. Por último, después del Capítulo 6 se encuentran los Apéndices donde reproducimos algunas tablas, y las expresiones de distintas ecuaciones y fórmulas de diferencia de color, que nos parecen interesantes para comprender los resultados obtenidos.



CAPÍTULO 2
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el desarrollo de la Colorimetría, el estudio de la textura ha sido habitualmente olvidado. Por simplicidad se han considerado muestras homogéneas, tanto en la especificación y medida del color, como en el cálculo de diferencias de color. En las más recientes fórmulas de diferencia de color, CIE94 (CIE, 1995) y CIEDE2000 (CIE, 2001), se considera, a través de los coeficientes paramétricos, la posibilidad de incluir muestras con textura. Incluso se recomienda su estudio como un efecto paramétrico a tener en cuenta (Robertson, 1978; Witt, 1995). Sin embargo, hasta la fecha son escasos los estudios realizados sobre este tema.

La textura aparece frecuentemente de una u otra forma en muchos trabajos publicados. Sin embargo, contradictoriamente, son escasos los trabajos donde se estudia la influencia de la textura sobre la percepción visual, y consecuentemente sobre las diferencias de color.

A continuación, en el Apartado 2.1, referiremos los trabajos que se relacionan con las experiencias visuales realizadas en esta Memoria de Doctorado. En el Apartado 2.2 comentaremos los trabajos relacionados con el estudio y tratamiento de los errores en la medida del color, aspecto que también abordamos en esta Memoria.

2.1. Trabajos Relacionados con la Textura

Básicamente existe un artículo publicado donde se plantea la influencia de la textura sobre las diferencias de color percibidas, es el artículo de Montag y Berns del año 2000 (Montag et al., 2000). Hemos hallado dos comunicaciones de Luo et al., que también abordan directamente esta cuestión (Han et al., 2003; Xin et al., 2003), en un congreso celebrado en Agosto de 2003 en Bangkok (Interim Meeting de la AIC). A continuación vamos a comentar en detalle estos 3 trabajos.

El artículo más importante, que ha servido de referencia para algunos de los trabajos relacionados con texturas realizados posteriormente, es el publicado por Montag y Berns en el año 2000. Montag y Berns estudian el efecto de la textura sobre las tolerancias supra-umbrales en claridad. Este estudio se enmarca dentro del análisis más general de la dependencia, con la claridad, de las diferencias de color en claridad. En concreto, investigan la discrepancia entre los factores de ponderación S_L de las fórmulas de diferencia de color CIE94 (CIE, 1995) y CMC (Clarke et al., 1984). En un trabajo previo, Berns (Berns, 1993) apuntó como posible causa las diferencias paramétricas entre las bases de datos utilizadas para desarrollar cada una de las fórmulas. Concretamente, el factor S_L de CMC podría deberse a que las muestras utilizadas en los experimentos en los que la ecuación se basa, eran muestras textiles. Sin embargo, la textura de las muestras es sólo una de las muchas diferencias entre las condiciones experimentales de los dos conjuntos de datos en que se basan estas dos fórmulas de diferencia de color.

Montag y Berns determinan experimentalmente las tolerancias supra-umbrales en claridad, usando tanto estímulos homogéneos, como estímulos con textura simulada. Consideran dos tipos de textura: una textura “total” y otra textura “intermedia” entre las muestras homogéneas y con textura. Para calcular las tolerancias utilizan estímulos presentados en un monitor CRT, controlado por ordenador mediante una tarjeta de 10 bits por canal. En este experimento los 44 observadores empleados comparan un par de prueba con un par de referencia, y su tarea consiste en indicar qué par tiene la mayor diferencia de color total.

Utilizan como centros estímulos acromáticos valores de claridad (L^* de CIELAB) igual a 10, 20, 40, 60, 80 y 90; tanto para los estímulos homogéneos como con textura.

Para simular la textura capturan, con una cámara digital, la imagen de muestras físicas (creadas con hilos enrollados sobre un soporte), similares a las empleadas en el desarrollo de la fórmula CMC. A partir de 4 de estas imágenes capturadas, convenientemente tratadas, crean unas plantillas (una para cada valor de L^* y textura total o media) con las que generan el conjunto de muestras neutras con textura utilizadas en el experimento. Para cada uno de los centros acromáticos (con valores de L^* de 10, 20, 40, 60, 80 y 90), y cada una de las texturas (textura total, textura media y sin textura) generaron 101 muestras con diferencias de L^* en pasos de 0.1 (hasta ± 5 unidades en total). En el transcurso del experimento, pareció que el rango era bajo para algunos centros, y añadieron nuevos estímulos que agrandaban los límites.

En cada par, de forma aleatoria, una muestra presentaba la textura con la orientación original y la otra con la orientación al revés. Se les indicó a los observadores que realizaran sus juicios sobre la diferencia de color general, no sobre las características de la textura. Las muestras de cada par, rodeadas por un píxel negro, subtendían un ángulo de 6.2° , para una distancia entre el observador y el monitor de 60 cm. Utilizaron un campo circundante blanco (cercano a D65) de 1 cm de ancho, que tomaron como el blanco de referencia y un fondo neutro con una claridad $L^*=51.0$. El par de referencia, siempre en el lado izquierdo, estaba formado por dos muestras neutras, sin textura y con una diferencia de color entre ellas de una unidad CIELAB. La posición arriba-abajo de las muestras era aleatoria. El experimento se realizó en una habitación oscura, con 2 minutos de adaptación de los observadores al fondo y al campo circundante antes de comenzar cada sesión. En las sesiones, se presentaron a los observadores de forma aleatoria la combinación de centros y texturas.

Del análisis de los resultados concluyen que existe una dependencia de la tolerancia ΔL^* con la claridad de las muestras. Para muestras sin textura, la tolerancia se mantiene constante hasta valores de L^* de las muestras próximos a 60. Para valores de L^* mayores de 60, la tolerancia aumenta rápidamente hasta el doble de su valor inicial. No hay evidencia clara de efecto "crispensing" (Fairchild, 1998) para las muestras homogéneas y sí para las muestras con textura. El efecto "crispensing" consiste en el fenómeno en el que la magnitud percibida de una diferencia de color aumenta cuando el color de los dos estímulos comparados es similar al color del fondo. En algunos trabajos se dice que tiene poca influencia (Coates et al., 1981; Luo et al., 1987), y en otros que es

un efecto a tener en cuenta (Xin et al., 2001). Montag y Berns recomiendan estudiar más en profundidad, con diferentes fondos, el efecto “crispening” sobre las diferencias umbrales de color.

En los resultados obtenidos por Montag y Berns, para las muestras con la textura más fuerte, el incremento en la tolerancia es continuo para todo el rango de claridades, excepto en L^* igual a 40, lo que podría ser una consecuencia del efecto “crispening”. Para valores altos de L^* (80 y 90) no queda claro, por la alta incertidumbre de los resultados, si el incremento continúa o se estanca. Las muestras con textura media tienen el mismo comportamiento que con textura total, con tolerancias 1 unidad CIELAB por debajo. Por tanto, el efecto de la textura es incrementar las tolerancias supra-umbrales sobre las de las muestras homogéneas. Los autores creen que puede deberse al enmascaramiento de las diferencias medias de claridad, debido a las frecuencias espaciales de la textura. Admiten que para predecir el efecto de la textura en la tolerancia, es necesario examinar diferentes tipos de textura en futuros trabajos. Además en su trabajo sólo se examina el efecto de la textura sobre las tolerancias en claridad. Manifiestan su interés por estudiar cómo afecta la textura que han considerado, a las tolerancias en croma y en tono. Por otro lado, también hay que tener en cuenta que las texturas que utilizan sólo tienen variaciones en claridad sobre el fondo. También sería necesario investigar cómo influyen, sobre las tolerancias, texturas con variaciones en tono y croma.

En su trabajo también estudian las tolerancias que predicen las fórmulas de diferencia de color CMC, LCD, BFD, CIELAB y CIE94. En todos los casos, estas fórmulas predicen unos valores de la tolerancia inferiores a los obtenidos. Los autores sostienen que puede deberse a que por el efecto crispening, por tener el par de referencia una claridad igual al fondo, las tolerancias obtenidas son mayores. Ninguna de las fórmulas de diferencia de color se ajusta bien a la dependencia de la tolerancia en claridad con la claridad obtenida experimentalmente. Por los resultados obtenidos, determinan que CIELAB no es un buen espacio para modelar diferencias de color, siendo mejor un espacio basado en escalas logarítmicas. Por último reconocen la necesidad de realizar más experimentos para resolver esta cuestión.

Posteriormente a la publicación de este artículo no hemos encontrado ningún trabajo referente a la influencia de la textura sobre las diferencias de color, hasta el año

2003, donde en el congreso de la AIC celebrado en Bangkok, aparecen dos comunicaciones que estudian el efecto de la textura sobre la evaluación de diferencias de color.

En una de las comunicaciones presentada en Bangkok (Han et al., 2003), se investiga el efecto de dos factores paramétricos: la textura y el tipo de separación entre las muestras, sobre las diferencias de color percibidas. Realizan dos experimentos, uno con muestras textiles y otro con muestras, sin textura y con textura simulada, mostradas en un monitor CRT. Con los resultados obtenidos estudian, mediante el cálculo del factor PF/3 (Luo et al., 1987), el rendimiento de 5 fórmulas de diferencia de color: CIELAB, CMC, CIE94, BFD, y CIEDE2000.

Por un lado, un panel formado por 11 observadores, valoran 25 pares de muestras textiles utilizando el método de escala de grises, con un fondo neutro de $L^*=50$. Las muestras corresponden a 5 centros: rojo, rosa, verde amarillento, verde y azul. Entre los pares de muestras se tenían diferencias de croma, diferencias de tono y ambas, pero no diferencias de claridad. Por otro lado, 10 observadores valoraron, en un monitor CRT de 24 bits, pares de muestras sin textura y con textura simulada, utilizando distintos tipos de separación entre las muestras. La separación entre las muestras podía ser mediante una línea negra, una línea gris, una línea con color, una línea con color y textura o sin separación entre las muestras. La textura simulada de las muestras la obtuvieron transformando convenientemente las imágenes escaneadas de las muestras textiles.

Comparando los resultados de las dos experiencias, observan que las diferencias de color percibidas en el monitor son menores en un factor cercano a 1/2. Como cabía esperar, el acuerdo entre los resultados, muestras textiles y muestras en el monitor, es mejor cuando las muestras presentadas en el monitor presentan textura.

Estudian la variabilidad (repetibilidad y exactitud) en los resultados de los observadores mediante el factor PF/3 (Luo et al., 1987). Obtienen el mismo valor promedio del PF/3, 38, para la repetibilidad (precisión) y la exactitud.

Respecto a los efectos paramétricos de la textura y la separación entre las muestras, los resultados indican que, para las muestras presentadas en el monitor, son muy pequeños. En el caso de las muestras sin separación y sin textura la diferencia de color percibida se reduce ligeramente. La presencia de textura en las muestras no incrementa apreciablemente la tolerancia visual, en contradicción a los resultados

obtenidos por Montag y Berns. No obstante, hay que señalar que Han et al. estudian muestras con diferencias exclusivamente cromáticas (en croma y/o tono), mientras que Montag y Berns estudian muestras con diferencias sólo en claridad.

En el análisis de las fórmulas de diferencia de color, CIELAB es la que mejor reproduce los resultados obtenidos con las muestras textiles. Para las muestras con textura presentadas en el monitor, todas las fórmulas analizadas tienen resultados parecidos. Cuando son muestras sin textura (presentadas en el monitor) CIELAB es la que peor reproduce los resultados, obteniendo el resto de las fórmulas valores parecidos. Por tanto, de las 5 fórmulas analizadas, ninguna supera a las demás en todas las condiciones.

En la otra comunicación presentada en Bangkok (Xin et al., 2003), se investiga el efecto de la textura en la evaluación de diferencias de color en monitores. En su trabajo utilizan 15 tipos de texturas, simuladas a partir de 15 imágenes (seleccionadas de entre 80 imágenes) escaneadas de muestras textiles con diferente patrón de textura. Como las texturas de los tejidos son muy regulares, caracterizan las distintas texturas de acuerdo con la distribución de su luminosidad, es decir el histograma de la coordenada Y. A partir del patrón de la textura y el estímulo de color deseado, sintetizan el estímulo con la textura que utilizan para el experimento. Para este trabajo los estímulos que consideran son los mismos que en un trabajo previo (Xin et al., 2001): naranja, amarillo, gris, verde y azul.

Para cada tipo de textura y cada centro generaron un par de muestras, con una diferencia de color en claridad de 5 unidades CIELAB entre ellas. Los pares generados fueron evaluados por los observadores mediante el método de escala de grises. También realizaron un experimento de referencia, con muestras homogéneas con la misma diferencia de color y las mismas condiciones de observación. La razón de la diferencia de color visual entre las muestras con y sin textura va de 0.33 a 0.82, dependiendo del grado de textura. Por tanto, al aumentar el grado de textura disminuye la diferencia de color percibida, o equivalentemente aumenta la tolerancia visual. Para los 5 centros estudiados se tienen resultados similares, con un valor medio de la razón de las tolerancias con y sin textura en torno a 0.6.

En su comunicación Xin et al. concluyen que la evaluación visual de las diferen-

cias de color está fuertemente influenciada por la textura de las muestras del par. Reconocen la necesidad de realizar estudios adicionales para cuantificar el efecto de la textura e introducirlo en las valoraciones de diferencias de color instrumentales, para hacerlas más fiables.

En resumen, son muy escasos y recientes los trabajos sobre la influencia de la textura en las diferencias de color percibidas. Se admite en general que esa influencia puede ser grande, pero los resultados de los experimentos, además de escasos, no son por ahora muy coherentes. Es necesario, por tanto, estudiar más ampliamente este tema, como se reconoce en los trabajos comentados.

Una vez comentados los trabajos más importantes sobre la influencia de las texturas en las diferencias de color percibidas, a continuación analizaremos cronológicamente una serie de trabajos en los cuales se plantea, aunque de forma menos directa, la influencia de la textura sobre la percepción de diferencias de color, o la necesidad de estudiar dicha influencia.

Ya en 1978 Robertson aconseja estudiar la influencia de las texturas, en una publicación sobre las directrices en el estudio de las diferencias de color (Robertson, 1978), que siguió al informe del subcomité de diferencias de color del TC-1.3 de la CIE. Específicamente, para coordinar a los investigadores en los estudios referentes a la influencia de los factores paramétricos sobre las diferencias de color, se creó el comité técnico de la CIE 1-28, conjuntamente con el comité técnico CIE 1-29 sobre la evaluación industrial de diferencias de color. Tras la publicación de los informes de los mencionados comités técnicos 1-28 (CIE, 1993) y 1-29, y ante la necesidad de nuevos estudios que mejoren la relación entre las diferencias de color percibidas y su descripción colorimétrica, Witt proporciona (Witt, 1995) unas directrices para coordinar los futuros trabajos. Concretamente, en el Technical Report (CIE, 1993) publicado por el TC 1-28, se analizan una serie de factores paramétricos, recomendando incluso valores de los coeficientes paramétricos en algunos casos. Sin embargo a la textura se dedican unas breves líneas reconociendo su importancia pero sin hacer ninguna recomendación cualitativa al respecto. En el trabajo presentado por Witt (Witt, 1995), realizado sobre la base de las directrices de Robertson (Robertson, 1978), Witt recomienda los siguientes objetivos generales, para futuros trabajos: chequear la fórmula CIE94 en la práctica

industrial, estudiar los efectos de cambios respecto de las condiciones de referencia, incluir la incertidumbre en el estudio del color, desarrollar una base de datos de diferencias de color visuales, y desarrollar una fórmula de diferencias de color con una base fisiológica.

Muchas de las recomendaciones y sugerencias se han seguido en trabajos posteriores dando lugar a numerosas publicaciones, que estudian la influencia, sobre las diferencias de color, de distintos factores paramétricos: tamaño de las muestras (Xin et al., 2001), separación de las muestras (Wuerger et al., 1995), color del fondo (Witt, 1990), iluminante utilizado (Melgosa et al., 1997a), funciones de mezcla (Martinez et al., 1997), modo objeto y modo apertura (monitores CRT) (Melgosa et al., 1990a; Pérez et al., 2000) (Montag et al., 1999) (Xu et al., 2001a), comparación de métodos psicofísicos (Guan et al., 1999c) (Guan et al., 1999a), magnitud de la diferencia de color (Melgosa et al., 1997b) (Guan et al., 1999b) (Li et al., 1999; Xu et al., 2001b; Xu et al., 2002) (Witt, 1999), chequeo de CIE94 (Melgosa et al., 1999; Melgosa, 2000) (Kim et al., 2001), etc. Sin embargo, la textura de las muestras es uno de los aspectos que menos se ha estudiado, aunque es evidente su influencia sobre la percepción como se indica en trabajos recientes (Montag et al., 2000; Brenner et al., 2003). En concreto, Witt apunta (Witt, 1995) que en el estudio de condiciones de observación diferentes a las de referencia, “la estructura de la superficie de las muestras (textura) es otro parámetro de alta relevancia industrial. Se cree que los valores de los coeficientes paramétricos utilizados en la industria textil están influenciados por esta variable. Sin embargo, no se ha desarrollado una relación cuantitativa entre parámetros de la textura y las tolerancias visuales de diferencias de color”.

Entre los trabajos que mencionan la textura entre otros efectos paramétricos, es interesante el realizado por Berns (Berns, 1996). El autor estudia los coeficientes paramétricos en un trabajo en el que compara las fórmulas de diferencia de color CIE94 (CIE, 1995) y CMC (Clarke et al., 1984). Berns explica que el “Colour Measurement Committee” de la “Society of Dyers and Colourists”, introduce la razón L_c de CMC “para permitir la posibilidad de diferente peso de la claridad o el croma en diferentes circunstancias; por ejemplo las diferencias en la discriminación entre textiles, pintura o cuero”. La CIE incluyó las diferencias entre los substratos de las muestras, tales como el brillo y la textura, como “factores paramétricos”, y los introdujo en la fórmula CIE94 a

través de los coeficientes K_L , K_C , y K_H . La CIE explícitamente definió un conjunto de condiciones de referencia (CIE, 1993) para clarificar el significado de estos coeficientes paramétricos, y diferenciar entre las correcciones que, para las condiciones de referencia, mejoran la falta de uniformidad visual de CIELAB (S_L , S_C y S_H) de las correcciones que tienen en cuenta los efectos paramétricos (K_L , K_C , y K_H).

Berns también alude al origen del valor de los coeficientes paramétricos en las muestras textiles. La “American Association of Textile Chemists and Colorists” (AATCC) ha apuntado que, en el caso de CMC, cuando $l=2.0$ se correlaciona mejor los resultados de la fórmula con los juicios visuales de muestras textiles típicas. Otros valores de l podrían necesitarse en casos donde las características de la superficie difieran dramáticamente. En el caso de CIE94, si K_H se hace igual a la unidad, K_L y K_C pueden interpretarse como la razón $l:c$ de CMC. Al estudiar las diferencias entre CIE94 y CMC, Berns se plantea los conceptos de perceptibilidad y aceptabilidad. Los experimentos que dieron lugar a cada una de las ecuaciones difieren en estos conceptos. Los umbrales y los experimentos con un par de referencia, tienen por resultado datos de perceptibilidad. Las ecuaciones derivadas de esos datos se consideran ecuaciones de perceptibilidad, como es el caso de CIE94. La ecuación CMC fue derivada a partir de juicios visuales de aceptación/rechazo, estando implicada la aceptabilidad. Otra causa de las diferencias entre los factores de ponderación de CIE94 y CMC, en concreto del factor S_L , pueden ser efectos paramétricos, ya que CIE94 está basada en observaciones de muestras lisas y brillantes, mientras que CMC está basada en observaciones de muestras de hebras de poliéster.

Como conclusión final Berns afirma que queda aún mucho por aprender sobre las tolerancias de color. En particular, no se entiende bien cómo afectan a las tolerancias factores como la textura, la separación de las muestras, adaptación al iluminante o la claridad del fondo, por nombrar sólo algunos. Por esta razón se constituyó en 1995 un Consorcio de Evaluación de Diferencias de Color Industriales, del que el autor fue uno de los principales impulsores.

En otros trabajos Luo, Guan, Xin y Lam investigan la influencia de diferentes factores paramétricos sobre las diferencias de color. Los factores paramétricos que analizan son la separación entre las muestras, distintas luminancias de fondos neutros, y las diferencias entre varios métodos psicofísicos para realizar los juicios visuales.

Estudian especialmente, el efecto de estos factores paramétricos sobre diferencias de color pequeñas (Guan et al., 1999c), medianas (Xin et al., 2001) y grandes (Guan et al., 1999b; Guan et al., 1999a), y cómo predicen diferentes fórmulas de diferencia de color los resultados obtenidos. En todos estos trabajos, en su parte experimental utilizan muestras textiles, concretamente tejidos de lana tintados convenientemente. Al ajustar los coeficientes paramétricos de CIE94 obtienen valores de K_L en torno a 1.6 para el caso de diferencias de color pequeñas. Sin embargo en el caso de diferencias de color grandes, los valores de K_L que optimizan los resultados de CIE94 están cercanos a la unidad. Para diferencias de color medianas, Xin et al., obtienen un valor de K_L optimizado en torno a 1.3 para CIE94. Destacamos que en estos 3 trabajos, a pesar de utilizar muestras textiles, evidentemente con un grado alto de textura, los autores no han considerado expresamente la textura como un factor paramétrico con influencia en la percepción de diferencias de color. En el caso de diferencias de color pequeñas, los valores del coeficiente K_L son muy parecidos al caso de muestras con textura, y puede ser la textura la causa del incremento de los umbrales, aunque los autores no se lo plantean. En el caso de diferencias de color grandes, puede ocurrir que los efectos paramétricos (textura y diferencia de color grande) se cancelen, quedando K_L próximo a la unidad. Es decir, la presencia de textura aumenta las tolerancias mientras que las diferencias de color grandes las disminuyen. Para las diferencias de color medianas se tiene el caso intermedio entre los anteriores.

También Griffin et al. incluyen la textura en el estudio de algunos efectos paramétricos en un trabajo del año 2002 sobre el rendimiento de CIE94 bajo condiciones diferentes a las de referencia (Griffin et al., 2002). En particular, obtienen diferencias de color percibidas por 3 observadores, bajo distintos iluminantes cromáticos, muestras con texturas y pares con grandes diferencias de color. El trabajo se centra sobre todo en analizar las predicciones de CIE94 cuando el iluminante utilizado no es D65. En sus experiencias las muestras del par de prueba podían ser de moqueta, metal, tarjetas pintadas, papel, plástico, esponja, cera o madera, y fueron iluminadas por 13 iluminantes diferentes. Construyen 18 pares de muestras, mezclando muestras con textura y sin textura, y utilizan un método muy similar al de escala de grises (para lo cual usan muestras del atlas Munsell). Los pares fueron contruidos de forma que cubrieran un amplio rango de diferencias de color. A partir de medidas espectrorradiométricas

calculan los valores tristímulo de cada muestra, para lo cual realizan 6 medidas para tener en cuenta el error de las medidas y propagan este error desde los valores tristímulo hasta las diferencias de color mediante cálculo directo. Al utilizar iluminantes diferentes de D65, para considerar la adaptación cromática utilizan las transformaciones de von Kries, antes de calcular la diferencia de color CIE94 (manteniendo los coeficientes paramétricos iguales a la unidad). Calculan el promedio de las diferencias de color percibidas por los observadores en las 3 repeticiones, y lo comparan con el valor pronosticado por CIE94. En general los valores obtenidos no se ajustan bien a los teóricos, salvo para pares de muestras sin textura.

Para estudiar el efecto de la textura analizan separadamente cómo se ajustan las diferencias de color correspondientes a pares de muestras sin textura, y pares de muestra con textura (una o las dos muestras del par). El ajuste para el caso de muestras sin textura es mejor. Por lo tanto, de los tres factores paramétricos posible causa del mal ajuste, la textura de las muestras parece ser el más importante. Sostienen que el uso de la adaptación cromática de von Kries resuelve bien el problema del cambio de iluminante y las diferencias de color grandes tienen una influencia pequeña. En su trabajo intentan integrar la presencia de textura utilizando la métrica de potencias de Minkowsky para combinar las diferencias de color y textura. Considerando algunas hipótesis iniciales obtienen un modelo lineal donde las diferencias en claridad aumentan con el grado de textura.

También son interesante algunos trabajos realizados sobre el estudio de textiles, ya que sin estudiar explícitamente la influencia de la textura sobre las diferencias de color, de sus resultados podemos deducir el efecto de la textura. En un trabajo del año 2002 Steen y Dupont (Steen et al., 2002) estudian cómo CMC(2:1) reproduce la percepción visual de diferencias de color en textiles. Utilizan 2180 juicios visuales (de industrias textiles) de aceptación/rechazo de la diferencia de color entre la muestra y un patrón. Hay que tener en cuenta que las observaciones fueron realizadas en condiciones industriales, a veces alejadas de las recomendadas por la CIE. Con estos datos de aceptación/rechazo estiman el umbral de aceptabilidad en torno a 1 unidad CMC. En particular, con 350 pares realizan los juicios visuales utilizando 2 fuentes luminosas D65 y F para estudiar efectos de metamerismo. El índice de metamerismo que calculan es un factor importante para describir sus resultados. También prueban CIE94, e indican expresamen-

te la necesidad de investigar qué coeficientes paramétricos deben utilizarse con CIE94 para muestras textiles. Comparan las fórmulas CMC y CIE94, específicamente CMC(2:1) con CIE94(2:1:1). De la comparación resulta más apropiada, para sus resultados, la corrección de la claridad ($S_L=1$) de CIE94, y la corrección del tono con el ángulo de tono (S_H) de CMC. Entre sus conclusiones aseguran también que el efecto de la textura es aumentar el error, tanto de las observaciones visuales como de las medidas instrumentales.

Choo et al. estudian el efecto del color y la textura en la percepción de tejidos (Choo et al., 2003). En su trabajo 328 observadores califican con adjetivos un conjunto de 120 muestras textiles con diferentes colores y texturas. Del análisis estadístico de las respuestas concluyen que, tanto el color como la textura están muy relacionados con las sensaciones causadas por las muestras textiles. En un artículo anterior (Lee et al., 2001), también se estudia la percepción visual de la textura de muestras textiles. Están interesados en evaluar la respuesta emocional ante la percepción visual de texturas. Además estudian las diferencias en la percepción entre texturas reales y simuladas. Utilizan en su experimento 18 muestras textiles (tejidos de algodón, lana y seda), y sus correspondientes imágenes impresas en papel fotográfico. Todas las muestras eran acromáticas. Con los resultados obtenidos investigan los mecanismos de percepción de la textura, la deducción de factores psicológicos desde la percepción visual y cómo afecta la luz proveniente de la muestra en la percepción. Nos interesa destacar de este trabajo la conclusión de que la percepción de texturas reales y simuladas es similar, a pesar de las diferencias geométricas y espaciales entre ambos tipos de muestras.

A continuación expondremos otros trabajos menos relacionados con los objetivos de esta Memoria, pero donde se trata de alguna forma la textura. Como hemos comentado al principio de este capítulo, son numerosos los artículos relacionados con la textura. Con diferencia, es en el campo de la informática donde más se trata esta cuestión. Sirva de ejemplo el número de artículos sobre textura citados en la revisión de Rosenfeld de 1999 sobre Análisis de Imágenes y Visión por ordenador (Rosenfeld, 2000), donde en el apartado dedicado a “color y textura” cita 89 artículos relacionados con la textura, agrupados de la siguiente forma: 37 en “textura: modelos y síntesis”, 31 en “textura: descripción” y 21 en “textura: segmentación”. En la revisión del año 1992 realizada por el mismo autor (Rosenfeld, 1993) el número de artículos relacionados con la textura era

de 73. Concretamente hemos encontrado una serie de artículos en los que se aborda cómo simular las texturas de la forma más realista posible (Shufelt, 1997; Clausse et al., 2001; Dischler et al., 2001; Merillou et al., 2001; Miyata et al., 2001; Chen et al., 2002a; Rocchini et al., 2002; Wiens et al., 2002; Itoh et al., 2003). En estos artículos se describen diferentes algoritmos matemáticos y distintas técnicas a la hora de abordar la creación, por ordenador, de objetos con diferentes texturas. También se aborda la caracterización de texturas (Grigoriev et al., 1998; Paschos, 1998; Suen et al., 1999; Jones et al., 2000; Turiel et al., 2000; Myshkin et al., 2003; Paschos et al., 2003), donde resulta especialmente interesante el trabajo de Paschos (Paschos, 2000), que utiliza “momentos cromáticos” en el diagrama CIE 1931 para clasificar las texturas.

Otro campo, en el que se agrupan bastante artículos recientes, lo constituye el relacionado con el análisis de la textura en imágenes, bien para la clasificación y búsqueda de imágenes en bases de datos (Chou, 1999; Echigo et al., 2000; Zhong et al., 2000; Drimbarean et al., 2001; Rubner et al., 2001; Chen et al., 2002b; Mirmehdi et al., 2002; Cheng et al., 2003; Khotanzad et al., 2003), o el reconocimiento de imágenes, texturas o patrones (Caulfield et al., 1997; Grossberg et al., 1999; Salek et al., 1999; Dunn et al., 2000; Al-Rawi et al., 2001; Chung et al., 2004).

Dentro de las aplicaciones informáticas citamos, como ejemplo, el trabajo de control de calidad de textiles (Anagnostopoulos et al., 2001), o en el campo de la medicina algunos trabajos para la valoración de tumores, en citometría (Bloyet et al., 1999), tumores de mama (Gibbs et al., 2003), o cirrosis hepática (Jirak et al., 2002), también un artículo para aplicaciones en biomedicina (Zhang et al., 1998).

Nos parece interesante indicar que la textura también aparece en estudios neuronales sobre percepción (Bloj et al., 1999; Adini et al., 2002; Basole et al., 2003; Fahle et al., 2003). También en estudios fisiológicos (Goda et al., 2001), donde se estudia la sensibilidad de modulación a distribuciones de textura multicolor, o los trabajos de Grossberg et al. (Grossberg et al., 1998), y Li et al. (Li et al., 2000; Li et al., 2001), que estudian fisiológicamente la percepción de la textura. Otros estudios son los realizados por Popple (Popple, 2003), o Seiffert (Seiffert et al., 1999; Zaidi et al., 2002).

También aparece la textura en otros trabajos diversos, como en la caracterización colorimétrica del iris humano (Melgosa et al., 2000), donde los autores se enfrentan a la

medida del color y al cálculo de diferencias de color sobre muestras (iris) que presentan textura. O el caso de trabajos encuadrados en campos tan diversos como la arquitectura (en relación con los materiales), o los alimentos. Gimeno et al. caracterizan el chorizo de Pamplona a partir de la medida de su color y textura (Gimeno et al., 2000). Benavente et al. abordan el estudio de la influencia de la rugosidad de la superficie en el cambio de color de materiales de construcción (Benavente et al., 2003). En este trabajo se plantean cómo realizar las medidas de color en caso de que las muestras presenten textura: heterogeneidades, vetas, etc. Proponen utilizar aperturas pequeñas o bien utilizar una cámara CCD para medir el color en cada píxel. Aunque realizan 3 medidas espectrorradiométricas para calcular la media, no hacen ningún tratamiento de los errores. También miden la rugosidad de cada muestra para correlacionarla con el color. Tras realizar un proceso de pulido de los materiales y ataque mediante ácido relacionan el cambio producido en el color con el cambio en la rugosidad. Calculan las diferencias de color en unidades CIELAB y CIE94, pero no tienen en cuenta en ningún momento los efectos paramétricos debido a la textura de las muestras. La relación del color con la rugosidad de la superficie de la muestra también es estudiada por Simonot y Elias (Simonot et al., 2003).

Es evidente que la textura es un tema de investigación actual, como lo demuestra el hecho de que la mayoría de los artículos son muy recientes. También en los congresos más recientes aparece la textura. Valga de ejemplo el último Interim Meeting de la AIC (Han et al., 2003; Xin et al., 2003) y el CGIV2002 (First European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision) donde también se presentaron algunos trabajos relacionados con la textura (Botchko et al., 2002; Brochard et al., 2002; Horikawa, 2002; Jiman et al., 2002; Khoudeir et al., 2002).

A modo de resumen, según los trabajos que hemos presentado, puede decirse que no hay resultados claros respecto a la influencia de la textura en la percepción, en concreto en la percepción de diferencias de color. Podemos considerar, no sin controversia, que la textura de las muestras produce un incremento de las tolerancias en claridad en un factor próximo a 2, dependiendo del tipo y grado de textura. Respecto a las tolerancias en croma y tono no parece que estén influidas por la textura. Sin embargo los resultados no son claros y parece necesario realizar nuevos experimentos para analizar esta influencia, como los propios autores de los trabajos recomiendan a menudo.

2.2. Trabajos sobre los Errores en la Medida del Color

Según las directrices de Witt del año 1995 (Witt, 1995), se recomienda explícitamente incluir la incertidumbre en el estudio del color. Sin embargo, hasta la fecha tampoco es habitual calcular y propagar los errores, inherentes a la medida del color. Observamos no obstante una tendencia creciente a tener en cuenta estos errores. Así los artículos de Griffin (Griffin et al., 2002) y Steen (Steen et al., 2002), que ya hemos mencionado por tratar las texturas, incluyen el error en las medidas experimentales que realizan.

Además en los trabajos publicados se realiza el estudio de los errores colorimétricos en el sistema de representación del color más usual en el momento de su publicación, siendo bien sabido que han sido muchos los sistemas propuestos (Melgosa et al., 1990b) hasta llegar a los actualmente recomendados por la CIE (CIELAB y CIELUV), para los que los trabajos sobre errores en sus coordenadas de color son, obviamente, aún mas escasos. Es significativo también que a menudo los autores se interesan por valorar el significado, desde el punto de vista perceptivo, de estos errores colorimétricos. Coinciden en admitir como tolerables aquellos errores en la medida que produzcan una incertidumbre, en las coordenadas de color, que no sea perceptible por un observador con visión normal del color.

Haciendo una rápida revisión histórica, comentaremos en primer lugar el trabajo de Nimeroff (Nimeroff, 1953), donde pone de manifiesto que no se ha tenido en cuenta la incertidumbre asociada a los datos espectrofotométricos, en la medida del color derivada de dichos datos. En su trabajo estudia los errores aleatorios suponiendo que siguen una distribución normal en torno a sus valores medios; adopta, por tanto, la desviación estándar como representativa del error. Con la teoría de la propagación cuadrática calcula la propagación de la desviación estándar desde la reflectancia espectral hasta las coordenadas de cromaticidad CIE 1931 (CIE, 1986). De acuerdo con MacAdam, Nimeroff indica que las coordenadas de cromaticidad no son independientes y que por tanto habría que tener en cuenta su correlación en la propagación de errores (Nimeroff, 1953). Para esta autora el error aleatorio en los datos colorimétricos se debe a la incertidumbre en la medida de la reflectancia, ya que tanto las funciones de mezcla como la radiancia espectral del iluminante las toma libres de error (denominando a su producto

espectral del iluminante las toma libres de error (denominando a su producto “valores triestímulo espectrales”). Aunque la incertidumbre en la reflectancia medida por un espectrofotómetro en general depende de la longitud de onda, por simplicidad de cálculo, asume un valor constante en todo el espectro (0.001).

Shiple y Walker (Shiple et al., 1956) calculan el error máximo admisible sobre la medida de la reflectancia o transmitancia espectral para que el error en las coordenadas de cromaticidad CIE 1931 esté por debajo del umbral visual. Escogen para sus cálculos una región ($x \leq 0.310$, $y \leq 0.310$) donde un observador normal es más sensible a las diferencias de color (cfr. las elipses de MacAdam), y consideran que este umbral es de 0.001 en las tres coordenadas de cromaticidad (x , y , z), aunque utilizan una tolerancia visual de 0.002 por ser éste un valor más aceptado en la práctica industrial de aquel momento. A partir de este error máximo tolerable calculan cuál es el error máximo (que por sencillez suponen constante, o sea independiente de λ) en la curva de transmitancia espectral, para el caso particular de 18 filtros azules Wratten escogidos dentro de la región estudiada. Obtienen un error máximo permitido en las curvas de transmitancia espectral que varía entre 0.01% y 0.4%, dependiendo del filtro. Sin embargo en el caso de considerar el error en la transmitancia en el mismo sentido para todo el espectro (desplazamiento paralelo de la curva de transmitancia espectral medida) los errores máximos permitidos varían entre 0.1% y 1%. En sus resultados, generalmente la coordenada z tiene un error mayor que x e y ; también observan que el error máximo tolerable en la medida de la transmitancia espectral es mayor cuanto mayor es la transmitancia luminosa del filtro.

Más tarde MacAdam (Macadam, 1957) comenta que el cálculo del error máximo desarrollado por Shiple y Walker sobrestima, en un factor 3, los errores en las coordenadas de cromaticidad, pues aunque formalmente su desarrollo matemático es correcto, en la práctica es improbable que un espectrofotómetro pueda producir errores semejantes en la medida de la curva de transmitancia o reflectancia espectral. Sin embargo afirma que los errores aleatorios estimados por Nimeroff mediante la teoría de propagación cuadrática, aunque subestiman en un factor 0.5 los errores (quizá porque intervienen otros errores no aleatorios), están más cercanos a los errores producidos al medir con un espectrofotómetro construido y mantenido adecuadamente.

El trabajo de Robertson (Robertson, 1967) es quizá el más completo en este campo, pues aborda muy distintas cuestiones. En primer lugar menciona una serie de trabajos previos (Vandenbelt, 1954; Wright, 1959; CIE, 1963; Billmeyer, 1965; Robertson et al., 1965) donde se realiza una comparación entre las medidas de la reflectancia y transmitancia espectral, de un mismo conjunto de muestras, al utilizar varios espectrofotómetros. Robertson se plantea los efectos de estos errores espectrofotométricos para conocer cuál es el error máximo tolerable en la medida, sobre el principio de que la precisión del instrumento ha de ser al menos igual a la del ojo. Parte de un análisis de distintos trabajos previos (Macadam, 1953; Nimeroff, 1953; Shipley et al., 1956) donde considera que no se ha estudiado el tema ampliamente pues se utilizan un grupo de muestras limitado o sólo se estudian errores aleatorios. En su trabajo Robertson utiliza un conjunto de 32 muestras (4 azulejos neutros y 28 tarjetas coloreadas del Munsell Book of Color) escogidas para cubrir un rango amplio de color. Considera tanto los errores aleatorios como los sistemáticos, de diferentes tipos. Para calcular el máximo error tolerable en la curva de transmitancia o reflectancia espectral, utiliza la propagación lineal de errores para los errores sistemáticos, y la propagación cuadrática para los aleatorios, reconociendo la necesidad de incluir en el cálculo la covarianza (a través de los coeficientes de correlación), aunque de hecho no aborda esta cuestión en su artículo.

Robertson utiliza para la especificación del color el sistema $U^*V^*W^*$, recomendado por la CIE en 1963. Se plantea como una primera cuestión estimar el umbral visual en este sistema, ya que afirma que es deseable una precisión del instrumento al menos igual a la del ojo humano. Considera 0.2 unidades CIE $U^*V^*W^*$, o equivalentemente 0.5 en Y (sobre 100) y 0.001 en x e y, como el error máximo admisible en problemas industriales o comerciales, aunque comenta que en investigación sería deseable un error aún menor en la medida del color. Por otro lado analiza muchas de las posibles fuentes de error sobre la medida y especificación del color. Una de ellas son los errores cometidos por el método de integración utilizado para calcular los valores triestímulo. Robertson utiliza el método de ordenadas ponderadas con intervalos de longitud de onda de 10 en 10 nm entre 400 y 700 nm, pues según un estudio previo (De Kerf, 1958) el error cometido con este método es menor que el umbral visual para curvas de reflectancia espectral suave (la mayoría de las 32 muestras). Analiza también la variabilidad en las funciones de mezcla de los observadores como posible causa de error, y finalmente

considera las funciones de mezcla del observador patrón (CIE 1931) sin error. Estudia distintos tipos de errores sobre la reflectancia espectral que analiza separadamente. Por un lado considera errores constantes (independientes de la reflectancia) o proporcionales a la reflectancia; en ambos casos pueden ser bien sistemáticos, que considera constantes o dependientes de λ , o bien aleatorios, siempre constantes. En estos casos los errores tolerables en la reflectancia no han de exceder 0.4% cuando son constantes y menos aún cuando son dependientes de λ . También estudia los errores, sistemáticos y aleatorios, en la longitud de onda; obteniendo un error máximo tolerable de 0.2 nm y 0.3 nm para sistemáticos y aleatorios respectivamente. Otra posible fuente de error sobre la reflectancia espectral es la causada por el ancho de banda, estimando que en un caso simple de función de ancho de banda triangular, la anchura media no debe sobrepasar los 7 nm para cumplir las exigencias. En todos los casos los resultados corresponden a los cálculos realizados con las muestras más saturadas que son las que proporcionan los valores más bajos de error admisible. Robertson apunta que en el caso de combinación de varios errores se hará sumándolos vectorialmente, por lo que si dos de estos errores se combinan la tolerancia será aún más pequeña pues sería posible que el error total sea igual a la suma escalar de los mismos.

Fairchild y Reniff (Fairchild et al., 1991) estudian el error en la medida del color y cómo afectan los errores del blanco de calibrado utilizado en un espectrofotómetro. Normalmente en el calibrado de un espectrofotómetro se utiliza un blanco estándar de calibrado llamado instrumental, que está calibrado a partir de un blanco de transferencia, calibrado a su vez utilizando un blanco primario, que es el que tiene el menor error. En este trabajo analizan el error arrastrado en esta cadena de calibrado al utilizar un blanco instrumental, partiendo de la incertidumbre de un blanco primario estándar de calibrado del National Institute for Standards and Technology (NIST). A partir de esta incertidumbre en la reflectancia espectral del blanco estándar de calibrado, y la incertidumbre en la razón (muestra/blanco) de la reflectancia medida por un espectrofotómetro, calculan por propagación cuadrática el error en la reflectancia espectral de la muestra. Como ellos trabajan con el sistema CIELAB, propagan los errores hasta las coordenadas de color de este sistema. Sin embargo en los cálculos del sistema CIELAB no tienen en cuenta el posible error del blanco de referencia definido para este sistema. Para la propagación de los errores aleatorios utilizan la propagación cuadrática y consideran importante incluir

los coeficientes de correlación. Sin embargo asumen que estos coeficientes suelen despreciarse en el cálculo tradicional de errores, tal y como hacen ellos mismos en este trabajo, al no conocer el valor de los mismos.

Calculan los errores para las medidas realizadas con un espectrofotómetro Milton Roy Color Scan/45 sobre un conjunto de 12 muestras cerámicas (BCRA Series II), con un blanco estándar de calibrado instrumental, bajo el iluminante D65 y con el Observador Patrón CIE 1931. Obtienen unos errores medios de 0.028 en L^* , 0.173 en a^* y 0.086 en b^* , que usualmente se verían incrementados en la práctica, como consecuencia de otros factores tales como el mal mantenimiento del instrumento, mayores irregularidades de las muestras y aparición de errores sistemáticos. Consideran que la mayor fuente de error, en una medida del color, sería la inestabilidad y no-uniformidad tanto de las muestras como del blanco primario estándar y que, por tanto, la forma de reducir estos errores requeriría el desarrollo de nuevos materiales.

En un artículo más reciente Burns y Berns (Burns et al., 1997) analizan la propagación de errores en general, en transformaciones lineales y no lineales, que consideran de interés por ser las que se utilizan en el procesado de señales, como es el caso de la medida del color (con un espectrofotómetro) y la captura de imágenes de color (con una cámara digital). En particular desarrollan las expresiones para la propagación de errores desde la medida de la reflectancia hasta las coordenadas del sistema CIELAB. Consideran los errores aleatorios, producidos por causas estocásticas, y utilizan la teoría de propagación cuadrática con notación matricial, por ser en su opinión, más funcional y fácilmente aplicable al estudio de los errores en la medida del color, en el calibrado y en el procesado en color de la imagen. Consideran muy importante tener en cuenta la correlación entre las incertidumbres y calculan estos coeficientes para los valores triestímulo suponiendo que toda la correlación viene dada solamente por el solapamiento de las funciones de mezcla. Por otro lado calculan también los errores para las coordenadas CIELAB (incluyendo croma y ángulo de tono), pero consideran sin error los valores triestímulo del blanco de referencia, aunque admiten que puede ser interesante incluirlo, en particular, para comparar medidas entre laboratorios o a lo largo del tiempo.

Como un ejemplo de cálculo, partiendo del caso particular de tener un error (no correlacionado) del 5% en los valores triestímulo, calculan el correspondiente error

propagado a las coordenadas CIELAB. También para estos valores, calculan los elipsoides de error tanto en el espacio XYZ como en CIELAB. En el caso de CIELAB también usan coordenadas ΔL^* , ΔC^* , ΔH^* , con la métrica euclídea de CIELAB y con la dada por CIE94 (CIE, 1995) y analizan las diferencias entre los elipsoides de error. Respecto al problema inverso calculan los errores máximos admisibles sobre los valores triestímulo para obtener un error de 0.5 unidades CIE94, obteniendo unos errores de 0.57%, 0.47% y 0.30% para X, Y y Z respectivamente.

Gardner (Gardner, 2000) ha abordado el estudio de los errores en colorimetría como un problema de Metrología, aplicando el formalismo recomendado por la International Organization for Standardization (ISO, 1993). Así, para la propagación de errores utiliza la teoría de propagación cuadrática, haciendo un énfasis especial en la importancia de los coeficientes de correlación. En este trabajo considera dos procedimientos distintos de medida del color: partiendo de la medida de la irradiancia espectral (con un espectrorradiómetro) o de la medida de los valores triestímulo (con un colorímetro). A partir de estos datos calcula las coordenadas de color y sus correspondientes errores en tres espacios de color, CIE 1931, CIE 1960 UCS y CIE 1976 UCS, desarrollando las correspondientes expresiones analíticas. Sin embargo en su estudio, aunque es muy reciente, no llega a usar los sistemas CIELUV y CIELAB actualmente recomendados. Según un trabajo previo (Gardner et al., 1999) Gardner considera que los coeficientes de correlación entre los valores triestímulo en general no son nulos, ya que al solaparse las funciones de mezcla los valores triestímulo no son independientes, salvo que la irradiancia espectral tuviera una forma muy concreta. Calcula una expresión analítica para calcular estos coeficientes, realizando algunas suposiciones sobre la incertidumbre de la irradiancia espectral. Estas expresiones permiten calcular el valor de los coeficientes de correlación entre los valores triestímulo a partir de la irradiancia espectral y de las funciones de mezcla. Gardner estima el valor de estos coeficientes para el caso de distribuciones espectrales suaves (sustituyendo la irradiancia espectral por un valor medio constante) obteniendo: $r_{XY}=0.760$, $r_{XZ}=0.255$ y $r_{YZ}=0.082$. Como comprobación de las expresiones desarrolladas para los coeficientes de correlación, calcula el error en las coordenadas de cromaticidad de dos formas, a partir de los valores triestímulo con los coeficientes de correlación calculados, y directamente a partir de la irradiancia espectral, obteniendo el mismo resultado. Gardner también considera el caso de errores aleatorios

en la longitud de onda. Suponiendo que son constantes a lo largo del espectro visible desarrolla las expresiones de la propagación de errores hasta las coordenadas colorimétricas que él ha considerado.

Realiza cálculos de error para estímulos con coordenadas colorimétricas distribuidas por todo el espacio de color, concluyendo que los errores no están distribuidos uniformemente en el espacio de color. También da algunos ejemplos de cálculo de errores, en los que la aproximación hecha para calcular los coeficientes de correlación entre los valores triestímulo no es válida (es el caso de las distribuciones espectrales de irradiancia de las luces de algunos LEDs).

Siendo CIELAB el sistema de especificación del color que utilizaremos casi exclusivamente en esta Memoria, conviene hacer algunas consideraciones a propósito de este sistema, empezando por resaltar el hecho de que es en la actualidad, junto a CIELUV, es el sistema de especificación del color recomendados por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, 1986).

En 1976 la CIE recomendó el uso de dos sistemas de especificación del color, CIELAB y CIELUV, con sus correspondientes fórmulas de diferencia de color asociadas, principalmente con el deseo de promover una uniformidad práctica en las medidas de color. A lo largo del tiempo han sido muchos los sistemas de especificación del color y las fórmulas de diferencia de color que se han propuesto (Melgosa et al., 1990b), buscando mejorar la correlación entre medidas de color y percepción visual (McDonald, 1982a; McDonald, 1982b). A pesar de los avances conseguidos en este sentido, es importante destacar que habitualmente resulta imposible pasar las diferencias de color de unos sistemas a otros, con la consiguiente dificultad para el intercambio de información en aplicaciones industriales y en trabajos científicos. Por ejemplo, en el momento en que la CIE propuso CIELUV y CIELAB había más de 20 sistemas de especificación colorimétrica en las industrias de los distintos países (Robertson, 1977).

Los sistemas CIELUV y CIELAB son considerados por la CIE, ambos, como espacios “aproximadamente uniformes”. En 1976 la CIE no pudo recomendar sólo uno de estos sistemas, fundamentalmente por dos razones: 1) los datos experimentales no indicaban una superioridad significativa de ninguno de los dos sistemas; 2) se deseaba armonizar los beneficios derivados de la existencia de un diagrama de cromaticidad

(existente en CIELUV y no en CIELAB) con la adopción de una fórmula de diferencia de color basada en la de Adams-Nickerson (Nickerson et al., 1944), estandarizada por distintos países y organizaciones en aquel momento, y que constituye el precedente histórico del sistema CIELAB. En la literatura se encuentran numerosos detalles sobre el proceso que condujo a los sistemas CIELUV y CIELAB (Robertson, 1977) (Robertson, 1990; Berns, 2000). Nos limitaremos aquí a recordar las ecuaciones que definen a CIELAB, y a realizar algunas breves observaciones respecto al mismo.

Las ecuaciones que definen CIELAB en función de los valores tristímulo son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 && \text{para } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) > 0.008856 \\
 L^* &= 903.3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) && \text{para } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \leq 0.008856 \\
 a^* &= 500 [f(X/X_0) - f(Y/Y_0)] \\
 b^* &= 200 [f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde la función f tiene la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 f(\alpha) &= \alpha^{1/3} && \text{para } \alpha > 0.008856 \\
 f(\alpha) &= 7.787\alpha + \frac{16}{116} && \text{para } \alpha \leq 0.008856
 \end{aligned} \tag{2}$$

Una característica importante de CIELAB (también de CIELAV) es la posibilidad que ofrece de realizar una especificación del color en coordenadas cilíndricas, que se correlacionan con la claridad, el tono y la saturación (los clásicos atributos psicológicos del color). En la Figura 2.3.1 se tiene una representación de las coordenadas croma y ángulo de tono. Esta característica fue recogida por la CIE en 1976, siendo las expresiones para el croma y el ángulo de tono las siguientes:

$$\begin{aligned}
 C_{ab}^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\
 h_{ab} &= \arctg \left(\frac{b^*}{a^*} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Estas ecuaciones son la base de las expresiones que desarrollaremos para la

propagación de los errores desde los valores tristímulos, medidos, hasta las coordenadas de color L^* , C^*_{ab} y h_{ab} . Es destacable la presencia, en estas ecuaciones, del acromático de referencia (X_0, Y_0, Z_0), que desempeña el papel de un factor de normalización sobre los valores tristímulo del color considerado, a fin de valorar los efectos de la adaptación cromática. Como analizamos en profundidad en mi Memoria de Licenciatura (Huertas, 2001), es importante considerar el error correspondiente a la medida del blanco de referencia.

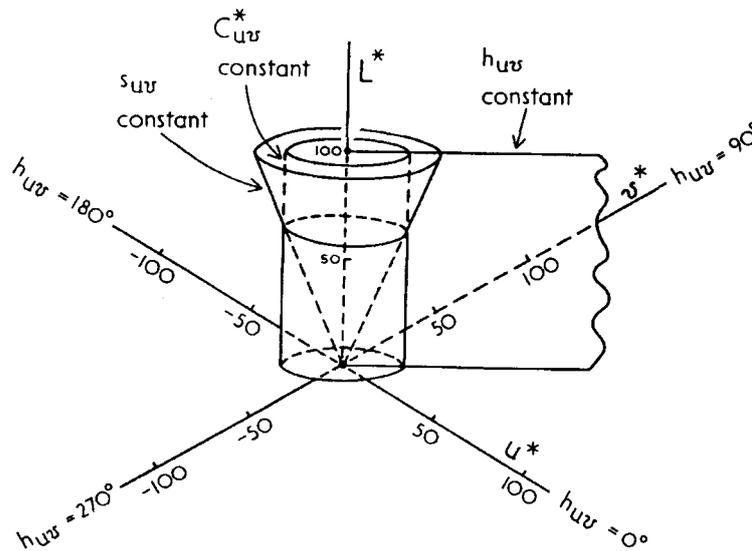


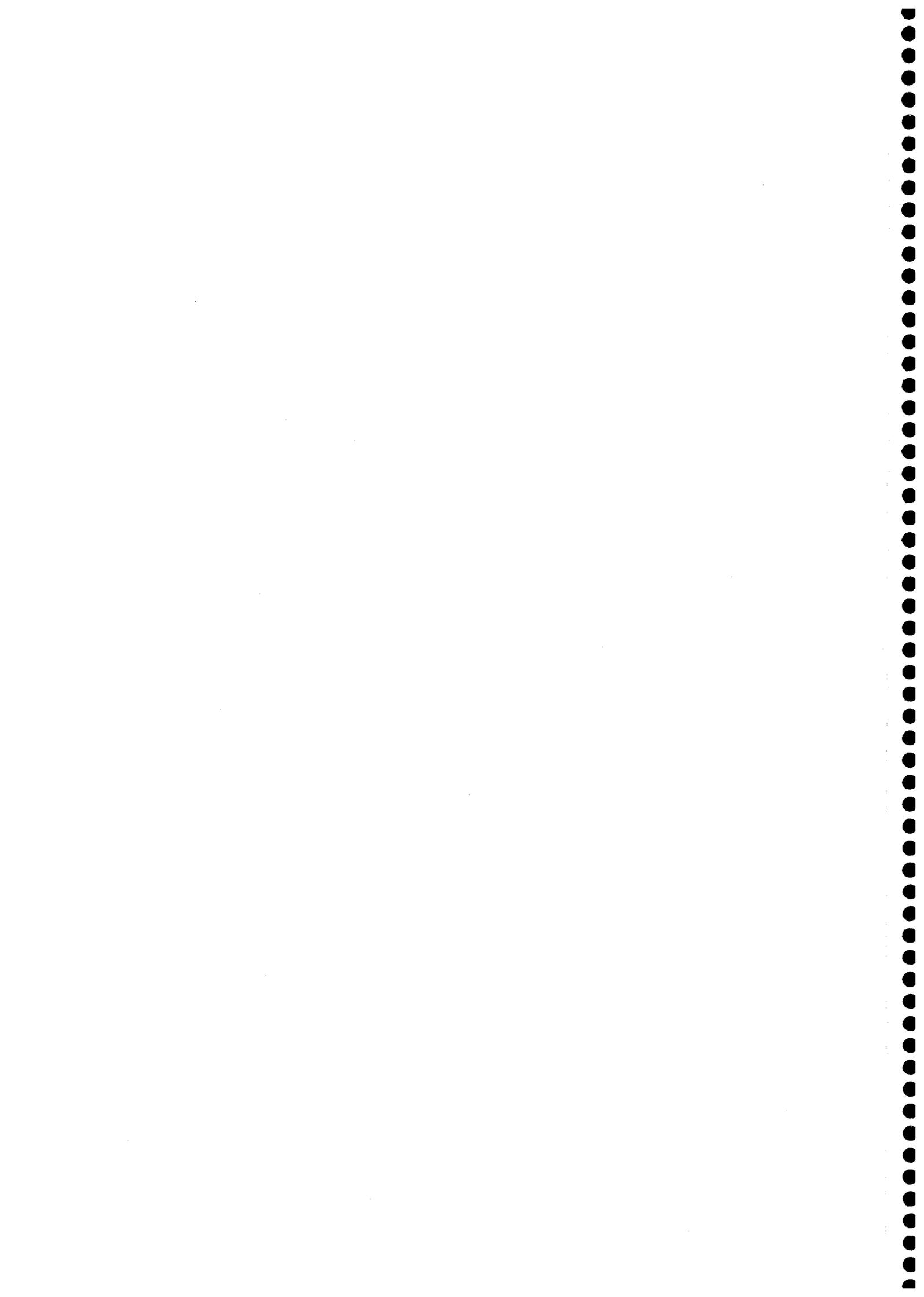
Figura 2.3.1. Representación tridimensional del espacio CIELUV. La representación del espacio CIELAB es similar (Hunt, 1987).

Como hemos comentado, en el documento de la CIE de 1977 se recomiendan conjuntamente los sistemas CIELAB y CIELUV, ya que en el momento en que se recomendaron no había argumentos sólidos para indicar que una de las dos fórmulas fuera superior a la otra ni en términos generales, ni en aplicaciones específicas. Posteriormente, como indicó Robertson (Robertson, 1990), se han difundido algunas ideas erróneas respecto a diferencias entre CIELUV y CIELAB (por ejemplo que CIELUV se recomendó para pequeñas diferencias de color y operando con luces de color, mientras que CIELAB se propuso para grandes diferencias con objetos de color). En cualquier caso, es también preciso reconocer que en la actualidad el uso de CIELAB está más generalizado que el de CIELUV (Kuehni, 1973; Komatsubara et al., 1988). Así, en base a CIELAB se han desarrollado muchas de las fórmulas de diferencia de color que actual-

mente se emplean, en particular la fórmula CIE94 (CIE, 1995) y la fórmula CIEDE2000 (CIE, 2001; Luo et al., 2001). En cualquier caso el uso de estas nuevas fórmulas no reemplaza según la CIE el empleo de CIELUV y CIELAB como sistemas de especificación del color. La obtención de un nuevo sistema de especificación del color que supere a estos sistemas, es más compleja que la resolución en la evaluación de diferencias de color. En este sentido, de lograr un sistema de especificación del color más uniforme que CIELAB y CIELUV, trabajan los Comités Técnicos 1-36 y 1-55 de la CIE (CIE TC1-36; CIE TC1-35).



CAPÍTULO 3
MÉTODO EXPERIMENTAL



CAPÍTULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

En este Capítulo describimos la instrumentación y metodología seguida durante el proceso experimental, que comprende por una parte las observaciones realizadas y por otra las medidas de las muestras. También comentaremos el tratamiento de los datos obtenidos.

3.1 Dispositivo Experimental de Observación

En el estudio experimental realizado para esta Memoria hemos presentado una serie de estímulos, con unas características dadas, bien para ser observados o bien para ser medidos. Para esta presentación hemos utilizado un monitor CRT, debido a la versatilidad, sencillez y rapidez de respuesta de estos dispositivos para este tipo de experiencias. Se ha estudiado ampliamente que estos dispositivos son válidos para este tipo de experiencias (Berns et al., 1991; Rich et al., 1992; Montag et al., 1999; Pérez et al., 2000). En concreto hemos utilizado un monitor color Samsung SyncMaster 900p con las siguientes características:

- Tubo de pantalla de 48.2 cm (19.0”), con representación visual de 45.7 cm (18.0”). Revestimiento de anti-reflejo con antielectrostático.
- Sincronización horizontal automática de 30 a 96 kHz, y vertical de 50 a 160 Hz.

- Resolución máxima horizontal de 1600 puntos y vertical de 1200 líneas.
- Área de visualización activa horizontal de 36 cm y vertical de 27 cm.

El monitor es manejado por un programa informático que hemos realizado especialmente para esta Memoria y que comentaremos en el Apartado 3.3. Este software se ejecuta en un ordenador pc IBM-compatible, con una CPU AMD K6 Athlon™ XP1700 con 3Dnow!™ 256.0 MB de memoria RAM, tarjeta gráfica NVIDIA RIVA TNT2 Model 64 Pro 32 MB, en el que se ha instalado el sistema operativo Microsoft® Windows 98 Segunda Edición. La pantalla del monitor se configuró a 1024x768 píxeles y color verdadero de 32 bits.

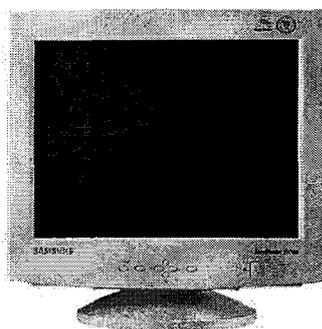


Figura 3.1.1. Monitor Samsung SyncMaster 900p (<http://www.samsung.es>).

3.2 Calibrado del Monitor

Al utilizar dispositivos CRT para representar los estímulos es necesario realizar un calibrado de los mismos, con el fin de obtener en la pantalla los estímulos con las coordenadas de color deseadas. El calibrado del monitor, tras revisar algunos trabajos previos (Brainard, 1989; Post et al., 1989; Berns, 1996; Diaz et al., 1996; Palomares et al., 1997; Jimenez et al., 1999), lo realizamos siguiendo básicamente el procedimiento desarrollado en nuestro laboratorio, usado en trabajos precedentes (del Barco et al., 1995; Melgosa et al., 1999; Cui et al., 2001a; Cui et al., 2001b).

Dentro del programa informático que hemos desarrollado están incluidos los datos del calibrado (introducidos en el momento de realizar cada calibrado) y el

algoritmo que realiza la búsqueda de los valores DAC de los cañones del monitor para obtener el estímulo de color más próximo al color buscado. Esta búsqueda se realiza en diversos sistemas de especificación del color que hemos implementado en el programa, como veremos posteriormente. De esta forma el usuario, una vez realizado el calibrado, no tiene que preocuparse más que de especificar las coordenadas de color correspondientes al estímulo que desee obtener y el programa buscará los valores DAC que correspondan a las coordenadas más próximas a las buscadas.

En este punto hemos de comentar una de las principales desventajas del uso de dispositivos CRT en experiencias de estudio del color. Ésta básicamente se reduce a que la paleta de colores disponibles en un monitor es limitada, debido a dos causas fundamentales que analizaremos a continuación. En un dispositivo CRT los estímulos se obtienen como mezcla de estímulos primarios producidos por tres fósforos: rojo, verde y azul (cada uno excitado por el correspondiente cañón del monitor). Estos fósforos tienen un valor mínimo (que no suele ser apagado total) y un valor máximo. Por tanto la paleta de colores posibles serán los colores que puedan obtenerse como mezcla de los 3 primarios, y el resultado es que hay muchos estímulos cromáticos que no podremos obtener; es decir la paleta de colores del monitor es más reducida que la paleta de colores reales. En la Figura 3.2.1 hemos representado la paleta de colores que podemos obtener con nuestro monitor en un diagrama CIE 1964 (como explicaremos más adelante, todas las medidas de calibrado del monitor las hemos realizado para campos mayores que 4° y por eso hemos utilizado las funciones de mezcla del Observador Patrón CIE 1964).

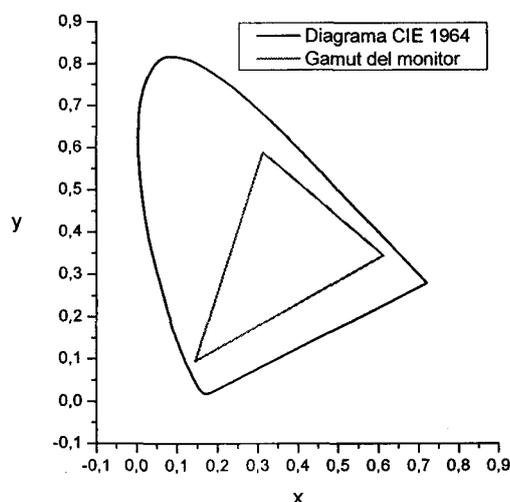


Figura 3.2.1. Paleta de colores obtenibles con el monitor sobre un diagrama CIE 1964.

Además de que la paleta de colores es reducida, por otro lado, la excitación de los fósforos mediante los cañones se controla mediante valores que han de ser números enteros de 0 a 255 (en el caso de una tarjeta de vídeo de 32 bits como la utilizada). Esto hace que el conjunto de todos los colores que obtenemos dentro de esa paleta esté “cuantizado”, no disponiendo de un continuo de estímulos cromáticos entre dos puntos de la paleta de colores.

Por estas razones en el programa informático que hemos desarrollado, cuando se definen las coordenadas de color de cualquier estímulo y se va a realizar la búsqueda de los valores DAC, hemos incluido la precisión con la que queremos que se haga la búsqueda de las coordenadas de ese estímulo, teniendo en cuenta que a mayor precisión requerida más difícil será que la búsqueda sea fructífera. No obstante, podemos jugar con distintas precisiones en cada una de las coordenadas, sacrificando alguna de ellas para poder obtener mayor precisión en las restantes.

En el desarrollo de esta Memoria esto ha supuesto que no hemos podido obtener de forma totalmente exacta las coordenadas deseadas, encontrando, no obstante, casi en todos los casos estímulos cercanos, dentro de la tolerancia que hemos considerado. Normalmente hemos trabajado con tolerancias de 0.5 unidades en L^* y C^*_{ab} y 0.3 unidades en h_{ab} (en grados), que son las coordenadas de color que hemos utilizado en esta Memoria. Hemos de decir que en la mayoría de los casos la diferencia entre las coordenadas encontradas y buscadas es pequeña, mucho menor que las tolerancias, y por debajo de los errores cometidos por las suposiciones que se hacen en el propio calibrado. Sin embargo en algunos casos no ha sido posible encontrar estímulos razonablemente cercanos a los buscados por lo que hemos tenido que eliminar el estudio de ese estímulo particular. Más adelante volveremos sobre este tema.

3.3 Diseño del Programa Informático DCTR

Para presentar en la pantalla del monitor el test deseado con los estímulos adecuados y de forma correcta, se necesita un programa informático que realice y controle estas tareas. Debido a las exigencias particulares de diseño experimental de esta Memoria de Doctorado, se optó por desarrollar un programa “a la medida”, que hemos

realizado exclusivamente para esta Memoria y hemos denominado DCTR 2.1.

En un primer intento, después de un esfuerzo de aprendizaje en programación, desarrollamos un programa de software en Borland C++ 3.1 bajo el sistema operativo MS-DOS, que denominamos DCTR 1.0. Al trabajar con este sistema operativo, el manejo de la tarjeta de video ha de hacerse desde el propio programa, lo que limita las posibilidades en el empleo de los colores obtenidos en pantalla, como expondremos a continuación. Para ello explicaremos resumidamente el funcionamiento de la tarjeta de video de un ordenador como el utilizado.

Las tarjetas de video, que conectan el monitor con la placa base que alberga la unidad central de proceso (CPU), funcionan como convertidoras de valores digitales a valores analógicos (DAC: digital-analogical converter) para cada uno de los tres cañones de los que dispone un monitor convencional: rojo, verde y azul. El número de valores digitales que definen la potencia de cada cañón (valor DAC) depende del número de bits disponibles por cañón. El valor DAC máximo corresponderá con la potencia del cañón al máximo y el valor mínimo con la potencia mínima del cañón (muy cerca del apagado); del número de valores entre dichos máximo y mínimo dependerá el número de colores intermedios que podamos obtener. Por otro lado, del número de bits por cañón, de la resolución de la pantalla y de la memoria de la tarjeta dependerá el número máximo de colores disponibles en pantalla simultáneamente. Con los "drivers" que utilizamos en programación bajo MS-DOS no conseguimos disponer de más de 18 bits (6 bits por canal o cañón), lo que nos proporciona 64 (2^6) valores DAC para cada uno de los canales del monitor (rojo, verde y azul). Al trabajar con la pantalla del monitor como dispositivo de observación nos interesa la mayor precisión posible en los estímulos presentados en la pantalla, o lo que es lo mismo el mayor número de bits por canal del que podamos disponer. Por esta razón, aunque casi finalizado el programa, cuya pantalla de inicio observamos en la Figura 3.3.1, se optó por abandonarlo y solucionar este problema cambiando el sistema operativo base del programa informático.

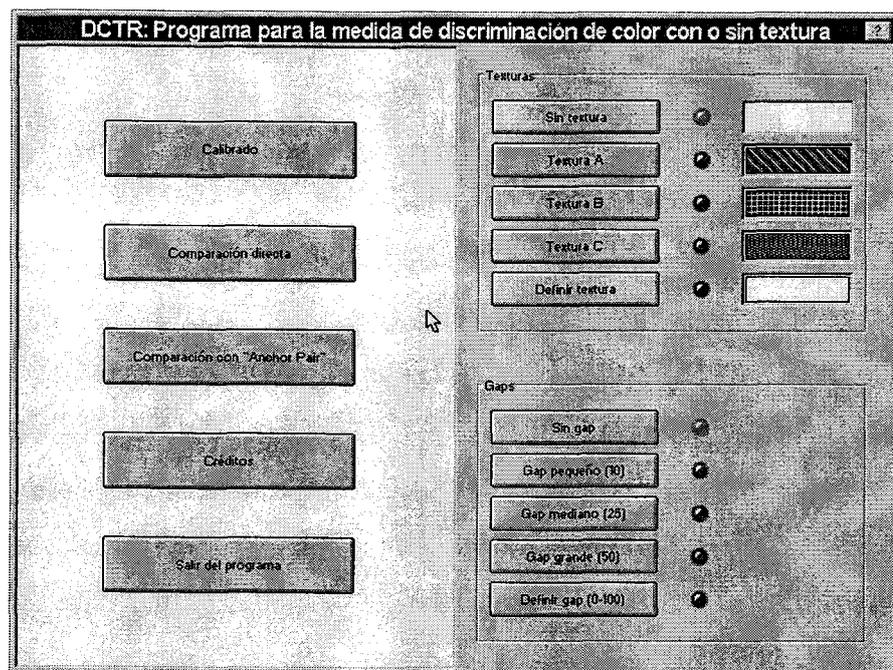


Figura 3.3.1. Pantalla de inicio del programa DCTR 1.0.

Ya que el sistema operativo Microsoft® Windows maneja directamente la tarjeta de video con una capacidad de hasta 8 bits por canal (256 valores para cada uno de los canales) para una tarjeta convencional, volvimos a realizar el programa con un planteamiento totalmente distinto y aprovechando la experiencia obtenida en el intento anterior. Este nuevo programa lo hemos realizado también bajo el mismo lenguaje C++ pero ahora bajo el sistema operativo Windows, mediante el programa Borland C++ Builder 4 (Charte, 2000). Al contar con 8 bits por canal en lugar de los 6 bits anteriores, la “cuantización” de la que hablamos antes es en saltos más pequeños, lo que nos hace disponer de muchos más colores: 16.777.216 colores diferentes frente 262.144 colores diferentes con 24 y 18 bits respectivamente.

Desde la primera versión, al plantear el desarrollo del programa pensamos en que fuera lo más versátil posible, de forma que pudiera utilizarse en futuros trabajos de investigación, no sólo en la presente Tesis Doctoral. Por ello hemos implementado más métodos de igualación que el utilizado, distintos sistemas de especificación de color, más tipos de textura que las que emplearemos, etc., como iremos viendo en los siguientes párrafos. También en el diseño del programa se han intentado seguir los estándares ANSI de programación en Windows para hacer su manejo lo más sencillo posible a cualquier usuario.

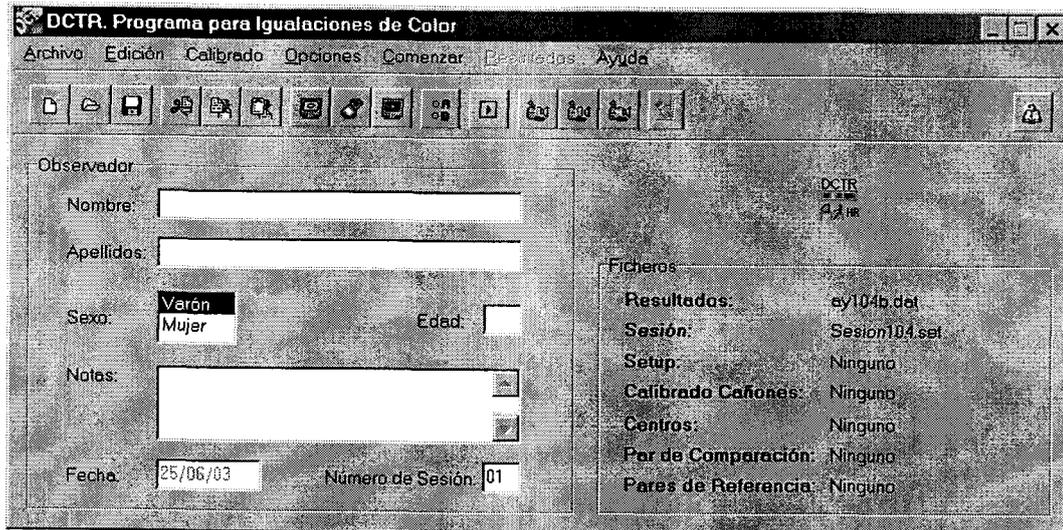


Figura 3.3.2. Pantalla de inicio del programa.

El programa consta de una pantalla inicial, que mostramos en la Figura 3.3.2, desde la cual se accede a cualquiera de las diferentes opciones, mediante la barra de menú o los botones rápidos. También desde esta pantalla se abren los ficheros de los distintos tipos o se guardan los resultados y se muestra información de los ficheros y del observador.

Según el funcionamiento del programa podemos dividirlo en tres módulos fundamentales, todos integrados en el mismo programa. En las secciones siguientes describiremos las características más relevantes de cada módulo.

Calibrado y búsqueda de valores DAC

Este módulo incluye los mecanismos para realizar el calibrado del monitor, así como el algoritmo de búsqueda de los valores DAC del estímulo con coordenadas de color lo más cercanas posibles, y dentro de la precisión requerida si es posible, a las coordenadas de color buscadas en cada caso. Los datos del calibrado pueden guardarse en un fichero para recuperarlos en cualquier momento. En la Figura 3.3.3 observamos la pantalla sobre la que se realizan las medidas espectrorradiométricas necesarias para el calibrado. Hemos realizado estas medidas con un espectrorradiómetro PR-704, que describiremos en el Apartado 3.7.

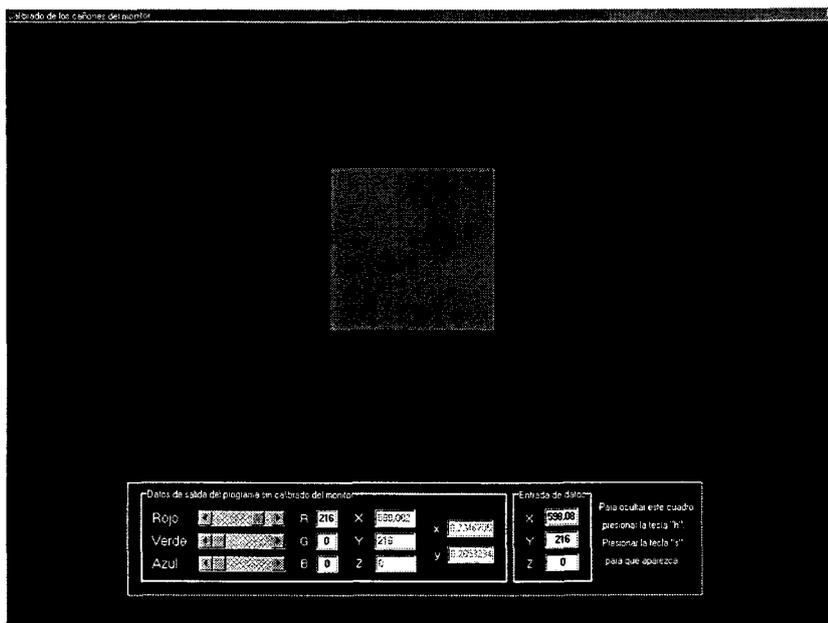


Figura 3.3.3. Pantalla para realizar el calibrado del monitor.

Para especificar las coordenadas de color de cualquier estímulo, y que el programas realice la búsqueda de los valores DAC (inmediatamente después de especificar unas coordenadas) se utiliza la pantalla que se muestra en la figura siguiente:

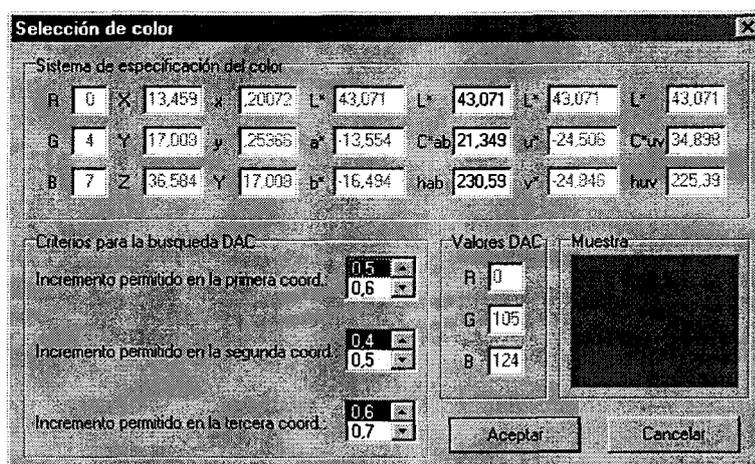


Figura 3.3.4. Pantalla de selección de color.

Como podemos observar en la figura, con la idea de hacer el programa lo más versátil posible, lo hemos programado de forma que maneja indistintamente cualquiera de los siguientes sistemas de especificación del color: RGB, valores triestímulo, coordenadas de cromaticidad, sistema CIELAB y sistema CIELUV, incluyendo la

especificación con croma y ángulo de tono tanto para CIELAB como CIELUV. Como comentamos anteriormente se incluyen tres parámetros de precisión en la búsqueda que se pueden modificar independientemente. En caso de que la búsqueda sea fructífera (dentro de la precisión requerida) se muestra el estímulo encontrado, sus coordenadas en todos esos sistemas de especificación del color (en negrita el sistema en el que se han solicitado las coordenadas) y los valores DAC correspondientes. En la presente Memoria para casi todos los estímulos hemos utilizado el sistema CIELAB con coordenadas cilíndricas: L^* , C^*_{ab} y h_{ab} (en grados).

Configuración y diseño del test

En este módulo se manejan todos los datos relativos a la configuración de las observaciones experimentales. Por un lado se determinan las siguientes preferencias: tamaño de las muestras, método de comparación utilizado, tiempo de adaptación a la oscuridad, tiempo de adaptación al campo circundante y al fondo y color del fondo y del campo circundante. Además se introducen los datos de tamaño de la pantalla del monitor y distancia de observación, para los cálculos de tamaños y ángulos que realiza el programa. En la Figura 3.3.5 observamos la pantalla principal de configuración del programa.

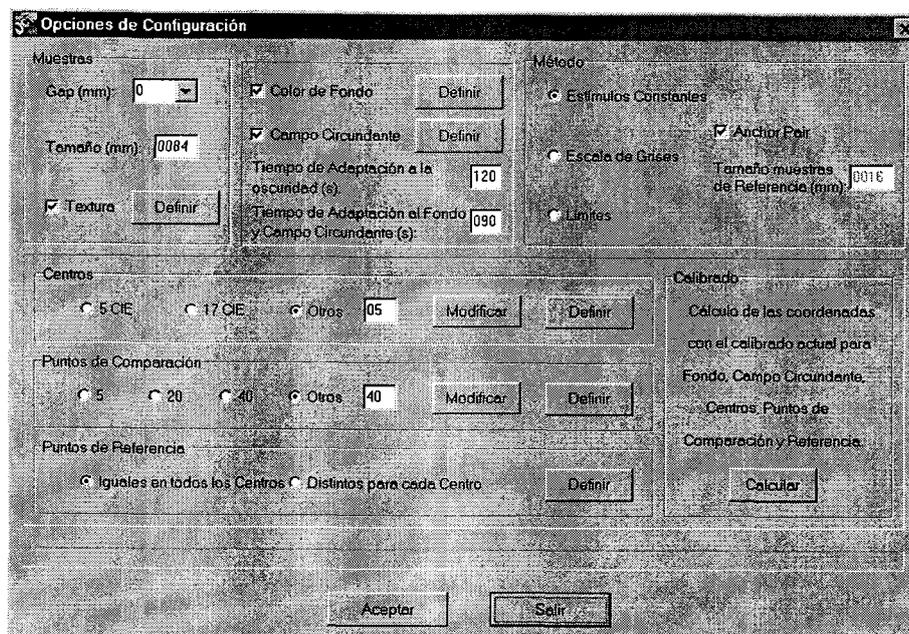


Figura 3.3.5. Pantalla con las opciones de configuración.

Hemos de aclarar que entendemos por Fondo (background) la zona que rodea las muestras, y que acaba en el Campo Circundante (surround) situado en el borde de la pantalla.

También en este módulo se definen las coordenadas de color (en cualquiera de los sistemas antes indicados) de todos los estímulos que van a aparecer: si es el caso el Par de Referencia (iguales o distintos para cada centro), todos los estímulos del Par de Prueba (con un máximo de 40), así como la Escala de Grises si la hubiera. También se selecciona la textura de los estímulos, la separación (“gap”) entre las muestras del par, etc.

Con la filosofía de hacer un programa más general de lo que necesitábamos tuvimos en cuenta distintos métodos psicofísicos, como también contemplamos en la Figura 3.3.5. Estos métodos son el “Método de Escala de Grises”, en el que el observador “adapta” el Par de Referencia al Par de Prueba; el “Métodos de los Límites”, donde el Par de Prueba va cambiado en un tiempo aleatorio hasta que el observador detiene el proceso; y el llamado “Método de Estímulos Constantes”, donde el Par de Prueba va cambiando como respuesta a acciones del observador. Tanto en el Método de los Límites, como en el Método de los Estímulos Constantes es posible utilizar un Par de Referencia (Anchor-Pair) o sólo el Par de Prueba.

Todos los datos que hemos comentado referentes a la configuración se pueden guardar en un fichero, de forma que el usuario sólo tenga que abrir este fichero sin tener que preocuparse de configurar el programa cada vez; por supuesto siempre que desee mantener la misma configuración.

Presentación del test y salvado de los resultados

Este tercer módulo maneja la presentación en la pantalla del test, siguiendo todos los valores preestablecidos anteriormente en la configuración y teniendo en cuenta el calibrado del monitor. En la Figura 3.3.6 mostramos un ejemplo de uno de los test presentados.

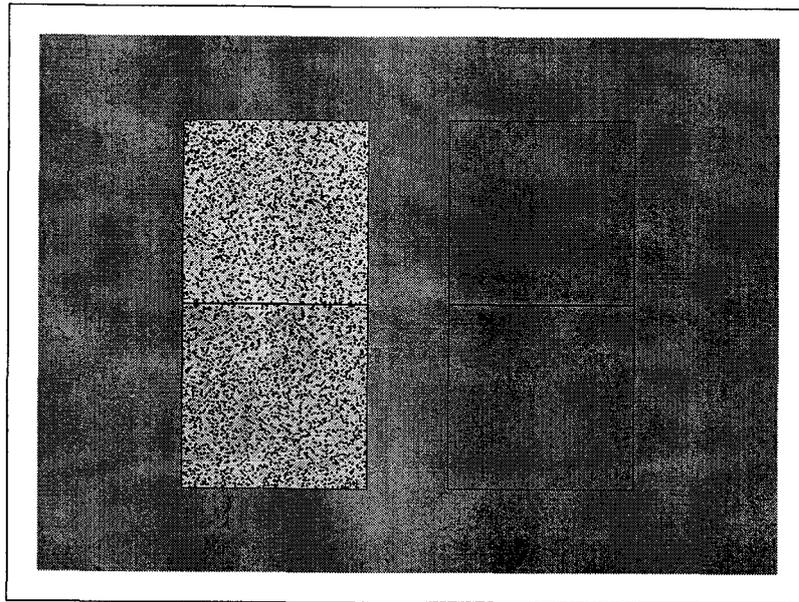


Figura 3.3.6. Aspecto de la pantalla de observación para una muestra de ejemplo.

Resultados

Centro: 4

Método: Estímulos Constantes

Color de Fondo y Campo Circundante:
 Fondo: L: 50.962 C:ab:0.40023 hab: 23.034
 Campo Circundante: L: 93.429 C:ab:0.04325 hab:61.443

Textura:
 A L: 5.79 A C:ab: 3.34 A hab: 243

Puntos Aleatorios:
 Superficie 20%
 Grosor: 1

Blanco de Referencia:
 Xo: 128.0 Yo: 128.0 Zo: 176.6
 xo: 0.28226 yo: 0.3027

	de	Comparación	L*	C*ab	hab	Muestra 1	de	Anchor Pair	Muestra 2	de	Anchor Pair	tiempo
Muestra 4	C*ab:47.085	hab:98.533	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 5	C*ab:47.111	hab:98.453	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 6	C*ab:47.12	hab:98.377	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 7	C*ab:47.594	hab:98.458	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 8	C*ab:47.112	hab:98.507	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 9	C*ab:47.151	hab:98.618	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 10	C*ab:47.276	hab:98.211	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 11	C*ab:47.302	hab:98.407	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 12	C*ab:47.348	hab:98.278	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 13	C*ab:47.352	hab:98.37	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 14	C*ab:47.362	hab:98.462	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 15	C*ab:47.407	hab:98.582	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07	0.01-18	
Muestra 16	C*ab:47.48	hab:98.584	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		
Muestra 17	C*ab:47.523	hab:98.589	6.794	3.344	249.6	L*:49.329	C*ab:0.07179; hab:51.121	L*:47.686	C*ab:0.26552	hab:209.07		

< Anterior Salir Siguiente >

Figura 3.3.7. Pantalla de resultados.

También este módulo controla las acciones del observador y guarda los resultados, que pueden mostrarse en una pantalla como la que observamos en la Figura

3.3.7. En esta pantalla de resultados se muestran los datos referentes al fondo y campo circundante, al método y todos los datos del centro y la textura. También aparecen las coordenadas de todos los puntos del Par de Prueba y del Par de Referencia, así como el estímulo seleccionado por el observador y el tiempo empleado por éste para realizar la comparación. Por comodidad en la manipulación posterior de los resultados, en una última versión del programa (versión 2.1), es posible guardar los resultados en un fichero de Microsoft® Excel.

En la presente Memoria las observaciones experimentales se han realizado mediante el método de Comparación de Pares, o lo que es lo mismo el Método de Estímulos Constantes utilizando un Par de Referencia, tal y como observamos en la Figura 3.3.6. Esta configuración experimental ha sido empleada en trabajos previos (Montag et al., 1999; Melgosa et al., Aceptado). En un artículo reciente se ha probado que el método de Estímulos Constantes es más adecuado que el método de Escala de Grises, aunque por supuesto con resultado similares (Montag et al., 2003).

En un primer momento, por similitud con el diseño de la presentación de las muestras con el método de Escala de Grises, se hicieron algunas observaciones de ensayo con el Par de Prueba y el Par de Referencia en horizontal y subtendiendo un ángulo de 3.12° (cada muestra del par), que corresponde con la mitad del tamaño del que aparece en la Figura 3.3.6. Según los observadores la sensación de diferencia de color en el Par de Referencia era distinta según la posición exterior o interior (que era aleatoria) de las muestras que lo forman. Este efecto podría deberse a que, con esta configuración, una de las muestras del par estará siempre más cerca del campo circundante y la otra más lejos y menos influenciada por éste; por otro lado también podría influir la inhomogeneidad del dispositivo CRT, al ser la claridad ligeramente mayor en el centro, dependiendo de cual muestra del par esté situada más al centro la diferencia de color entre el par se verá aumentada o disminuida. Para evitar este efecto se modificó el programa para presentar los estímulos en vertical dentro de cada par.

La distancia de observación, marcada mediante una mentonera de referencia (que no se usaba para fijar firmemente al observador) es de 770 mm. Desde esta distancia y teniendo en cuenta las dimensiones mostradas en la Figura 3.3.8, cada uno de los estímulos del Par de Prueba (a la izquierda) y del Par de Referencia (a la derecha)

subtienden un ángulo de 6.2° . La posición arriba y abajo de cada estímulo dentro del par es aleatoria, pues de esta forma se cancelan los efectos de orientación (Sugiyama et al., 1963). Una línea negra de un píxel bordea cada estímulo. Entre los pares se subtiende un ángulo de 2.7° .

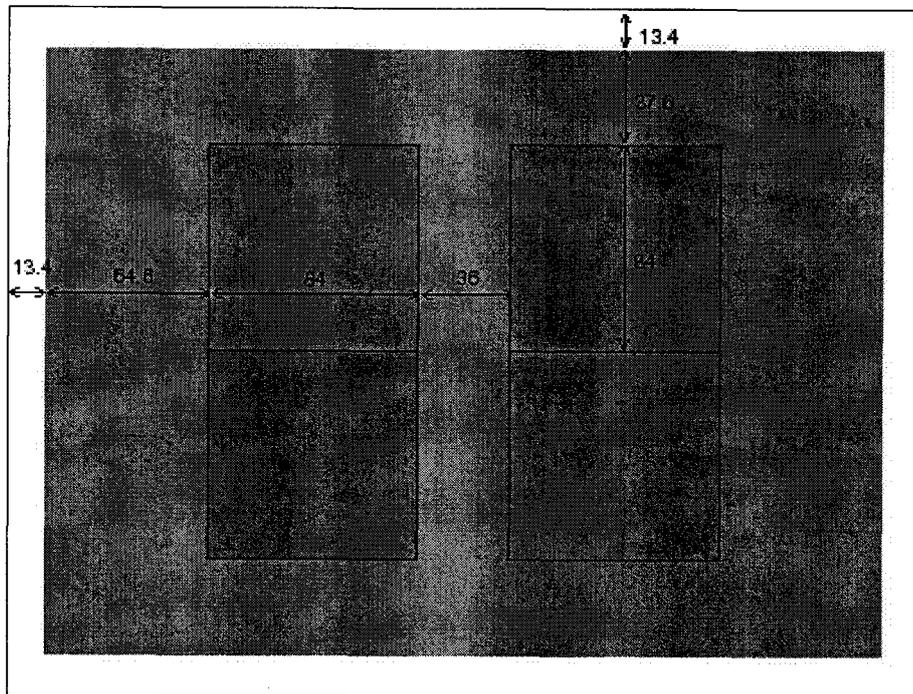


Figura 3.3.8. Tamaño (mm) de los estímulos de la pantalla de observación.

Hemos utilizado un Campo Circundante, que subtiende 1° , y corresponde al blanco de referencia en el cálculo de las coordenadas CIELAB y CIELUV. Entre el campo circundante y los pares se subtienden 4.8° y 2.8° según sea el borde horizontal o vertical respectivamente. Para el Fondo hemos elegido un estímulo empleado en trabajos previos (Montag et al., 1999; Melgosa et al., Aceptado). Las coordenadas del Campo Circundante y del Fondo se muestran en la Tabla 3.3.I.

En el diseño del experimento, respecto al Par de Referencia (Anchor Pair) hicimos pruebas con diferentes pares, siempre acromáticos, pero con distintas diferencias de color. Siguiendo el trabajo de Montag (Montag et al., 1999) probamos un par con una diferencia de color de 1.2 unidades en L^* ($L^*=48.55$ y $L^*=49.72$). Sin embargo estimamos que esa diferencia de color es demasiado pequeña, resultando más difícil la tarea para el observador. Conforme a trabajos previos en nuestro laboratorio (Melgosa et

al., Aceptado) optamos por utilizar un Par de Referencia con una diferencia de color mayor entre los estímulos, cuyas coordenadas también se muestran en la Tabla 3.3.I.

		L*	a*	b*	x ₁₀	y ₁₀	Y ₁₀ (cd/m ²)
Par de Referencia	Muestra 1	47.69	0.232	0.129			
	Muestra 2	49.33	0.045	0.056			
Campo Circundante		99.43			0.284	0.304	126.90
Fondo		50.96			0.284	0.303	24.78

Tabla 3.3.I. Coordenadas de color del Par de Referencia, Campo Circundante y Fondo.

El Par de Prueba está formado por dos estímulos con las coordenadas de color que se han elegido, en la pantalla de configuración, para cada centro. El observador puede aumentar o disminuir una de las coordenadas (L*, C*_{ab} o h_{ab}) de uno de los estímulos que constituyen el Par de Prueba; y su tarea consiste en hacer que la diferencia de color de este par (que por tanto será una diferencia de color exclusivamente en L*, C*_{ab} o h_{ab}) sea igual o ligeramente mayor que la diferencia de color observada en el Par de Referencia (que será constante).

El programa puede manejarse con el teclado y también mediante un ratón. En este último caso uno de los botones del ratón aumenta la diferencia, otro la disminuye y el botón central acepta la diferencia de color seleccionada. Hemos utilizado un ratón inalámbrico para hacer más fácil la tarea a los observadores.

Distribuimos el conjunto de todas las observaciones en sesiones, cada una de las cuales constaba de cinco igualaciones como la comentada en el párrafo anterior, siendo aleatorias las combinaciones de centros, variaciones en claridad, croma o tono, aumento o disminución de los mismos y tipo de textura. En el Apartado 3.6 comentaremos más ampliamente cómo se ha diseñado el conjunto de sesiones que ha pasado cada observador. Cada una de las sesiones de observación estaba precedida por un tiempo de adaptación a la oscuridad de 2 minutos. Otros 2 minutos de adaptación al Fondo y Campo Circundante antecedían a cada una de las cinco observaciones que constituyen cada sesión.

Cada una de estas sesiones, previamente preparadas, se guardó en un fichero de forma que los observadores sólo tenían que abrir el fichero correspondiente y comenzar

la observación, sin tener que preocuparse de seleccionar ni configurar nada más. Los observadores han realizado normalmente de 3 a 6 sesiones de este tipo al día, lo que corresponde a 30 igualaciones diarias como máximo.

El experimento se llevó a cabo en una habitación oscura, con el monitor y el observador en los bordes opuestos de un cajón pintado de negro mate, como se muestra en la Figura 3.3.9, para evitar luces parásitas.

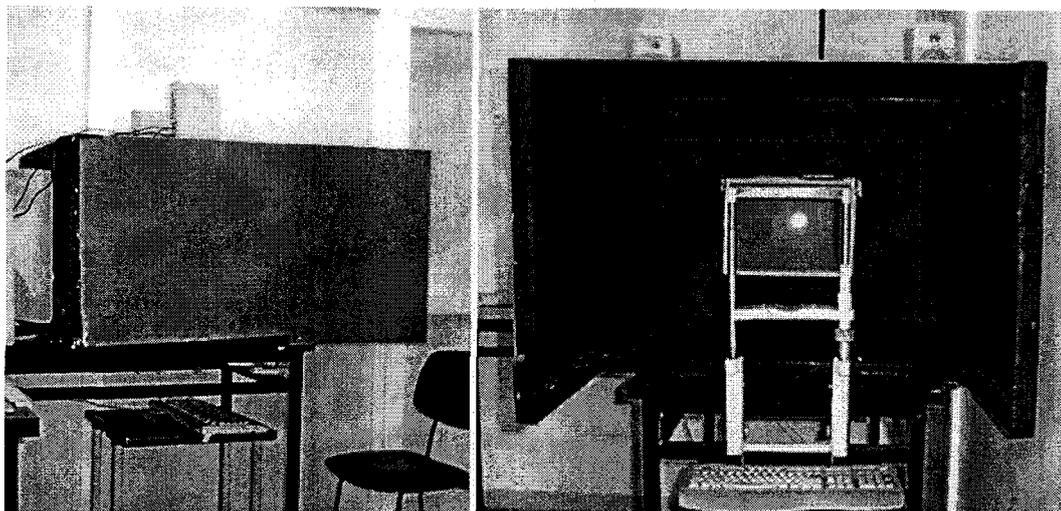


Figura 3.3.9. Fotografías del dispositivo experimental.

3.4 Textura

El estudio de la textura constituye una de las materias de mayor interés en la presente Memoria. Según se ha discutido en la revisión bibliográfica realizada es uno de los aspectos menos estudiado y peor definido en el estudio del color.

En principio podemos considerar que la textura real de una muestra está íntimamente ligada a la estructura tridimensional de la misma. En la vigésima primera edición del diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española (Edición Electrónica, Espase Calpe SA versión 21.1.0), la definición de la palabra *textura* es la siguiente:

Del latín "textûra".

1. (sustantivo femenino). Disposición y orden de los hilos en una tela.

2. *Operación de tejer.*
3. *(figurado). Estructura, disposición de las partes de un cuerpo, de una obra, etc.*
4. *(Biología). Disposición que tienen entre sí las partículas de un cuerpo.*

La etimología de la palabra es latina y como observamos está estrechamente enraizada con el sustantivo “*textil*”. Por tanto la textura hace referencia a las distintas estructuras tridimensionales de las muestras textiles, y por extensión al efecto visual de estas estructuras, que se consiguen con diferentes disposiciones de las fibras que constituyen la muestra. Actualmente su significado se ha ampliado más allá de los textiles.

En la presente Memoria hemos utilizado monitores CRT para presentar los test deseados. Por lo tanto al tratar de obtener muestras texturadas han de ser con texturas “planas” (en 2 dimensiones), que hemos denominado “texturas simuladas”, utilizando un concepto muy usado en el argot informático.

El hecho de ser texturas simuladas no ha de considerarse un inconveniente o una limitación de la presente Memoria. Pensamos que estas texturas cumplen su cometido de dar la sensación de texturas reales, y analizaremos sus efectos en los umbrales de discriminación cromática. Además, aunque es la tridimensionalidad una de las características más comunes de las texturas, no siempre ocurre así o al menos no siempre esta tridimensionalidad es tan evidente. Piénsese en un trozo de mineral veteado, por ejemplo mármol, o madera veteada o el caso de cualquier textura (una muestra textil por ejemplo) vista a una distancia considerable.

Tampoco podemos olvidar el auge de los dispositivos CRT y otras pantallas en nuestra sociedad. En este marco, el estudio de la simulación de texturas y sus efectos sobre la visión constituye un tema de estudio interesante por sí mismo. Como ejemplos podemos pensar en visión artificial, en coloreado y texturado de diferentes partes de una imagen para ayudar a su reconocimiento: imágenes por satélite (Grossberg et al., 1999), imágenes en medicina (Bloyet et al., 1999) (Gibbs et al., 2003) (Jirak et al., 2002), diseño asistido por ordenador, etc., o en el ordenador como un medio de entretenimiento o publicidad.

Teniendo en mente nuestros objetivos en la presente Memoria de Doctorado, comentados en el Capítulo 1, hemos pensado en la necesidad de tener una textura

“controlada” por ciertos parámetros que nos permitan obtener distintos “grados de textura” sobre las muestras. Para intentar obtener estos parámetros o variables de la textura nos planteamos analizar cualquier tipo de textura, de las que observamos en una muestra, al nivel más básico. A este nivel, más aún en muestras representadas en dispositivos CRT, consideramos una muestra formada por diferentes puntos (llamados píxeles en un monitor). Así en cualquier tipo de muestra texturada podremos considerar una base o fondo y una textura formada por zonas diferenciadas del fondo y con diferentes disposiciones espaciales. En esta situación, entre los parámetros más básicos se tendrá la superficie que ocupa la textura sobre el fondo, pudiendo considerar el tanto por ciento de superficie ocupada por la textura. Otro de estos parámetros básicos que controlan la textura será la superficie de cada una de estas zonas, y así hablamos del grosor de la textura (tamaño de los puntos que forman la textura). Por último podemos considerar también la forma (regular o irregular) en que se disponen estas zonas o puntos que conforman la textura. Otros autores han realizado estas mismas consideraciones al intentar clasificar una imagen mediante la segmentación de la misma por textura y color (Cheng et al., 2003) (Echigo et al., 2000) (Khotanzad et al., 2003) (Turiel et al., 2000).

En un primer momento consideramos un abanico muy amplio de posibilidades, que luego se fue reduciendo para tener un número razonable de observaciones. En la presente Memoria hemos estudiado exclusivamente texturas formadas por puntos espacialmente distribuidos de forma aleatoria. En cuanto al color de los puntos que forman la textura hemos considerado tres casos muy distintos:

- a) Que los puntos de la textura sean puntos negros, independientemente del color del fondo. En este caso hablamos de **textura absoluta**, que hemos designado como textura tipo *F*. En la parte superior de la Figura 3.4.1 podemos observar texturas absolutas sobre diferentes muestras, con distinto grosor y superficie.
- b) Que la textura esté formada por puntos que varían en uno de los atributos de color sobre el fondo, manteniéndose la diferencia cuando varía el color del fondo. En este caso la hemos llamado **textura relativa**. Después de efectuar varias sesiones de prueba decidimos considerar variaciones de ± 10 unidades en claridad (L^*) y de ± 15 unidades en croma (C^*_{ab}). No hemos tenido en cuenta texturas formadas por puntos con una diferencia de color de tono por

considerarlas menos reales. En la parte inferior de la Figura 3.4.1 podemos observar texturas relativas con distintos grosores y superficies sobre muestras de los diferentes centros que hemos estudiado. Hemos designado estas texturas relativas de la siguiente forma: tipo *B* para las texturas con +10 unidades en L^* ; tipo *C* para texturas con -10 unidades en L^* ; tipo *D* para texturas con +15 unidades en C^*_{ab} ; y tipo *E* para las texturas con -15 unidades en C^*_{ab} .

- c) Por supuesto otro caso de indudable interés y referencia en este estudio lo constituyen las muestras homogéneas o sin textura, que hemos llamado textura tipo *A*.

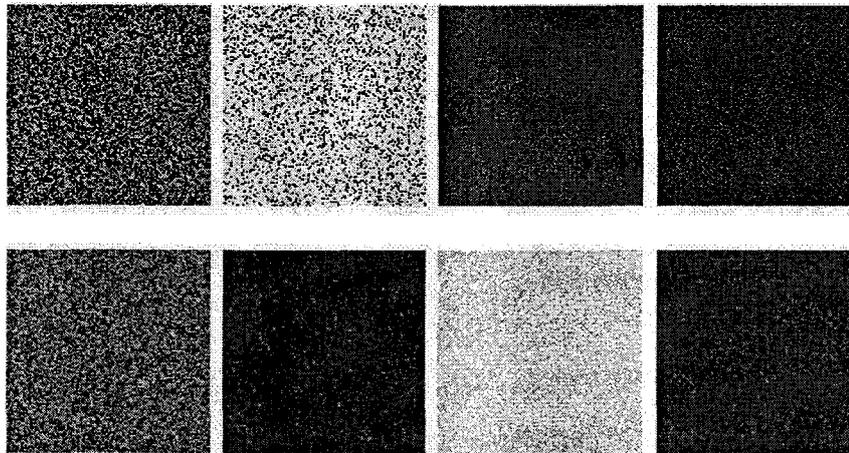


Figura 3.4.1. Tipos de texturas absolutas (fila superior) y relativas (fila inferior).

En cuanto al tamaño o grosor de los puntos que forman la textura hemos considerado dos tamaños: 1 píxel y 4 píxeles (formando un cuadrado), con independencia de que la distribución aleatoria de los mismos pueda agruparlos en zonas de mayor tamaño. Hemos designado estos tamaños como grosor *1* y *4* directamente. Los puntos que forman la textura pueden ocupar diferente tanto por cierto de la superficie de la muestra variando el número de puntos. En nuestro estudio hemos considerado los casos de 5%, 20% y 50%. Para las texturas absolutas también hemos tenido en cuenta el caso de 80% de la superficie de la muestra ocupada por la textura. Para las texturas relativas no tiene sentido considerar texturas con superficie de más del 50% pues, en ese caso, tendríamos una simple inversión de los conceptos fondo y textura.

En la Tabla 3.4.I mostramos una sinopsis de las texturas que hemos considerado en esta Memoria de Doctorado.

Variable	Nomenclatura	Descripción
Tipo	A	Muestra homogénea
	B	Puntos con +10 unidades en L*
	C	Puntos con -10 unidades en L*
	D	Puntos con +15 unidades en C*
	E	Puntos con -15 unidades en C*
	F	Puntos negros
Superficie	0%	Muestra homogénea
	5%	Puntos ocupan 5% superficie
	20%	Puntos ocupan 20% superficie
	50%	Puntos ocupan 50% superficie
	80%	Puntos ocupan 80% superficie
Grosor	0	Muestra homogénea
	1	Puntos con tamaño 1 píxel
	4	Puntos con tamaño 4 píxeles

Tabla 3.4.I. Sinopsis de las texturas utilizadas.

Por tanto cada comparación habría de hacerse con 48 texturas diferentes (6 tipos de textura, 4 superficies y 2 tamaños). Sin embargo esto no es así. La textura A (homogénea) no tiene diferentes superficies ni grosores y le corresponden obviamente grosor 0 y superficie de textura del 0%. Las texturas relativas (B, C, D y E) no pueden ocupar el 80% de la superficie. Esto hace un total de 33 texturas diferentes para cada comparación, como podemos observar en el cuadrante de la Tabla 3.6.I del Apartado 3.6.

En el programa se selecciona la textura de los estímulos en el módulo de configuración, Figura 3.3.5. Pulsando el botón “Definir” textura en el cuadro de “Muestras” aparece la pantalla de la Figura 3.4.3, donde podemos configurar cada uno de los parámetros comentados. La textura podrá aparecer sólo en los estímulos que forman el Par de Prueba o también en los del Par de Referencia. En nuestro caso sólo hemos considerado texturas de puntos aleatorios en los estímulo del Par de Prueba, manteniendo el Par de Referencia siempre homogéneo.

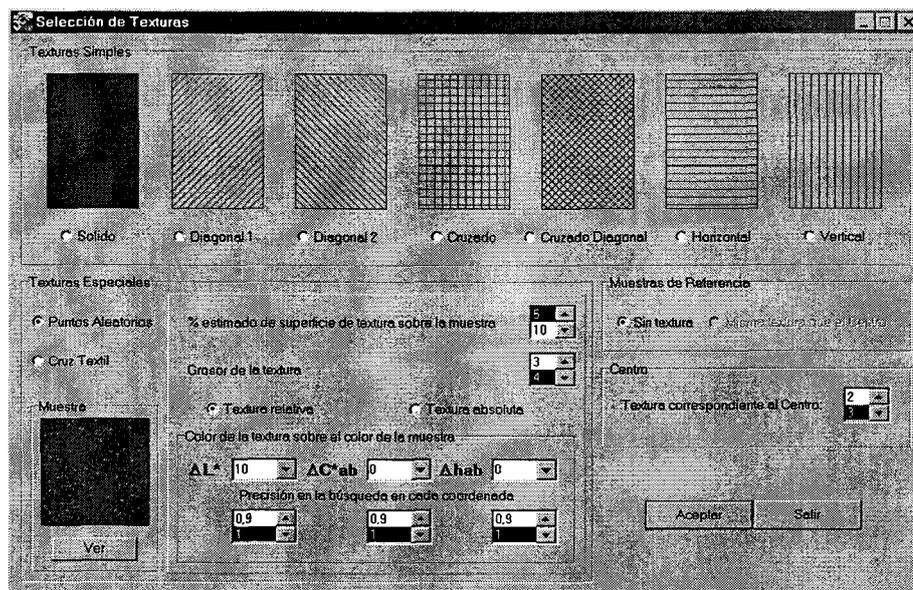


Figura 3.4.3. Pantalla de selección de la textura.

3.5 Selección de los Centros

Para nuestra Memoria hemos utilizado el Método de Estímulos Constantes con Par de Referencia (Método de Comparación de Pares), según hemos comentado. En cada comparación, el Par de Prueba está formado por uno de los 5 centros CIE recomendados para el estudio de diferencias de color (Robertson, 1978), y el estímulo con el que lo comparamos. Las coordenadas de estos centros se muestran en la Tabla 3.5.I. En las columnas de la izquierda se tienen las coordenadas definidas por la CIE (Robertson, 1978) para estos centros recomendados. En las columnas de la derecha se tienen las coordenadas más próximas obtenidas en nuestro monitor a partir del calibrado.

Centro	Coordenadas					Coord. encontradas		
	L^*	a^*	b^*	C_{ab}^*	h_{ab}	L^*	C_{ab}^*	h_{ab}
1 Grey	62	0	0	0	0	62	0.18	341.92
2 Red	44	37	23	43.57	31.87	43.78	43.61	31.68
3 Yellow	87	-7	47	47.52	98.47	86.95	47.29	98.48
4 Green	56	-32	0	32	180	56.85	30.04	179.82
5 Blue	36	5	-31	31.40	279.16	35.89	31.46	279.17

Tabla 3.5.I. Coordenadas de color de los 5 centros estudiados.

El otro estímulo del Par de Prueba estará formado por un estímulo seleccionado por el observador de entre los 40 estímulos previamente buscados con diferencias de color crecientes (de sólo claridad, croma o tono) respecto al centro. La tarea del observador consiste precisamente en hacer que la diferencia de color en el Par de Prueba, modificable por el mismo observador, sea igual o ligeramente superior a la diferencia de color preestablecida en el Par de Referencia.

Por tanto en principio tendríamos 30 comparaciones (5 centros con variaciones aumentando o disminuyendo L^* , C^*_{ab} o h_{ab} en el otro estímulo del par) para cada tipo de textura. Sin embargo este número se reduce debido a diferentes causas. Para el centro 1, que es acromático, no podemos estudiar diferencias de color disminuyendo el croma ni texturas formadas por puntos con croma 15 unidades por debajo del centro. Tampoco tiene sentido estudiar diferencias de color en tono en un acromático. Por tanto para este centro sólo hemos estudiado diferencias de color en claridad y texturas tipo A, B, C y F. Para el centro 4 no hemos podido encontrar, debido a las limitaciones comentadas de los dispositivos CRT, estímulos con diferencias de color en claridad por debajo, en croma por encima y en ángulo de tono por encima respecto al centro. Quedan entonces un total de 23 comparaciones para cada textura, como se observa en la Tabla 3.6.I, en la que se indica en verde las comparaciones que se han realizado y en rojo aquellas que no se han podido efectuar.

En los resultados tendremos en cuenta si la diferencia de color del Par de Prueba es por aumento o disminución, respecto al centro CIE, de la coordenada CIELAB que estemos variando. Le llamaremos sentido ascendente y descendente respectivamente.

3.6 Observadores y Sesiones

Las sesiones han sido realizadas por un conjunto de 5 observadores, 3 mujeres y 2 hombres, con sus correspondientes correcciones optométricas, con visión normal del color, y con experiencia en tareas de discriminación cromática. Nos referiremos a los observadores por sus iniciales: AY, MJR, MM, MP y RH.

Según los cálculos realizados en los apartados anteriores cada observador habría

de realizar 759 (23 comparaciones con 33 texturas) comparaciones. Debido a los problemas comentados sobre la búsqueda de determinados estímulos, o de ciertas texturas relativas, no ha sido posible encontrar los estímulos para todos estos casos considerados. En la Tabla 3.6.I se tiene un cuadrante de los estímulos que ha sido posible reproducir en nuestro dispositivo en verde y en rojo aquellos que no ha sido posible.

		A	B			C			D			E			F			
		0	5%	20%	50%	5%	20%	50%	5%	20%	50%	5%	20%	50%	5%	20%	50%	80%
		0	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
1	L* Up																	
	L* Down																	
	C* Up																	
	C* Down																	
	h Up																	
	h Down																	
2	L* Up																	
	L* Down																	
	C* Up																	
	C* Down																	
	h Up																	
	h Down																	
3	L* Up																	
	L* Down																	
	C* Up																	
	C* Down																	
	h Up																	
	h Down																	
4	L* Up																	
	L* Down																	
	C* Up																	
	C* Down																	
	h Up																	
	h Down																	
5	L* Up																	
	L* Down																	
	C* Up																	
	C* Down																	
	h Up																	
	h Down																	

Tabla 3.6.I. Cuadrante de las comparaciones que se han realizado (en verde).

Por tanto en total se tienen 645 comparaciones por cada observador. Con el fin de minimizar los errores aleatorios cada comparación se ha realizado dos veces no consecutivas. De algunos comparaciones específicas se han realizado 3 repeticiones. Concretamente las comparaciones de muestras sin textura, que serán los resultados a comparar con el resto, y las comparaciones de las muestras con textura C y F con 50% de superficie y grosor 1, como representativas de textura relativa y absoluta. Hemos escogido 50% de superficie y grosor 1 porque corresponden a las texturas relativas más

intensas que hemos utilizado. Para las texturas absolutas es aún más fuerte el caso de 80% de superficie, pero hemos escogido 50% para poder comparar resultados. Además de éstas, dependiendo de cada observador, se han realizado 3 repeticiones de algunas otras comparaciones. Por tanto el número total de comparaciones es distinto para cada observador, como observamos en la Tabla 3.6.II. También aparece en la tabla el número total de comparaciones que constituyen el conjunto de datos experimentales de la presente Memoria de Doctorado.

No todos los resultados obtenidos han sido aceptados. Como hemos comentado, nos interesa obtener tolerancias visuales basadas en la diferencia de una sola coordenada CIELAB: L*, C* ó h. Es decir, que la diferencia de color en el Par de Prueba se deba exclusivamente a una diferencia de claridad, croma o tono entre las muestras del par. Según hemos explicado, es imposible obtener en nuestro dispositivo estímulos con dos de los parámetros CIELAB completamente constantes y el tercero variando. Por tanto una vez realizadas las comparaciones, hemos eliminado aquellas en las que la diferencia de color parcial ΔL^* , ΔC^* o ΔH^* no es al menos el 75% de la diferencia de color total CIELAB (ΔE_{ab}^*).

También hemos excluido las primeras sesiones que hizo cada observador, tomándolas como sesiones de aprendizaje. Por otro lado, se han repetido algunas comparaciones que tenían valores absurdos (desbrozado de los datos). En consecuencia, el número de comparaciones aceptadas es inferior al total de comparaciones realizadas. También presentamos en la Tabla 3.6.II los valores de las comparaciones aceptadas.

Observador	Número total	Número aceptadas
AY	1516	1468
MJR	1521	1482
MM	1533	1497
MP	1543	1393
RH	1958	1866
Suma	8071	7706

Tabla 3.6.II. Número de comparaciones realizadas y aceptadas.

De las 7706 tolerancias aceptadas, 3122 corresponden a la primera repetición, 3123 a la segunda y 1446 a la tercera. En total las experiencias se han desarrollado durante un tiempo de 6 meses aproximadamente.

3.7 Dispositivo Experimental de Medida del Color

Además de las observaciones realizadas para cuantificar el efecto de las texturas simuladas en los umbrales de discriminación cromática, hemos estudiado cómo afectan estas texturas simuladas a la medida del color de las muestras y al error que afecta a estas medidas, así como a la propagación de estos errores. En este apartado comentaremos la instrumentación y métodos utilizados para realizar esas medidas de color, así como para el calibrado del monitor, medida del blanco de referencia, etc.

Espectrorradiómetro

El instrumento empleado para realizar las medidas de color ha sido un espectrorradiómetro SpectraScan modelo PR-704 de Photo Research (<http://www.photoresearch.com>), con su correspondiente software. Este instrumento, figuras 3.7.1 y 3.7.2, consta de un cabezal óptico con un espejo de apertura tipo Pritchard que dirige la radiación óptica incidente hacia una red de difracción ó hacia el ocular. A continuación de la red de difracción se halla una matriz lineal de fotodiodos detectores con 256 elementos, enfriados termoeléctricamente a 0° C en una cámara sellada para eliminar cualquier posible contaminación y el efecto de las fluctuaciones térmicas.

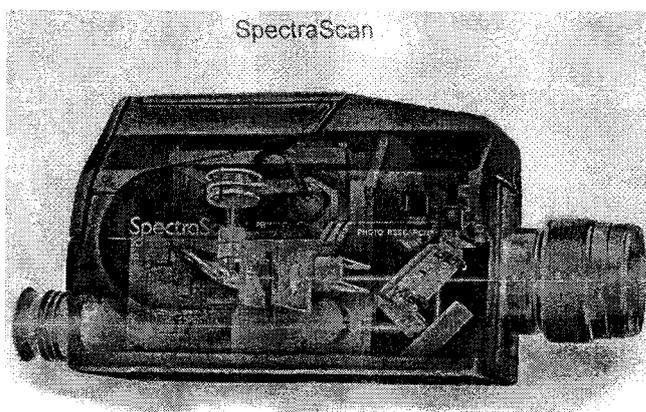


Figura 3.7.1. Espectrorradiómetro PR-704 de Photo Research (<http://www.photoresearch.com>).

El rango espectral de nuestro instrumento es de 380-780 nm con una resolución estimada de 2 nm. Antes de realizar una medida cada detector se carga eléctricamente, disminuyendo dicha carga al incidir radiación sobre el detector y generándose una señal

analógica que se transmite a la tarjeta controladora instalada en un ordenador. Un convertidor analógico digital de 12 bits transforma la señal analógica y proporciona los datos que permiten realizar la medida deseada. En principio, la medida básica facilitada por el espectrorradiómetro es la radiancia espectral de la muestra situada en el campo de observación, si bien el software del instrumento permite obtener otras muchas magnitudes derivadas de ella. Así, por ejemplo, podemos medir los valores triestímulo de la muestra para un determinado Observador Patrón, las coordenadas de cromaticidad CIE, la longitud de onda dominante y pureza colorimétrica de la muestra relativa a un determinado estímulo acromático, las coordenadas CIELUV y CIELAB de la muestra para un determinado blanco de referencia, la reflectancia/transmitancia de la muestra, diferencias de color, etc. Según el fabricante, la exactitud del espectrorradiómetro PR-704 es de ± 0.003 en las coordenadas de cromaticidad CIE y $\pm 4\%$ en la luminancia, para una fuente patrón con temperatura de color de 2856 K.

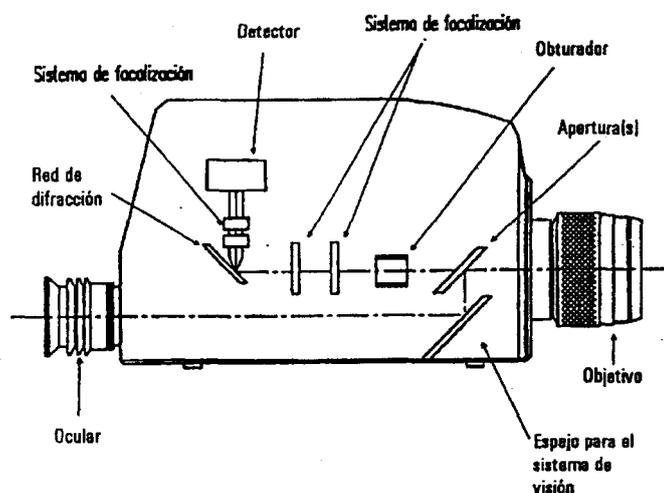


Figura 3.7.2. Esquema del espectrorradiómetro PR-704 de Photo Research (Moraghi, 1999).

Al medir el color, para calcular las coordenadas en cualquiera de los sistemas CIELAB y CIELUV el blanco de referencia ha de medirse bajo las mismas condiciones que la muestra correspondiente. En nuestro caso el blanco de referencia es un estímulo con los valores DAC máximos de los tres cañones del monitor, es decir el blanco de máxima luminancia que puede obtenerse con el monitor. Este blanco de referencia es el estímulo del campo circundante de la pantalla de comparaciones experimentales (cfr. Figura 3.3.6).

Por tanto, al tratarse de una medida experimental más, la medida del blanco de referencia es una nueva fuente de error que afectará a las coordenadas finales (Huertas, 2001), que en nuestro caso son las coordenadas de color CIELAB. En todo caso conviene también recordar que, como en nuestro caso, cuando no se trata de objetos de color, la elección del blanco de referencia, imprescindible para aplicar las transformaciones CIELUV y CIELAB, no deja de ser a veces una cuestión un tanto arbitraria. Este punto ha sido puesto de manifiesto por Carter et al. (Carter et al., 1983) en relación a la obtención de las coordenadas CIELUV en monitores de color, y surge también de forma inmediata al intentar pasar resultados clásicos de la colorimetría, correspondientes a luces de color, a coordenadas CIELUV y CIELAB. Por ejemplo, las elipses de MacAdam (MacAdam, 1942) han sido transformadas a CIELAB por varios autores (Melgosa et al., 1992; Kuehni, 2000) usando como blanco de referencia un iluminante. Podríamos decir que, cuando no se trabaja con objetos de color, es imprescindible indicar expresamente el acromático de referencia usado para las transformaciones a los sistemas CIELUV y CIELAB.

Para las medidas de color de los estímulos generados se han dispuesto según observamos en el ejemplo de la Figura 3.7.3, donde el estímulo subtende un ángulo de 6.2° , pues tienen el mismo tamaño (que se selecciona en la pantalla de configuración, Figura 3.3.5) que los estímulos de Par de Prueba o Par de Referencia.

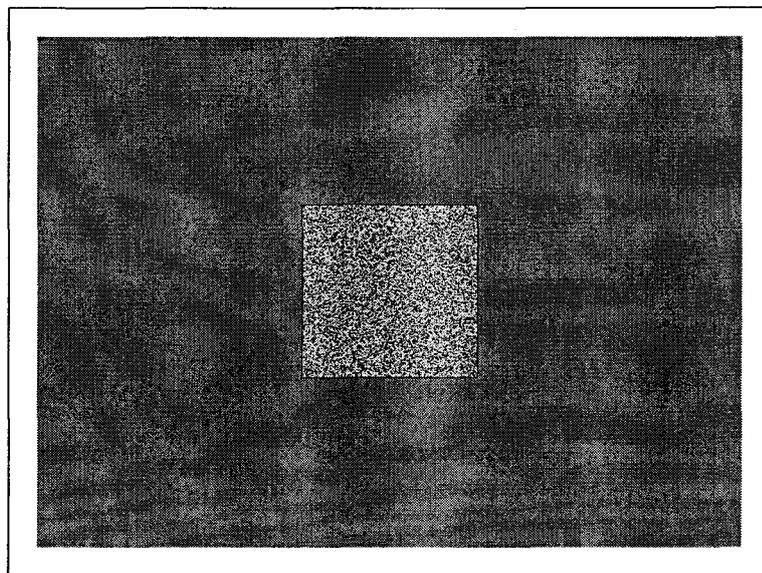


Figura 3.7.3. Pantalla para la medida de color de un estímulo.

Para la medida del blanco de referencia y el calibrado del monitor se ha utilizado la configuración mostrada en la Figura 3.3.3, donde el tamaño del estímulo está fijado a 200 píxeles. En nuestro caso los estímulos subtenden un ángulo de 5.2° , pues el tamaño de la pantalla es de 360x270 mm, con una resolución de 1024x768 píxeles y el espectrorradiómetro fue colocado a 770 mm de la pantalla.

En las medidas, realizadas mediante el espectrorradiómetro indicado, empleamos un campo de medida de 1° y consideramos el Observador Patrón CIE 1964, como corresponde al caso de que el ángulo subtendido por la muestra sea superior a 4° . El espectrorradiómetro se sitúa sobre un trípode apropiado, según el esquema de la Figura 3.7.4, y se enfoca a la superficie de la pantalla (situada a 77 cm del espectrorradiómetro) en el centro de la muestra a medir, situada a su vez en el centro de la pantalla. La dirección de medida es de 0° respecto a la normal a la muestra. Seguidamente, sin mover el espectrorradiómetro, se va procediendo a la medida de las distintas muestras ó del blanco de referencia.

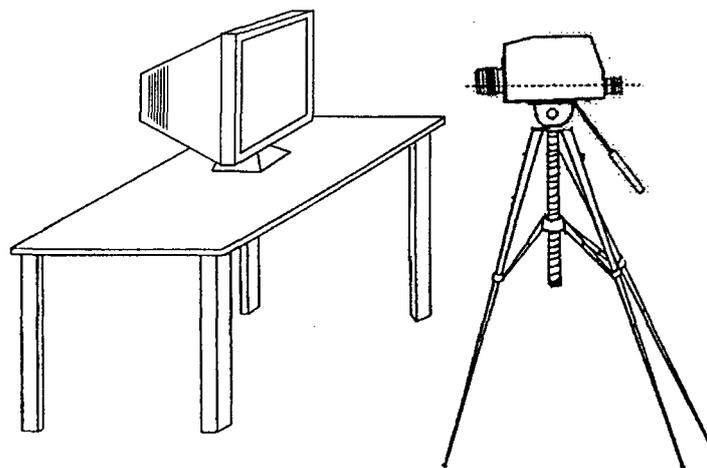


Figura 3.7.4. Esquema del dispositivo de medida del color.

Hemos realizado tres medidas, tanto para las muestras como para el blanco de referencia, que designaremos como medidas de “*variación temporal corta*”, por ser realizadas una inmediatamente después de la otra. Puede decirse que es el procedimiento usual en el laboratorio para cuantificar los errores aleatorios inherentes a una medida, cuya influencia en las coordenadas CIELAB queremos evaluar. En el caso de muestras

con textura también hemos realizado tres medidas en distintas posiciones, que designaremos como “variación espacial”. Tendremos por tanto errores provenientes de variaciones temporales cortas y otros, que esperamos serán mayores, de variaciones espaciales en las medidas.

En las medidas realizadas hemos utilizado los valores triestímulo, tanto para el calibrado del monitor como para el cálculo de errores. Por tanto, para realizar la propagación de errores a los parámetros de color en el sistema CIELAB hemos elegido como punto de partida los valores triestímulo X, Y, Z (X_0 , Y_0 , Z_0 , en el caso del blanco de referencia), que serán las medidas directas. Tomamos los valores triestímulo con todas las cifras significativas que da nuestro espectrorradiómetro y, cómo las medidas han de seguir una distribución normal, consideraremos la media aritmética de las 3 medidas realizadas como el valor de la magnitud (valor triestímulo) y la desviación estándar de las 3 medidas como la cota de error correspondiente. Los valores de los errores están redondeados a la primera cifra significativa (las dos primeras si la primera es un 1); los valores medios están redondeados al mismo número de cifras significativas que sus cotas de error.

Aunque las medidas directas que tomamos son los valores triestímulo, es también preciso registrar los datos de radiancia espectral, pues son necesarios para evaluar los coeficientes de correlación entre los valores triestímulo, según el procedimiento propuesto por Gardner (Gardner et al., 1999) (Huertas, 2001), que utilizaremos en la propagación de errores.

Por tanto, el número total de medidas instrumentales es de 3228 (645×5 más 3 del blanco de referencia). Aparte se han hecho las 255 (para los valores DAC de cada cañón entre 0 y 255 tomadas de 3 en 3) medidas para el calibrado del monitor.

3.8 Procedimientos de Cálculo y Software Utilizado.

En este apartado describimos el cálculo de algunos parámetros que utilizaremos en el Capítulo 4, así como los programas informáticos que básicamente hemos utilizado para el desarrollo de esta Memoria.

Cálculo del factor PF/3 (Performance Factor)

Al estudiar diferencias de color con frecuencia es necesario comparar las diferencias entre dos conjuntos de datos (X_i, Y_i) correspondientes a N pares de muestras ($i=1\dots N$). Estos dos conjuntos de datos pueden ser las diferencias visuales percibidas por dos sujetos diferentes, o por un mismo sujeto utilizando dos procedimientos distintos, o las diferencias calculadas mediante dos fórmulas de diferencia de color cualesquiera. Es también frecuente realizar comparaciones entre las diferencias de color percibidas ($Y_i=\Delta V_i$), como datos de referencia, y las calculadas mediante una cierta fórmula de diferencia de color ($X_i=\Delta E_i$), a fin de valorar la bondad de dicha fórmula en relación a determinados datos experimentales. En todas estas situaciones es posible realizar la comparación empleando diferentes herramientas estadísticas: coeficientes de correlación, coeficientes de variación, desviación estándar, etc. Sin embargo, en el caso de diferencias de color, se ha difundido recientemente el uso de un parámetro denominado PF/3 (Performance Factor), propuesto por Luo, Rigg y Guan (Luo et al., 1987b; Guan et al., 1999).

El factor PF/3 es el promedio de 3 parámetros que cuantifican la relación entre los dos conjuntos de datos, que designaremos como X_i e Y_i . Estos 3 parámetros son: CV, γ , propuestos por Coates et al. (Coates et al., 1981), y V_{AB} propuesto por Schultze (Schultze, 1972). CV y V_{AB} vienen a ser dos coeficientes de variación en los que se usa un factor de ajuste (designado como f y F , respectivamente en CV y V_{AB}) a fin de poner en una misma escala los dos conjuntos de datos. Por su parte γ es el antilogaritmo decimal de la desviación típica de los cocientes de los logaritmos decimales de la razón (X_i/Y_i). Concretamente las ecuaciones para el cálculo de PF/3 son las siguientes:

$$PF/3 = \frac{100 \left[(\gamma - 1) + V_{AB} + \frac{CV}{100} \right]}{3} \quad (4)$$

donde el coeficiente CV es:

$$CV = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_i - fY_i)^2}}{\bar{X}} \quad (5)$$

$$f = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum Y_i^2} \quad (6)$$

el coeficiente V_{AB} es:

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{(X_i - FY_i)^2}{X_i FY_i}} \quad (7)$$

$$F = \sqrt{\frac{\sum \frac{X_i}{Y_i}}{\sum \frac{Y_i}{X_i}}} \quad (8)$$

Por último el factor γ está definido de la siguiente forma:

$$\log_{10}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left[\log_{10} \left(\frac{X_i}{Y_i} \right) - \log_{10} \left(\frac{X_i}{Y_i} \right) \right]^2} \quad (9)$$

Para un perfecto acuerdo entre los dos conjuntos de datos X_i e Y_i el factor PF/3 debería valer 0 (lo que se obtiene cuando $\gamma=1$, $CV=0$ y $V_{AB}=0$). Cuanto mayor es el valor de PF/3 peor es la relación o acuerdo entre X_i e Y_i . Por ejemplo un $PF/3=30$ indica un discordancia del 30% entre los dos conjuntos de datos.

El factor PF/3 ha sido ampliamente utilizado en numerosos trabajos recientes de diferentes autores (Melgosa et al., 1996) (Kim et al., 2001; Xin et al., 2001) (Luo et al., 2001). En trabajos más antiguos (Luo et al., 1987b; Luo et al., 1987a) se consideraba también apropiado añadir el coeficiente de correlación lineal r , lo que llevó a definir un promedio adecuado de 4 factores (denominado a veces PF/4): r , CV , γ , V_{AB} . En trabajos más recientes (Guan et al., 1999) se detectó que en varios experimentos el coeficiente r resultaba inconsistente con los tres restantes, por lo que actualmente se prefiere el uso del factor PF/3.

En la presente Memoria hemos elaborado un programa informático que permite el cálculo del factor PF/3 para dos conjuntos de datos X_i e Y_i cualquiera. En la Figura 3.8.1 observamos el aspecto de este programa.

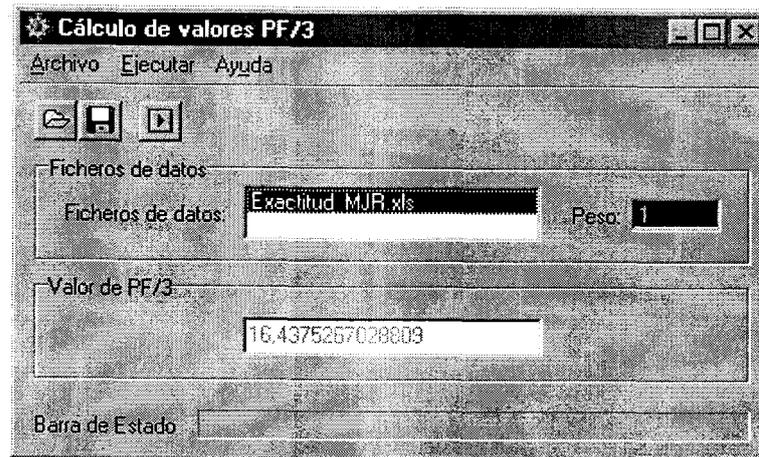


Figura 3.8.1. Software para el cálculo del factor PF/3.

Hemos calculado el factor PF/3 para diferentes propósitos. Por un lado para calcular la repetibilidad o precisión de cada uno de los observadores en sus comparaciones y también para calcular la exactitud de las comparaciones de los observadores. Por otro lado hemos utilizado el factor PF/3 para analizar la conformidad de diversas fórmulas de diferencia de color (ΔE) con nuestros resultados de tolerancias visuales (ΔV) como valores de referencia.

Además de lo comentado, hemos utilizado el factor PF/3 en el estudio de la influencia de la textura sobre las tolerancias visuales, que es uno de los objetivos principales de esta Memoria. En esta tarea se enmarca la optimización de los coeficientes paramétricos de las fórmulas de diferencia de color CIE94 y CIEDE2000 para el caso de muestras con textura. Para optimizar los coeficientes paramétricos comparamos la tolerancia (calculada con CIE94 o CIEDE2000) para un mismo par de muestras cuando presentan textura y cuando son homogéneas (coeficientes paramétricos unidad). Para la comparación utilizamos dos procedimientos: el factor PF/3 para lograr la mejor relación posible entre diferencias de color percibidas y calculadas; o bien la diferencia promedio entre las dos tolerancias.

Para calcular los valores de los coeficientes paramétricos que minimizan el factor PF/3, o el promedio de las diferencias, hemos desarrollado otro programa informático, cuyo aspecto observamos en la Figura 3.8.2. Este programa busca el mínimo valor de PF/3 mediante cálculo numérico siguiendo el Método Simplex Modificado (MSM) (Nelder et al., 1965; Nelder, 1979).

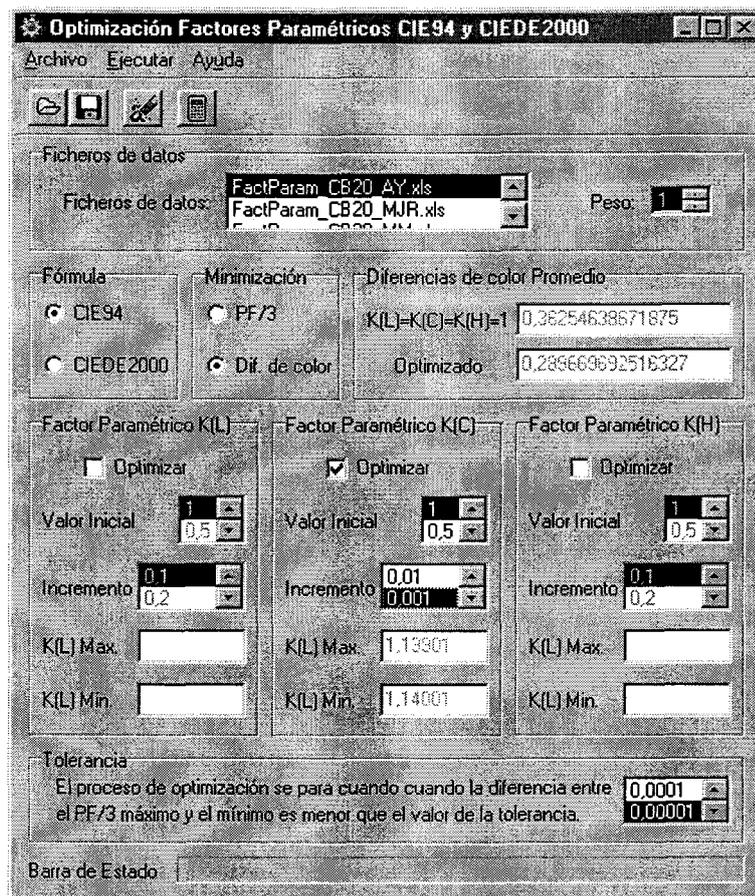


Figura 3.8.2. Programa informático para minimizar los coeficientes paramétricos.

Cálculo de los errores

Para la especificación del color, tanto en el cálculo de los errores como en las observaciones, utilizamos el sistema de especificación del color CIELAB, actualmente recomendado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) (CIE, 1986).

En el Capítulo 2 y el Apéndice 1 tenemos la definición de los parámetros CIELAB en función de los valores triestímulo: ecuaciones (A1) a (A3) y (1) a (3) respectivamente. Como podemos ver, en el cálculo de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , interviene un estímulo blanco de referencia (X_0 , Y_0 , Z_0), que desempeña el papel de un factor de normalización sobre los valores triestímulo del color considerado, a fin de valorar los efectos de la adaptación cromática. En la propagación de errores es importante tener en cuenta el error en las coordenadas del blanco de referencia, como ya señalamos en estudios previos (Huertas, 2001).

La teoría de propagación cuadrática es la usada para los errores aleatorios, como es nuestro caso, mientras que para propagar errores sistemáticos se emplea la propagación lineal (Robertson, 1967; Bevington et al., 1992). Por tanto propagamos los errores desde los valores triestímulo hasta las coordenadas CIELAB mediante la teoría de propagación cuadrática de errores. Con esta teoría, la desviación estándar (el error aleatorio) de una magnitud derivada (que hemos llamado V), que es función de medidas directas independientes (llamadas α y β), se calcula mediante la expresión general:

$$\sigma^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma^2(\alpha) + \left(\frac{\partial V}{\partial \beta}\right)^2 \sigma^2(\beta) \quad (10)$$

donde: ∂ denota la derivada parcial,

σ es la desviación estándar de una variable, que en nuestro caso asimilamos al error asociado a esa variable.

Cuando las magnitudes medidas directamente no son independientes sino que hay entre ellas alguna correlación, como es nuestro caso, la expresión anterior se modifica en la forma siguiente:

$$\sigma^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma^2(\alpha) + \left(\frac{\partial V}{\partial \beta}\right)^2 \sigma^2(\beta) + 2r_{\alpha\beta} \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha}\right) \left(\frac{\partial V}{\partial \beta}\right) \sigma(\alpha)\sigma(\beta) \quad (11)$$

donde: $r_{\alpha\beta}$ es el coeficiente de correlación entre las variables α y β .

Como observamos, esta expresión es más general e incluye a la Ecuación (10), pues en el caso de que las variables sean independientes el coeficiente de correlación entre ellas tendrá el valor cero.

Hemos calculado los errores en las coordenadas CIELAB en función de los errores en los valores triestímulo aplicando la Ecuación (11) a las Ecuaciones (1) a (3). Las expresiones obtenidas vienen también detalladas en el Apéndice 1 de esta Memoria y corresponden a los errores de las coordenadas de color CIELAB en función de los errores en los valores triestímulo de la muestra y del blanco.

Para calcular los errores hemos evaluado las ecuaciones (A4) a (A8) partiendo de nuestras medidas directas de los valores triestímulo. También utilizamos los datos de

radiancia espectral para calcular los coeficientes de correlación entre los valores triestímulo (Gardner et al., 1999) (Huertas, 2001).

Respecto a las ecuaciones del Apéndice 1 conviene señalar que si los datos de partida fueran otros (por ejemplo x, y, z), no sólo las expresiones de las magnitudes derivadas (a^* , b^* por ejemplo) sino también el valor numérico de los errores serían distintos.

Software utilizado

Como hemos explicado en este Capítulo, con el programa DCTR 2.1 hemos obtenido los resultados experimentales de la presente Memoria de Doctorado. También hemos desarrollado algunos otros programas para distintos cálculos de resultados. Todos estos programas los hemos realizado bajo el lenguaje C++ mediante el programa Borland C++ Builder™ Profesional versión 4.0.

Además del programa DCTR 2.1 y el resto de programas que hemos desarrollado para cálculos específicos, en la realización global del presente trabajo de Memoria de Doctorado hemos manejado un número elevado de programas comerciales. Los más utilizados son los que detallamos a continuación.

Para el tratamiento de los datos obtenidos, bien como resultado de las comparaciones realizadas por los observadores mediante el programa DCTR, o bien de las medidas realizadas con el espectrorradiómetro, se ha utilizado el programa Microsoft® Excel 2000. Con este programa también hemos calculado las medias aritméticas y la desviación estándar en los casos que ha sido necesario. Como herramienta de cálculo en la propagación de los errores hemos utilizado la versión 4.0.0.0 de Mathematica® de Wolfram Research.

La mayoría de las gráficas de resultados las hemos realizado mediante el programa Origin® 7.0 aunque también hemos utilizado Microsoft® Excel 2000 y Surfer® 5.01.

El tratamiento estadístico de los datos se ha realizado mediante el programa SPSS 9.0.1 con ayuda de la bibliografía (Lara Porras, 2000; Pérez, 2001) así como de Dr. Pedro Antonio García López, profesor titular del Departamento de Estadística e Investigación

Operativa de la Universidad de Granada.

Para la redacción de la presente Memoria de Doctorado hemos utilizado el programa Microsoft® Word 2000. También hemos utilizado el Diccionario de la Lengua Española Versión Electrónica 21.1.0, EndNote® 6.0.2, Acrobat 5.0.

Todos estos programas han sido utilizados en un PC compatible IBM bajo el sistema operativo Microsoft® Windows 98 Segunda Edición.





CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este Capítulo abordamos el análisis de los resultados obtenidos. Para ello estructuramos el Capítulo en 7 Apartados. En el Apartado 4.1 realizaremos un análisis estadístico inicial de las tolerancias visuales obtenidas; explicaremos el modelo estadístico que vamos a utilizar y validaremos las hipótesis de ese modelo. Los resultados obtenidos serán analizados en los Apartados del resto del Capítulo.

En el Apartado 4.2 estudiaremos ampliamente la influencia de los observadores sobre los resultados. En primer lugar nos plantearemos si los observadores han mostrado algún aprendizaje durante la realización de las sesiones experimentales. También analizaremos las diferencias entre las distintas observaciones de un mismo sujeto, a través del cálculo de la variabilidad intra-observador y de la exactitud individual de cada observador. Las diferencias entre los resultados de todos los observadores las estudiaremos por medio de la variabilidad inter-observador y de la exactitud de los resultados. Por último analizaremos las diferencias entre las tolerancias visuales de los observadores.

Dependiendo del centro que consideremos las tolerancias visuales son diferentes. En el Apartado 4.3 estudiamos la influencia de los centros sobre las tolerancias. Estudiaremos las interacciones entre los centros y los factores tipo, superficie o grosor de la textura, y coordenada. Como veremos, algunas de estas interacciones son importantes.

Observaremos que especialmente manifiestas son las diferencias entre las tolerancias en claridad, croma y tono, en unidades CIELAB. En el Apartado 4.4 analizaremos estas diferencias y las interacciones entre el factor coordenada y el resto de

los factores. También presentaremos las correcciones CIE94 y CIEDE2000 a la fórmula de diferencias de color CIELAB, y sus consecuencias en el cálculo de las tolerancias. Analizaremos estadísticamente las tolerancias en unidades CIE94, y las estudiaremos respecto a los observadores, los centros, las coordenadas y las interacciones entre estos factores y el resto.

En el Apartado 4.5 estudiamos la influencia de la textura sobre las tolerancias, analizando las tolerancias según el tipo, la superficie y el grosor de la textura. Descubriremos qué texturas, de las consideradas, tienen efectos significativos sobre las tolerancias.

En el Apartado 4.6, una vez analizados cada uno de los factores, estudiaremos los coeficientes paramétricos de CIE94 y CIEDE2000, y calcularemos sus valores para las texturas que consideramos influyen sobre las tolerancias.

Por último, en el Apartado 4.7 analizaremos las medidas instrumentales de las muestras con texturas, el error de estas medidas y la propagación de los errores desde los valores triestímulo hasta las coordenadas de CIELAB.

4.1. Análisis Estadístico Inicial

Como resultado de las observaciones realizadas obtenemos, por cada comparación, un Par de Prueba distinto, seleccionado por el observador. Cada Par de Prueba está formado por el centro estudiado en cada caso, y otra muestra, que ha sido aceptada por el observador y difiere del centro sólo en L^* , C^* o h . Para los primeros análisis de este capítulo calcularemos la tolerancia visual (ΔV), correspondiente a cada comparación, como la diferencia de color, en unidades CIELAB, entre las dos muestras del Par de Prueba correspondiente. La tolerancia visual calculada tiene que corresponder con la diferencia de color del Par de Referencia.

De esta forma obtenemos la tolerancia visual (ΔV) de cada observador para cada combinación de las variables consideradas: centro, coordenada CIELAB en las tolerancias, los dos sentidos de la diferencia de color de las tolerancias y los distintos tipos de textura, según hemos explicado en el Capítulo 3. Estas combinaciones hacen un total de

645 casos que corresponden a los mostrados en la Tabla 3.6.I. También hemos comentado en el Capítulo “Método Experimental” que cada observador ha realizado 2 ó 3 repeticiones de cada comparación. Por tanto, cada una de las dos primeras repeticiones se componen del total de las 645 tolerancias para cada observador, salvo las comparaciones que hemos eliminado por no tener más del 75% de la diferencia total de color CIELAB en ΔL^* , ΔC^* o ΔH^* . La tercera replicación sólo se ha realizado para algunos de los casos y dependiendo de cada observador, según hemos explicado en el capítulo anterior.

En los Apartados siguientes de este capítulo de “Resultados y Discusión” realizaremos un análisis detallado de la influencia de cada una de las variables sobre las tolerancias. Antes, en este Apartado, vamos a analizar desde un punto de vista estadístico el conjunto de todas las tolerancias, para obtener algunos resultados preliminares.

En nuestro análisis estadístico la variable respuesta o dependiente es la tolerancia visual resultado de cada comparación experimental. Las variables independientes o factores serán cada una de las variables que hemos considerado pueden influir en la variable respuesta, que son: *observador*, *centro* CIE, *coordenada* CIELAB (L^* , C^* o h) fundamental de la diferencia de color en la tolerancia visual, el *sentido* ascendente o descendente de la coordenada fundamental de la diferencia de color respecto al centro, el *tipo* de textura, la *superficie* de la textura y el *grosor* de la textura. Los niveles de cada factor son cada uno de los valores que puede tomar cada variable independiente, comentados en el Capítulo 3.

Para analizar el conjunto de todas las tolerancias visuales obtenidas por los observadores, que son nuestra población estadística, vamos a utilizar un modelo estadístico que se adecúe a las características particulares de nuestro experimento y a los resultados que queremos estudiar. Este modelo es un modelo factorial univariante, con replicación, de efectos fijos y no equilibrado o balanceado (diferente número de observaciones para cada nivel).

Validación del modelo

Antes de aplicar el modelo estadístico al conjunto de tolerancias visuales vamos a probar que se cumplen las hipótesis necesarias para emplearlo. Estas hipótesis para la

validación de un modelo estadístico son: la *normalidad*, la *independencia* y la *homocedasticidad* o igualdad de varianzas. Es importante que la variable respuesta cumpla estas condiciones, e incluso más importante que las cumplan los residuos de la variable respuesta.

Comenzaremos estudiando la normalidad de la variable respuesta, mediante la representación, en la figura siguiente, del histograma del conjunto de todas las tolerancias visuales. El histograma muestra que los datos siguen una distribución normal sólo aproximadamente. Como probaremos más adelante, es suficiente para aplicar nuestro modelo estadístico.

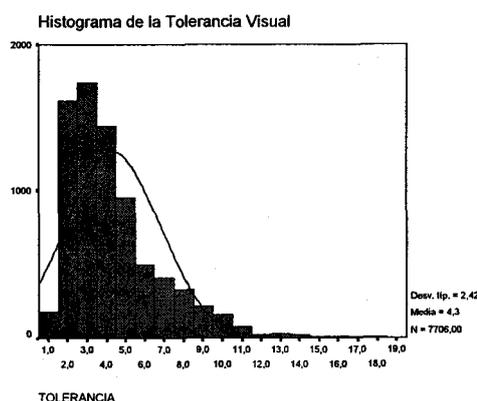


Figura 4.1.1. Histograma de las tolerancias visuales.

El gráfico probabilístico normal P-P de la variable respuesta también muestra este comportamiento aproximado a la distribución normal, al disponerse los puntos cercanos a la línea diagonal, como observamos en la Figura 4.1.2.

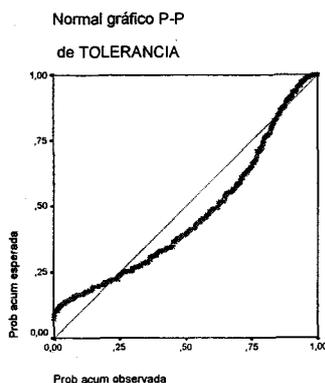


Figura 4.1.2. Gráfico P-P de las tolerancias visuales.

En este punto es interesante estudiar la distribución de las tolerancias, que observamos en el histograma de la Figura 4.1.1. El análisis de la distribución de las tolerancias visuales puede ayudarnos a entender mejor los resultados experimentales obtenidos. Como hemos comentado, las tolerancias visuales no se distribuyen de forma completamente normal. Según la forma del histograma de la Figura 4.1.1 pensamos que el logaritmo neperiano de las tolerancias visuales puede seguir una distribución normal, tal como se muestra en el histograma de la Figura 4.1.3. Este resultado explica la respuesta de los observadores ante la comparación visual de diferencias de color (Par de Prueba) con otra diferencia constante (Par de Referencia). La mayoría de las tolerancias están en torno a 3 unidades CIELAB (la diferencia en el Par de Referencia es de 1.66 unidades CIELAB), como observamos en la Figura 4.1.1. Respecto de ese máximo, el número de tolerancias con diferencias de color mayores o menores no es simétrico sino con una tendencia exponencial creciente hacia diferencias mayores. Por otro lado, es curioso que el valor medio de las tolerancias sea de 3 unidades CIELAB siendo la diferencia del Par de Referencia de 1.66 unidades CIELAB. Más adelante volveremos sobre este asunto y sus posibles causas.

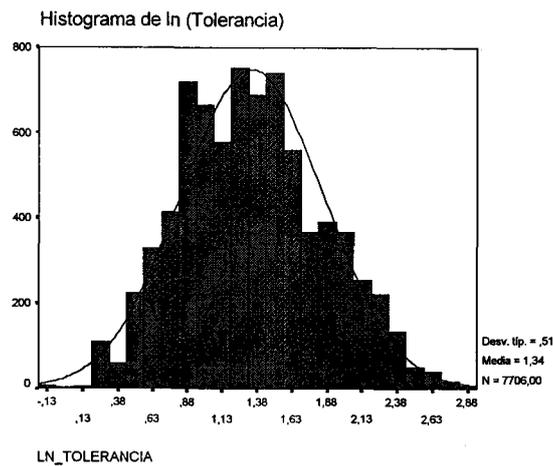


Figura 4.1.3. Histograma del logaritmo neperiano de las tolerancias visuales.

Una vez analizada la normalidad estudiamos la homocedasticidad de las tolerancias visuales, respecto a los factores, mediante la prueba de Levene. El resultado de la prueba es que no existe homocedasticidad para el modelo, con un p-valor de 0.000. Realizando la prueba de Levene a cada uno de los factores separadamente obtenemos los

resultados de la Tabla 4.1.I.

Factor	Valor de Significación
Observador	0.000
Centro	0.000
Coordenada	0.000
Sentido	0.183
Tipo	0.000
Superficie	0.000
Grosor	0.000

Tabla 4.1.I. Valores de significación del test de Levene para la tolerancia visual.

La igualdad de varianzas sólo se tiene para el sentido, y no hay igualdad de varianzas respecto a ninguno de los demás factores. También veremos más adelante que no es importante la homocedasticidad de las tolerancias para los factores que no la cumplen.

Para la validación del modelo es más importante probar que las hipótesis son cumplidas por los residuos de la variable respuesta que por la propia variable respuesta. Analizando los residuos obtenemos que se distribuyen normalmente, como muestra la Figura 4.1.4, con el histograma a la izquierda y el gráfico P-P a la derecha. Este resultado, junto con el elevado número de observaciones del que disponemos en cada nivel de los factores, hace que no sea importante que la variable respuesta no siga estrictamente una distribución normal (cfr. Figuras 4.1.1 y 4.1.2).

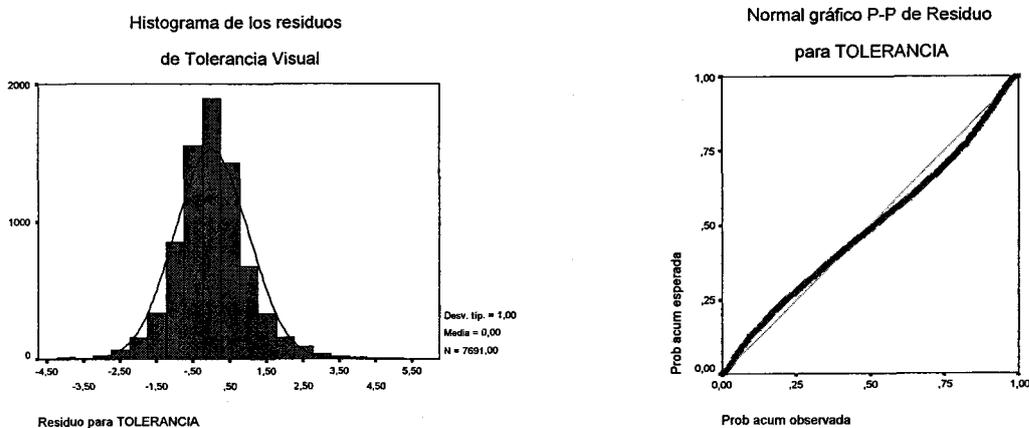
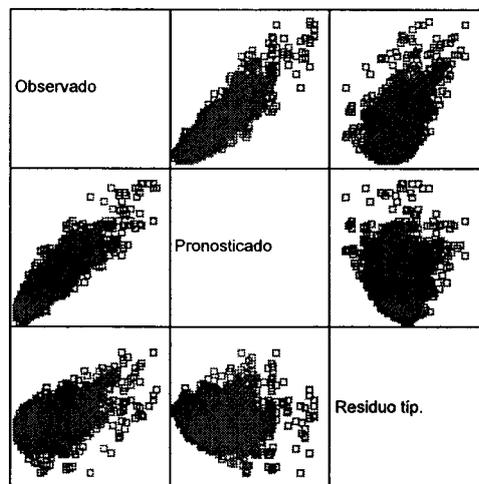


Figura 4.1.4. Histograma de los residuos a la izquierda y gráfico P-P de los mismos a la derecha.

También para los residuos vamos a probar la independencia y la homocedasticidad. De las 3 hipótesis, la independencia es la más importante y la más difícil de solventar en caso de violación. En la Figura 4.1.5 mostramos el gráfico para los residuos. De esta matriz 3x3 nos interesa sobre todo la última fila. En el gráfico de la izquierda de esta fila se tiene que los residuos son independientes, pues observamos suficiente aleatoriedad en la distribución. En el gráfico del centro de la última fila se puede observar que la homocedasticidad, o igualdad de varianzas, para los residuos es buena, ya que aproximadamente la dispersión es parecida en todos los niveles del gráfico.

Variable dependiente:
TOLERANCIA



Modelo: Intersección +OBSERVADOR+CENTRO+COORDENADA+
SENTIDO+TIPO+SUPERFICIE+GROSOR+Interacciones de orden 2

Figura 4.1.5. Gráfico de los residuos de la tolerancia.

Otra prueba de la independencia de los residuos son los gráficos de dispersión de los residuos por factores. En la Figura 4.1.6 observamos que la dispersión es similar en todos los niveles de cada factor, lo que confirma la independencia de los residuos.

Se tiene por tanto que los residuos cumplen bastante bien las hipótesis del modelo, lo que valida la utilización, con nuestros resultados, de este modelo paramétrico.

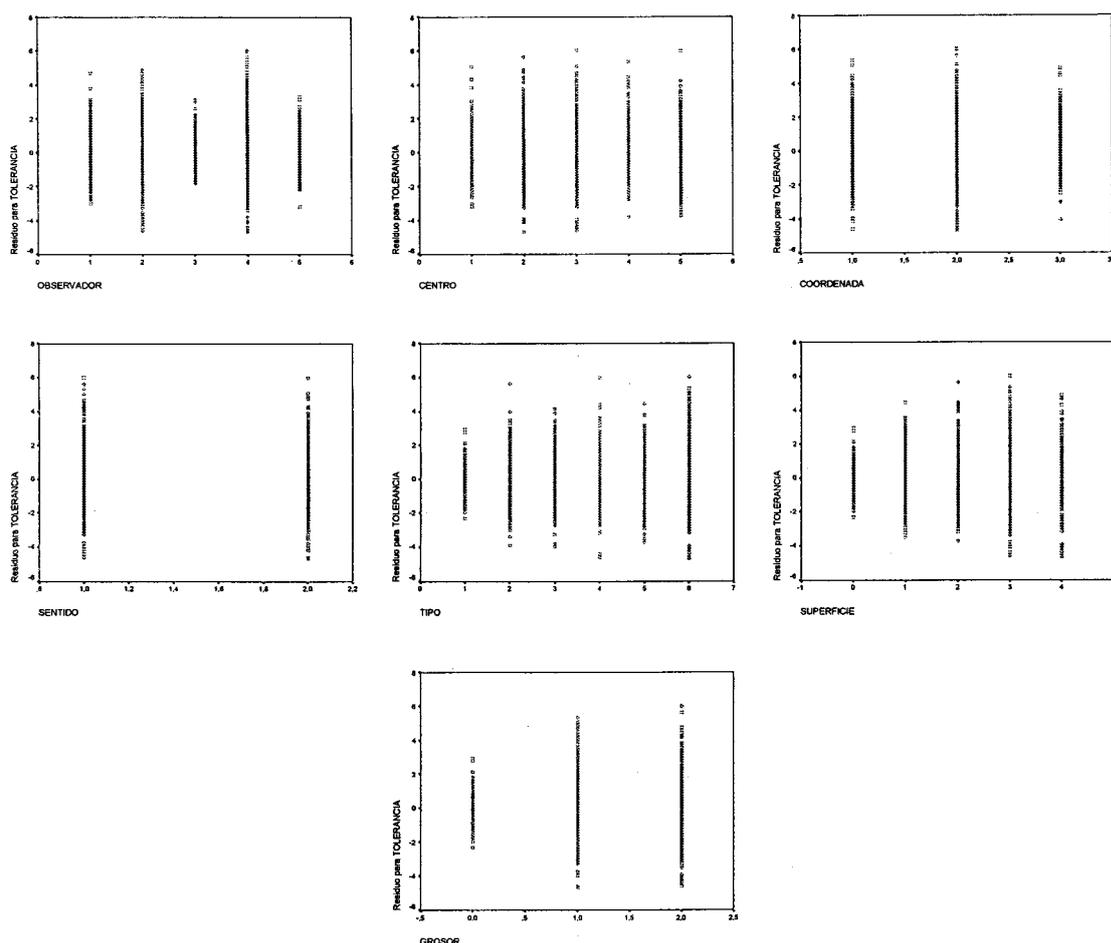


Figura 4.1.6. Dispersión de los residuos de las tolerancias visuales por factores.

En resumen, hemos comprobado que las hipótesis de validación del modelo se cumplen, con la excepción de la igualdad de varianzas en la variable respuesta para casi todos los factores. Aplicaremos el modelo teniendo en cuenta esta infracción.

Resultados iniciales

Según hemos expuesto en el apartado anterior, vamos a analizar las tolerancias visuales obtenidas (variable respuesta) utilizando un modelo factorial con replicación y con los factores que hemos considerado en el diseño del experimento, y que ya hemos enumerado anteriormente. También vamos a considerar las interacciones de orden 2 de todos los factores. Los primeros resultados del análisis se muestran en la Tabla 4.1.II.

Modelo corregido	37527.153	169	222.054	215.771	0.000
Intersección	65094.190	1	65094.190	63252.422	0.000
OBSERVADOR	6280.912	4	1570.228	1525.800	0.000
CENTRO	218.163	4	54.541	52.998	0.000
COORDENADA	2760.020	2	1380.010	1340.964	0.000
SENTIDO	0.158	1	0.158	0.153	0.695
TIPO	868.353	4	217.088	210.946	0.000
SUPERFICIE	1358.327	3	452.776	439.965	0.000
GROSOR	20.266	1	20.266	19.692	0.000
OBSERVADOR * CENTRO	393.705	16	24.607	23.910	0.000
OBSERVADOR * COORDENADA	1545.132	8	193.141	187.677	0.000
OBSERVADOR * SENTIDO	32.903	4	8.226	7.993	0.000
OBSERVADOR * TIPO	566.637	16	35.415	34.413	0.000
OBSERVADOR * SUPERFICIE	526.427	12	43.869	42.628	0.000
OBSERVADOR * GROSOR	9.839	4	2.460	2.390	0.049
CENTRO * COORDENADA	1050.791	5	210.158	204.212	0.000
CENTRO * SENTIDO	145.847	3	48.616	47.240	0.000
CENTRO * TIPO	264.142	12	22.012	21.389	0.000
CENTRO * SUPERFICIE	40.610	12	3.384	3.288	0.000
CENTRO * GROSOR	3.066	4	0.767	0.745	0.561
COORDENADA * SENTIDO	59.413	2	29.707	28.866	0.000
COORDENADA * TIPO	125.072	8	15.634	15.192	0.000
COORDENADA * SUPERFICIE	62.902	6	10.484	10.187	0.000
COORDENADA * GROSOR	3.366	2	1.683	1.635	0.195
SENTIDO * TIPO	5.012	4	1.253	1.218	0.301
SENTIDO * SUPERFICIE	2.196	3	0.732	0.711	0.545
SENTIDO * GROSOR	0.214	1	0.214	0.208	0.649
TIPO * SUPERFICIE	460.323	8	57.540	55.912	0.000
TIPO * GROSOR	5.006	4	1.252	1.216	0.302
SUPERFICIE * GROSOR	19.481	3	6.494	6.310	0.000
Error	7755.431	7536	1.029		
Total	190989.605	7706			
Total corregido	45282.584	7705			

r^2 cuadrado = 0.829 (r^2 cuadrado corregido = 0.825)

Tabla 4.1.II. Tabla ANOVA inicial de las tolerancias visuales.

Como observamos en esta tabla, de los factores directos, el sentido (ascendente o descendente) no muestra diferencias significativas en las tolerancias visuales. En la sección anterior hemos probado que el sentido es el único factor en el que las varianzas son iguales (cfr. Tabla 4.1.I), lo que valida el resultado de diferencias no significativas para el sentido. Cuando se obtienen diferencias significativas, como para el resto de los factores, no es necesario que se cumpla la hipótesis de homocedasticidad. En adelante no vamos a considerar el sentido como un factor en el análisis estadístico, con lo que el número de replicaciones es ahora entre 4 y 6 dependiendo de cada caso (2 ó 3 repeticio-

nes para cada uno de los dos sentidos).

El resto de los factores directos sí dan lugar a diferencias significativas en la variable respuesta y estudiaremos detenidamente su efecto sobre las tolerancias visuales en los Apartados siguientes de este Capítulo.

En el análisis estadístico realizado, y en los que hagamos posteriormente, tenemos en cuenta todas las replicaciones de las tolerancias visuales, aumentando el número de replicaciones cuando no consideramos un factor. Sin embargo para el análisis no estadístico de los resultados (representaciones gráficas, etc.) calculamos el promedio de todas las replicaciones que correspondan a un mismo caso; entendiendo por caso cada combinación única de los factores que sí consideramos. En las tablas del Apéndice 2 se tienen las tolerancias visuales (calculadas en unidades CIELAB y CIE94), promediado el sentido, que son los resultados con los que vamos a trabajar en todo este Capítulo de Resultados y Discusión.

En cuanto a las interacciones entre factores, de todas las interacciones de orden 2, no muestran diferencias significativas en la tolerancia visual las siguientes: centro*grosor, coordenada*grosor y tipo*grosor. Hemos obtenido que el grosor de la textura es un factor significativo de forma global, pero sin diferencias en cada centro, coordenada o tipo de textura. En adelante no consideraremos estas interacciones de orden 2 que no son significativas. La interacción observador*grosor es significativa con un nivel de significación de 0.049; a pesar de estar en el límite de no ser significativa, vamos a considerarla y la estudiaremos ampliamente en el Apartado siguiente.

Tenemos establecido completamente el modelo estadístico, factores e interacciones que vamos a tener en cuenta. En la Tabla 4.1.III indicamos el número de observaciones para cada nivel de los factores que vamos a considerar. Según observamos, el número de casos es suficientemente alto, incluyendo las interacciones de orden 2, para que no sea necesario obligar al cumplimiento estricto de la normalidad de la variable respuesta (cfr. Figuras 4.1.1 y 4.1.2).

OBSERVADOR	AY	1468
	MJR	1482
	MM	1497
	MP	1393
	RH	1866
CENTRO	1 (Gris)	520
	2 (Rojo)	2380
	3 (Amarillo)	1895
	4 (Verde)	1000
	5 (Azul)	1911
COORDENADA	L	2846
	C	2464
	h	2396
TIPO	A (Sin textura)	342
	B (Relativa +10 unidades en L*)	1235
	C (Relativa -10 unidades en L*)	1490
	D (Relativa +15 unidades en C*)	1059
	E (Relativa -15 unidades en C*)	1477
	F (Absoluta)	2103
SUPERFICIE	0%	342
	5%	2268
	20%	2267
	50%	2349
	80%	480
GROSOR	0	342
	1	3781
	4	3583

Tabla 4.1.III. Número de observaciones para cada factor considerado.

En la Tabla 4.1.IV presentamos los resultados del modelo definitivo.

Modelo corregido	37164.189	140	265.458	247.363	0.000
Intersección	71629.301	1	71629.301	66746.649	0.000
OBSERVADOR	6309.787	4	1577.447	1469.919	0.000
CENTRO	299.557	4	74.889	69.784	0.000
COORDENADA	3270.697	2	1635.349	1523.874	0.000
TIPO	887.477	4	221.869	206.745	0.000
SUPERFICIE	1387.562	3	462.521	430.993	0.000
GROSOR	27.713	1	27.713	25.824	0.000
OBSERVADOR * CENTRO	393.580	16	24.599	22.922	0.000
OBSERVADOR * COORDENADA	1590.831	8	198.854	185.299	0.000
OBSERVADOR * TIPO	560.815	16	35.051	32.662	0.000
OBSERVADOR * SUPERFICIE	546.057	12	45.505	42.403	0.000
OBSERVADOR * GROSOR	10.266	4	2.567	2.392	0.048
CENTRO * COORDENADA	1078.768	6	179.795	167.539	0.000
CENTRO * TIPO	242.813	12	20.234	18.855	0.000
CENTRO * SUPERFICIE	41.447	12	3.454	3.218	0.000
COORDENADA * TIPO	135.207	8	16.901	15.749	0.000
COORDENADA * SUPERFICIE	67.770	6	11.295	10.525	0.000
TIPO * SUPERFICIE	461.806	8	57.726	53.791	0.000
SUPERFICIE * GROSOR	23.031	3	7.677	7.154	0.000
Error	8118.395	7565	1.073		
Total	190989.605	7706			
Total corregido	45282.584	7705			

r cuadrado = 0.821 (r cuadrado corregido = 0.817)

Tabla 4.1.IV. Tabla ANOVA de resultados del modelo definitivo.

Observamos que el coeficiente de correlación al cuadrado (r^2) del modelo es alto (próximo a la unidad), lo que demuestra que los factores no controlables o desconocidos y los errores experimentales tienen un efecto pequeño, y que los factores considerados en el modelo explican bien los resultados experimentales obtenidos.

4.2. Análisis de los Observadores

En este apartado estudiaremos distintos aspectos de los resultados relacionados con los observadores que han tomado parte en las sesiones experimentales. Como hemos indicado, las observaciones experimentales han sido realizadas por 5 observadores, que repitieron cada comparación 2 ó 3 veces. Como no vamos a tener en cuenta el sentido ascendente o descendente de la diferencia de color, tenemos entre 4 y 6 (2 ó 3 correspon-

dientes a cada sentido) comparaciones para cada caso.

En primer lugar vamos a investigar si se ha producido aprendizaje por parte de los observadores durante el tiempo en el que se realizaron las sesiones experimentales.

A continuación, una gran parte de este Apartado lo dedicaremos a estudiar, para cada observador, las diferencias entre las tolerancias de cada repetición, para tener una idea de la precisión o repetibilidad de cada observador. También estamos interesados en analizar las diferencias, en las tolerancias, entre los observadores. Abordaremos estos estudios mediante dos análisis matemáticos diferentes:

- Analizaremos la variabilidad calculando la desviación estándar, bien entre las repeticiones de cada comparación (variabilidad intra-observador), o entre las comparaciones realizadas por los observadores (variabilidad inter-observador).
- Utilizaremos el cálculo del factor estadístico PF/3 (Luo et al., 1987b; Guan et al., 1999c) para analizar las diferencias entre las comparaciones de cada observador (precisión individual de cada observador), o entre observadores (precisión de los observadores). Mediante el factor PF/3 es posible también analizar la exactitud, en los resultados de cada observador (exactitud individual) o del conjunto de observadores (exactitud de los observadores). Entendemos la exactitud como la diferencia respecto del valor promedio, que consideramos como valor verdadero.

En este capítulo también estamos interesados en el análisis de las propias tolerancias visuales que ha obtenido cada observador.

Aprendizaje de los observadores

Comenzaremos analizando si se ha producido aprendizaje, por parte de los observadores, a lo largo de la realización de las sesiones experimentales. Esperamos que no haya habido aprendizaje ya que todos los observadores tenían experiencia en este tipo de tareas. También para evitar el aprendizaje, las comparaciones que forman cada sesión experimental fueron elegidas de forma aleatoria del conjunto de todas las posibles. De esta forma en una sesión cualquiera estaban mezcladas comparaciones de diferentes centros, texturas, etc. Además las primeras sesiones las consideramos de prueba, para aprendizaje de los observadores, por lo que las eliminamos y se volvieron a repetir.

Si en los resultados detectáramos que se ha producido aprendizaje nos obligaría a no darle el mismo peso a todos los resultados, siendo más importantes aquellos obtenidos al final del proceso de aprendizaje. Para analizar el posible aprendizaje comparamos las tolerancias visuales en función del momento en que se realizaron las sesiones. La primera repetición se hizo primero, luego la segunda y por último la tercera. Si se ha producido algún aprendizaje habrá diferencias significativas en las tolerancias dependiendo del orden de la repetición. Hemos realizado un nuevo análisis estadístico de las tolerancias, incluyendo ahora un nuevo factor, que hemos llamado *repetición*, cuyos niveles son precisamente el orden de repetición (a, b o c) de cada comparación. En la tabla siguiente se tienen los resultados del análisis estadístico.

Modelo corregido	37235.611	180	206.865	193.446	0.000
Intercept	58838.148	1	58838.148	55021.569	0.000
OBSERVADOR	5949.005	4	1487.251	1390.780	0.000
CENTRO	279.936	4	69.984	65.445	0.000
COORDENADA	3028.062	2	1514.031	1415.822	0.000
TIPO	796.124	4	199.031	186.121	0.000
SUPERFICIE	1135.786	3	378.595	354.037	0.000
GROSOR	22.184	1	22.184	20.745	0.000
REPETICIÓN	1.574	2	0.787	0.736	0.479
OBSERVADOR * REPETICIÓN	29.016	8	3.627	3.392	0.001
OBSERVADOR * CENTRO	384.949	16	24.059	22.499	0.000
OBSERVADOR * COORDENADA	1556.803	8	194.600	181.978	0.000
OBSERVADOR * TIPO	563.358	16	35.210	32.926	0.000
OBSERVADOR * SUPERFICIE	548.933	12	45.744	42.777	0.000
OBSERVADOR * GROSOR	9.636	4	2.409	2.253	0.061
CENTRO * COORDENADA	1073.015	6	178.836	167.235	0.000
CENTRO * TIPO	240.301	12	20.025	18.726	0.000
CENTRO * SUPERFICIE	41.911	12	3.493	3.266	0.000
CENTRO * REPETICIÓN	12.112	8	1.514	1.416	0.184
COORDENADA * TIPO	135.903	8	16.988	15.886	0.000
COORDENADA * SUPERFICIE	66.688	6	11.115	10.394	0.000
COORDENADA * REPETICIÓN	5.498	4	1.375	1.285	0.273
TIPO * SUPERFICIE	451.413	8	56.427	52.767	0.000
TIPO * REPETICIÓN	8.889	8	1.111	1.039	0.404
SUPERFICIE * GROSOR	22.602	3	7.534	7.045	0.000
SUPERFICIE * REPETICIÓN	4.273	6	0.712	0.666	0.677
GROSOR * REPETICIÓN	0.650	2	0.325	0.304	0.738
Error	8046.973	7525	1.069		
Total	190989.605	7706			
Total corregido	45282.584	7705			

r cuadrado = 0.822 (r cuadrado corregido = 0.818)

Tabla 4.2.I. Tabla ANOVA considerando el factor repetición.

Efectivamente podemos considerar que no existe aprendizaje, pues para el factor repetición las diferencias en la tolerancia visual no son significativas, con un alto p-valor de 0.479. Para que este resultado sea aceptado es importante probar que las varianzas de la tolerancia son iguales para el factor repetición. Desafortunadamente cuando realizamos la prueba de Levene para este factor, el resultado es que no existe homocedasticidad con un p-valor de 0.000. Esto nos obliga a realizar pruebas no paramétricas para ratificar o revocar el resultado de la Tabla 4.2.I. En la tabla siguiente mostramos los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica para k muestras independientes).

Chi-cuadrado	76.432
gl	2
Sig. asintót.	0.000
a Prueba de Kruskal-Wallis	
b Variable de agrupación: REPETICIÓN	

Tabla 4.2.II. Prueba de Kruskal-Wallis para las tolerancias visuales en función de la repetición.

Según observamos en la tabla las diferencias son significativas, lo que implicaría que en las tolerancias se refleja aprendizaje de los observadores. Analizamos las causas de este resultado inesperado. Las repeticiones a y b (primera y segunda) están formadas por dos grupos de datos análogos en número y clase, pues incluyen tolerancias para todas las combinaciones de centros, coordenadas y texturas. Sin embargo la tercera repetición (c) está formada sólo por algunas tolerancias: las correspondientes a muestras homogéneas, a muestras con textura tipo C y tipo F ambas con 50% de superficie y grosor 1 y algunas más dependiendo del observador. La prueba de Kruskal-Wallis, en la comparación de grupos sólo tiene en cuenta el factor de agrupación, por lo que al tomarlas de forma global, las tolerancias que se comparan son diferentes en número y tipo. El número de tolerancias es mucho menor para la tercera repetición, como podemos observar en la tabla de rangos siguiente. Por tanto, al comparar las tolerancias de la tercera repetición con las de las repeticiones a y b las diferencias son significativas.

TOLERANCIA	a	3127	3968.77
	b	3128	3951.52
	c	1451	3393.77
	Total	7706	

Tabla 4.2.III. Tabla de rangos para el factor repetición.

Vamos a compara entre sí cada una de las repeticiones. Si la diferencias se deben a la distinta composición del grupo de tolerancias de la tercera repetición, esperamos que no haya diferencias significativas entre las dos primeras y que las haya con la tercera. Si realmente las tolerancias visuales muestran aprendizaje de los observadores, habrá diferencias entre todas las repeticiones. Utilizamos la prueba de Mann-Whitney (prueba no paramétrica para dos muestras independientes) para comparar los grupos dos a dos. En la tabla siguiente mostramos los resultados.

U de Mann-Whitney	4868767.500	1930039.000	1940899.000
W de Wilcoxon	9762524.000	2983465.000	2994325.000
Z	-0.306	-8.138	-7.892
Sig. asintót. (bilateral)	0.760	0.000	0.000
Variable de agrupación: REPETICIÓN			

Tabla 4.2.IV. Prueba de Mann-Whitney para las tolerancias en función de la repetición dos a dos.

Las diferencias son significativas para las comparaciones con el grupo c. En la comparación entre la repetición a y b no hay diferencias significativas, con un alto p-valor.

En resumen, entendemos que no hay aprendizaje y que los resultados de la Tabla 4.2.II se deben efectivamente a la diferente composición del conjunto de tolerancias de la repetición c. En adelante no tendremos en cuenta el factor repetición, por lo que no distinguiremos entre las comparaciones que se han efectuado al principio o al final del proceso de realización de las sesiones experimentales.

Variabilidad intra-observador

Para estudiar las diferencias entre las comparaciones realizadas por un mismo observador, hemos calculado la desviación estándar entre las tolerancias visuales de las distintas réplicas de cada comparación. La variabilidad intra-observador es una medida de la precisión individual de cada observador. En total tenemos para cada observador del orden de 645 desviaciones estándar calculadas, una para cada combinación de centro, coordenada CIELAB, sentido ascendente o descendente, tipo de textura, superficie de la textura y grosor de la misma. Cada uno de los 645 datos es la desviación estándar de dos o tres tolerancias pues, como hemos explicado anteriormente, se han eliminado algunas tolerancias o bien el observador no realizó la tercera repetición de todas las comparaciones.

Con el propósito de tener una idea global de cuál es la variabilidad intra-observador hemos promediado las 645 desviaciones estándar de cada observador. En la tabla siguiente mostramos los valores obtenidos.

AY	0.59
MJR	0.68
MM	0.36
MP	0.88
RH	0.51
Promedio	0.60

Tabla 4.2.V. Promedio de desviaciones estándar por observadores.

Observamos un rango amplio de desviaciones estándar, que nos dan una idea de la precisión en los resultados de cada observador.

Nos interesa conocer la influencia de los distintos factores que estamos considerando, en la variabilidad intra-observador. Para ello realizamos un análisis estadístico de las desviaciones estándar, análogo al realizado para las tolerancias visuales en el Apartado 4.1. Vamos a considerar los mismos factores que probamos, en el Apartado anterior, que obtienen diferencias significativas sobre la tolerancia visual (cfr. Tabla 4.1.IV). En este caso no hemos considerado interacciones entre los factores. El sentido no es significativo sobre las tolerancias y no lo consideramos, aunque hemos verificado

(no mostramos los resultados) que efectivamente tampoco es significativo sobre las desviaciones estándar.

En la figura siguiente exponemos los resultados de la validación del modelo para los residuos de la variable respuesta, que en este caso es la desviación estándar.

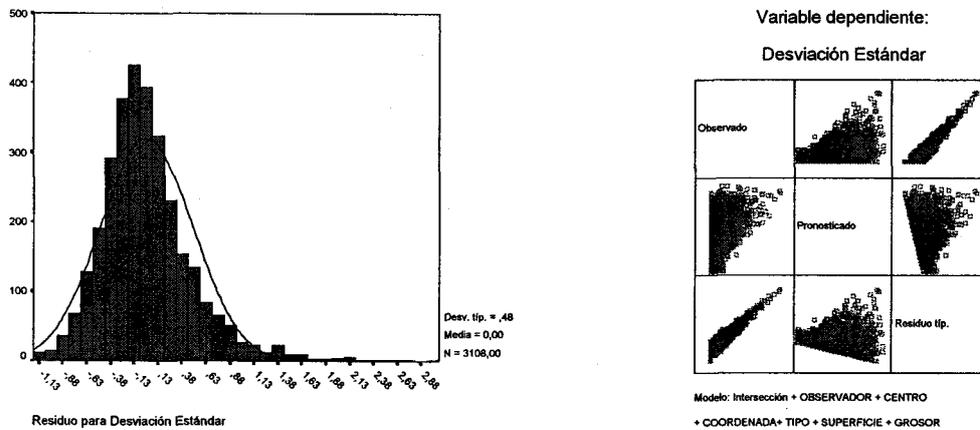


Figura 4.2.1. Gráficas de validación del modelo para los residuos de las desviaciones estándar.

Según observamos en las gráficas no hay problemas con la normalidad, sin embargo no se tiene independencia de los residuos, y en el gráfico para la homocedasticidad los puntos no están igual de dispersos en cada nivel. El problema de la no-independencia de los residuos es difícil de solventar, por lo que aplicaremos el modelo con ciertas reservas. Para la variable respuesta (la desviación estándar), en cuanto a la validación del modelo, se tienen resultados similares a los obtenidos para sus residuos. La tabla ANOVA de resultados del análisis estadístico es la siguiente:

ANOVA					
Modelo corregido	165.779	19	8.725	37.363	0.000
Intersección	403.157	1	403.157	1726.396	0.000
OBSERVADOR	90.552	4	22.638	96.940	0.000
CENTRO	18.705	4	4.676	20.025	0.000
COORDENADA	48.688	2	24.344	104.245	0.000
TIPO	1.932	4	0.483	2.068	0.082
SUPERFICIE	5.196	3	1.732	7.417	0.000
GROSOR	0.317	1	0.317	1.356	0.244
Error	722.294	3093	0.234		
Total	2051.100	3113			
Total corregido	888.072	3112			
r cuadrado = 0.187 (r cuadrado corregido = 0.182)					

Tabla 4.2.VI. Tabla ANOVA para las desviaciones estándar.

Según los resultados, sabiendo que violamos la hipótesis de independencia y de igualdad de varianzas, observamos que no hay diferencias significativas por tipo ni por grosor. Realizado el test de Levene obtenemos que ni el grosor ni el tipo de textura cumplen la condición de homocedasticidad. Entonces para confrontar los resultados obtenidos en la Tabla 4.2.VI hemos realizado pruebas no paramétricas para los factores tipo y grosor. En el caso del grosor hemos realizado la prueba de Mann-Whitney (prueba no paramétrica para dos muestras independientes) y para el tipo de textura la prueba de Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica para k muestras independientes). Los resultados de estas pruebas se muestran conjuntamente en la tabla siguiente:

U de Mann-Whitney	1110084.500	Chi-cuadrado	13.158
W de Wilcoxon	2238837.500	gl	5
Z	-0.598	Sig. asintót.	0.022
Sig. Asintót. (bilateral)	0.550		
Variable de agrupación: GROSOR		a Prueba de Kruskal-Wallis	
		b Variable de agrupación: TIPO	

Tabla 4.2.VII. Tabla de resultados de las pruebas no-paramétricas de la desviación estándar para grosor (izquierda) y tipo (derecha).

En el caso del grosor la prueba no paramétrica corrobora el resultado obtenido anteriormente. Es decir, no hay diferencias significativas en la desviación estándar debidas al grosor. En el caso del tipo de textura obtenemos diferencias significativas

entre los distintos niveles con un p-valor de 0.022. Realizando la prueba de Mann-Whitney para niveles del tipo de textura tomados 2 a 2, hemos observado que sólo las diferencias entre algunos niveles son significativas, con un p-valor no muy bajo. Aunque no parece muy claro que el tipo de textura tenga efecto sobre las desviaciones estándar, en esta Memoria de Doctorado estamos interesados especialmente en estudiar el efecto de la textura, tanto sobre las tolerancias visuales como sobre la repetibilidad de las comparaciones. Consideramos entonces el factor tipo, y en el análisis posterior podremos comprobar el efecto del tipo de textura sobre la desviación estándar.

Respecto del grosor, no vamos a considerar este factor al analizar las desviaciones estándar. Como hemos comentado, tampoco hemos tenido en cuenta el sentido, que daba lugar a diferencias no significativas ya sobre las tolerancias visuales. Hemos promediado las desviaciones estándar correspondientes a sentido ascendente y descendente, y a grosor 1 y 4, reduciendo el número de desviaciones estándar por observador de 645 a 197.

A continuación analizaremos qué pasa con la desviación estándar de los observadores cuando tenemos en cuenta los distintos centros, las distintas coordenadas CIELAB, los distintos tipos de textura y superficies de la misma.

En el diseño del experimento se pensó que para estudiar el efecto de la textura sobre la precisión de las comparaciones, todos los observadores realizarían 3 repeticiones de las comparaciones correspondientes a las muestras homogéneas, y a las muestras con textura tipo C (relativa con +15 unidades en C*) y F (absoluta) con superficie del 50% y grosor 1, como representativas de textura relativa y absoluta. En las Figuras 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4 representamos las desviaciones estándar para estas muestras, promediadas para los 5 centros. Las barras de error indican la desviación estándar del promedio de los 5 centros. Cada figura corresponde a comparaciones con diferencias de color en L*, C* y h. Recordamos que al referirnos a diferencias de color en una coordenada (L*, C* o h) estamos indicando la coordenada en la que se diferencian fundamentalmente las dos muestras del Par de Prueba; que es el significado del factor que hemos denominado "coordenada".

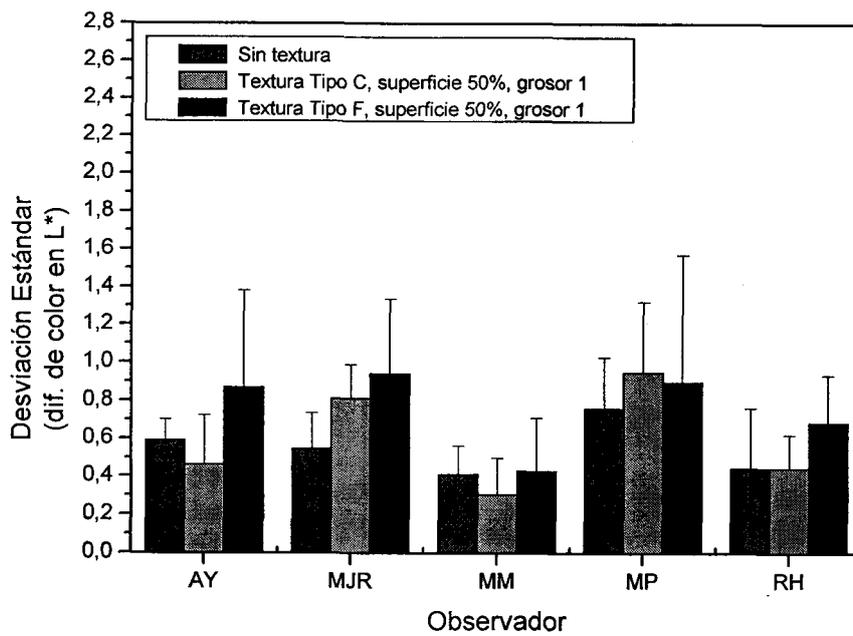


Figura 4.2.2. Desviación estándar con distintos tipos de textura para diferencias de color en L*.

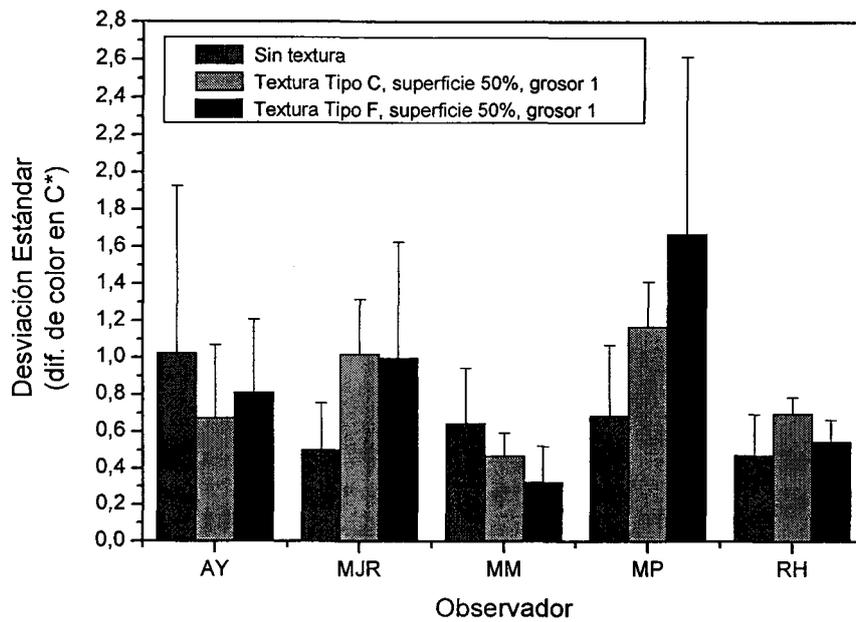


Figura 4.2.3. Desviación estándar con distintos tipos de textura para diferencias de color en C*.

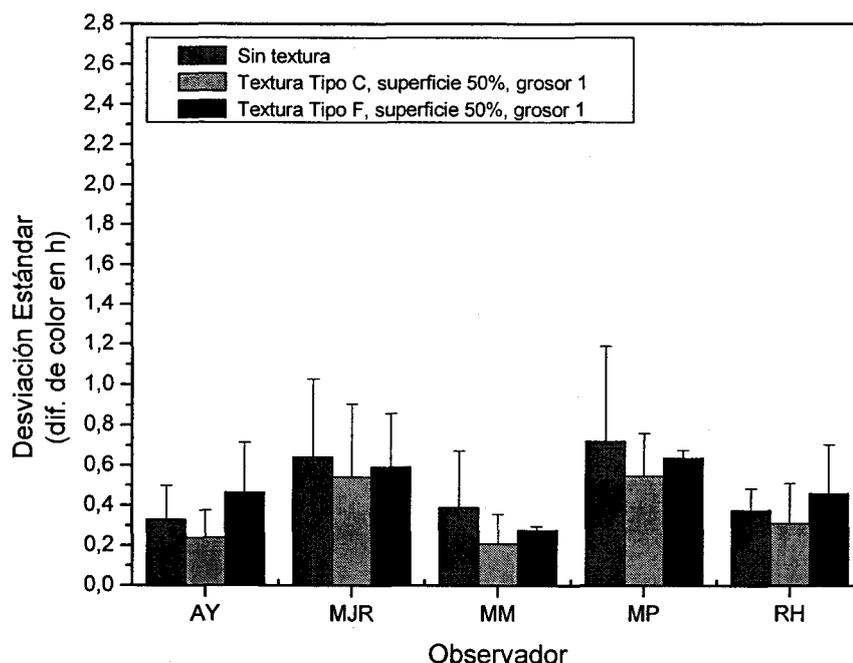


Figura 4.2.4. Desviación estándar con distintos tipos de textura para diferencias de color en h.

En general, se tienen distintas desviaciones estándar para los observadores. Advertimos una tendencia a incrementarse la desviación estándar para muestras con textura, mayor para el caso de textura absoluta (F) y menor para el caso de textura relativa (C). Para las tolerancias en tono las diferencias son más pequeñas que para las tolerancias en claridad o croma. Para el observador MM la textura no tiene efecto sobre la variabilidad o incluso el efecto es el contrario: disminuye la desviación estándar con la textura. Podemos explicarlo considerando que quizás este observador experto ponía más atención en las comparaciones con textura, al ser éstas novedosas, y así reduce la desviación estándar entre las comparaciones con textura. En todos los casos las barras de error (desviación estándar del promedio de los 5 centros) nos indican que la variabilidad entre los distintos centros es muy alta y el análisis realizado no puede extenderse a todos los centros. En conclusión, no se tiene una tendencia clara en estos resultados y la variabilidad cambia de unos casos a otros. Los resultados obtenidos para el resto de los tipos de textura son similares a los mostrados, sin ningún patrón de comportamiento en las desviaciones estándar.

Según hemos comentado, en las Figuras 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4 la variabilidad entre los resultados promediados para los 5 centros es muy alta (barras de error en estas

Figuras). Para observar las diferencias que hay entre los distintos centros para cada uno de los observadores, hemos representado en las Figuras 4.2.5, 4.2.6 y 4.2.7 la desviación estándar para cada uno de los centros. Cada una de ellas corresponde a la desviación estándar cuando la diferencia de color es fundamentalmente en una coordenada CIELAB: L^* , C^* y h respectivamente. Las tres gráficas corresponden a muestras homogéneas (sin textura).

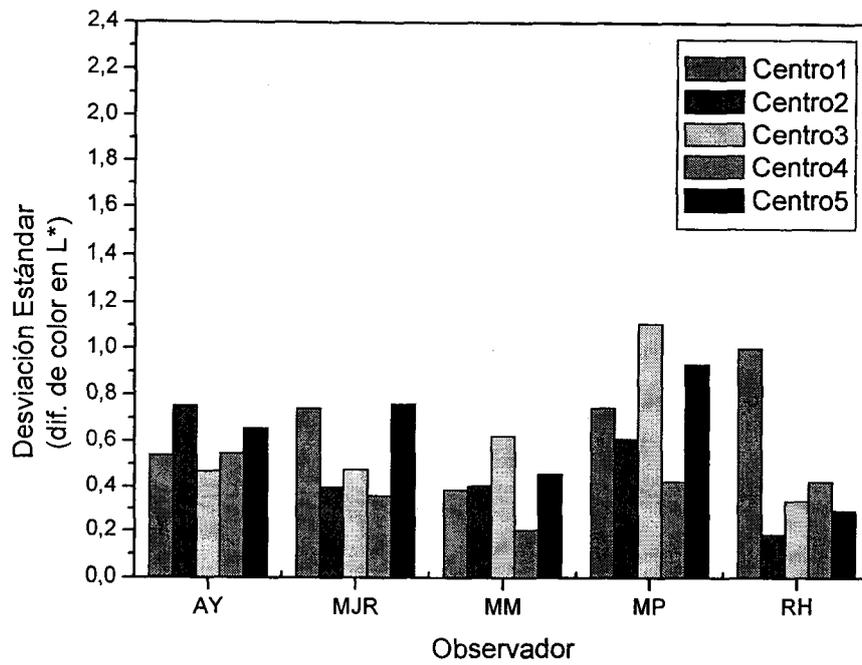


Figura 4.2.5. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en L^* y muestras sin textura.

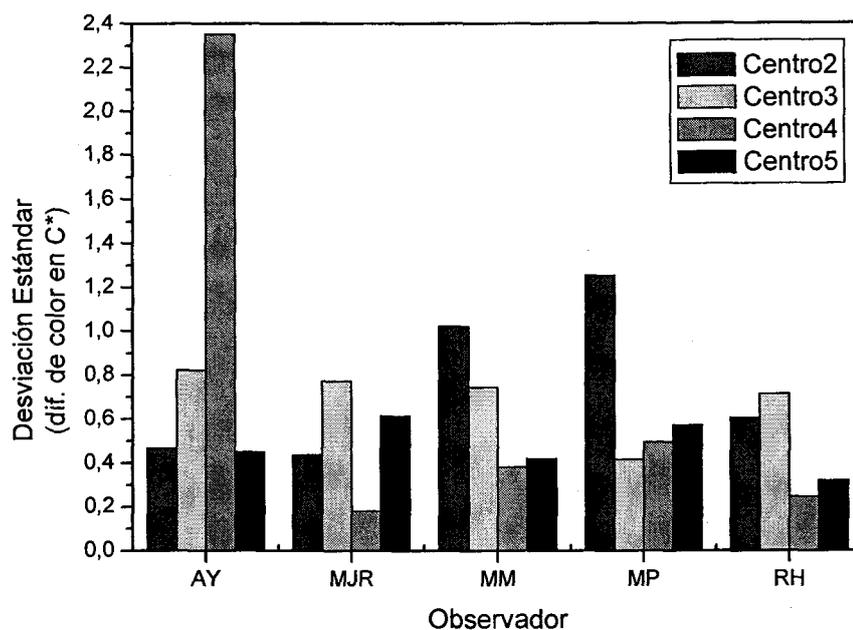


Figura 4.2.6. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en C* y muestras sin textura.

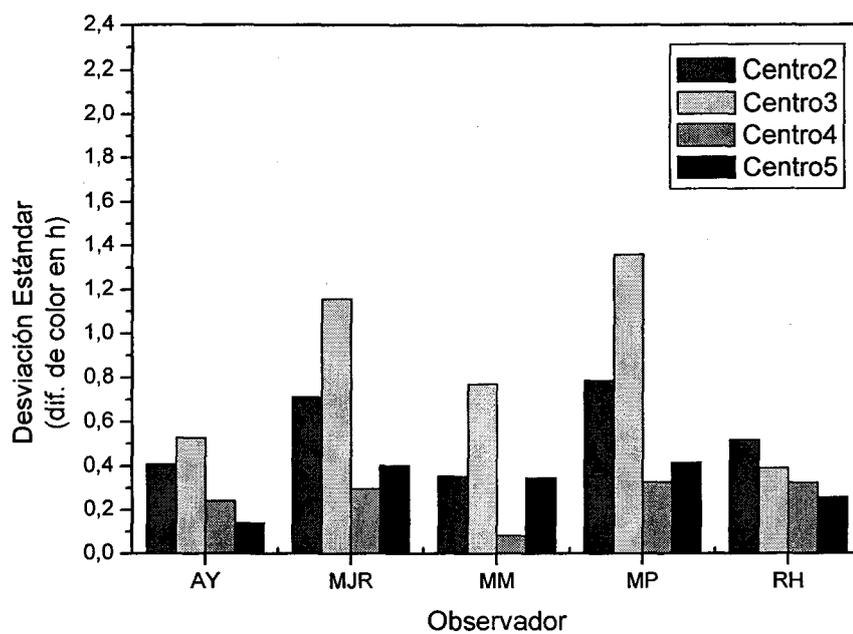


Figura 4.2.7. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en h y muestras sin textura.

Figuras). Para observar las diferencias que hay entre los distintos centros para cada uno de los observadores, hemos representado en las Figuras 4.2.5, 4.2.6 y 4.2.7 la desviación estándar para cada uno de los centros. Cada una de ellas corresponde a la desviación estándar cuando la diferencia de color es fundamentalmente en una coordenada CIELAB: L^* , C^* y h respectivamente. Las tres gráficas corresponden a muestras homogéneas (sin textura).

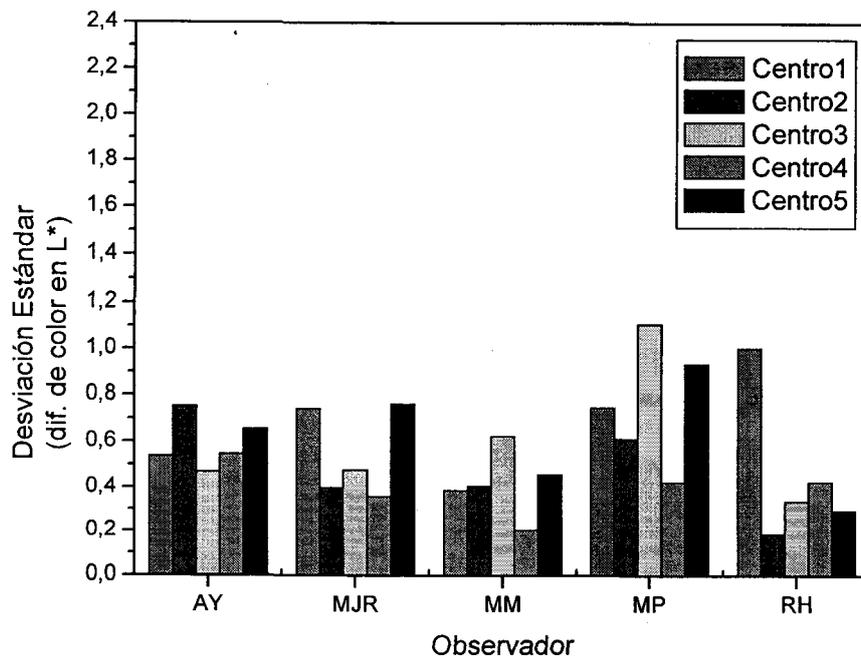


Figura 4.2.5. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en L^* y muestras sin textura.

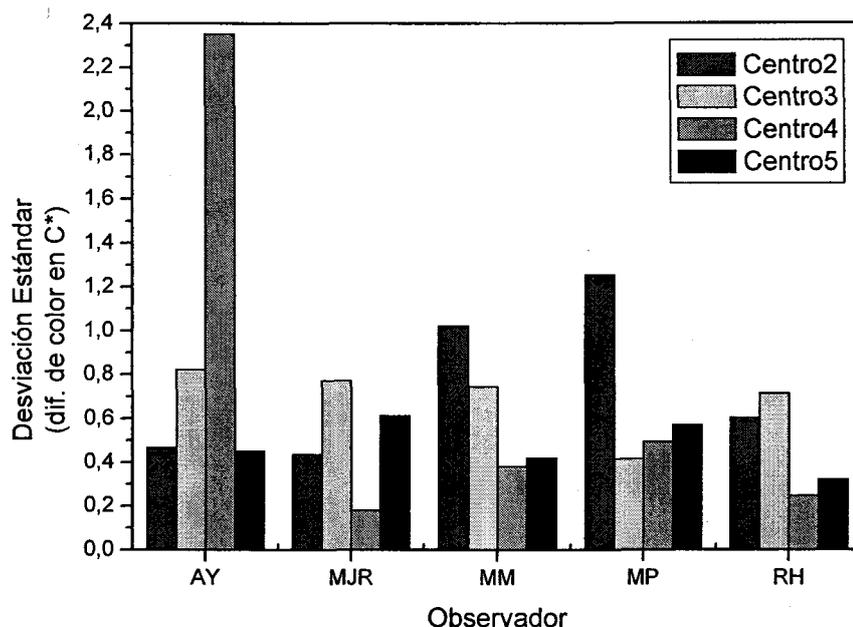


Figura 4.2.6. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en C* y muestras sin textura.

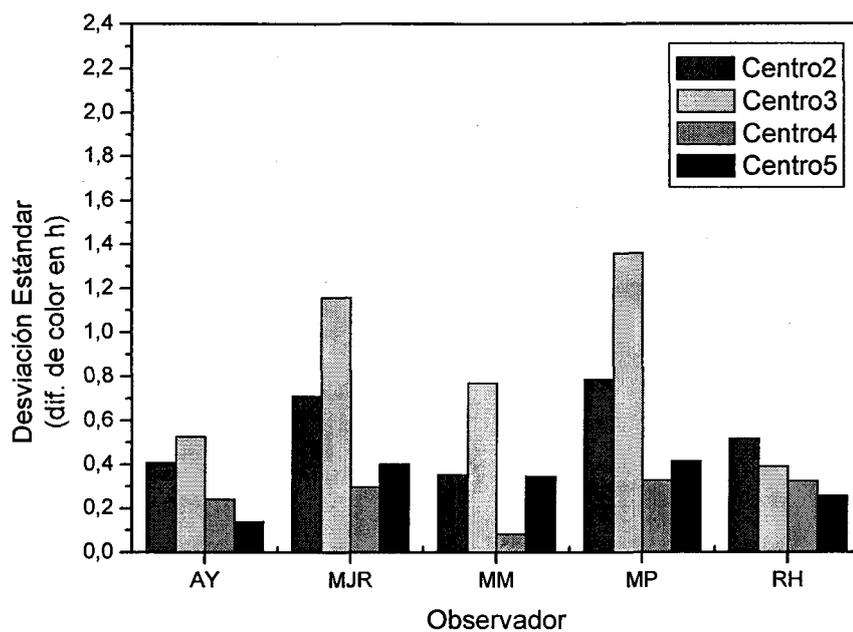


Figura 4.2.7. Desviación estándar para todos los observadores y centros para diferencias de color en h y muestras sin textura.

Como observamos no hay una tendencia clara y existe interacción entre el observador y el centro, pues depende de cada observador la repetibilidad es mejor o peor en cada centro. Creemos que esto se debe a las características individuales de cada sujeto, lo que le hace más fácil o complicado realizar las comparaciones con un centro u otro. Aunque en algunos casos puede deberse a que, para muestras homogéneas, el número de medidas sobre el que hemos realizado la desviación estándar inicialmente (tres), es bajo, y un solo dato “anómalo” hace que se dispare la desviación estándar. Es el caso del observador AY, en la Figura 4.2.6, para el que la desviación estándar es muy alta para el centro 4 y normal para el resto. También en la Figura 4.2.5 para el observador RH, la desviación estándar es muy alta en el centro 1 y bastante baja para el resto. Casos similares podemos observar en las tres gráficas.

Comparando las barras del mismo color en las tres gráficas de las Figuras 4.2.5 a 4.2.7 podemos observar el comportamiento de las desviaciones estándar con las coordenadas: L^* , C^* y h . Para apreciarlo mejor, en la Figura 4.2.8 hemos representado, para el observador RH, las desviaciones estándar para comparaciones con diferencias de color en L^* , C^* y h entre las muestras del Par de Prueba.

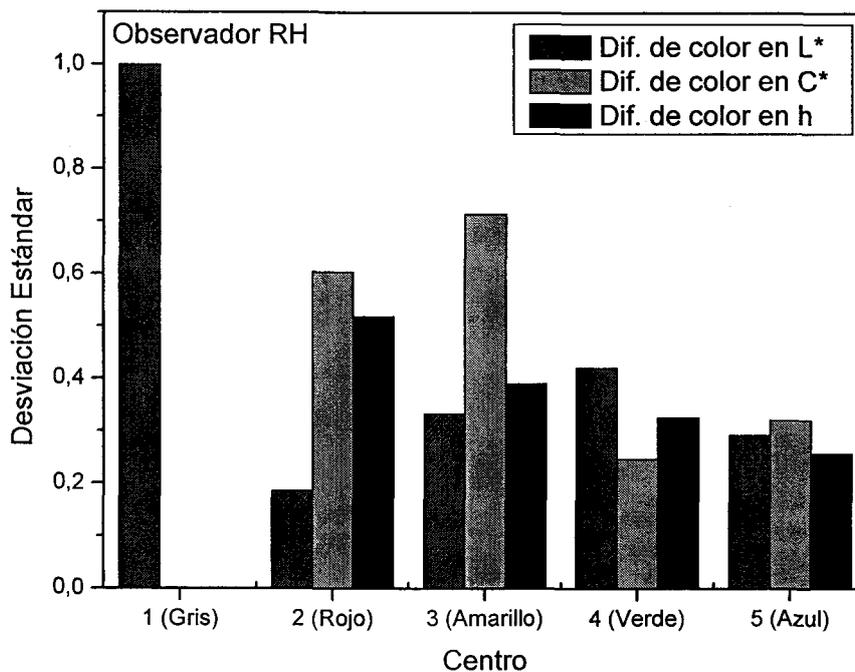


Figura 4.2.8. Desviación estándar del observador RH para todos los centros y coordenadas CIELAB para muestras sin textura.

Notamos que no hay una tendencia clara, y la desviación estándar varía de unas coordenadas a otras y de unos centros a otros. Observamos claramente el valor alto correspondientes al centro 1 que hemos comentado anteriormente. Para el resto de los observadores tampoco se pueden obtener conclusiones, según hemos deducido en la comparación de las Figuras 4.2.5, 4.2.6 y 4.2.7.

En cuanto al efecto, en la desviación estándar, de la superficie que ocupa la textura sobre el fondo mostramos, como ejemplo, los resultados del observador MP en la Figura 4.2.9. Aunque parece haber una tendencia a aumentar la desviación estándar con la superficie, no ocurre siempre, ni para el resto de centros, coordenadas u observadores. De nuevo hay una mezcla de comportamientos distintos para los diferentes observadores, texturas, coordenadas y centros.

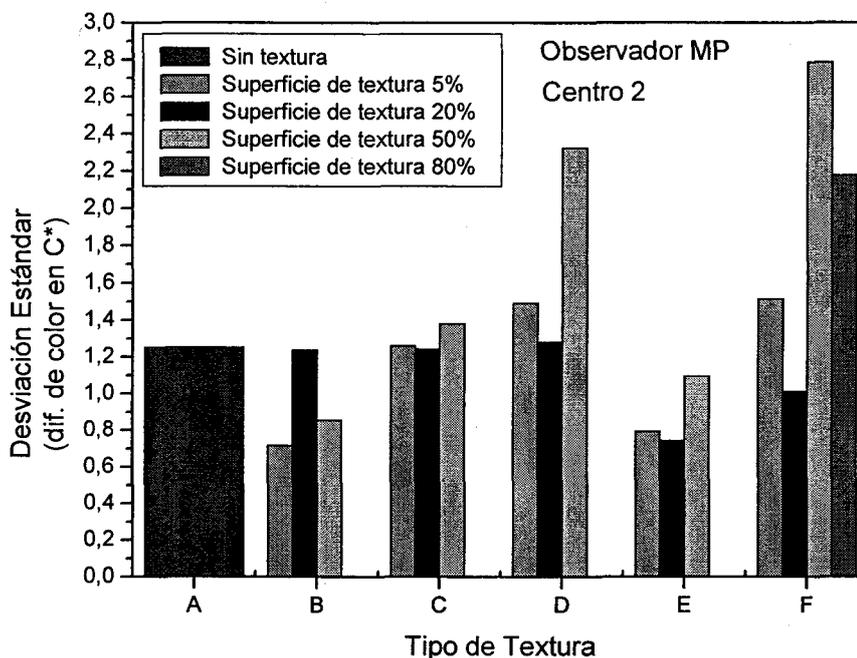


Figura 4.2.9. Desviación estándar para el observador MP, centro 2, diferencia en C* para todos los tipos de textura y superficies.

Como conclusión se tiene que, en el análisis de la variabilidad intra-observador para cada observador, con el número de repeticiones adoptado realmente no existe una influencia clara de los factores analizados, y sí interacciones entre todos ellos, dando lugar a una mezcla de resultados para cada factor. En consecuencia los promedios de la Tabla 4.2.V son un buen análisis global de la variabilidad intra-observador.

Precisión y exactitud individuales

Para tener una idea de la precisión y exactitud en las comparaciones de cada observador utilizaremos el factor PF/3. Este cálculo es más adecuado, desde el punto de vista estadístico, para estudiar la correlación entre pares de datos que la desviación estándar.

Si comparamos entre si (dos a dos, mediante combinaciones de las 3 repeticiones) los datos de cada una de las repeticiones, el factor PF/3 nos da una idea de la repetibilidad o precisión en los resultados de cada observador. En la Tabla 4.2.VIII mostramos, para cada observador, los valores PF/3 y el número de pares con los que lo hemos calculado. Ya que en la tercera repetición el número de comparaciones es distinto para cada observador, así como las comparaciones eliminadas, el número total de pares en el cálculo del factor PF/3 es distinto para cada observador.

AY	36.17	1027
MJR	21.27	1041
MM	24.18	1065
MP	26.42	993
RH	31.47	1815
PF/3 Promedio		27.90

Tabla 4.2.VIII. Valores PF/3 de la precisión individual de los observadores.

De los resultados obtenidos y mostrados en la tabla anterior, en primer lugar cabe decir que los valores son parecidos a los obtenidos en la bibliografía. Así Han et al., en un trabajo donde utilizan muestras con textura (Han et al., 2003), obtienen un valor de 38. Guan y Luo obtienen valores menores, 26.3 (Xin et al., 2001), e incluso 19 (Guan et al., 1999b) en un trabajo donde los observadores eran todos expertos.

Según los datos de la tabla podemos establecer dos grupos de observadores: uno formado por MJR, MM y MP con mayor precisión en sus resultados y otro formado por AY y RH con mayor dispersión. Las diferencias en la precisión puede explicarse por la menor experiencia, en este tipo de tareas visuales, de los observadores AY y RH.

El análisis de la variabilidad intra-observador mediante la desviación estándar, que hemos realizado en la Sección anterior, es también un cálculo de la precisión

individual de cada observador. Comparando la Tabla 4.2.VIII con la Tabla 4.2.V observamos que existen diferencias destacables. El observador MM obtiene valores bajos en los 2 análisis, los observadores AY y RH tienen valores altos en las 2 Tablas, y son los observadores MJR y MP los que obtienen valores discordantes. Podemos explicar estas diferencias a partir de la definición del factor PF/3, que reproducimos en el Capítulo 3. Entendemos que el factor PF/3 es mucho más elaborado que el simple promedio de las desviaciones estándar. En el cálculo de los valores PF/3 se tiene en cuenta, y se minimiza, el efecto de desviaciones sistemáticas respecto de los valores de comparación; mientras que en el cálculo de la desviación estándar las desviaciones sistemáticas son tenidas en cuenta.

Además de la precisión individual, nos interesa estudiar la exactitud de cada observador. Estudiamos la exactitud individual calculando el factor PF/3 entre los pares de datos formados por la tolerancia visual de cada repetición, y el promedio de las tolerancias del mismo tipo (normalmente de 4 a 6, pues hemos promediado las comparaciones con sentido ascendente y descendente). En la tabla siguiente se tienen los valores obtenidos de PF/3, así como el número de pares utilizados en el cálculo.

AY	22.75	1468
MJR	16.44	1482
MM	16.33	1496
MP	17.57	1391
RH	21.44	1866
PF/3 Promedio		18.91

Tabla 4.2.IX. Valores PF/3 de la exactitud de los observadores.

Los resultados para la exactitud son más bajos que para la precisión para todos los observadores. Este resultado es lógico, pues tomamos como valor de comparación (valor exacto) el promedio de los resultados de cada observador. Se mantienen los dos grupos de observadores que hemos comentado en la Tabla 4.2.VIII.

Variabilidad inter-observador

En las Secciones precedentes hemos analizado ampliamente las diferencias entre las comparaciones realizadas por un mismo observador. Estamos ahora interesados en

estudiar las diferencias entre los observadores. Para ello calculamos la desviación estándar, entre los 5 observadores, de la tolerancia visual media de cada uno de ellos. Tenemos 645 datos que corresponden a las combinaciones de centro, coordenada, sentido, tipo, superficie y grosor de la textura. El promedio de estos 645 datos es 1.89, mucho mayor que los valores intra-observador (cfr. Tabla 4.2.V), como es de esperar.

Realizamos en primer lugar un análisis estadístico de estas desviaciones estándar similar a los efectuados anteriormente. Hemos considerado los factores que dan lugar a diferencias significativas en las tolerancias visuales, sin incluir por tanto el sentido. Tampoco vamos a tener en cuenta las interacciones entre factores. En la figura siguiente se tienen las gráficas de validación del modelo para los residuos de la variable respuesta, que ahora es la desviación estándar entre los observadores.

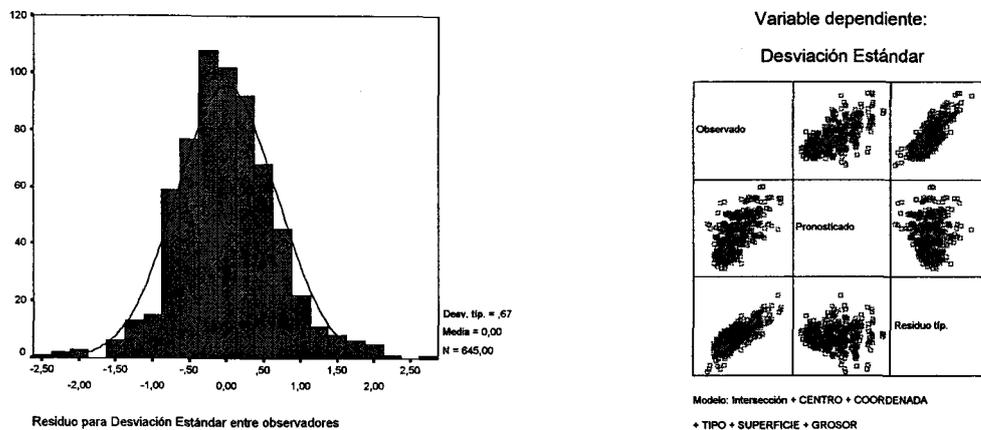


Figura 4.2.10. Gráficas de validación del modelo para los residuos de las desviaciones estándar entre observadores.

La hipótesis de normalidad se cumple muy bien para los residuos de la variable, al igual que la homocedasticidad. Respecto a la independencia observamos que el resultado no es tan satisfactorio. En la tabla siguiente se muestran los resultados de aplicar el modelo:

Modelo corregido	238.650	15	15.910	34.456	0.000
Intercept	663.266	1	663.266	1436.433	0.000
CENTRO	33.517	4	8.379	18.147	0.000
COORDENADA	121.829	2	60.914	131.922	0.000
TIPO	37.621	4	9.405	20.369	0.000
SUPERFICIE	10.106	3	3.369	7.295	0.000
GROSOR	0.153	1	0.153	0.331	0.565
Error	290.438	629	0.462		
Total	2885.437	645			
Total corregido	529.088	644			
r cuadrado = 0.451 (r cuadrado corregido = 0.438)					

Tabla 4.2.X. Tabla ANOVA para las desviaciones estándar entre observadores.

Hemos obtenido que el grosor no da lugar a diferencias significativas, tal y como ocurría para las desviaciones estándar intra-observador. La prueba de Levene para el grosor indica que hay igualdad de varianzas para el grosor con un p-valor de 0.075, lo que valida el resultado.

En primer lugar promediamos los 2 valores correspondientes al sentido y los dos correspondientes al grosor, ambos factores no significativos sobre la desviación estándar. De los 645 datos reducimos el número a 197.

En las Figuras 4.2.11, 4.2.12 y 4.2.13 representamos, para todos los centros, la desviación estándar entre los observadores para todos los tipos de textura que estamos estudiando, para tolerancias en L*, C* y h respectivamente. En las gráficas los valores corresponden al promedio de las distintas superficie de textura, y las barras de error a la desviación estándar de este promedio.

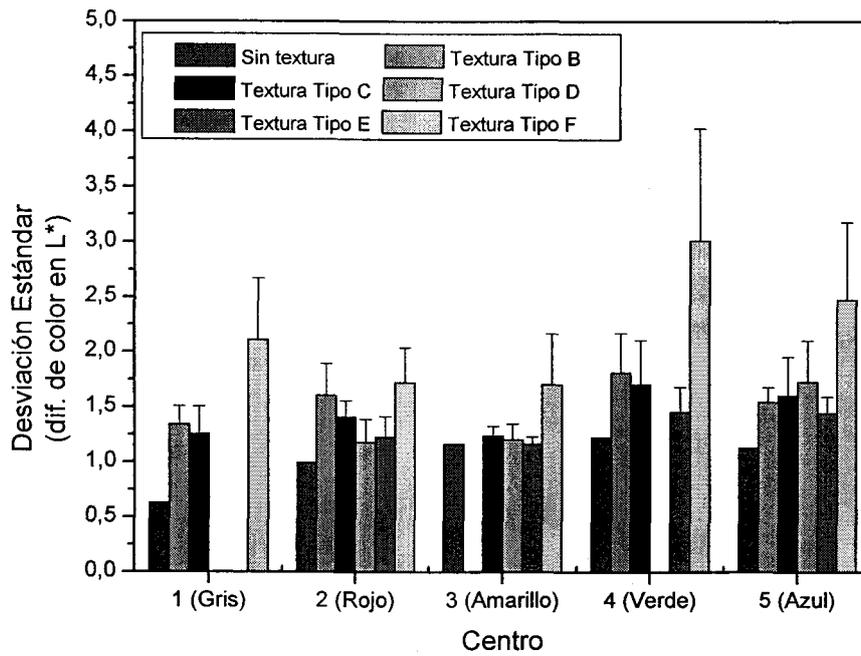


Figura 4.2.11. Desviación estándar entre observadores para diferencias de color en L*.

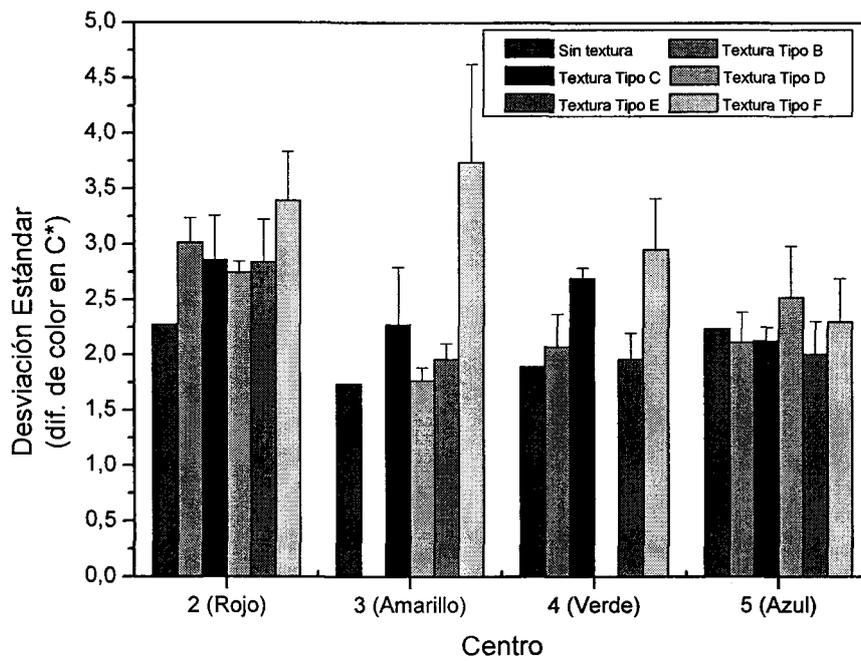


Figura 4.2.12. Desviación estándar entre observadores para diferencias de color en C*.

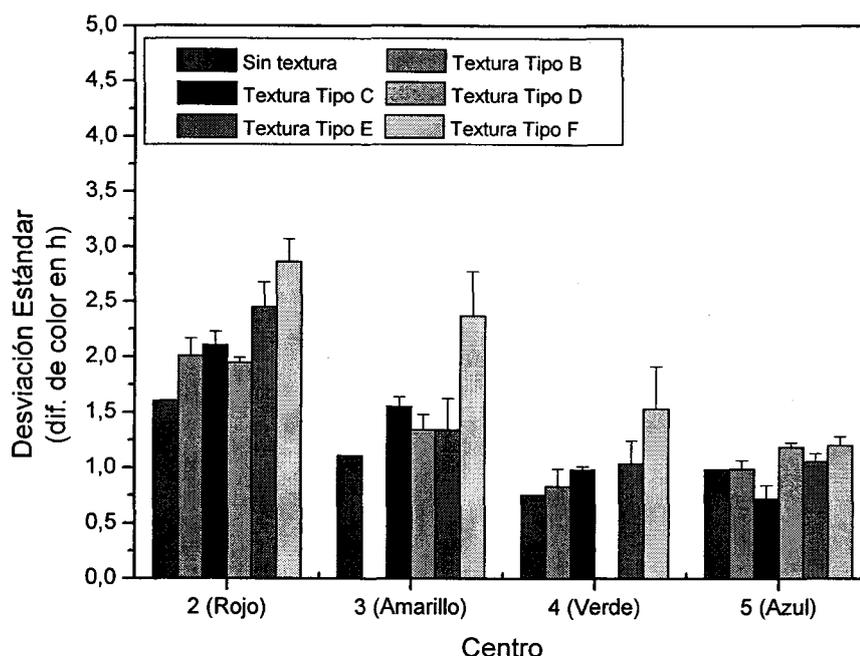


Figura 4.2.13. Desviación estándar entre observadores para diferencias de color en h.

Podemos analizar diferentes aspectos en estas gráficas dependiendo de qué comparemos. En general aumentan las diferencias entre los observadores cuando se tiene textura (mayores valores de la desviación estándar). En el caso de la textura absoluta (tipo F), las desviaciones estándar son las mayores. Entre las texturas relativas no se observan diferencias importantes. Si analizamos las diferencias entre centros se tiene que, para diferencias en L^* y C^* , las diferencias son pequeñas. En el caso de tolerancias con diferencias de color fundamentalmente en h, para el centro 2 se tienen desviaciones estándar medias mayores que para el resto. Si queremos analizar qué ocurre en la desviación estándar dependiendo de que la diferencia de color sea en L^* , C^* o h, comparamos las barras de un mismo color en las 3 gráficas, que tienen la misma escala de ordenadas para que sea más fácil la comparación. En el caso de diferencias en L^* ó h los valores son muy similares, pero mucho mayores son las desviaciones estándar cuando se tienen diferencias de color en C^* . Por tanto, los observadores discrepan mucho más en sus resultados cuando la diferencia de color en el par de prueba es en croma. Además, como observamos en la Figura 4.2.7, también la variabilidad intra-observador es mayor en este caso, sobre todo para los centros 2 y 3. En cuanto a las diferencias entre las distintas superficies de textura observamos, en las barras de error de las gráficas, que son

mayores en el caso de textura absoluta (tipo F), donde las barras corresponden al promedio de 4 niveles: 5%, 20%, 50% y 80%. Para las texturas relativas se promedian los 3 primeros niveles enumerados, y las diferencias entre ellas no son apreciablemente diferentes para los distintos tipos de textura relativa. Para observar mejor la influencia de la superficie de textura, en la gráfica de la figura siguiente representamos la desviación estándar entre observadores para distintas superficies de textura, para el centro 2 y tolerancias en claridad.

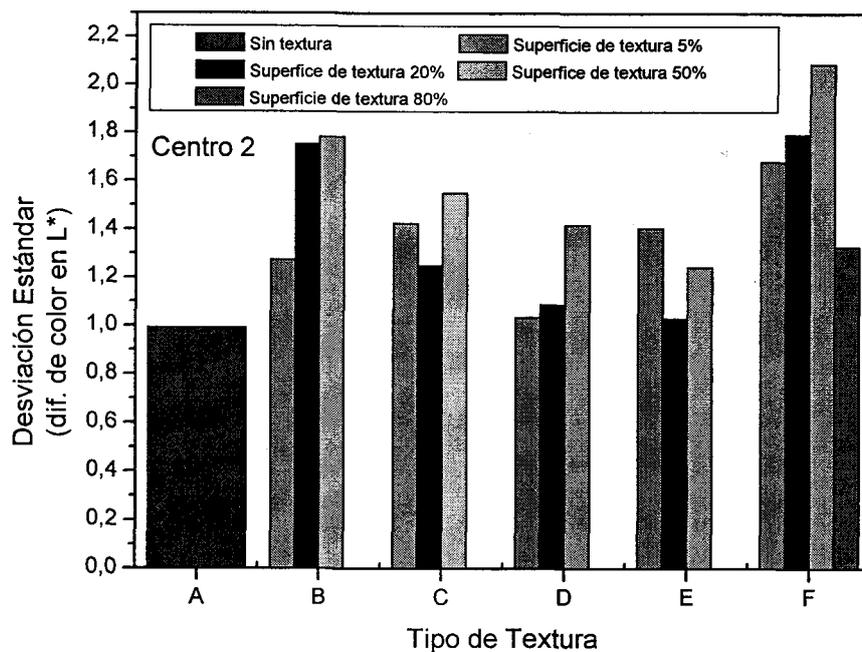


Figura 4.2.14. Desviación estándar entre observadores para el centro 2, diferencias de color en L* y todas las superficies de textura.

No hay diferencias claras entre las distintas superficies de textura. En el caso de diferencias de color en otras coordenadas y en el resto de los centros los resultados son similares, sin mostrar una tendencia con la superficie en la desviación estándar.

Comparando la variabilidad intra-observador e inter-observador, los valores de la desviación estándar para la variabilidad inter-observador son mucho mayores, en general, a los obtenidos para la variabilidad intra-observador, como observamos comparando cada observador de las Figuras 4.2.5, 4.2.6 y 4.2.7 (que corresponden a muestras sin textura) con las barras rojas (que pertenecen a muestras sin textura) de las Figuras 4.2.11, 4.2.12 y 4.2.13 respectivamente.

Como conclusión de la variabilidad intra-observador e inter-observador, las diferencias entre las tolerancias visuales experimentales de los observadores, son mayores cuando las diferencias de color son en croma, y aún mayores cuando las muestras presentan textura absoluta. También es mayor la variabilidad intra-observador para las tolerancias en croma. La causa más plausible es que las comparaciones con diferencia de color en croma resultan más difíciles para los observadores, por lo que aumenta la dispersión en los resultados. Este efecto se potencia en el caso de que las muestras presenten textura absoluta.

Precisión y exactitud

Aunque la variabilidad inter-observador (analizada mediante la desviación estándar entre observadores) nos da una idea de la dispersión de los resultados entre los observadores, para estudiar la precisión y exactitud de los resultados utilizamos el factor PF/3.

Construimos combinaciones de pares de datos formados por la tolerancia (promedio del sentido y de las repeticiones) de un observador y la de cada uno de los demás. Mediante el factor PF/3, comparando el conjunto de pares resultante, analizamos la precisión de los resultados. En la Tabla 4.2.XI mostramos el valor PF/3 resultante.

Analizamos la exactitud comparando pares de datos formados por la tolerancia (promedio del sentido y de las repeticiones) de cada observador y la media de todos los observadores como valor de comparación. Asumimos que la media de los resultados es el valor exacto. Puede suponerse que la media de 10 comparaciones (5 observadores y dos sentidos) tiene un valor cercano al exacto. En la Tabla 4.2.XI mostramos el resultado.

Precisión		Exactitud	
PF/3	Número de pares	PF/3	Número de pares
68.53	3794	42.25	1901

Tabla 4.2.XI. Valores PF/3 de la precisión y exactitud de los resultados.

Los valores de precisión y exactitud entre observadores son mayores que los encontrados en la bibliografía. El cálculo de la precisión, realizado de la misma forma, da un valor de 38 en un trabajo donde Han et al. analizan la influencia de la textura (Han et

al., 2003). En un trabajo anterior de Guan y Luo (Guan et al., 1999c) obtienen un valor de 40, y en otros artículos de los mismos autores (Guan et al., 1999b; Guan et al., 1999a) obtienen incluso valores menores, 27 y 24 respectivamente. Reconocen que todos los observadores eran expertos. El valor para la precisión de los observadores obtenido por Xin et al. (Xin et al., 2001) es de 20.7.

Respecto a la precisión, el valor obtenido, corrobora la conclusión de la sección anterior de una alta variabilidad inter-observador.

Análisis de la tolerancia visual por observadores

En esta Memoria de Tesis Doctoral, en principio, no estamos interesados en obtener conclusiones individuales, sino más bien conclusiones universales en cuanto al observador se refiere. Sin embargo, en esta sección vamos a analizar ampliamente los resultados, estudiando qué diferencias existen entre las tolerancias visuales individuales obtenidas por cada uno de los observadores que han realizado las comparaciones. Este análisis nos ayudará a comprender mejor los resultados.

Según hemos comentado, en la Tabla 4.1.IV hay diferencias significativas en las tolerancias visuales dependiendo del observador que ha hecho la comparación. En la gráfica siguiente representamos las medias globales por observadores.

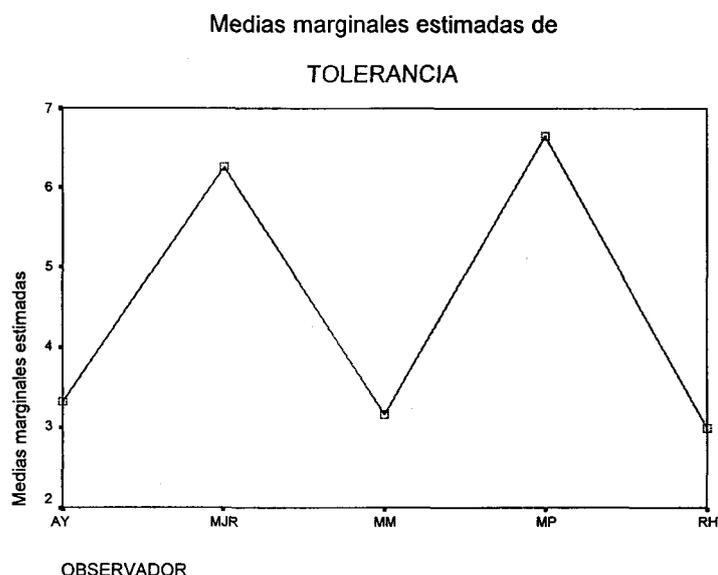


Figura 4.2.15. Gráfica de tolerancias visuales medias por observadores.

Efectivamente, observamos que las diferencias entre observadores son importantes. Hay dos grupos de observadores bien diferenciados, con una diferencia del orden de 3 unidades CIELAB entre ellos. Uno de los grupos, formado por observadores con tolerancias menores o más estrictos, lo constituyen AY, MM y RH. El otro grupo, formado por MJR y MP, son observadores más permisivos.

Vamos a estudiar estadísticamente las diferencias entre observadores mediante comparaciones múltiples y pruebas a posteriori o post hoc. Como no hay homocedasticidad de la variable respuesta respecto al factor observador (cfr. Tabla 4.1.I), utilizamos las siguientes pruebas específicas, que no asumen varianzas iguales: T2 de Tamhane, T3 de Dunnett y prueba de Games-Howell. En la Tabla 4.2.XII transcribimos los resultados del test de Tamhane. El resto de los tests dan resultados muy parecidos.

Prueba Tamhane para observadores		
AY	MJR	0.000
	MM	0.013
	MP	0.000
	RH	0.000
MJR	AY	0.000
	MM	0.000
	MP	0.176
	RH	0.000
MM	AY	0.013
	MJR	0.000
	MP	0.000
	RH	0.000
MP	AY	0.000
	MJR	0.176
	MM	0.000
	RH	0.000
RH	AY	0.000
	MJR	0.000
	MM	0.000
	MP	0.000

Tabla 4.2.XII. Resultados del test de Tamhane para los observadores.

Según los resultados no hay diferencias significativas entre las tolerancias de los observadores MJR y MP. Por tanto, de los dos grupos que hemos establecido, sólo el formado por MJR y MP es un grupo. Entre el resto de observadores las diferencias sí son significativas.

A continuación vamos a estudiar el comportamiento de los observadores en cada

uno de los centros separadamente. En la gráfica siguiente representamos las tolerancias visuales en L^* para todos los centros. Los datos corresponden a muestras sin textura.

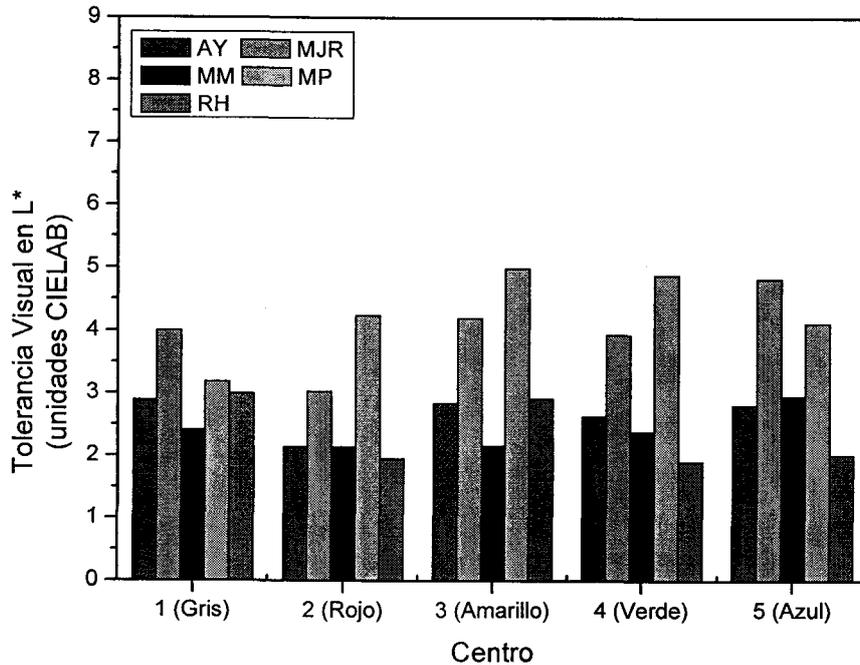


Figura 4.2.16. Tolerancias visuales en L^* de muestras homogéneas para todos los centros.

En todos los centros se mantiene la misma tendencia. Los observadores MJR y MP son los que obtienen tolerancias mayores, mientras que el resto de observadores obtienen tolerancias muy parecidas. En el caso de tolerancias con diferencias de color en C^* y h para muestras homogéneas, el comportamiento de los observadores es el mismo. En las Figuras 4.2.17 y 4.2.18 reproducimos los resultados para tolerancias en C^* y h respectivamente. Recordaremos que por tolerancias de color en una coordenada, L^* , C^* o h , entendemos diferencias de color calculadas, ΔL^* , ΔC^* y ΔH^* , que son debidas a diferencias (en más del 75% de la diferencia de color total) esencialmente en L^* , C^* y h respectivamente, entre las dos muestras del Par de Prueba.

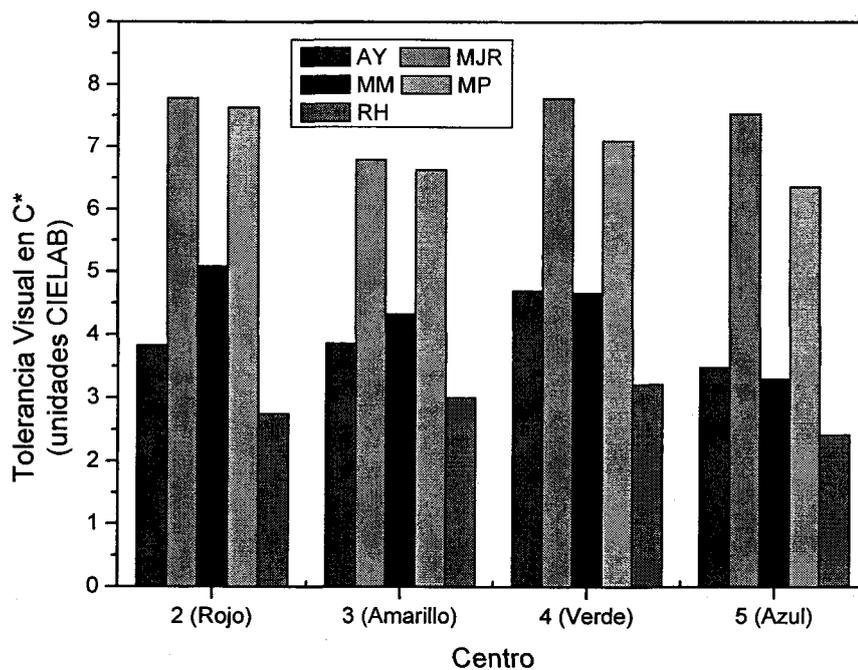


Figura 4.2.17. Tolerancias visuales en C* de muestras homogéneas para todos los centros.

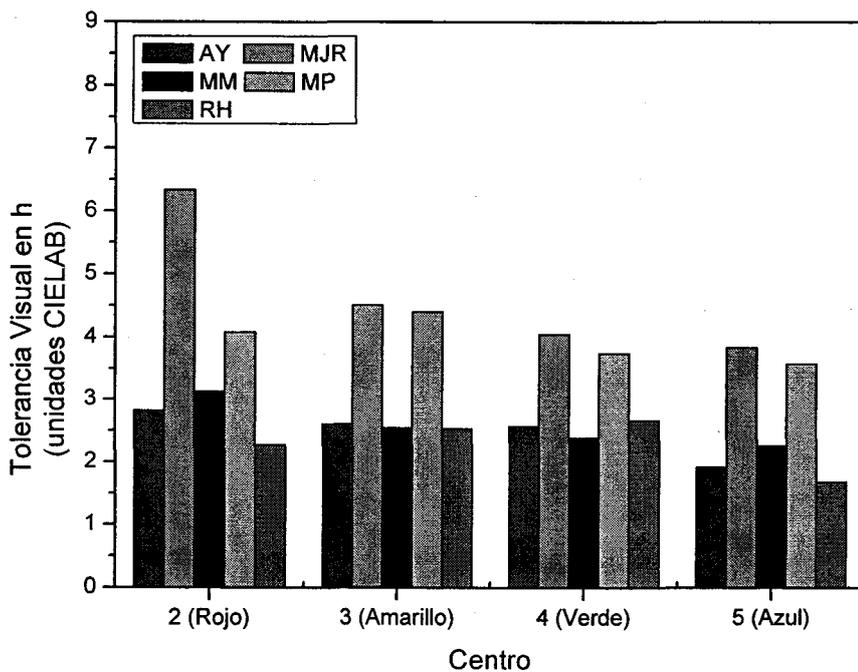


Figura 4.2.18. Tolerancias visuales en h de muestras homogéneas para todos los centros.

Para muestras homogéneas hemos observado, en las figuras anteriores, que las tolerancias de los observadores siguen una tendencia que es independiente del centro. ¿Qué pasa si las muestras tienen textura?. En las Figuras 4.2.19, 4.2.20 y 4.2.21 representamos las tolerancias visuales en L^* , C^* y h respectivamente, correspondientes a muestras con textura tipo B (relativa con +10 unidades en L^*) y superficie del 50%, como ejemplo de textura relativa. Para muestras con textura absoluta (textura tipo F) y también 50% de superficie representamos las tolerancias en las Figuras 4.2.22, 4.2.23 y 4.2.24. En ambos casos hemos promediado el grosor 1 y 4, y las barras de error corresponden a la desviación estándar de este promedio. Como observamos en estas figuras, los resultados siguen el mismo comportamiento que los obtenidos para muestras homogéneas.

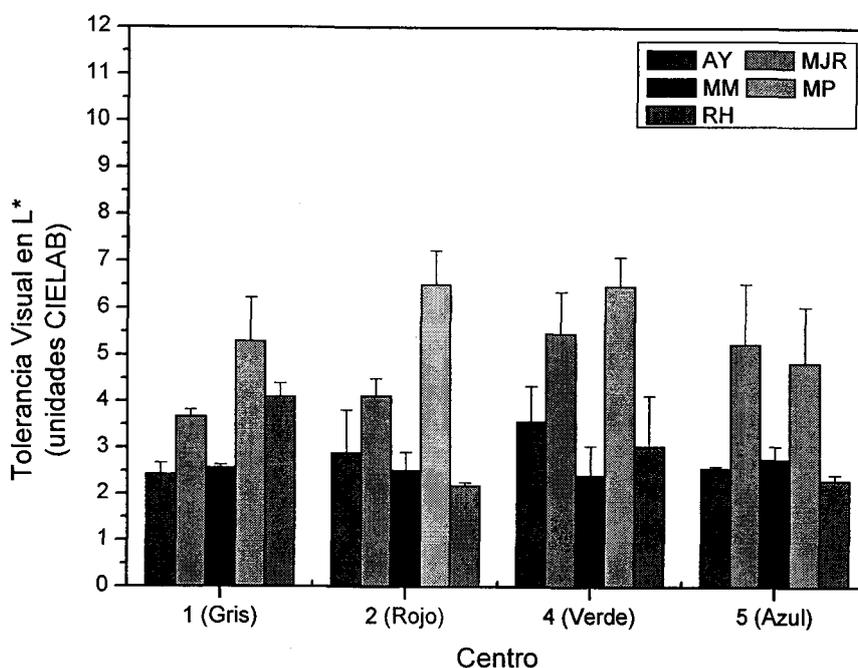


Figura 4.2.19. Tolerancias visuales en L^* de muestras con textura B y 50% de superficie.

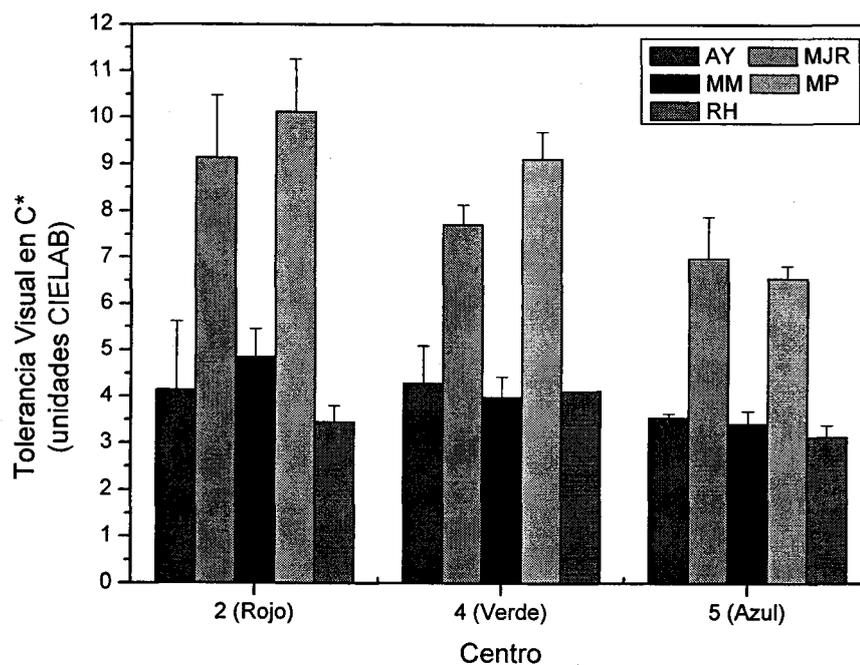


Figura 4.2.20. Tolerancias visuales en C* de muestras con textura B y 50% de superficie.

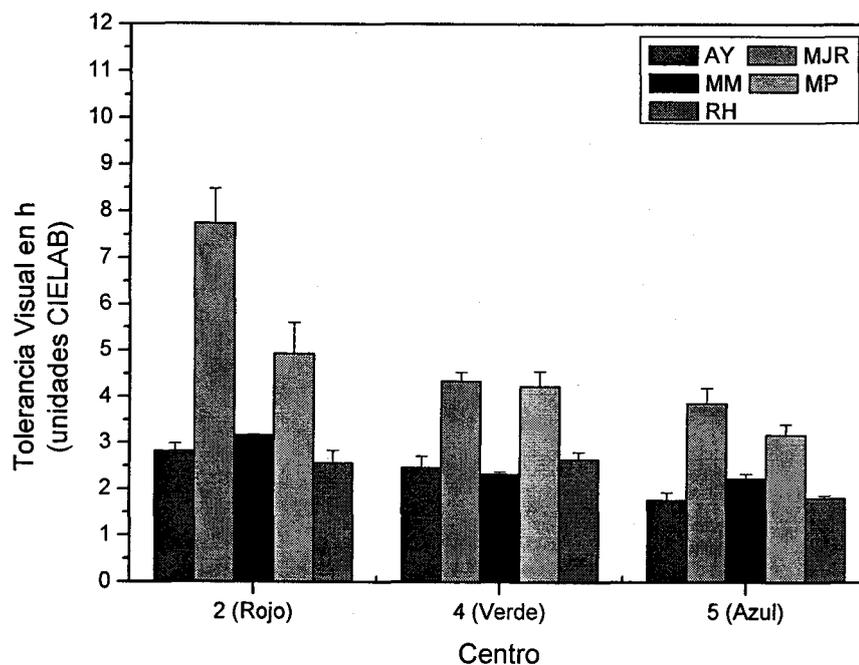


Figura 4.2.21. Tolerancias visuales en h de muestras con textura B y 50% de superficie.

En las gráficas de las Figuras 4.2.19, 4.2.20 y 4.2.21 no aparece el centro 3 ya que no podemos obtener el tipo de textura relativa B para este centro (por limitaciones del

dispositivo), como observamos en la Tabla 3.6.I del Capítulo 3.

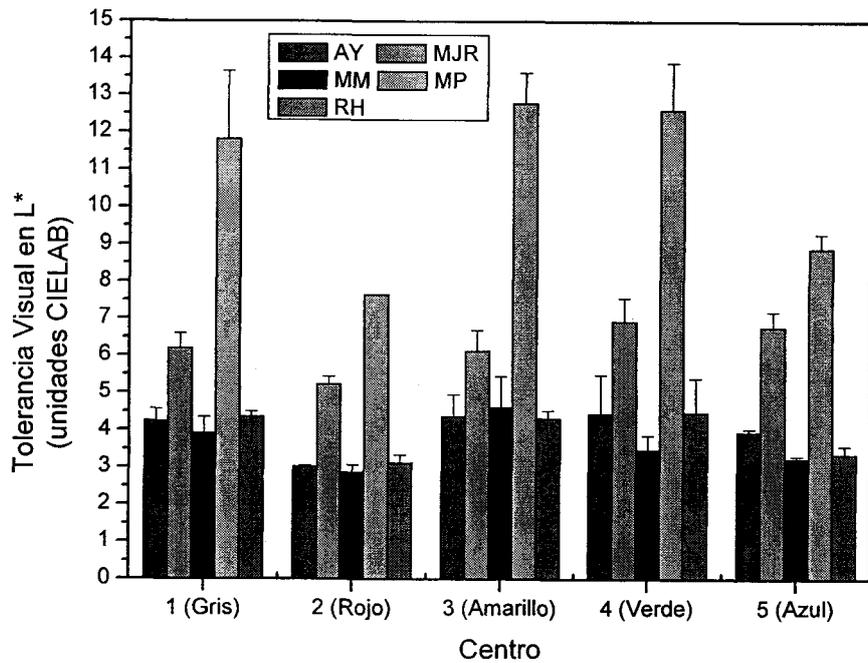


Figura 4.2.22. Tolerancias visuales en L* de muestras con textura F y 50% de superficie.

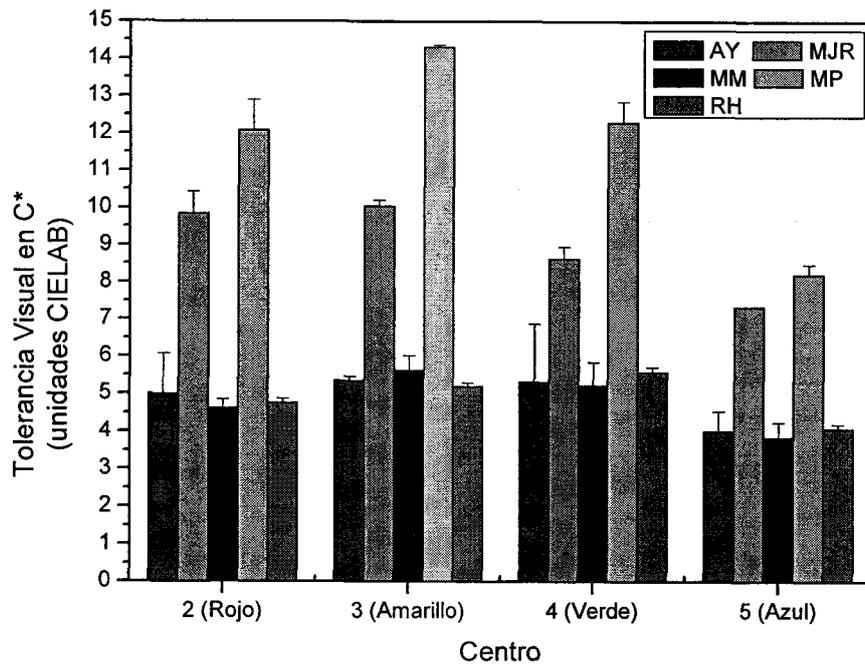


Figura 4.2.23. Tolerancias visuales en C* de muestras con textura F y 50% de superficie.

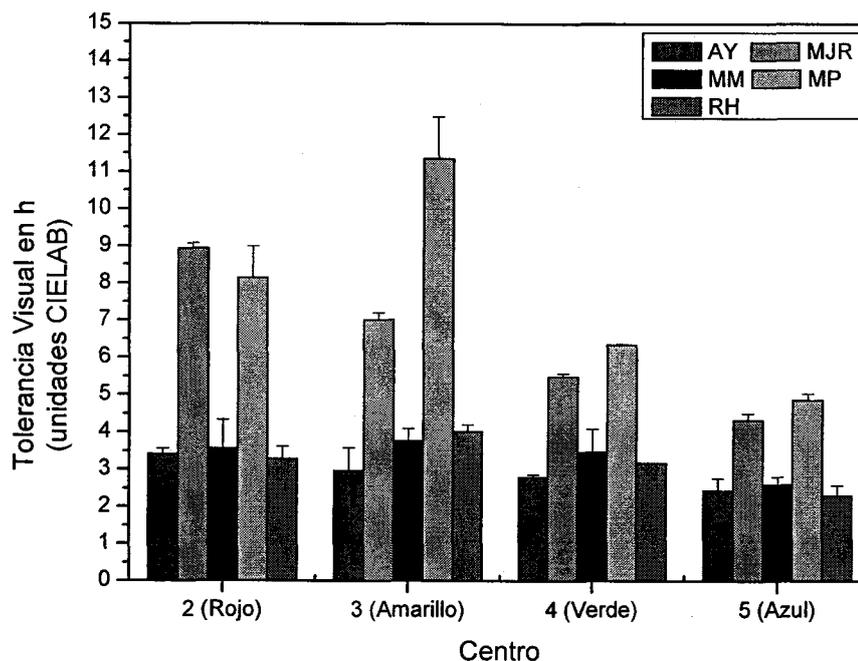


Figura 4.2.24. Tolerancias visuales en h de muestras con textura F y 50% de superficie.

A pesar de que según las figuras precedentes (cfr. Figuras 4.2.16 a 4.2.24) no existen grandes diferencias dependiendo de cada observador y centro, según los resultados de la Tabla 4.1.IV la interacción entre observador y centro es estadísticamente significativa. Sin embargo la interacción es muy suave, según confirmamos de forma global para todas las texturas y superficies de textura, en la gráfica de medias de observador y centro de la Figura 4.2.25. Por lo tanto podemos considerar que, a efectos prácticos, no es importante la interacción entre observador y centro; es decir, los observadores tienen el mismo comportamiento en los cinco centros.

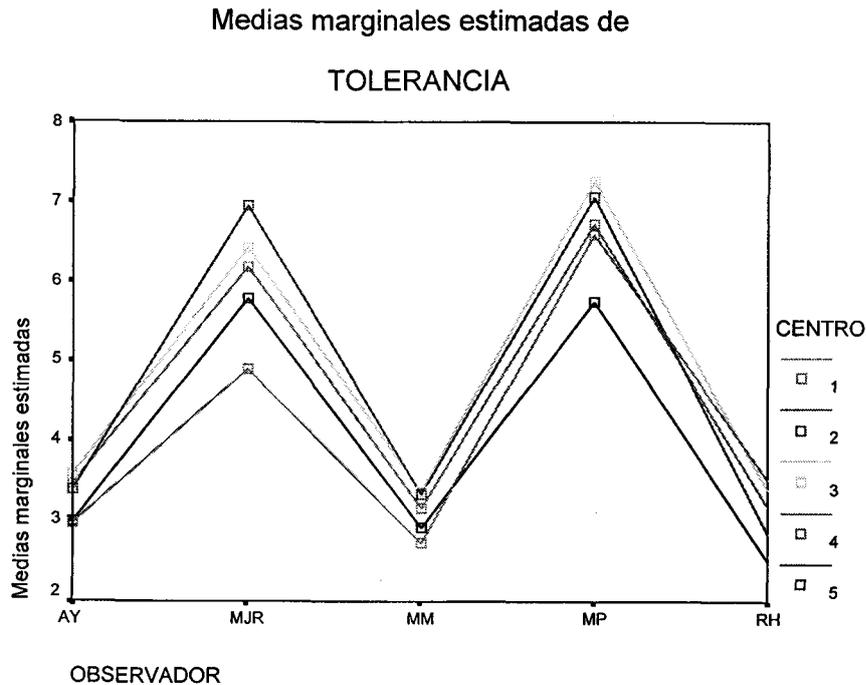


Figura 4.2.25. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y centro.

Además de que no observamos ninguna interacción importante, el comportamiento de los observadores en cada centro reproduce el mostrado en la Figura 4.2.15 para todos los centros, por lo que los centros no cambian la respuesta de los observadores.

Si comparamos entre sí las tolerancias en L^* , C^* y h (comparando entre sí las Figuras 4.2.16, 4.2.17 y 4.2.18; 4.2.19, 4.2.20 y 4.2.21; y 4.2.22, 4.2.23 y 4.2.24) observamos que se tiene un comportamiento similar de los observadores para las tolerancias en claridad, croma y tono. Esto significa que influye poco la coordenada (L^* , C^* o h) de la diferencia de color de la tolerancia visual, sobre la respuesta de los observadores. O lo que es lo mismo, la interacción entre los factores observador y coordenada es muy pequeña, aunque estadísticamente significativa según la Tabla 4.1.IV. En la gráfica de medias para observador y coordenada de la Figura 4.2.26, corroboramos que prácticamente no existe interacción. Además se sigue manteniendo el esquema de la Figura 4.2.15. Advertimos una pequeña interacción entre las coordenadas h y L^* y el observador MJR. Como esta interacción es nimia, en adelante no vamos a considerar la interacción observador*coordenada.

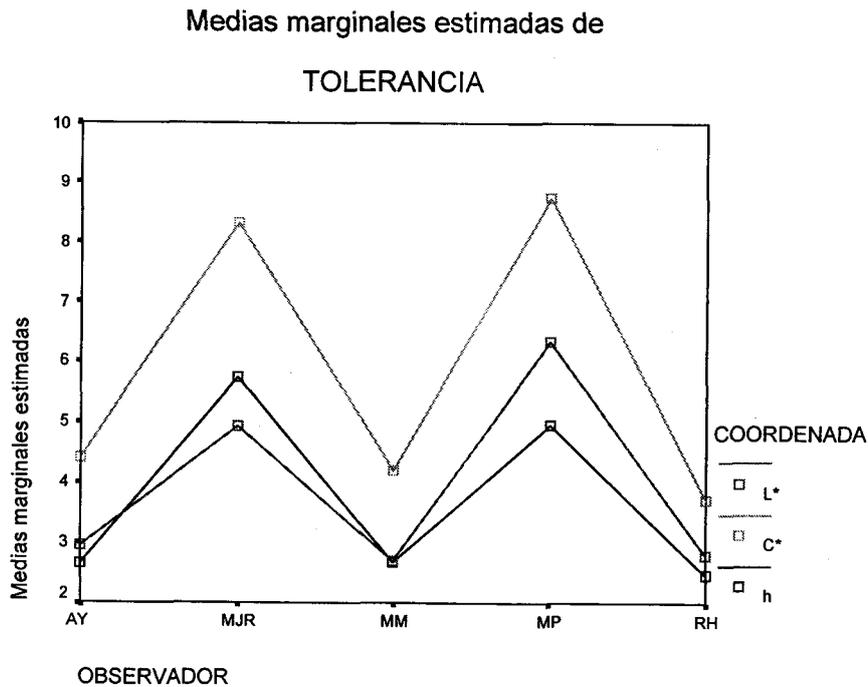


Figura 4.2.26. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y coordenada.

Nos interesa especialmente estudiar qué ocurre en las tolerancias visuales entre los observadores cuando las muestras presentan textura. Comparamos entre sí las Figuras 4.2.16, 4.2.19 y 4.2.22; 4.2.17, 4.2.20 y 4.2.23; y 4.2.18, 4.2.21 y 4.2.24. Observamos que tampoco interaccionan los factores observador y tipo. Para examinarlo mejor, en las Figuras 4.2.27, 4.2.28 y 4.2.29 representamos las tolerancias para los distintos tipos de textura en una sola gráfica, para tolerancias en L*, C* y h respectivamente. Además estas gráficas también incluyen el resto de texturas relativas (tipo C, D y E), que no aparecen en las gráficas precedentes (Figuras 4.2.16 a 4.2.24). Los datos corresponden al centro 5, a textura con superficie del 50% y hemos promediado grosor 1 y 4. La barra de error corresponde con la desviación estándar del promedio del grosor.

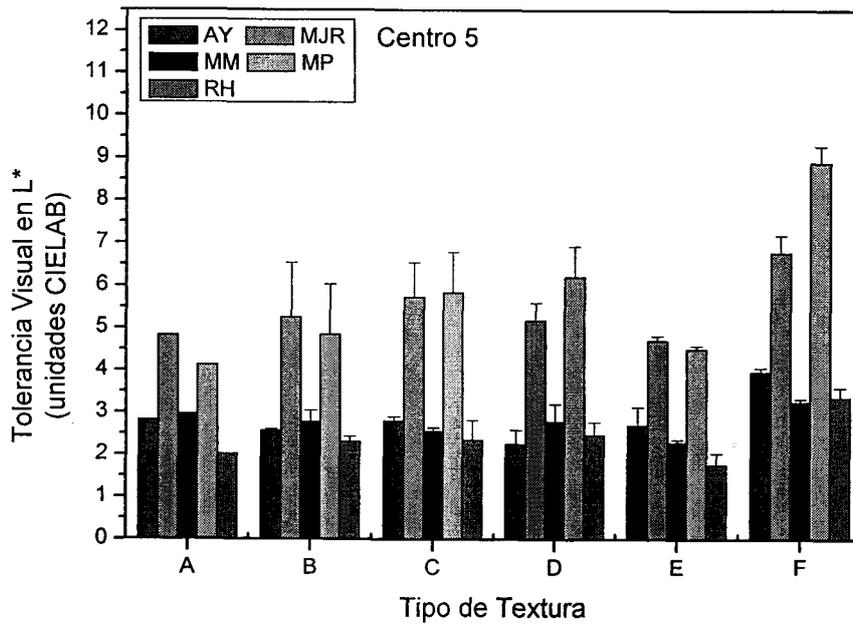


Figura 4.2.27. Tolerancias visuales en L* para el centro 5 y todas las texturas con superficie 50%.

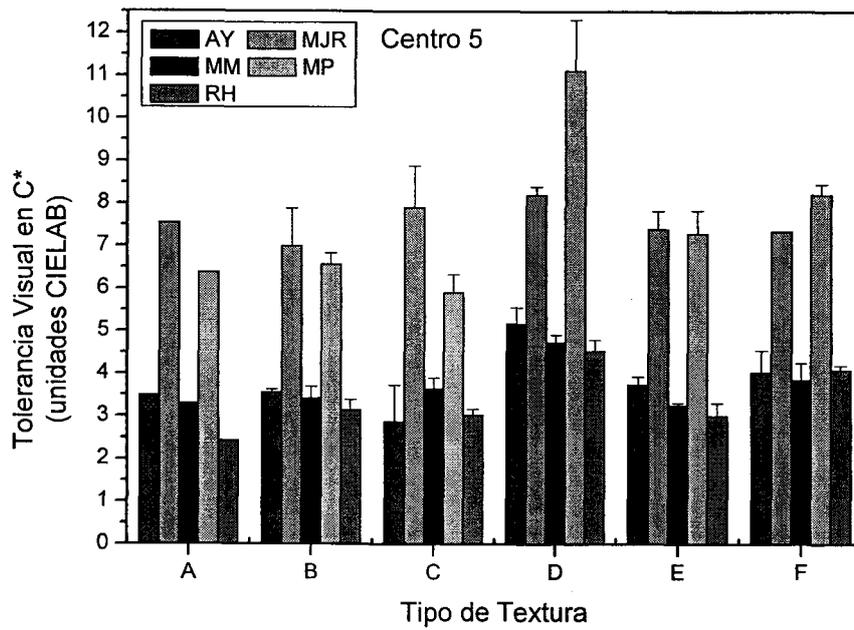


Figura 4.2.28. Tolerancias visuales en C* para el centro 5 y todas las texturas con superficie 50%.

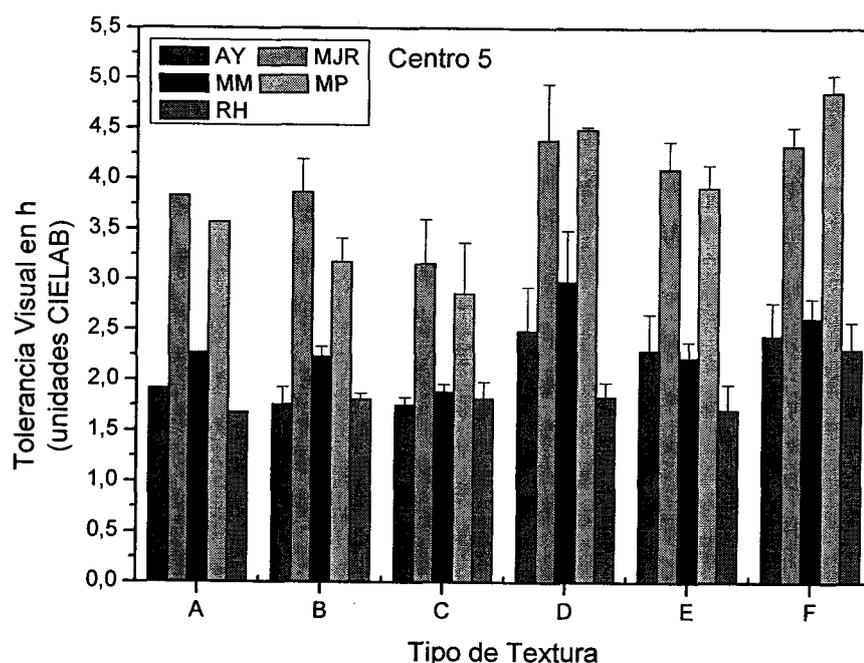


Figura 4.2.29. Tolerancias visuales en h para el centro 5 y todas las texturas con superficie 50%.

Se tiene el mismo comportamiento observado en todas las figuras anteriores: los observadores MJR y MP son los que obtienen las tolerancias mayores, y similares y más pequeñas el resto de observadores. Con ningún tipo de textura se altera este patrón de comportamiento. Es decir, tampoco interaccionan los factores observador y tipo. Con el resto de los centros se tienen resultados análogos a los mostrados, pues como ya hemos probado no existe interacción entre observador y centro. Podemos ratificarlo, para los tipo de texturas B y F, comparando las Figuras 4.2.16 a 4.2.24.

Para corroborar, de forma general, que no interaccionan los factores observador y tipo representamos, en la Figura 4.2.30, la gráfica de medias para observador y tipo. Es muy clara la no-interacción de la textura absoluta (tipo F) con los observadores. También en esta gráfica de medias se sigue el patrón de la Figura 4.2.15. Como ocurría en el caso de observador y coordenada, las interacciones son pequeñas (aunque estadísticamente significativas), lo que nos induce a no considerar en adelante la interacción entre observador y tipo.

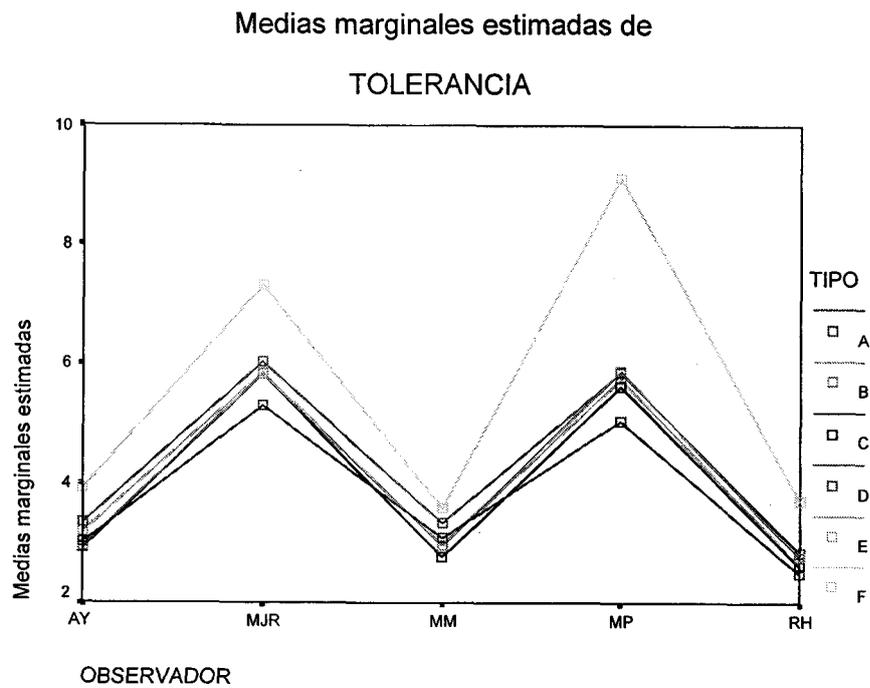


Figura 4.2.30. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y tipo.

A continuación vamos a analizar las tolerancias visuales entre los observadores cuando se tiene distinta superficie de la textura. En la Figura 4.2.31 representamos las tolerancias en C^* para el centro 3 y texturas de tipo D (relativa con +15 unidades en C^*) y F (absoluta), representativas de relativa y absoluta, para los distintos niveles de superficie. Hemos promediado los 2 grosores de la textura y la barra de error corresponde a la desviación estándar de ese promedio.

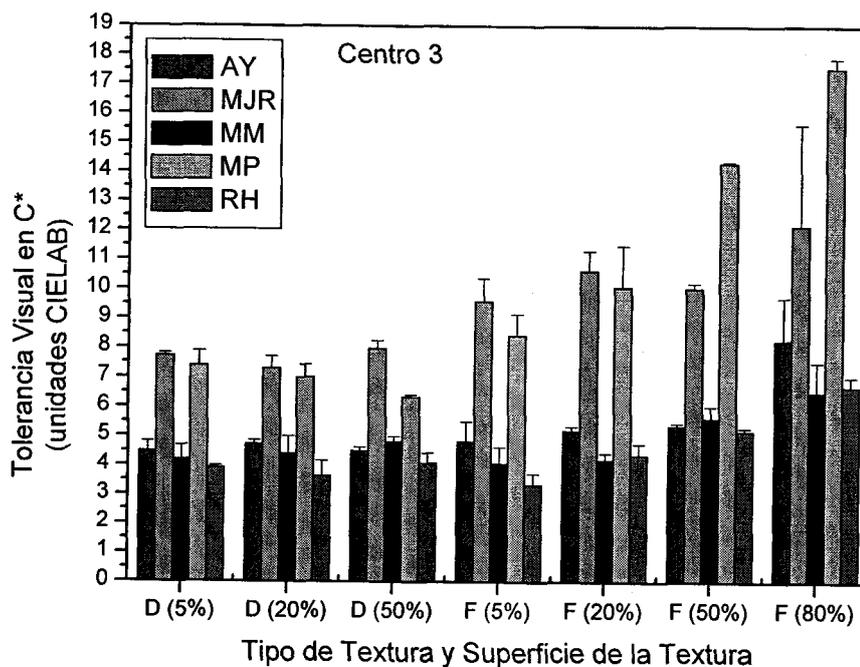


Figura 4.2.31. Tolerancias visuales en C* para todas las superficies de las texturas D y F para el centro 3.

En cada una de las superficies de textura, ya sea absoluta o relativa, se tiene el mismo comportamiento de los observadores en cuanto a las tolerancias visuales. En las demás coordenadas, L* o h, y en el resto de los centros, los resultados son muy parecidos a los mostrados. Además, ya hemos probado que no existe, en ningún caso, interacción entre observador y coordenada, ni entre observador y centro. Según la Figura 4.2.31 esperamos interacciones pequeñas entre los observador y las superficies de la textura, que sabemos que son significativas. En la Figura 4.2.32, en la gráfica de medias para observador y superficie, se tiene el mismo comportamiento de los observadores que el mostrado para las medias globales en la Figura 4.2.15. Existe una pequeña interacción entre el observador MM y las superficies 0 (muestras sin textura) y 5%. Como esta interacción es poco importante, en adelante consideraremos que tampoco hay interacciones entre los observadores y las superficies de textura.

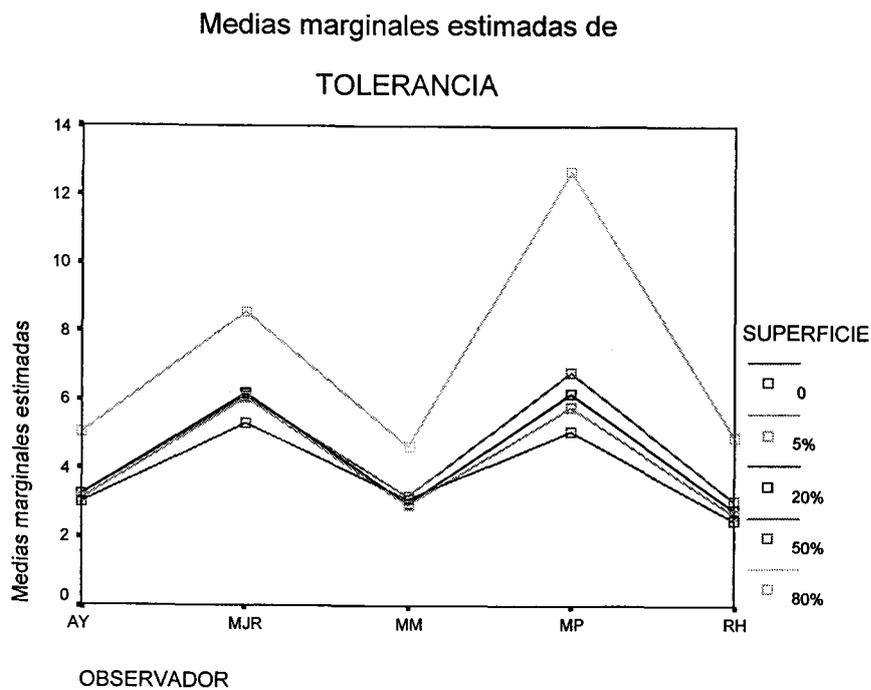


Figura 4.2.32. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y superficie.

La superficie del 80% está muy diferenciada para todos los observadores, especialmente para MP, que es el observador que mejor discrimina entre las distintas superficies de textura.

Por último vamos a estudiar la influencia del grosor sobre las tolerancia visuales de los observadores. Podemos estudiar las diferencias entre grosor 1 y 4 mediante las barras de error de las Figuras 4.2.27, 4.2.28, 4.2.29 y 4.2.31. En todas las gráficas las diferencias entre los grosores son pequeñas en general, y muy parecidas para todos los observadores. Las mismas conclusiones obtenidas en el análisis de esas figuras son válidas para ambos grosores, pues considerando los segmentos de error no cambia el análisis realizado. Por tanto, esperamos que el grosor tampoco tenga influencia sobre las tolerancias visuales de los distintos observadores. Para confirmar esta conclusión, de forma más general, observamos en la gráfica de la Figura 4.2.33 que no existe interacción entre el observador y el grosor. Para los dos grosores se tiene la misma forma de la curva que en la Figura 4.2.15, lo que indica que el grosor no modifica el comportamiento de los observadores. Además esta interacción, aún siendo significativa, es la menos significativa pues tiene un p-valor próximo a 0.05 (cfr. Tabla 4.1.IV), que es el nivel de significa-

ción que hemos considerado.

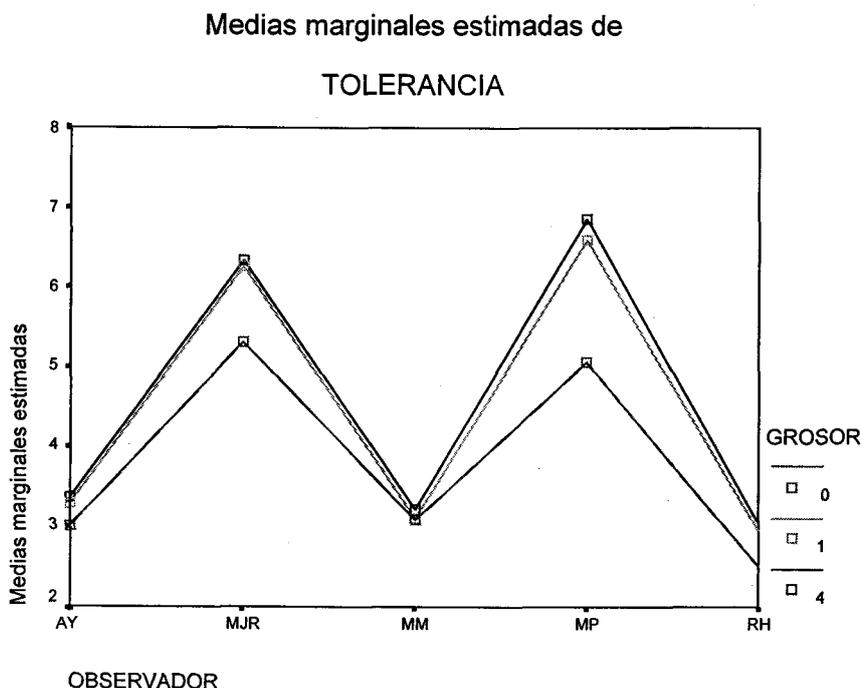


Figura 4.2.33. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y grosor.

En conclusión tenemos que los observadores mantienen el mismo comportamiento independientemente del centro, de la coordenada CIELAB, del tipo de textura, superficie o grosor de la misma. Este comportamiento es el mostrado en la Figura 4.2.15, en la gráfica de medias globales para los observadores.

Para generalizar las conclusiones que obtengamos más adelante a cualquier observador, es muy importante el hecho de que no haya interacción entre el observador y el resto de los factores. Si hubiera interacción los resultados sólo tendrían validez individual, para cada observador, y las conclusiones no podríamos extenderlas más allá de ese observador.

Una vez analizada ampliamente la influencia del observador sobre los resultados, y ya que no existe interacción con el resto de los factores, en adelante no vamos a considerar los resultados de cada observador individualmente, sino el promedio de los 5. Según hemos comentado nos interesa obtener resultados globales y generalizables a cualquier observador.

4.3. Análisis de los Centros

En este Apartado vamos a estudiar qué diferencias existen en las tolerancias visuales dependiendo del centro al que pertenezca la muestra, es decir, dependiendo de la zona del espacio de color en la que los observadores han realizado la comparación. Como comentamos en el Apartado “Selección de los Centros” del Capítulo 3, hemos estudiado los 5 centros recomendados por la CIE en 1978 para el estudio del color (Robertson, 1978). Al igual que con los observadores, en principio estamos interesados en obtener conclusiones globales, es decir, extrapolables a todo el espacio de color, al que estos 5 centros representan, pues están situados en zonas diferentes intentando abarcar todo el espacio. Podemos comprobarlo, por ejemplo observando sus coordenadas, mostradas en la Tabla 3.5.I, en el diagrama CIELAB.

En la gráfica de medias de la Figura 4.3.1 observamos las diferencias entre las tolerancias promedio de cada centro, sin considerar ningún otro factor.

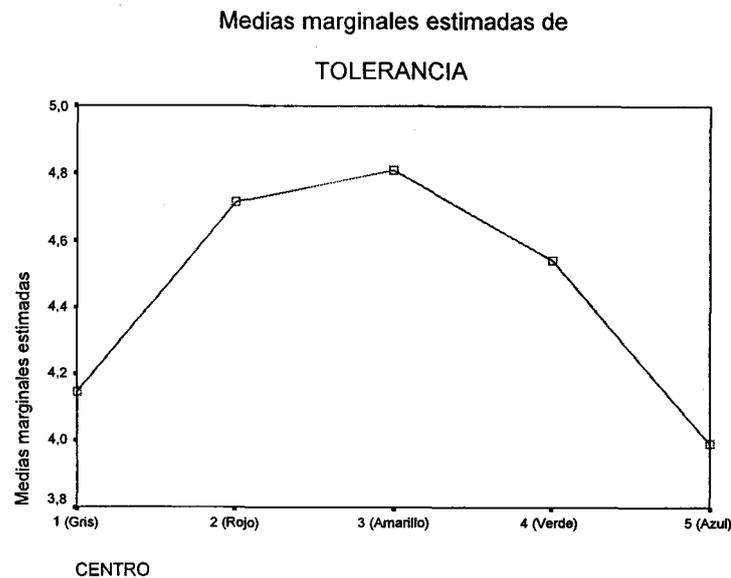


Figura 4.3.1. Gráfica de tolerancias visuales medias por centros.

Las diferencias entre los 5 centros, en torno a la unidad CIELAB, no son tan grandes como las que existen entre los observadores, en la Figura 4.2.15. No obstante, las tolerancias medias de los centros 1 (Gris) y 5 (Azul) son apreciablemente más pequeñas que las del resto. Incluso estos centros tienen unas tolerancias visuales medias mucho

mayores que la diferencia de 1.66 unidades CIELAB del Par de Referencia. Son varias las causas de que las tolerancias visuales sean mucho mayores que la diferencia de color con la que se comparan. En primer lugar, a los observadores se le pidió que ajustaran el Par de Prueba hasta obtener una diferencia de color igual o mayor que la que observada en el Par de Referencia. En algunos trabajos previos también se han obtenido resultados similares al utilizar este método de comparación (Montag et al., 2000). Otra causa del desajuste es el hecho de que los valores de la Figura 4.3.1 corresponden al promedio de todos los factores excepto el centro, y en este promedio la mayoría de las muestras presentan textura. Por lo que comentamos en el Capítulo de “Revisión Bibliográfica”, parece ser que la presencia de textura aumenta el umbral de discriminación y, por tanto, las tolerancias visuales. Por último, también el efecto “crispening” (Fairchild, 1998; Xin et al., 2001) puede ser otra causa de los valores elevados de las tolerancias visuales. Al tener las muestras del Par de Referencia un valor de L^* muy próximo al del fondo (además de ser también acromáticas como el fondo), el efecto “crispening” hace que la diferencia de color observada en el Par de Referencia sea mayor a la diferencia de color calculada. A lo largo del Capítulo seguiremos investigando este resultado.

A continuación analizamos estadísticamente las diferencias entre los centros mediante las mismas comparaciones múltiples y pruebas a posteriori o post hoc que en el caso de los observadores, ya que tampoco hay homocedasticidad en las tolerancias respecto a los centros (cfr. Tabla 4.1.I). En la tabla siguiente reproducimos los resultados del test T3 de Dunnet. Las demás pruebas (test T2 de Tamhane y test de Games-Howell) confirman los resultados con valores muy parecidos.

CENTRO DE COLOR		
1 (Gris)	2	0.000
	3	0.000
	4	0.000
	5	0.930
2 (Rojo)	1	0.000
	3	1.000
	4	0.876
	5	0.000
3 (Amarillo)	1	0.000
	2	1.000
	4	0.961
	5	0.000
4 (Verde)	1	0.001
	2	0.876
	3	0.961
	5	0.000
5 (Azul)	1	0.930
	2	0.000
	3	0.000
	4	0.000

Tabla 4.3.I. Resultados del test T3 de Dunnet para los centros.

Según los resultados de las pruebas a posteriori hay dos grupos de centros, que corresponden a lo mostrado en la gráfica de medias de la Figura 4.3.1. Uno de los grupos está formado por los centros 1 y 5, a los que pertenecen las tolerancias más pequeñas. El otro grupo está formado por los centros 2, 3 y 4, con tolerancias medias mayores. Según los resultados de la Tabla 4.3.I estos grupos están muy marcados y claramente establecidos, como indican los valores altos de significación entre los centros de un mismo grupo, y los valores 0.000 entre centros de distintos grupos.

Es importante recordar que el centro 1, por ser acromático, es diferente del resto. Para este centro las tolerancias son todas con diferencias de color sólo en L^* , mientras que para el resto de los centros, en la Figura 4.3.1, están promediadas las tolerancias en claridad, croma y tono. Respecto al centro 5 no encontramos, a priori, ninguna causa para diferenciarse de los centros 2, 3 y 4, a no ser por tener el mayor ángulo de tono (cfr. Tabla 3.5.I), al estar situado en la zona de los azules. Sin embargo los umbrales CIELAB en la zona de los azules no son más pequeños. En el resto de este apartado analizaremos las diferencias observadas y trataremos de encontrar las causas de las mismas.

Como hemos comentado al final del apartado anterior, los resultados correspon-

den al promedio de los 5 observadores. También hemos promediado los dos sentidos, al no ser significativas las diferencias (cfr. Tabla 4.1.IV). Después de ambos promedios el número de tolerancias visuales es de 381.

Según el análisis estadístico inicial, Tabla 4.1.IV, la interacción entre centro y grosor no es significativa, por lo que tendremos el mismo comportamiento de las tolerancias para grosor 1 y grosor 4. Por tanto también hemos promediado las tolerancias correspondientes a los grosores 1 y 4, y en todas las gráficas que mostramos en este apartado los segmentos de error corresponden con la desviación estándar de este promedio. Observaremos que las barras de error no cambiarán las conclusiones que obtengamos, siendo igual de válidas para un grosor u otro.

En las gráficas de las Figuras 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 representamos para los 5 centros las tolerancias en L*, C* y h respectivamente, para los distintos tipos de textura. En todas las gráficas las tolerancias corresponden a muestras con superficie de textura del 50%.

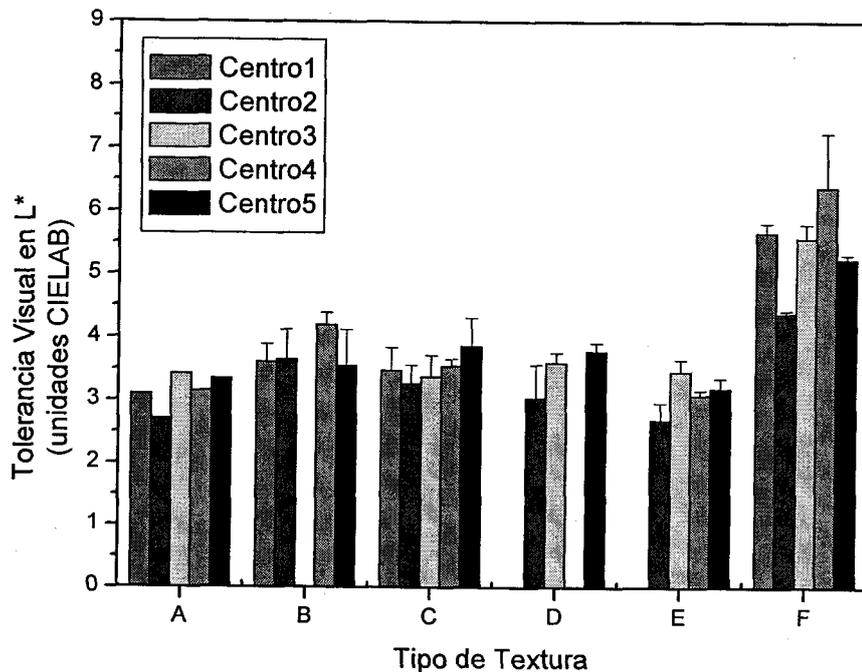


Figura 4.3.2. Tolerancias en L* de los 5 centros para todos los tipos de textura y superficie del 50%.

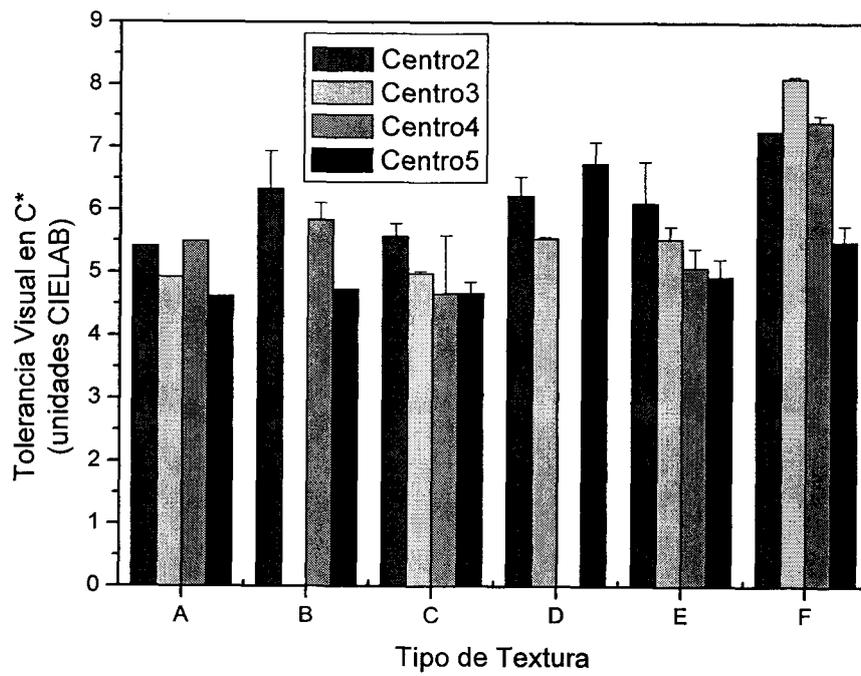


Figura 4.3.3. Tolerancias en C* de los 5 centros para todos los tipos de textura y superficie del 50%.

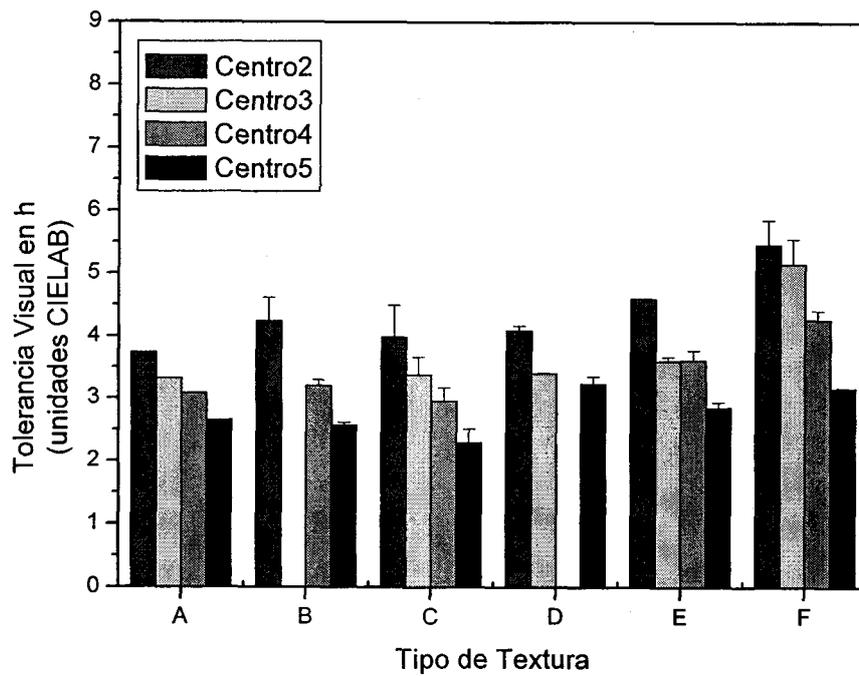


Figura 4.3.4. Tolerancias en h de los 5 centros para todos los tipos de textura y superficie del 50%.

En primer lugar observamos que no hay datos correspondientes a la textura tipo B (relativa con +10 unidades en L^*) con el centro 3 ni la textura tipo D (relativa con +15 unidades en C^*) con el centro 4. Como comentamos en el Capítulo 3 no pueden obtenerse, por limitaciones del dispositivo, esas texturas relativas para esos centros (cfr. Tabla 3.6.I). Obviamente tampoco aparecen las tolerancias en C^* ni h para el centro 1 que es acromático.

Para las tolerancias en claridad, Figura 4.3.2, los valores de la tolerancia son muy parecidos para los cinco centros, y no parece que sigan la pauta de la Figura 4.3.1. Los centros 1 (Gris) y 5 (Azul) tienen tolerancias parecidas al resto, no más bajas. El centro 2 (Rojo) tiene unos valores bajos de tolerancia en L^* comparados con la curva de la Figura 4.3.1. Por tanto cuando sólo consideramos tolerancias en L^* no parece que haya diferencias entre los centros. Como para las tolerancias en C^* o h , Figuras 4.3.3. y 4.3.4, no observamos esta pauta, creemos que puede deberse a una interacción entre centro y coordenada, que estudiaremos más adelante.

En el caso de tolerancias en croma o en tono, Figuras 4.3.3 y 4.3.4, sí se tiene el comportamiento de las medias globales de la Figura 4.3.1: el centro 2 (Rojo) tiene las tolerancias mayores, después el 3 (Amarillo), el 4 (Verde) y el centro 5 (Azul) es el que tiene las tolerancias menores. Este patrón de tolerancias de los centros lo observamos para todos los tipos de textura, salvo para la textura tipo D (relativa con +15 unidades en C^*) y tolerancias en C^* , donde el centro 5 tiene unos valores mayores. Esto puede significar que exista una interacción entre el tipo de textura D y el centro 5. Según la Tabla 4.1.IV la interacción entre centro y tipo es significativa. En la gráfica de medias de centro y tipo de la Figura 4.3.5 analizamos ésta y otras posibles interacciones.

Nos planteamos como posible causa de las diferencias entre las tolerancias CIELAB en croma y tono de los distintos centros, la no-uniformidad de CIELAB. En fórmulas de diferencia de color posteriores (CIE94 (CIE, 1995), CIEDE2000 (CIE, 2001)) las tolerancias en croma y tono aumentan con el croma. Conociendo las coordenadas de los centros (cfr. Tabla 3.5.I), los resultados son consistentes con el hecho de que los centros 2 (Rojo) y 3 (Amarillo) son los que tienen los valores de croma más altos. En el Apartado 4.4 volveremos de nuevo sobre esta tema.

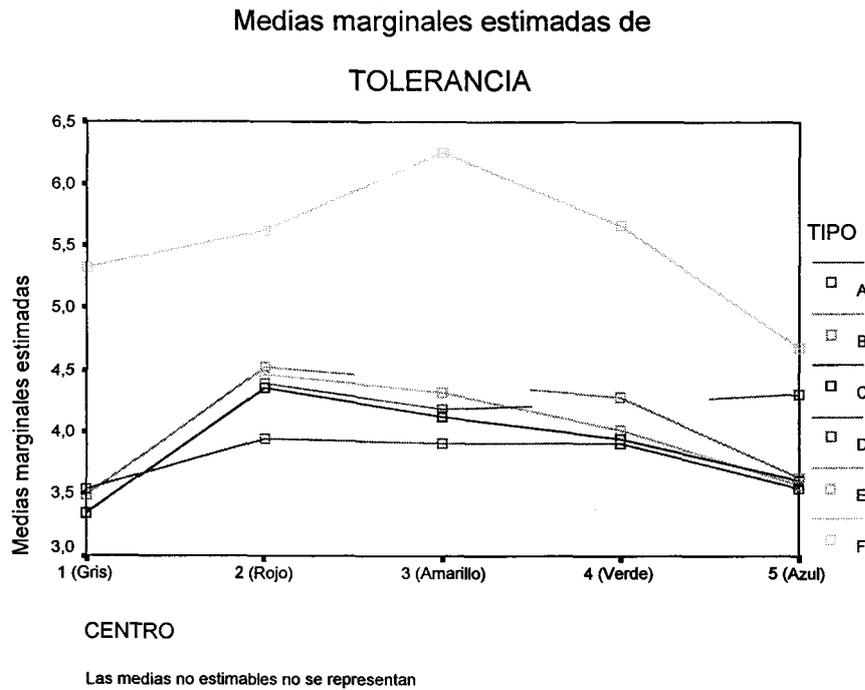


Figura 4.3.5. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y textura.

Las curvas, excepto para el tipo de textura D (relativa con +15 unidades en C^*), siguen el esquema de la Figura 4.3.1. Es evidente que la textura tipo F (absoluta) no interacciona con ninguno de los centros y tiene las mayores tolerancias. Observamos en la figura interacción entre el tipo A (muestras homogéneas) y el centro 1 (Gris), sin embargo esta interacción es muy pequeña. La interacción es más importante para la textura tipo D con el centro 5 (Azul), como ya habíamos observado. En los centros 2 (Rojo) y 3 (Amarillo) los valores de la tolerancia media para el tipo de textura D son muy parecidos al resto de las textura relativas. En el centro 4 (Verde) no es posible obtener la textura tipo D y en el centro 5 está próxima a la textura tipo F (absoluta), en lugar de ser menor que para los centros 2 y 3. En la Figura 4.3.3 ya advertimos este comportamiento en las tolerancias en croma, sin embargo para las tolerancias en claridad y en tono de las Figuras 4.3.2 y 4.3.4 no observamos esta interacción tan claramente.

Las Figuras 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 corresponden a muestras con superficie de textura del 50%. Tenemos que estudiar qué ocurre con las demás superficies de textura. En la Figuras 4.3.7, 4.3.8 y 4.3.9 representamos la tolerancia en L^* , C^* y h respectivamente, para texturas tipo C, D y F con todas las superficies de textura. En la Figura 4.3.8

observamos que para el centro 5 con textura tipo D la tolerancia en C* no es menor que para el resto de los centros. Este efecto se incrementa cuando aumenta la superficie de textura. En el caso de tolerancias en h, figura 4.3.9, para ninguna superficie de textura el centro 5 se aparta del esquema de la Figura 4.3.1.

En conclusión, en adelante consideraremos la interacción entre la textura tipo D y el centro 5 sólo para tolerancias en croma. La interacción es muy clara y más fuerte a medida que aumenta la superficie de textura. En principio no encontramos ninguna explicación a este resultado. La textura tipo D es una textura relativa en la que los puntos tienen 15 unidades más en croma que el fondo, y no hallamos ninguna razón para que su efecto sea diferente en el centro 5 (Azul). En el Apartado “Influencia de la Textura: Tipo, Superficie y Grosor” analizaremos en profundidad este resultado.

Al estudiar la influencia de los distintos tipos de textura ya hemos analizado, en algunos aspectos, qué ocurre en las tolerancias con las distintas superficies de textura. A continuación estudiamos directamente cómo son las tolerancias de los distintos centros cuando varía la superficie de textura. Nos interesa analizar si al cambiar la superficie de la textura las tolerancias siguen la curva de la Figura 4.3.1. En primer lugar representamos la gráfica de tolerancias medias para centro y superficie en la Figura 4.3.6.

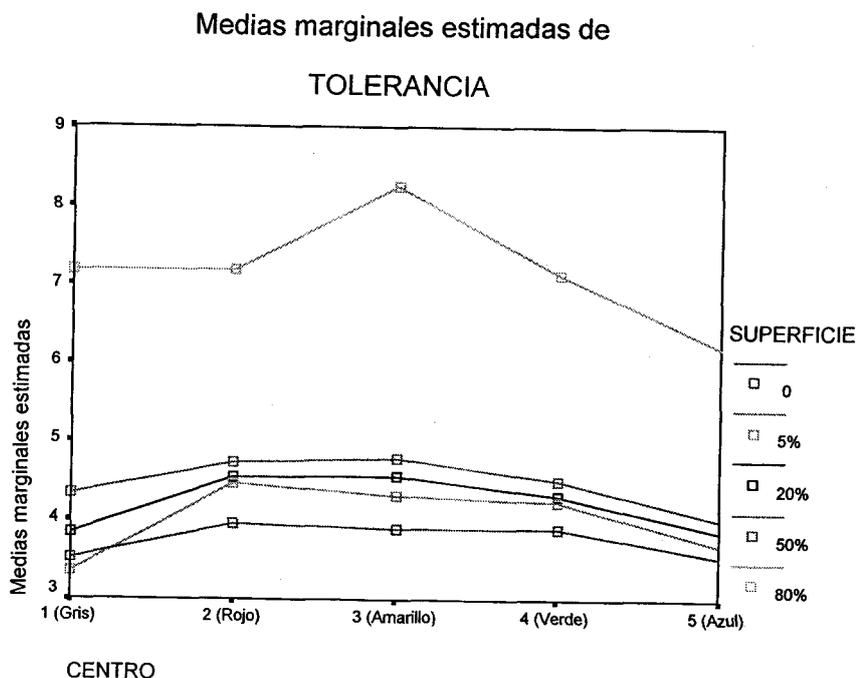


Figura 4.3.6. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y superficie.

La interacción centro y superficie es estadísticamente significativa, según los resultados de la Tabla 4.1.IV. Sin embargo, el comportamiento por centros de las tolerancias con las distintas superficies es muy claro: la interacción centro y superficie es despreciable, y por tanto no la vamos a considerar. Con todas las superficies de textura las tolerancias de los centros siguen la curva de la Figura 4.3.1. También observamos en la figura que en todos los centros, con la excepción del centro 1 (Gris), las tolerancias aumentan con la superficie de textura. Analizaremos más en profundidad estos resultados en el Apartado “Influencia de la Textura: Tipo, Superficie y Grosor”. En este Apartado nos interesa el hecho de que no interacciona centro y superficie, lo que significa que las tolerancias de los centros siguen el mismo patrón con todas las superficies de textura.

Para corroborar esta conclusión, en las Figuras 4.3.7, 4.3.8 y 4.3.9 representamos valores de la tolerancia, en L^* , C^* y h respectivamente, para distintas superficies de textura, para el tipo de textura F, como textura absoluta, y C y D representativas de texturas relativas en claridad (-10 unidades) y croma (+15 unidades). De esta forma podemos seguir analizando la interacción del centro 5 con el tipo D que hemos revelado anteriormente. Igual que en las gráficas anteriores, los datos corresponden al promedio de grosores y los segmentos de error a la desviación estándar entre los dos valores del grosor.

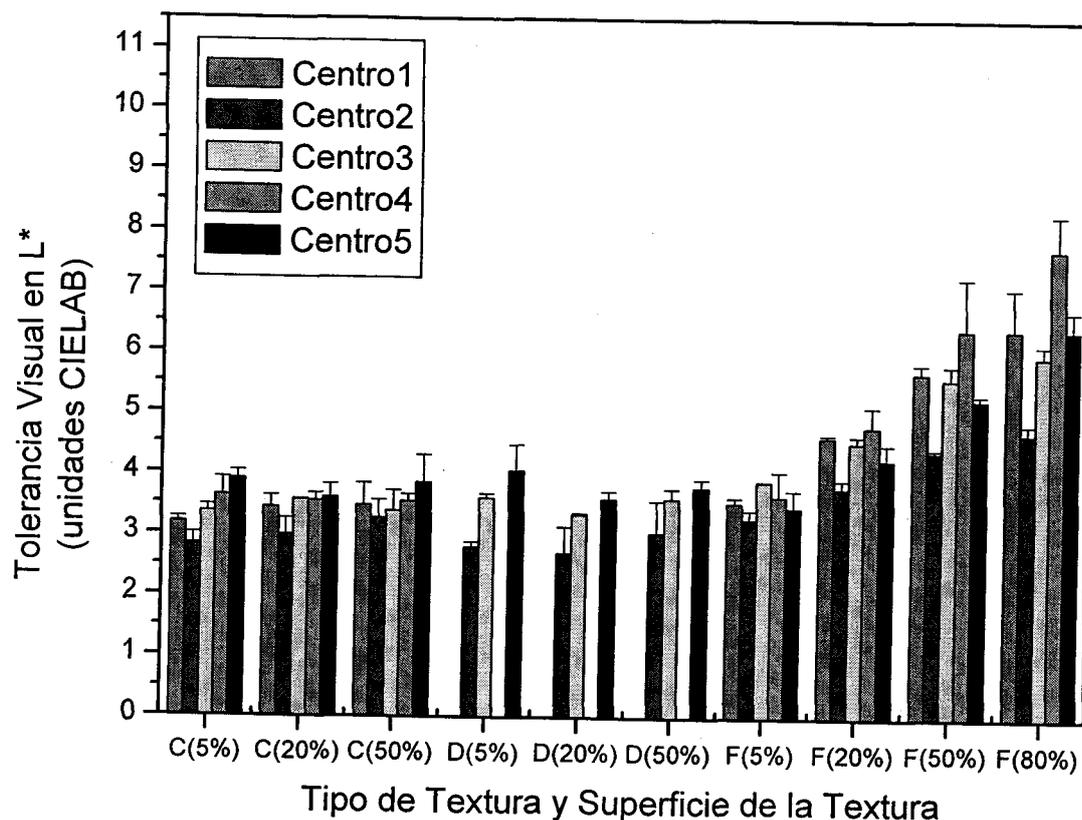


Figura 4.3.7. Tolerancias en L^* de los 5 centros para todas las superficies de textura de los tipos C, D y F.

Tal y como observábamos en la Figura 4.3.2 (que corresponde a superficie del 50%) las tolerancias en L^* son muy parecidas en todos los centros para todos los tipos de textura e independientemente del valor de la superficie de textura. Si acaso, se observan valores de la tolerancia ligeramente menores para el centro 2 (Rojo).

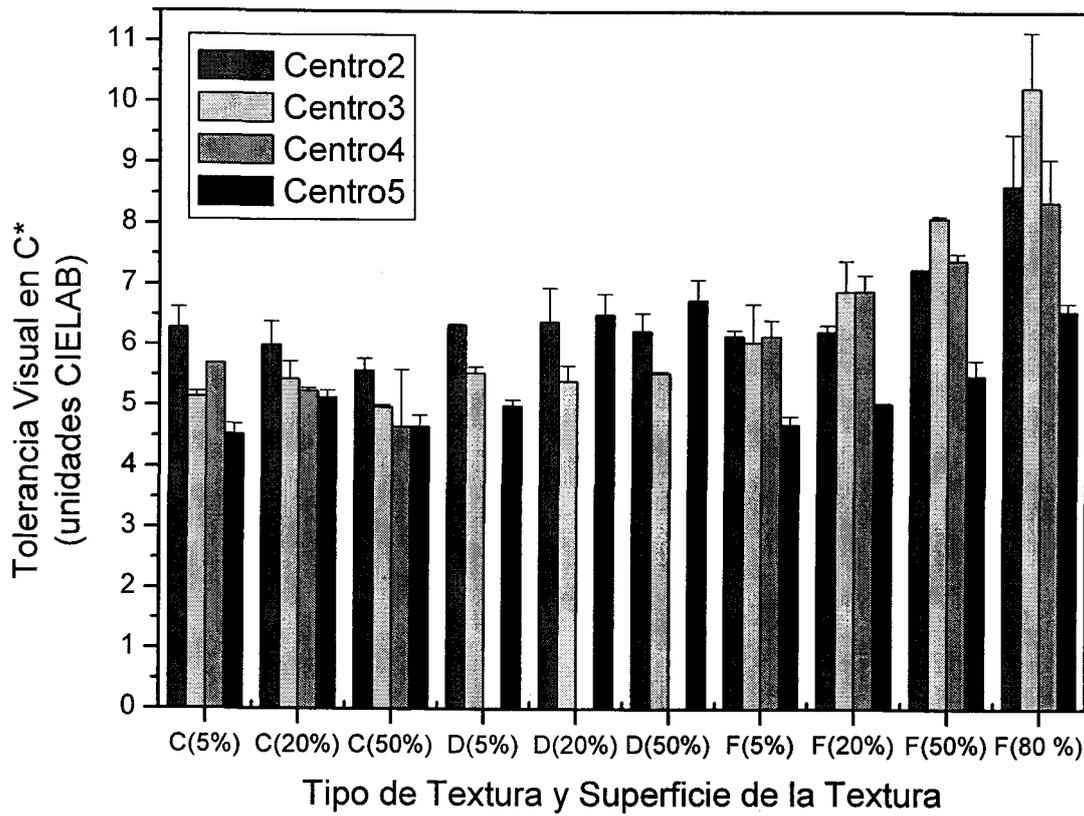


Figura 4.3.8. Tolerancias en C* de los 5 centros para todas las superficies de textura de los tipos C, D y F.

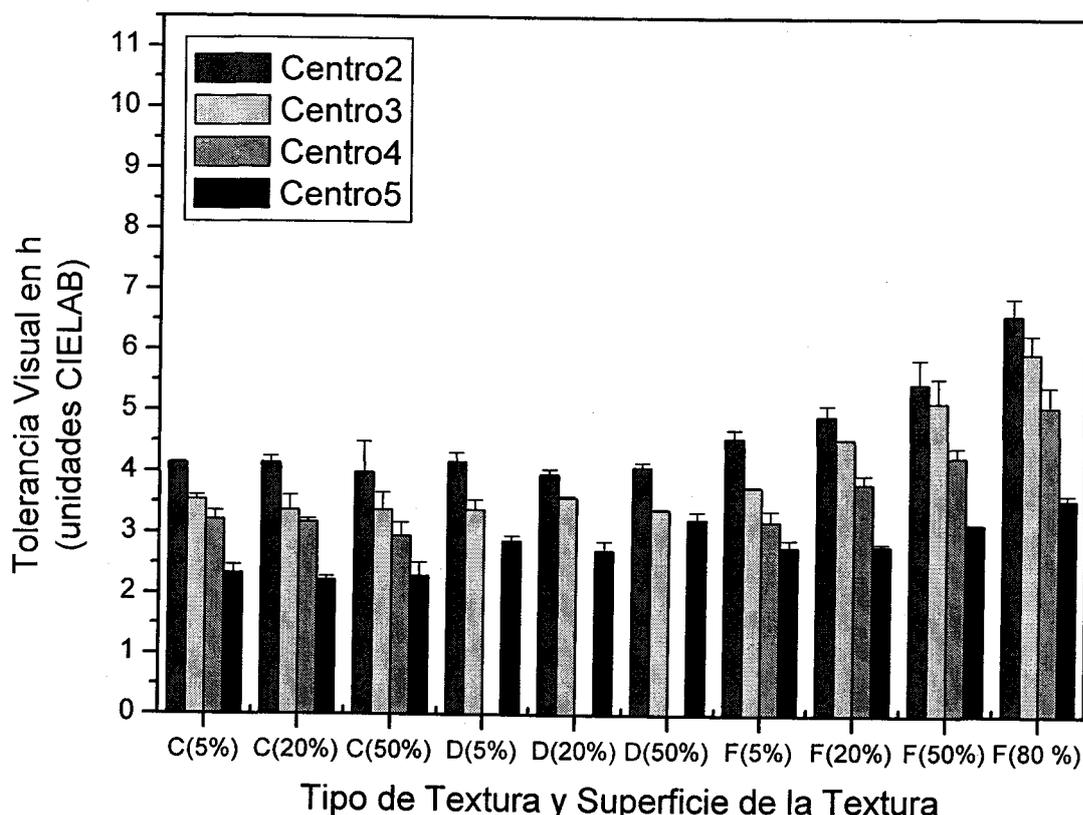


Figura 4.3.9. Tolerancias en h de los 5 centros para todas las superficies de textura de los tipos C, D y F.

Comparando las tolerancias de los centros, en las distintas superficies de textura observamos que no hay diferencias. Es decir, las tolerancias siguen el mismo comportamiento independientemente de la superficie de textura, como ya habíamos probado en la Figura 4.3.6. En las tolerancias en croma, Figura 4.3.8, el centro 5 (Azul) en la textura tipo D (relativa con +15 unidades en C*) tiene valores mayores que en el resto de los centros, y este efecto es más fuerte a medida que aumenta la superficie de la textura, como ya hemos comentado anteriormente. No pensamos que este resultado se deba a una interacción de la superficie de textura con el centro 5. Más bien la interacción es entre el tipo de textura D y el centro 5, y la superficie de textura sólo modula la interacción.

Nos falta analizar el comportamiento de las tolerancias por centros en función de que las tolerancias sean en L*, C* o h. La interacción entre centro y coordenada es estadísticamente significativa según la Tabla 4.1.IV. Conforme a los resultados que hemos ido obteniendo hasta ahora, intuimos que la interacción entre estos dos factores no es despreciable. En primer lugar representamos la gráfica de tolerancias medias para

centro y coordenada en la Figura 4.3.10.

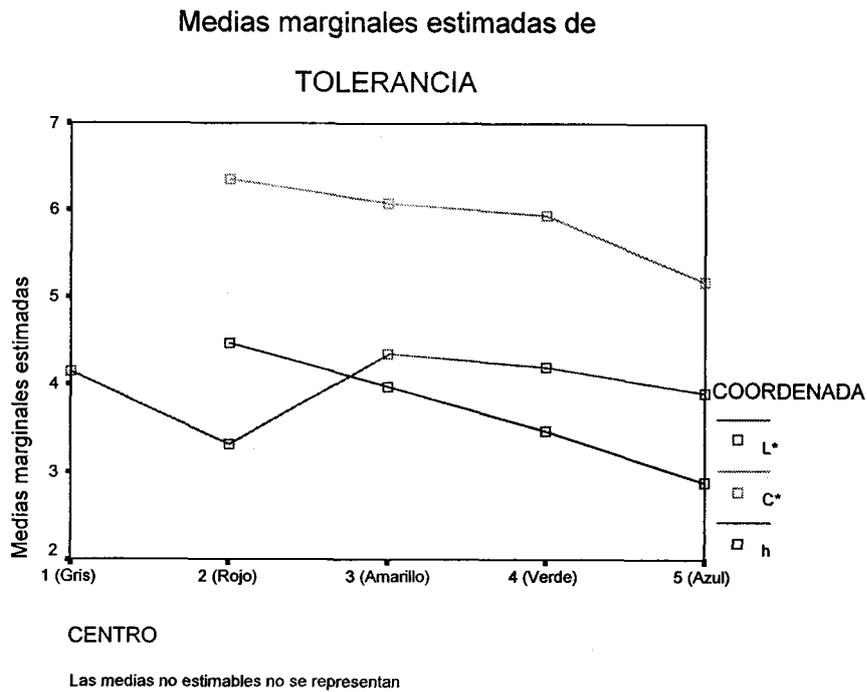


Figura 4.3.10. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y coordenada.

Llama la atención que las tolerancias en L^* no siguen el comportamiento global de los centros de la Figura 4.3.1, como ya habíamos observado en las Figuras 4.3.2 y 4.3.7. Según la gráfica de la Figura 4.3.10 existe interacción entre la coordenada L^* y el centro 2 (Rojo), pues la tolerancia media en L^* es más pequeña de lo que correspondería si el centro siguiera la curva de la Figura 4.3.1. Sin embargo, como observamos, para este centro la tolerancia en L^* es incluso menor que la tolerancia en h . En adelante tendremos en cuenta la interacción del centro 2 con la coordenada L^* . Este resultado puede explicarse por la interacción del centro 2 (Rojo) con el fondo, mediante el efecto “crispening” (Coates et al., 1981; Luo et al., 1987a; Fairchild, 1998; Xin et al., 2001). El centro 2 tiene el valor más bajo de L^* (cfr. Tabla 3.5.I), próximo a la claridad del fondo y a la claridad de las muestras del Par de Referencia (cfr. Tabla 3.3.I). El efecto “crispening” hace que aumente la diferencia de color percibida, y consecuentemente disminuya la tolerancia visual. Más adelante abordaremos nuevamente esta cuestión.

Para el resto de los centros las tolerancias en L^* siguen suavemente la tendencia de la curva de la Figura 4.3.1. Esto nos indica que las diferencias entre los centros de la

Figura 4.3.1 se deben sobre todo a las diferencias, entre centros, de las tolerancias en C^* y h , que son más parecidas a la curva de la Figura 4.3.1.

Podemos analizar las diferencias por centros entre las tolerancias en L^* , C^* y h mediante las gráficas de las Figuras 4.3.2, 4.3.3, y 4.3.4; 4.3.7, 4.3.8 y 4.3.9. En estas gráficas representamos las tolerancias en L^* , C^* y h respectivamente en cada tríada. La primera tríada corresponde a todos los tipos de textura y superficie del 50%, y la segunda tríada a todas las superficies para las texturas tipo C, D y F. Observamos que las tolerancias en L^* no siguen el perfil de la Figura 4.3.1, como ya hemos comentado. Este perfil se tiene muy claro para las tolerancias en h . En el caso de las tolerancias en C^* se sigue excepto para texturas tipo D (por la interacción entre el tipo de textura D y el centro 5 ya comentada). También observamos en las figuras 4.3.2 y 4.3.7, correspondientes a tolerancias en L^* , que para el centro 2 las tolerancias son más bajas, por la interacción entre el centro 2 y la coordenada L^* , que hemos explicado en el párrafo anterior.

Por último confirmamos, en las gráficas de las Figuras 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.7, 4.3.8 y 4.3.9, que efectivamente las conclusiones obtenidas son válidas para el grosor 1 y 4. Además en todas las figuras las barras de error son muy pequeñas, siendo un poco mayores para el centro 4 (Verde) y la textura F (absoluta), sobre todo con superficie de 50% y 80%, pero no en todos los casos.

Del estudio de los centros podemos concluir que los resultados agrupan a los centros en dos conjuntos muy marcados. Este agrupamiento se debe casi exclusivamente a las diferencias en las tolerancias en C^* y h . El comportamiento de las tolerancias por centros es el definido en la Figura 4.3.1 y es independiente de la superficie de la textura y por supuesto del grosor de la textura. Sin embargo, respecto al tipo de textura y coordenada de la tolerancia, existen interacciones importantes que hay que tener en cuenta. No podemos promediar para todos los centros, pues no todos tienen el mismo comportamiento, a causa de las interacciones. Para las tolerancias en L^* el centro 2 tiene unos valores más bajos de lo esperado, incluso menores que los de tolerancias en tono, debido probablemente a un efecto “crispening”. Para el centro 5 con textura tipo D se tienen unos valores de la tolerancia en C^* mayores de lo esperado por la tendencia del resto de los centros.

4.4. Análisis de las Coordenadas CIELAB de las Tolerancias

En este Apartado vamos a estudiar qué diferencias existen en las tolerancias visuales, dependiendo de si la diferencia de color del Par de Prueba se debe fundamentalmente (en más del 75% sobre la diferencia de color total CIELAB) a una diferencia en L^* , en C^* o en h entre las dos muestras del Par de Prueba, lo que lleva a tolerancias calculadas como ΔL^* , ΔC^* o ΔH^* respectivamente.

En los apartados anteriores, al analizar las interacciones con el factor coordenada de los observadores o los centros, ya hemos observado diferencias entre las tolerancias en L^* , C^* y h . En todos los análisis hemos advertido que, de forma global, las tolerancias en croma son mayores que las otras dos. Lo observamos por ejemplo comparando las Figuras 4.2.16, 4.2.17 y 4.2.18 o también 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4. También en las gráficas de medias donde uno de los factores es la coordenada, Figuras 4.2.26 y 4.3.10, observamos este resultado. En la gráfica de tolerancias medias para la coordenada de la figura siguiente, resulta aún más evidente la diferencia entre las tolerancias en C^* y las tolerancias en L^* o en h . La diferencia es de 2 unidades CIELAB aproximadamente. Entre las tolerancias en L^* y en h la diferencia es muy pequeña.

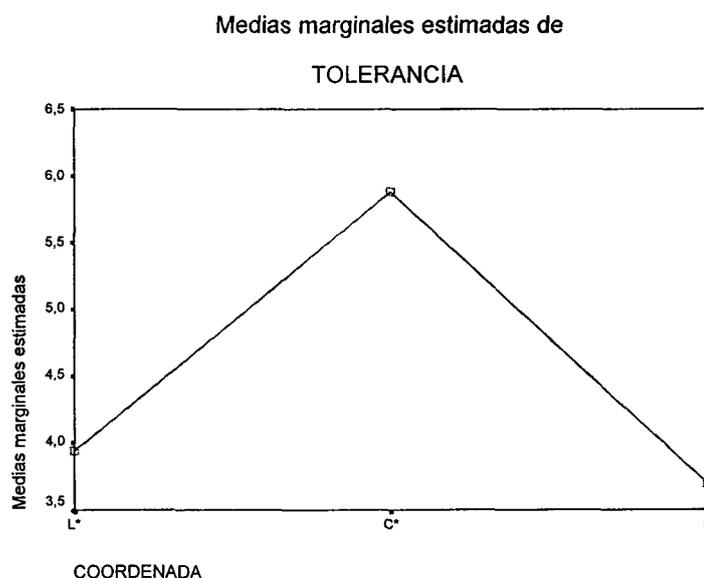


Figura 4.4.1. Gráfica de tolerancias visuales medias por coordenadas.

Vamos a realizar las mismas pruebas de comparaciones múltiples que hemos

hecho para los factores observador y centro, pues tampoco hay igualdad de varianzas en las tolerancias respecto del factor coordenada (cfr. Tabla 4.1.I). En la Tabla 4.4.I mostramos los resultados del test de Tamhane. Los resultados del test T3 de Dunnet y el test de Games-Howell son prácticamente idénticos.

COORDENADA (CROMA)		
L*	C*	0.000
	h	0.292
C*	L*	0.000
	h	0.000
h	L*	0.292
	C*	0.000

Tabla 4.4.I. Resultados del test T3 de Dunnet para las coordenadas.

Ciertamente las diferencias entre las tolerancias en L* y en h no son estadísticamente significativas, mientras que las tolerancias en C* sí lo son respecto a L* y h. Este resultado no nos sorprende, ya que hemos calculado las tolerancias visuales en unidades CIELAB. Está ampliamente estudiado que para la métrica euclídea de CIELAB se tiene un incremento en las tolerancias o umbrales calculados cuando la diferencia de color es en croma o tono y el C* del par es alto. En las fórmulas de diferencias de color propuestas por la CIE posteriores a CIELAB se corrige la tolerancia en croma con el croma. Así ocurre en CIE94 (CIE, 1995), cuya corrección se mantiene en CIEDE2000 (CIE, 2001), donde se añaden otras. A priori pensamos que la corrección de las diferencias de color en croma con el croma es suficiente para eliminar las diferencias entre las tolerancias en croma, claridad y tono. En la última sección de este apartado analizaremos ampliamente este asunto y calcularemos las tolerancias corregidas.

Antes de aplicar esta corrección comprobaremos que se tiene el mismo comportamiento de la Figura 4.4.1 para las tolerancias, independientemente del resto de los factores. Es decir, esperamos que no interaccionen el factor coordenada y el resto de los factores más allá de las interacciones que ya hemos encontrado en el apartado anterior.

Según los resultados de la Tabla 4.1.IV la interacción entre coordenada y grosor no es ni siquiera significativa. Según la Figura 4.2.26, en el Apartado 4.2, consideramos despreciable la interacción entre observador y coordenada. En consecuencia hemos promediado los resultados para todos los observadores y para los grosores, como ya

hicimos en el apartado anterior.

Respecto a la interacción entre centro y coordenada, Figura 4.3.10, en el apartado anterior concluimos que hay que considerar como especial el caso del centro 2 (Rojo) y la coordenada L*. En la Figura 4.4.2 representamos un ejemplo de la tolerancia en L*, C* y h para todos los centros. Los resultados corresponden a muestras homogéneas.

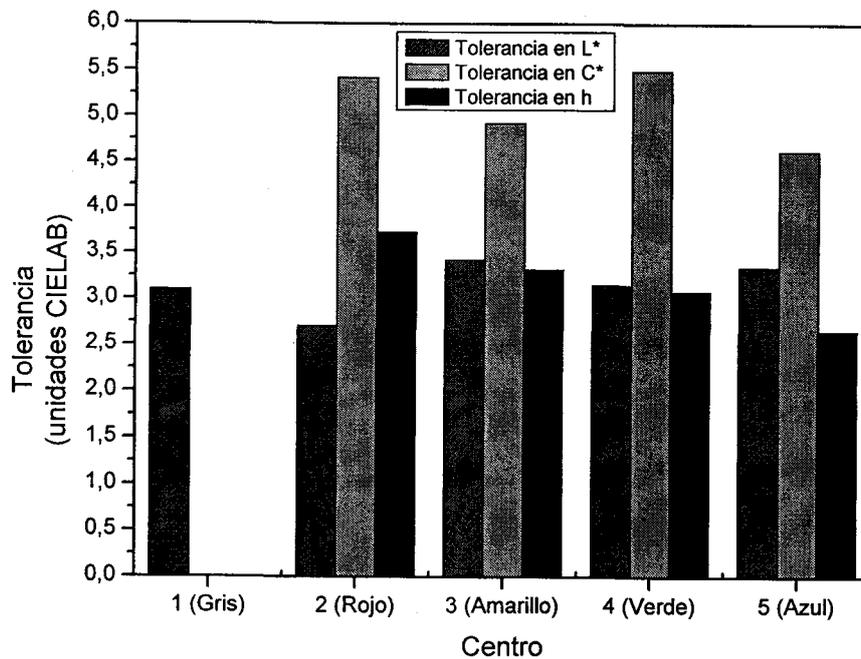


Figura 4.4.2. Tolerancias en L*, C* y h para todos los centros y muestras homogéneas.

Efectivamente observamos que la tolerancia en L* es especialmente baja para el centro 2. También que la tolerancia en C* es mucho mayor que las otras dos en todos los centros.

Nos falta por estudiar la interacción entre coordenada y tipo de textura, y entre coordenada y superficie. Ambas son estadísticamente significativas (cfr. Tabla 4.1.IV), pero estudiaremos si son importantes o son interacciones que podamos despreciar. En la gráfica de tolerancias visuales medias para coordenada y tipo de la Figura 4.4.3 comprobamos que las interacciones son muy pequeñas.

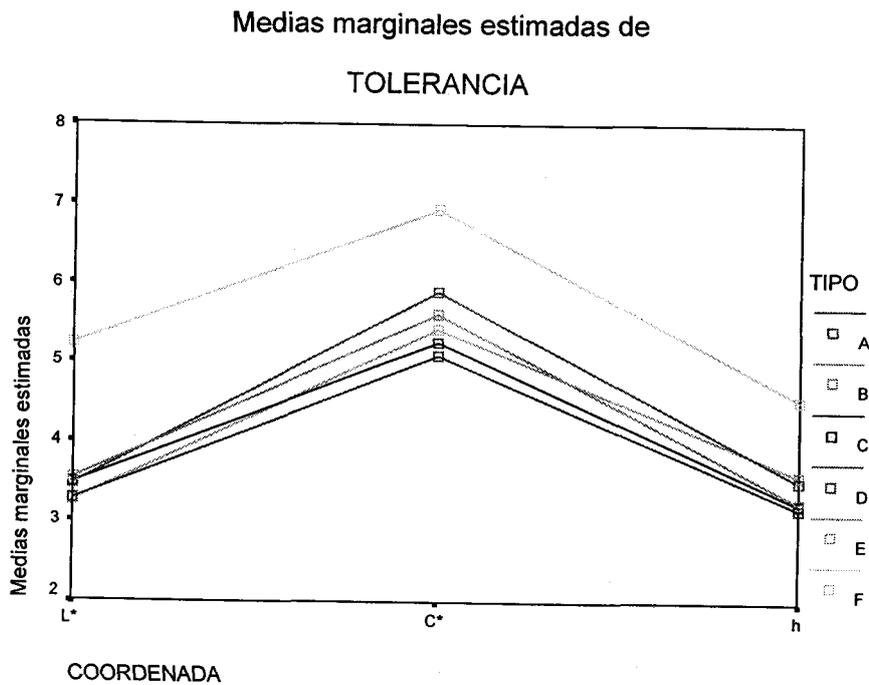


Figura 4.4.3. Gráfica de tolerancias visuales medias para coordenada y tipo.

Para todos los tipos de textura las tolerancias son mayores en croma y siguen la curva de la Figura 4.4.1. Para la textura tipo F (textura absoluta) es evidente que no hay interacción. Para el resto de los tipos de textura las interacciones son muy pequeñas y despreciables.

En las gráficas de las Figuras 4.4.4 y 4.4.5 representamos las tolerancias en L^* , C^* y h para todos los tipos de textura. Hemos promediado las distintas superficies de textura y las barras de error corresponden con la desviación estándar del promedio. En la Figura 4.4.4 los resultados corresponden al centro 2 (Rojo), que interacciona con la coordenada L^* , y en la Figura 4.4.5 al centro 5 (Azul), que interacciona con el tipo de textura D (relativa con +15 unidades en C^*) para tolerancias en C^* .

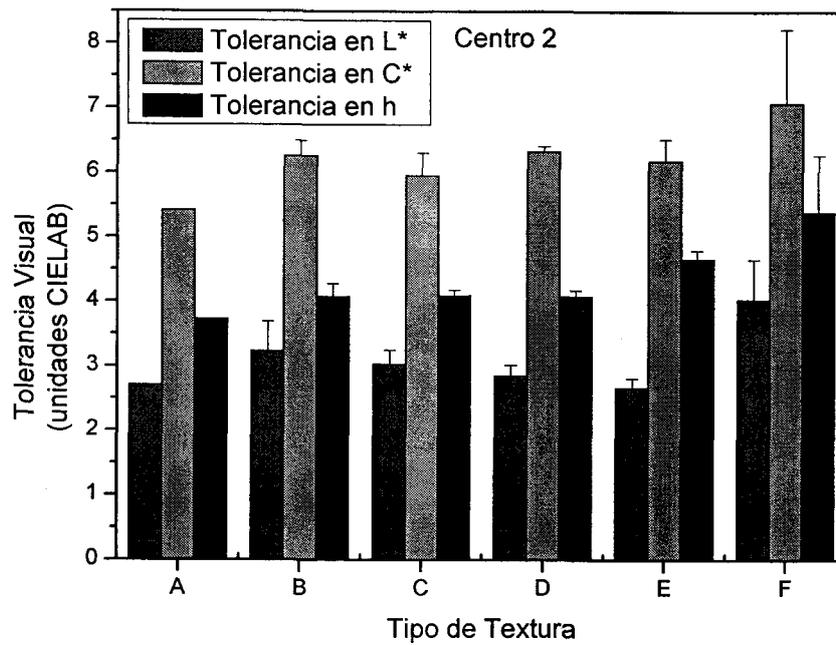


Figura 4.4.4. Tolerancias en L*, C* y h para todos los tipos de textura en el centro 2.

Observamos que, en todos los tipos de textura, las tolerancias en L* son más pequeñas comparativamente con lo que ocurre en el resto de los centros, por ejemplo el centro 5 (figura siguiente).

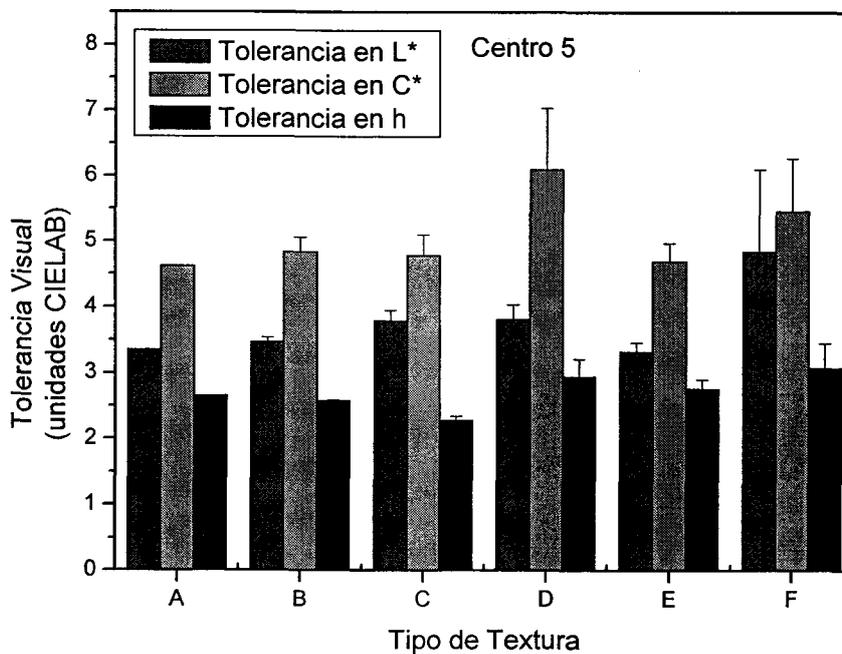


Figura 4.4.5. Tolerancias en L*, C* y h para todos los tipos de textura en el centro 5.

Aunque no es un resultado de este apartado, sino del Apartado “Análisis de los Centros”, claramente observamos que, para el centro 5, la tolerancia en croma para el tipo de textura D es mayor que en el resto de tipos de textura.

Además de volver a observar las interacciones comentadas, lo que nos interesa subrayar es que las tolerancias en croma son mayores que en L^* o h para todos los tipos de textura. Estas gráficas confirman que la interacción coordenada y tipo es despreciable, tal y como hemos explicado anteriormente. En el resto de los centros se tienen resultados muy parecidos, y siempre siguiendo el esquema de la Figura 4.4.1, pues salvo las interacciones comentadas, no hay interacción entre coordenada y centro ni entre coordenada y tipo.

En cuanto a los segmentos de error, en general las desviaciones estándar entre las distintas superficies de textura son muy pequeñas. Para el tipo de textura F (absoluta) son mayores, pues promediamos superficies de 5%, 20%, 50% y 80%, mientras que para las texturas relativas (B, C, D y E) promediamos superficies de 5%, 20% y 50%. Sabemos, por la Tabla 4.1.IV, que la interacción entre coordenada y superficie es significativa. Sin embargo, en base a los segmentos de error de las gráficas, podemos intuir que en general será pequeña la influencia de la superficie de textura sobre el comportamiento de las tolerancias en cada coordenada. No obstante, para la textura absoluta (tipo F) y según los segmentos de error, podrían no ser válidas las conclusiones que hemos comentado anteriormente. Para el centro 5 con la textura tipo D y tolerancias en C^* también se tiene una barra de error mayor. Aclaremos este punto analizando la posible interacción entre coordenada y superficie. En la figura siguiente representamos la gráfica de tolerancias medias para coordenada y superficie.

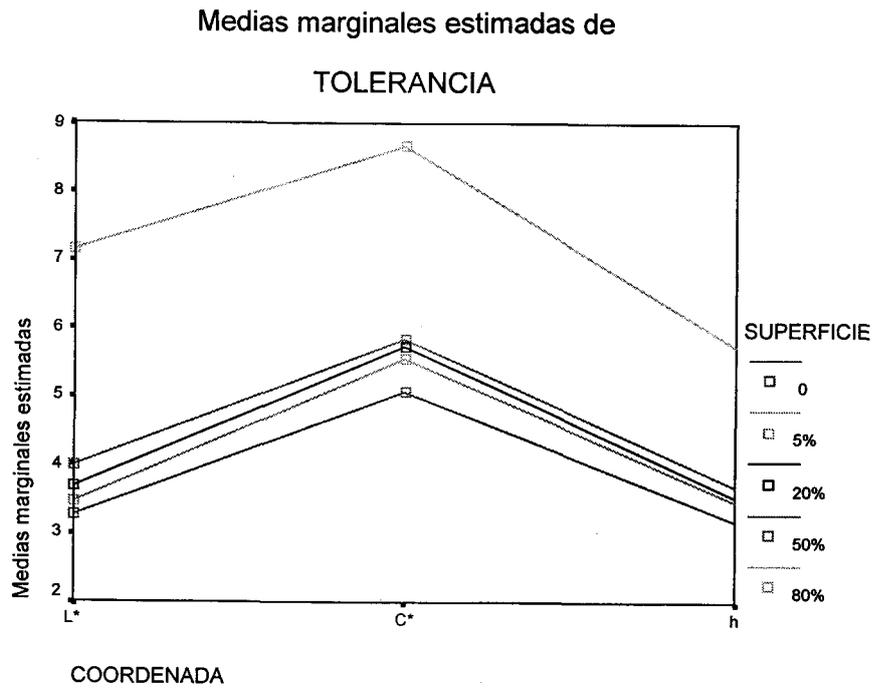
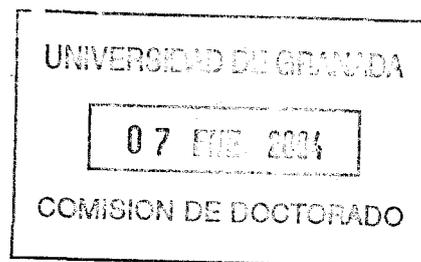


Figura 4.4.6. Gráfica de tolerancias visuales medias para coordenada y superficie.

En efecto observamos de forma muy clara que, en las tolerancias medias globales, la interacción entre coordenada y superficie es totalmente despreciable. La curva para cada superficie reproduce la curva de la Figura 4.4.1 y no se cruzan entre ellas. En la Figura 4.4.7 representamos las tolerancias en las 3 coordenadas para todas las superficies del tipo de textura F (absoluta) y el tipo de textura C (relativa con -10 unidades en C*), como ejemplo de textura relativa. Los resultados corresponden al centro 3 (Amarillo).



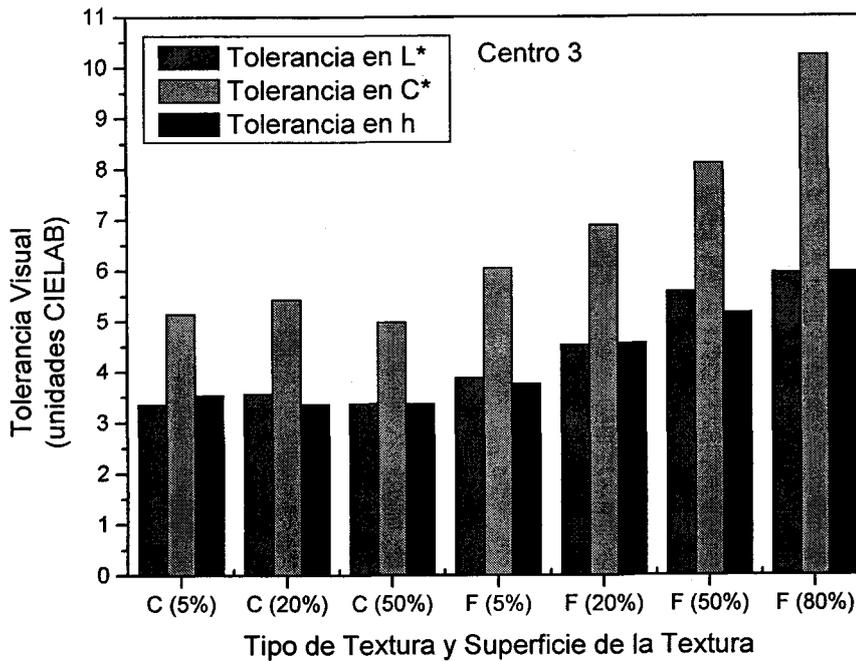


Figura 4.4.7. Tolerancias en L^* , C^* y h para los tipos de textura C y F, todas las superficies y el centro 3.

Observamos claramente que no existe interacción entre los factores coordenada y superficie. La tolerancia en croma es mayor que las tolerancias en L^* y h que son prácticamente iguales, independientemente de la superficie que ocupa la textura. Para el resto de tipos de textura los resultados son similares, pues no hay interacción entre coordenada y tipo. Para el resto de los centros también se tienen resultados similares, salvo el centro 2 (Rojo) que interacciona con la coordenada L^* . Este caso lo representamos en la Figura 4.4.8.

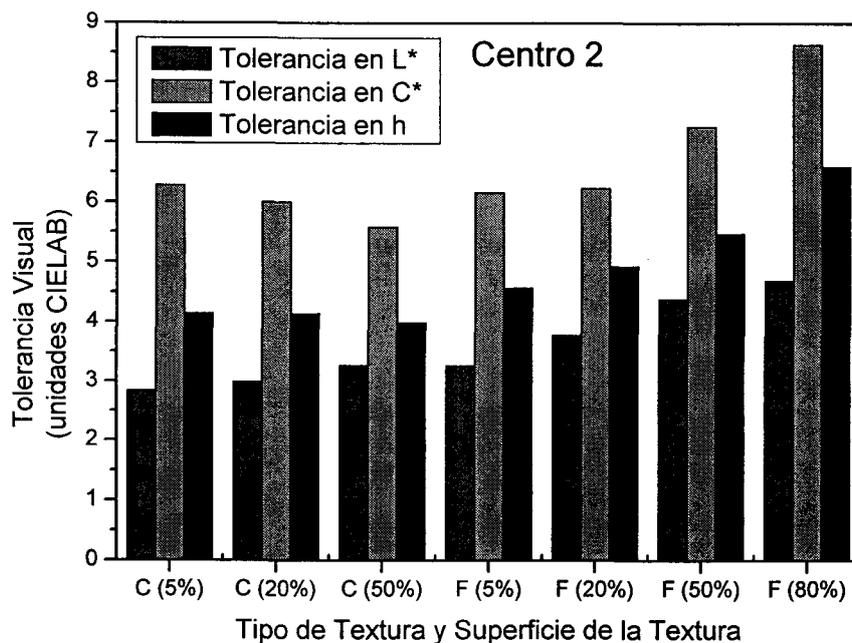


Figura 4.4.8. Tolerancias en L*, C* y h para los tipos de textura C y F, todas las superficies y el centro 2.

En la gráfica de la Figura 4.4.8 confirmamos que, para el centro 2 (Rojo), la tolerancia en L* es más baja de lo que ocurre en los demás centros (cfr. Figura 4.4.2), como hemos explicado ampliamente. Este efecto se tienen para todos los tipos de textura tal y como hemos observado en la Figura 4.4.4. Además esta interacción ocurre para todas las superficies de textura, como observamos en la Figura 4.4.8. Por tanto concluimos que también para el centro 2 el comportamiento de las tolerancias es el mismo en todas las superficies de textura, aunque por supuesto distinto del resto de los centros. Como hemos explicado estos resultados se explican por el efecto “crispning”.

Corrección de las diferencias de color en croma y en tono

Pensamos que las diferencias entre las tolerancias en croma y las tolerancias en claridad y tono de la Figura 4.4.1 se deben principalmente a la no-uniformidad del sistema CIELAB. Para solucionar la heterogeneidad de CIELAB se han intentado definir espacios de color más uniformes (Comité Técnico CIE TC 1-55). Por otro lado, también se han ido desarrollando distintas fórmulas de diferencias de color que ajusten mejor los resultados experimentales (CIE94 (CIE, 1995), CMC (Clarke et al., 1984), BDF (Luo et al., 1987a), CIEDE2000 (CIE, 2001)), manteniendo el espacio de color CIELAB. Con

estas nuevas métricas nuestras tolerancias visuales en claridad, croma o tono deben ser en teoría iguales para cada textura, pues todas se han obtenido por comparación con una misma diferencia de color constante (Par de Referencia).

De entre las fórmulas desarrolladas posteriormente a CIELAB destacan especialmente dos: CIE94 (CIE, 1995) y CIEDE2000 (CIE, 2001). En estas nuevas fórmulas, algunas de las correcciones a las fórmula de diferencia de color CIELAB se han introducido mediante los factores de ponderación, denominados S_L , S_C y S_H . En CIE94 aparece una de las correcciones más importantes a la fórmula de diferencia de color de CIELAB; es la corrección de la diferencia de color en croma (ΔC^*) con el croma mediante el factor de ponderación S_C . CIE94 también introduce una corrección de la diferencia de color en tono (ΔH^*) con el croma, mediante S_H . En CIEDE2000 la corrección de ΔC^* permanece como en CIE94. La corrección de ΔH^* se completa con un término que depende del ángulo de tono. Además en CIEDE2000 se incluyen otras correcciones que en este trabajo no nos interesan por ahora. En el Apéndice 3 reproducimos las ecuaciones que definen cada una de estas dos fórmulas de diferencias de color.

En nuestros resultados, con las tolerancias calculadas en unidades CIELAB, no encontramos diferencias estadísticamente significativas entre las tolerancias en claridad y tono (cfr. Tabla 4.4.I). No nos sorprende este resultado, que contradice la corrección de las diferencias de color en tono que hemos comentado en el apartado anterior. Según recientes estudios que hemos realizado, y que aún no hemos publicado, la corrección de ΔH^* es una corrección menos importante, aunque significativa, que la corrección de ΔC^* , y no hemos diseñado nuestro experimento para detectarla. La corrección de la diferencia de color en croma es la más importante y en nuestros resultados se pone de manifiesto.

Vamos a calcular las tolerancias visuales obtenidas por los observadores utilizando la métrica CIE94, y analizaremos las tolerancias obtenidas. En principio esperamos que se reduzcan las diferencias entre las tolerancias en L^* , C^* y h . Aplicando el mismo modelo estadístico a las nuevas tolerancias calculadas, hemos calculado de nuevo la significación estadística de los factores, y las interacciones entre ellos, que considerábamos en la Tabla 4.1.IV. Aunque no vamos a entrar en detalle en los resultados de la validación del modelo, los resultados de la validación son muy parecidos a los que

obteníamos para las tolerancias CIELAB en el Apartado “Análisis Estadístico Inicial”. Respecto a la hipótesis de homocedastidad los resultados globales, así como para cada uno de los factores, indican que no hay igualdad de varianzas para ninguno de los factores. Los resultados estadísticos de los tolerancias CIE94 se muestran en la tabla siguiente.

Modelo corregido	17086.881	140	122.049	217.124	0.000
Intercept	29032.573	1	29032.573	51648.570	0.000
OBSERVADOR	2444.813	4	611.203	1087.323	0.000
CENTRO	55.438	4	13.860	24.656	0.000
COORDENADA	2043.875	2	1021.938	1818.014	0.000
TIPO	454.886	4	113.722	202.309	0.000
SUPERFICIE	655.143	3	218.381	388.497	0.000
GROSOR	15.165	1	15.165	26.978	0.000
OBSERVADOR * CENTRO	147.806	16	9.238	16.434	0.000
OBSERVADOR * COORDENADA	757.028	8	94.628	168.343	0.000
OBSERVADOR * TIPO	276.502	16	17.281	30.743	0.000
OBSERVADOR * SUPERFICIE	236.964	12	19.747	35.130	0.000
OBSERVADOR * GROSOR	3.066	4	0.767	1.364	0.244
CENTRO * COORDENADA	576.476	6	96.079	170.924	0.000
CENTRO * TIPO	93.339	12	7.778	13.837	0.000
CENTRO * SUPERFICIE	12.889	12	1.074	1.911	0.029
COORDENADA * TIPO	177.200	8	22.150	39.405	0.000
COORDENADA * SUPERFICIE	159.107	6	26.518	47.175	0.000
TIPO * SUPERFICIE	231.979	8	28.997	51.586	0.000
SUPERFICIE * GROSOR	15.224	3	5.075	9.028	0.000
Error	4252.420	7565	0.562		
Total	80308.374	7706			
Total corregido	21339.301	7705			

r cuadrado = 0.801 (r cuadrado corregido = 0.797)

Tabla 4.4.II. Tabla ANOVA de las tolerancias en unidades CIE94.

Respecto a la Tabla 4.1.IV ahora la interacción entre observador y grosor no es significativa. De todas formas con las tolerancias CIELAB habíamos desestimado esa interacción, en el Apartado “Análisis de los Observadores”. Aunque no mostramos los resultados hemos probado que las diferencias no son significativas para el sentido ni las interacciones centro*grosor, coordenada*grosor y tipo*grosor, como ocurría para las tolerancias CIELAB (cfr. Tabla 4.1.II).

Vamos a analizar las tolerancias en unidades CIE94 tal y como hemos hecho para las tolerancias CIELAB. Las diferencias entre observadores se mantienen como en la

Figura 4.2.15, como observamos en la Figura 4.4.9. Comparando las dos gráficas observamos que las diferencias se reducen de 3 unidades CIELAB a 2 unidades CIE94.

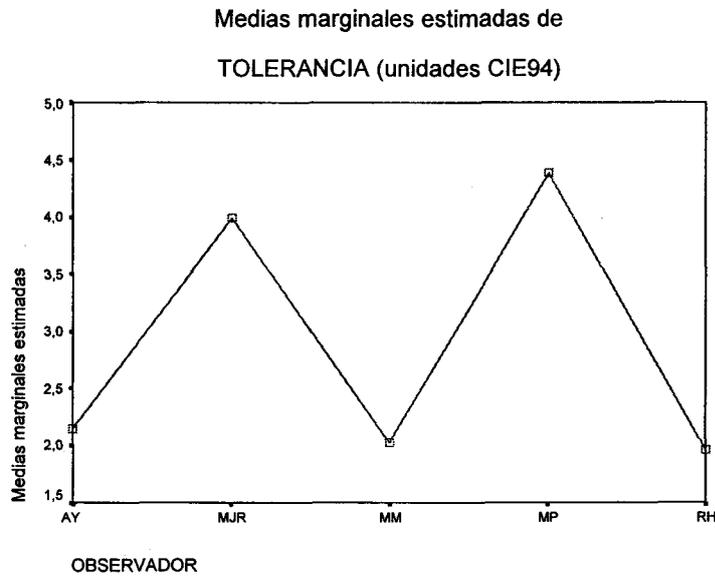


Figura 4.4.9. Gráfica de tolerancias visuales medias por observadores.

Las interacciones entre observador y centro, tipo, superficie y grosor tienen la misma forma en unidades CIE94 a las obtenidas en unidades CIELAB. La interacción entre observador y coordenada es la que en principio puede cambiar. En la figura siguiente representamos la gráfica de tolerancias visuales medias para la interacción entre observador y coordenada.

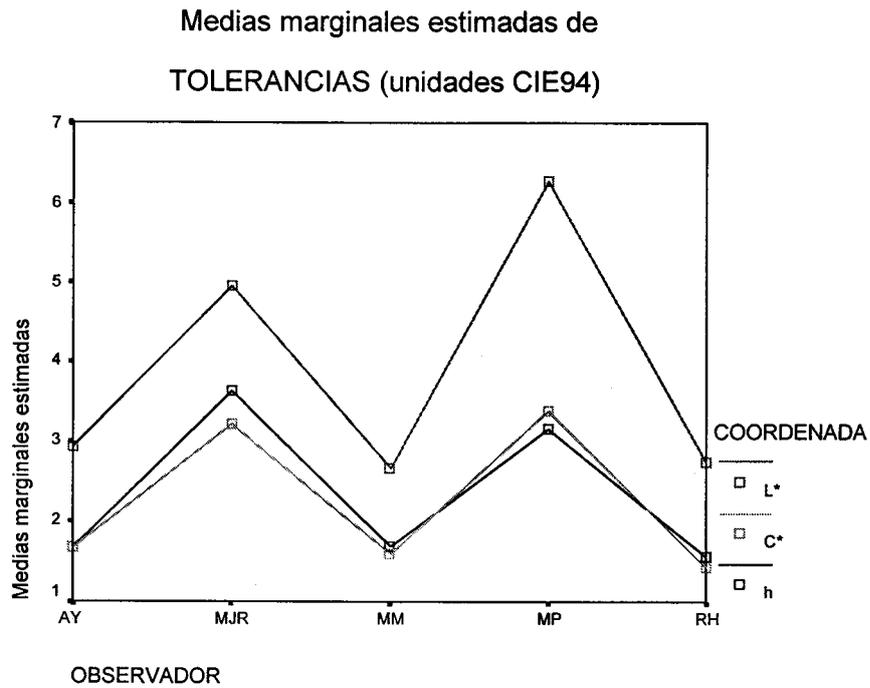


Figura 4.4.10. Gráfica de tolerancias visuales medias para observador y coordenada.

Las interacciones entre observadores y coordenadas no son importantes, y para todas las coordenadas se mantiene la forma de la curva de la Figura 4.4.9. Respecto a las tolerancias en unidades CIELAB de la Figura 4.2.26 ahora las tolerancias son mayores para L* y muy parecidas en C* y h.

En la figura siguiente mostramos la gráfica de tolerancias visuales medias por centros en unidades CIE94.

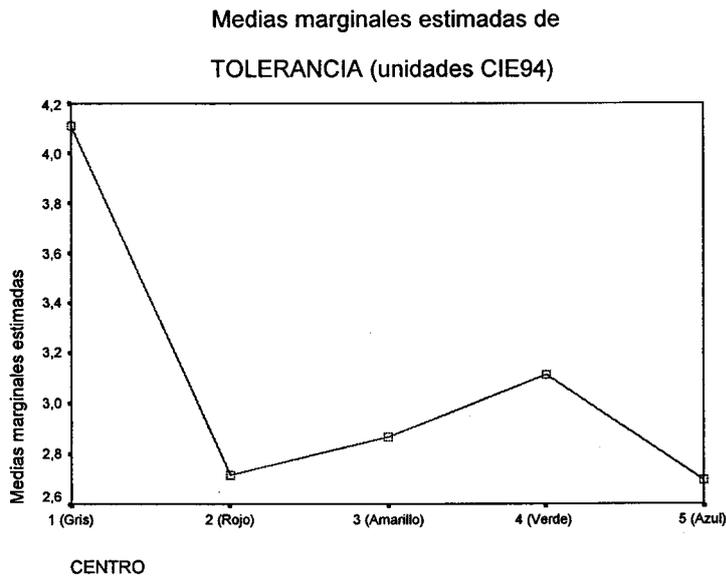


Figura 4.4.11. Gráfica de tolerancias visuales medias por centros.

Las tolerancias medias para los centros, en unidades CIE94, tienen una forma muy diferente a las obtenidas en unidades CIELAB, en la Figura 4.3.1. Ahora entre los centros 2, 3, 4 y 5 las diferencias son muy pequeñas y sí son grandes respecto al centro 1 (Gris). Con la Figura 4.4.11 confirmamos que las diferencias entre las tolerancias en unidades CIELAB se debían, sobre todo, a las tolerancias en croma, que no se tienen para el centro 1 y para el resto de los centros los valores de croma son desiguales (cfr. Tabla 3.5.I). Una vez que hemos corregido las diferencias de croma, y también las de tono, las diferencias son con el centro 1 que es acromático. Para el centro 1 todas la tolerancias son en claridad, que son ahora las mayores, mientras que para el resto tenemos tolerancias en claridad, croma y tono, promediadas en la gráfica de la Figura 4.4.11. A las tolerancias del centro 1, por ser acromático y sólo con tolerancias en claridad (ΔL^*), no les afectan las correcciones de CIE94. La corrección de ΔL^* con L^* de CIEDE2000 podría corregir moderadamente este comportamiento del centro 1.

En las pruebas a posteriori los resultados muestran 3 grupos con diferencias significativas: el centro 1 (Gris), el centro 4 (Verde) y los centros 2 (Rojo), 3 (Amarillo) y 5 (Azul). En la tabla siguiente reproducimos los resultados del test de Tamhane.

CENTRO		
1 (Gris)	2	0.000
	3	0.000
	4	0.000
	5	0.000
2 (Rojo)	1	0.000
	3	1.000
	4	0.000
	5	1.000
3 (Amarillo)	1	0.000
	2	1.000
	4	0.000
	5	1.000
4 (Verde)	1	0.000
	2	0.000
	3	0.000
	5	0.000
5 (Azul)	1	0.000
	2	1.000
	3	1.000
	4	0.000

Tabla 4.4.III. Resultados del test de Tamhane para los centros.

En las figuras siguientes mostramos las gráficas de tolerancias visuales (en unidades CIE94) medias para los centros con cada uno de los demás factores. La interacción centro*grosor no la hemos considerado en el modelo estadístico de la Tabla 4.4.II y no la vamos a tener en cuenta. Como ocurría para las tolerancias en unidades CIELAB esta interacción no es significativa. Hemos comprobado, utilizando un modelo completo en unidades CIE94, que esta interacción tampoco es significativa, aunque no mostramos los resultados pues no son importantes y coinciden con los mostrados en la Tabla 4.1.II.

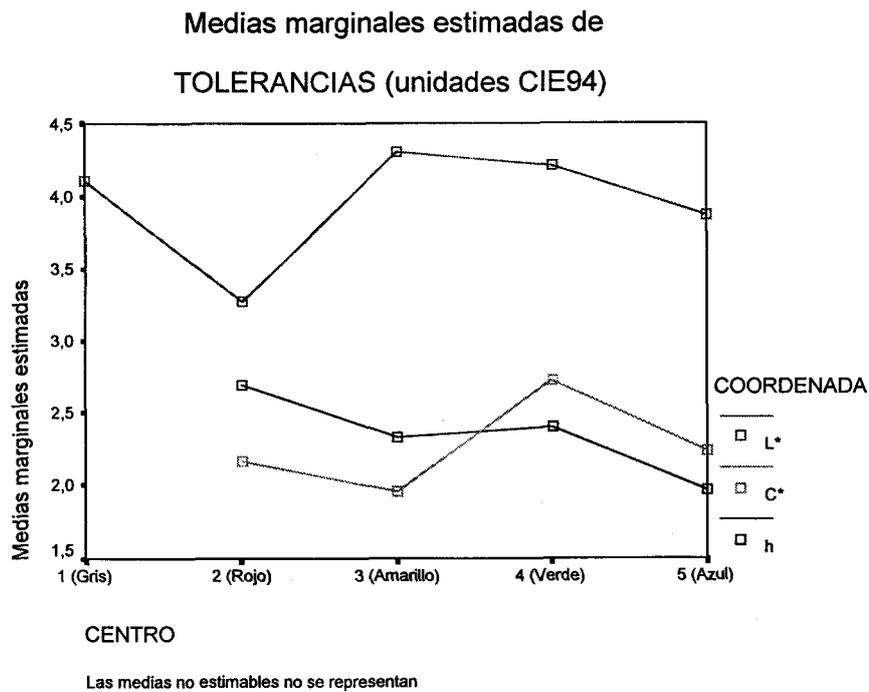


Figura 4.4.12. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y coordenada.

Es especialmente interesante analizar la interacción entre centro y coordenada por dos motivos. En primer lugar, en unidades CIE94 cambia totalmente el comportamiento de las tolerancias por coordenadas. Además en unidades CIELAB habíamos observado interacción entre el centro 2 y la coordenada L* (cfr. Figura 4.3.10). En unidades CIE94 observamos que efectivamente la tolerancia en L* del centro 2 es más baja de lo esperado y hay que seguir teniendo en cuenta esta interacción, supuestamente debida al efecto “crispening”. Además ahora interaccionan los coordenadas C* y h, aunque según observamos no es importante la interacción, pues la tolerancias en C* y h son muy parecidas, sin diferencias significativas entre ellas.

En la Figura 4.4.13 representamos las tolerancias medias para los centros y los tipos de textura.

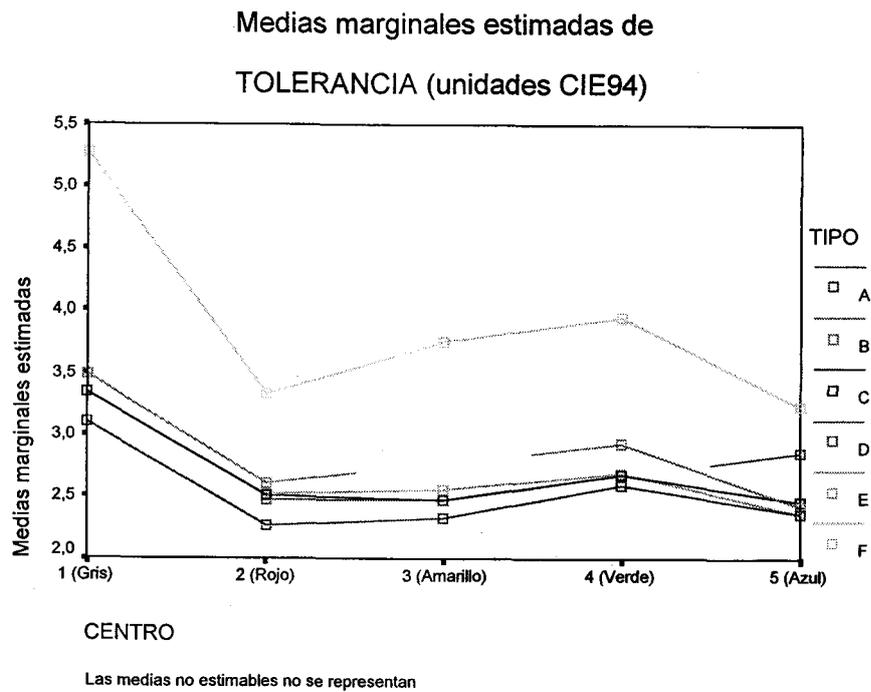


Figura 4.4.13. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y tipo de textura.

Los comentarios de la gráfica de la Figura 4.4.13 son totalmente análogos a los realizados para las tolerancias en unidades CIELAB (cfr. Figura 4.3.5), siguiendo ahora los centros la curva de la Figura 4.4.11. La interacción entre el centro 5 (Azul) y la textura tipo D (relativa con +15 unidades en C*) se sigue observando y el resto de las interacciones son despreciables.

En la figura siguiente presentamos la gráfica de tolerancias medias en unidades CIE94 para los factores centro y superficie.

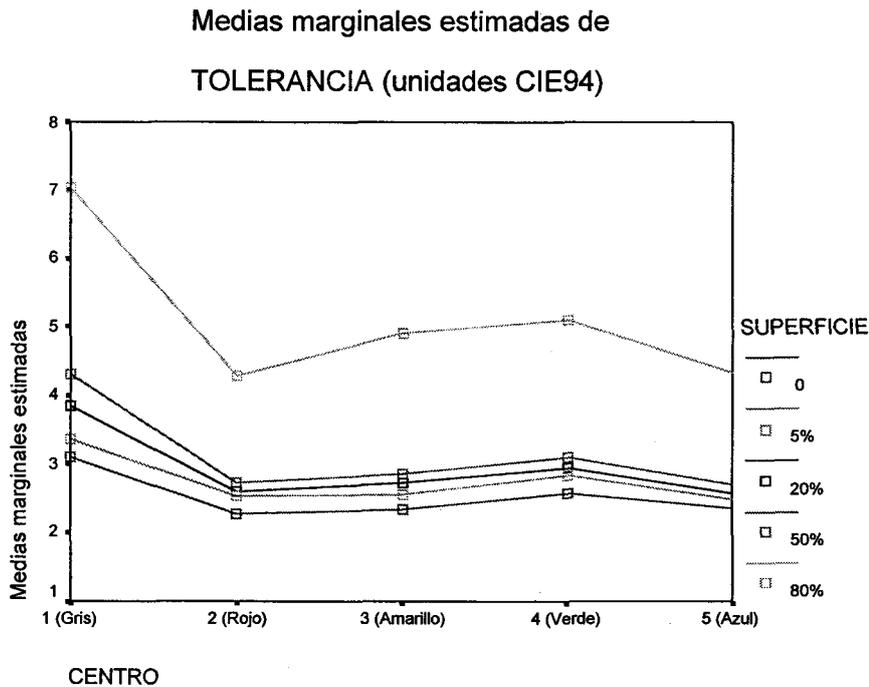


Figura 4.4.14. Gráfica de tolerancias visuales medias para centro y superficie.

Como observamos en la gráfica de la Figura 4.4.14 no existe interacción entre centro y superficie en ningún caso, de forma aún más clara que con las tolerancias en unidades CIELAB, que habíamos representado en la Figura 4.3.6.

Como conclusión, del análisis realizado de las tolerancias en unidades CIE94 en función de los observadores y de los centros, y de las posibles interacciones entre estos dos factores y el resto, hemos contrastado que no cambian los resultados que obtuvimos para las tolerancias en unidades CIELAB. Estudiamos ahora qué diferencias continúan existiendo entre las tolerancias en claridad, croma y tono en unidades CIE94. En la Figura 4.4.15 mostramos la gráfica de medias para las coordenadas.

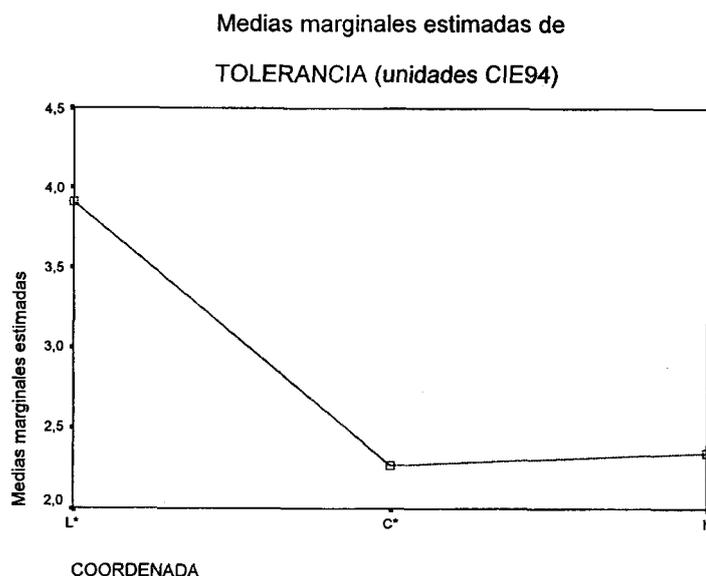


Figura 4.4.15. Gráfica de tolerancias visuales medias por coordenadas.

Son evidentes las diferencias entre esta gráfica y la gráfica de la Figura 4.4.1. Al introducir las correcciones con el croma de las diferencias de color en croma y en tono cambian completamente las tolerancias medias. En unidades CIELAB las tolerancias en croma son las mayores y las diferencias son pequeñas entre las tolerancias en claridad y tono. Esperábamos que, con las correcciones de CIE94, las tolerancias en L^* , C^* y h quedarían más igualadas. Sin embargo, según observamos en la Figura 4.4.15, ahora son muy parecidas las tolerancias en croma y tono, en torno a 2.5 unidades CIE94; y las tolerancias en claridad son las mayores, con una diferencia del orden de 1.5 unidades CIE94. Por tanto, las correcciones efectivamente han igualado y disminuido las tolerancias en croma y tono pero no en claridad. La corrección a las tolerancias en claridad con la claridad de CIEDE2000 y algunas otras fórmulas como CMC (Clarke et al., 1984), BFD (Luo et al., 1987a), etc. repararía en parte este comportamiento.

En la gráfica de la Figura 4.4.15 los resultados corresponden al promedio de todas las comparaciones. Como en este promedio la mayoría de las comparaciones corresponden a muestras con textura pensamos que ésta también puede ser la causa de las diferencias. Según hemos comentado en el Capítulo de “Revisión Bibliográfica” la presencia de textura aumenta las tolerancias en claridad (Montag et al., 2000; Xin et al., 2003) y no influye demasiado en las tolerancias en croma y tono (Han et al., 2003). En el apartado siguiente investigaremos esta cuestión. Por otro lado, en la gráfica de la Figura 4.4.15 el

número de tolerancias que se promedian para cada coordenada es diferente, según observamos en la Tabla 4.1.III. En la gráfica siguiente representamos las tolerancias en claridad, croma y tono en unidades CIELAB y CIE94, para todos los centros y muestras homogéneas.

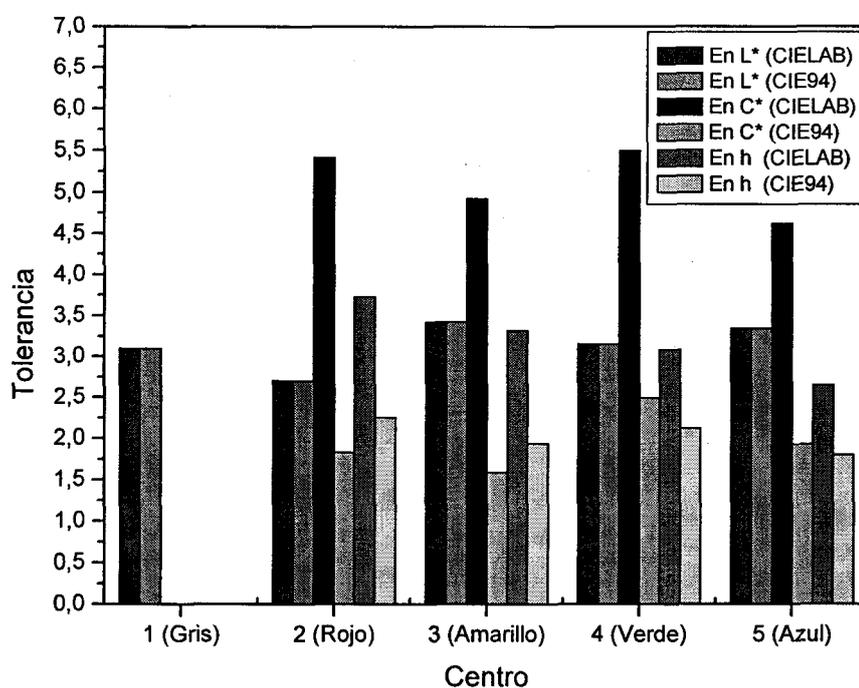


Figura 4.4.16. Tolerancias en L*, C* y h en unidades CIELAB y CIE94 para todos los centros y muestras homogéneas.

La presencia de textura, como posible causa que hemos apuntado anteriormente, no es el origen de las diferencias pues, para las muestras homogéneas claramente se tiene el mismo esquema de la Figura 4.4.15. En unidades CIE94 la tolerancia en claridad es mayor que las tolerancias en croma o tono, que son muy parecidas. La mayor diferencia entre unidades CIELAB y CIE94 se tiene para los centros 3 (Amarillo) y 5 (Azul), que son los que estarían más afectados por la corrección S_L de CIEDE2000, por tener valores de L^* (cfr. Tabla 3.5.I) más diferentes del fondo. Para el centro 1 (Gris) las tolerancias no son mayores que para el resto, como ocurre en la Figura 4.4.11. Se debe a que para el centro 1, al promediar todas las tolerancias, se promedian sólo tolerancias en L^* , que son mayores que en C^* o h , mientras que para los demás centros se promedian todas. Esto hace que las tolerancias medias para el centro 1 sean mayores en la Figura 4.4.11.

Por tanto, en las tolerancias en unidades CIE94 no existen diferencias entre centros (salvo las interacciones comentadas), y la única diferencia es entre las tolerancias en L*, C* y h. La corrección a ΔL^* de CIEDE2000 haría más parecidas las tolerancias en L*, C* y h. Sin embargo la fórmula de diferencia de color CIEDE2000 contiene otras correcciones y términos cruzados adicionales a la suma de las tolerancias en claridad (ΔL^*), croma (ΔC^*) y tono (ΔH^*). Por tanto no tiene sentido trabajar sólo con tolerancias en L*, C* o h como hemos hecho hasta ahora para las tolerancias CIELAB y CIE94, y no calcularemos las tolerancias en unidades CIEDE2000.

Para estudiar las diferencias, debidas a las coordenadas, entre las tolerancias en unidades CIE94, utilizamos las pruebas específicas que ya hemos indicado en otros apartados, puesto que no hay igualdad de varianzas. La prueba T3 de Dunnet y la prueba de Games-Howell coinciden con los resultados de la prueba de Tamhane, que mostramos en la Tabla 4.4.IV.

L*	C*	0.000
	h	0.000
C*	L*	0.000
	h	0.000
h	L*	0.000
	C*	0.000

Tabla 4.4.IV. Resultados del test de Tamhane para las coordenadas.

Las pruebas post hoc para las diferencias entre las coordenadas manifiestan que las diferencias son significativas entre las 3 tolerancias. De todas formas, las diferencias son mayores con las tolerancias en L*, según el análisis realizado.

A continuación analizaremos las interacciones entre las coordenadas y los factores de la textura. El gráfico de tolerancias medias para coordenada y tipo, de la Figura 4.4.17, muestra que la interacción es pequeña. Las tolerancias mayores se tienen para la textura absoluta (tipo F), las menores para las muestras homogéneas (tipo A) y las texturas relativas (tipo B, C, D y E) están muy próximas a la tolerancias de las muestras homogéneas y se cruzan entre ellas. Para todos los tipos de textura se sigue la curva de la Figura 4.4.15. La diferencia entre las tolerancias en L* y las tolerancias en C* y h es más acusada para la textura tipo F.

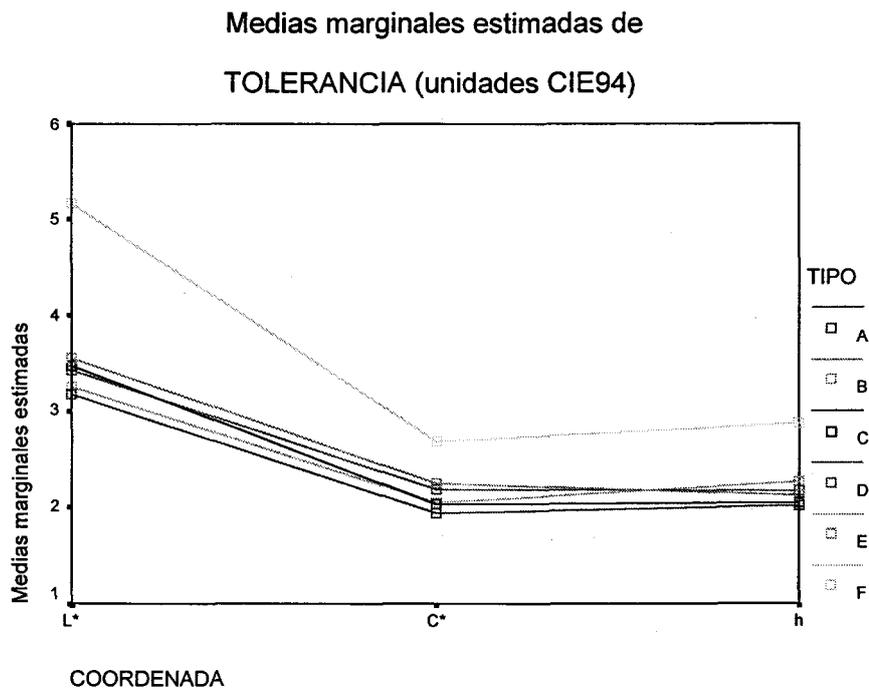


Figura 4.4.17. Gráfico de tolerancias visuales medias para coordenada y textura.

Respecto a la superficie de textura, en la gráfica de tolerancias medias de la Figura 4.4.18, observamos los mismos resultados de la Figura 4.4.15. A la superficie del 80% (sólo existe en la textura tipo F) le corresponde la mayor diferencia entre las tolerancias en L* y en C* o h. Las tolerancias menores corresponden a la superficie 0 (muestras homogéneas) y al resto de las superficies les corresponden valores muy cercanos a las tolerancias para la superficie 0. Igual que para el tipo de textura las interacciones son despreciables.

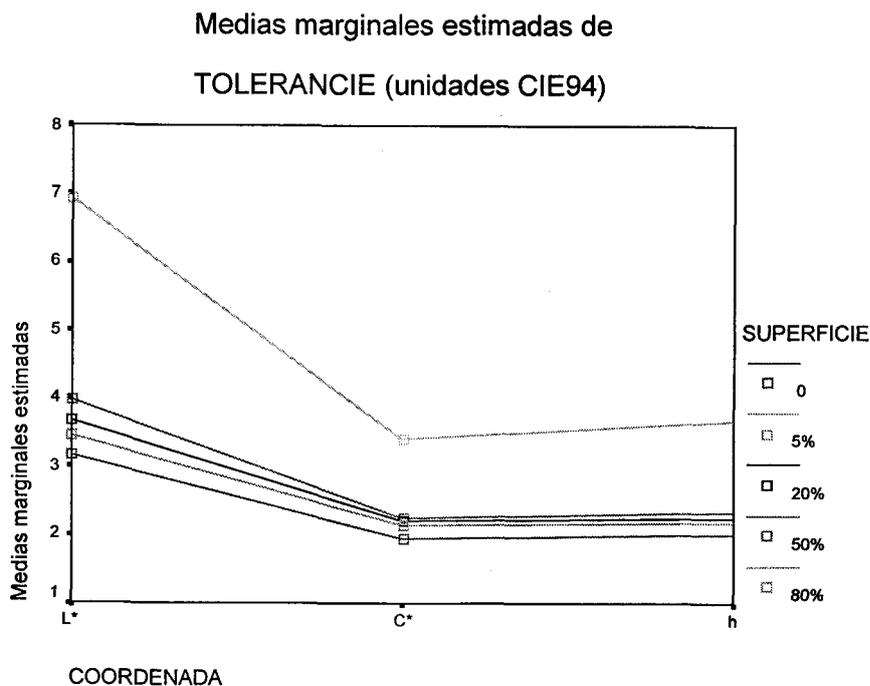


Figura 4.4.18. Gráfico de tolerancias visuales medias para coordenada y superficie.

Para la interacción entre coordenada y grosor, hemos comprobado que para las tolerancias en unidades CIE94, no es estadísticamente significativa cuando consideramos la interacción entre coordenada y grosor en el modelo estadístico. No mostramos aquí los resultados, pues coinciden con los expuestos para las tolerancias CIELAB en la Tabla 4.1.II.

En el resto de los apartados de este capítulo consideramos las tolerancias en unidades CIE94. De estas forma, una vez aplicadas las correcciones con el croma, aislamos la influencia de la textura sobre las tolerancias, con lo que es más fácil analizarla.

4.5. Influencia de la Textura: Tipo, Superficie y Grosor

En el diseño del experimento tuvimos en cuenta una serie de factores que pensamos serían importantes para entender los resultados. En el Apartado “Análisis Estadístico Inicial” hemos comentado que efectivamente los resultados se explican bien

con los factores y con el modelo estadístico elegidos, por el valor próximo a la unidad del coeficiente de correlación (r^2) de la Tabla 4.1.IV.

En los apartados anteriores hemos ido estudiando extensamente los factores observador, centro y coordenada, así como sus posibles interacciones con los demás. Con las conclusiones que hemos alcanzado hasta ahora tenemos un conocimiento amplio del conjunto de nuestros resultados experimentales en lo que a los factores observador, centro y coordenada se refiere.

En este apartado estudiaremos la influencia de la textura de las muestras sobre las tolerancias visuales. Este es uno de los objetivos principales de esta Memoria de Tesis Doctoral. Como hemos explicado en el Capítulo “Método Experimental”, hemos considerado para este estudio una textura elemental, determinada por 3 factores: *tipo* de textura, *superficie* que ocupa la textura sobre la muestra y *grosor* de la textura. La combinación de estos 3 factores da como resultado una textura única sobre las muestras del Par de Prueba.

A través de los análisis de los factores observador, centro y coordenada, que hemos realizado en los apartados anteriores, tenemos también una idea de cómo interviene cada uno de los factores de la textura sobre las tolerancias. Hemos observado que, en general con la textura absoluta las tolerancias son mayores. Con las texturas relativas los resultados no son tan claros. Respecto a la superficie de textura, en general aumentan las tolerancias cuando aumenta la superficie de textura. El grosor es uno de los factores que menos influye en los resultados, según hemos advertido. En este apartado estudiaremos en profundidad todos estos resultados.

Influencia del grosor de la textura

En la gráfica de tolerancias medias por grosor, de la Figura 4.5.1, observamos cómo afecta a las tolerancias visuales el grosor de los puntos aleatorios que forman la textura.

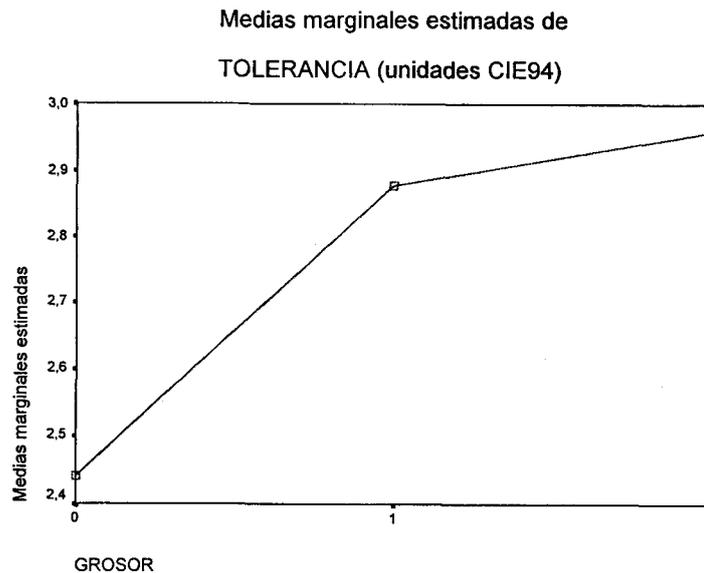


Figura 4.5.1. Gráfica de tolerancias visuales medias por grosores.

El grosor 0 corresponde exclusivamente a muestras homogéneas y el número de tolerancias para esta media es mucho menor que para grosor 1 ó 4, como podemos comprobar en la Tabla 4.1.III. Las diferencias entre los tres grosores son significativas según la Tabla 4.4.II. La diferencia entre las tolerancias medias para el grosor 1 y 4 es del orden de 0.05 unidades CIE94. Esta diferencia pequeña es lo que esperábamos por lo observado en los apartados anteriores.

Las varianzas de las tolerancias visuales no son iguales respecto a los grosores. Por tanto, para realizar las pruebas de comparaciones múltiples utilizamos test específicos que no asumen homocedasticidad: T2 de Tamhane, T3 de Dunnett y prueba de Games-Howell. Los resultados del test de Tamhane aparecen en la Tabla 4.5.I. El resto de los test dan resultados muy parecidos.

GROSOR		
0	1	0.000
	4	0.000
1	0	0.000
	4	0.230
4	0	0.000
	1	0.230

Tabla 4.5.I. Resultados del test de Tamhane para los grosores.

Aparecen dos grupos, uno formado por el grosor 0, y otro por los grosores 1 y 4. Las diferencias en las tolerancias entre grosor 1 y 4 no son significativas, y sí lo son con el grosor 0. Este resultado confirman que la diferencia de grosor, 1 ó 4, de los puntos de la textura no influye sobre las tolerancias, tal y cómo esperábamos por los resultados obtenidos hasta ahora. La diferencia significativa para el factor grosor se debe a la diferencia entre las muestras con grosor 0 y grosor 1 ó 4. Esta diferencia realmente indica diferencias entre las tolerancias de muestras sin textura (todas con grosor 0) y muestras con textura (todas con grosor 1 ó 4).

En las gráficas de las Figuras 4.5.2, 4.5.3 y 4.5.4 representamos las tolerancias en L^* , C^* y h respectivamente, para los grosores 0, 1 y 4. Hemos promediado la superficie de textura y las barras de error corresponden a la desviación estándar del promedio.

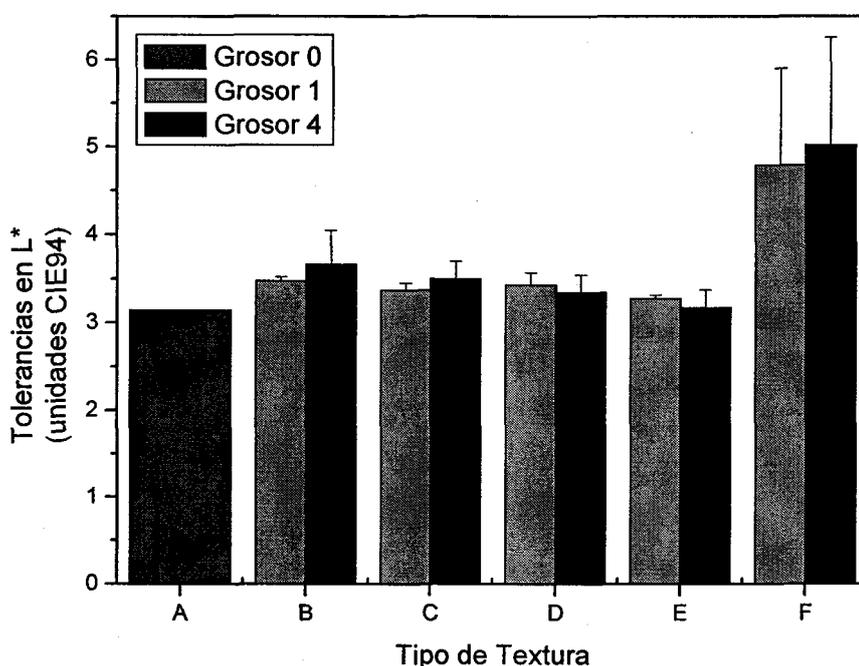


Figura 4.5.2. Tolerancias en L^* para todos los grosores y tipos de textura y promedio de las superficies.

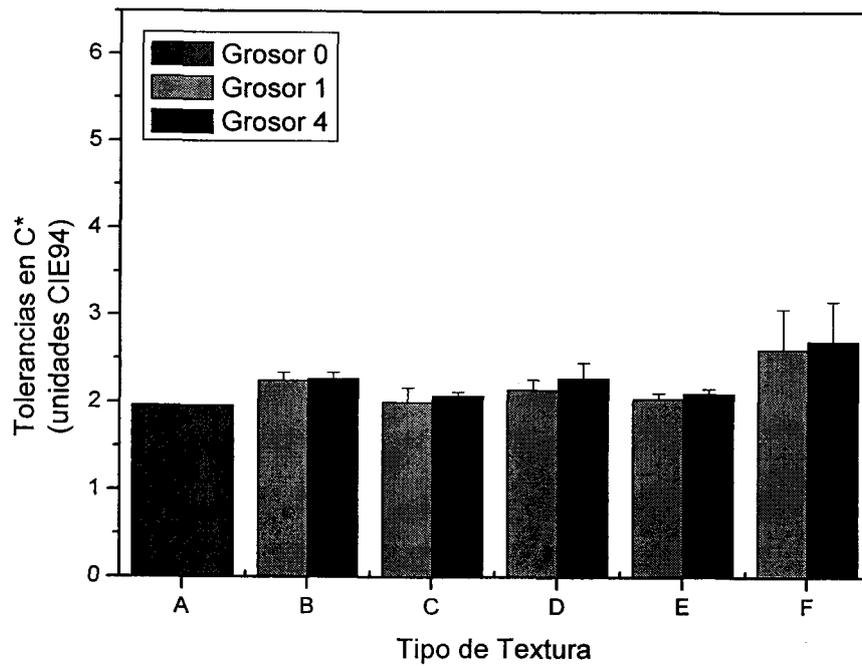


Figura 4.5.3. Tolerancias en C* para todos los grososres y tipos de textura y promedio de las superficies.

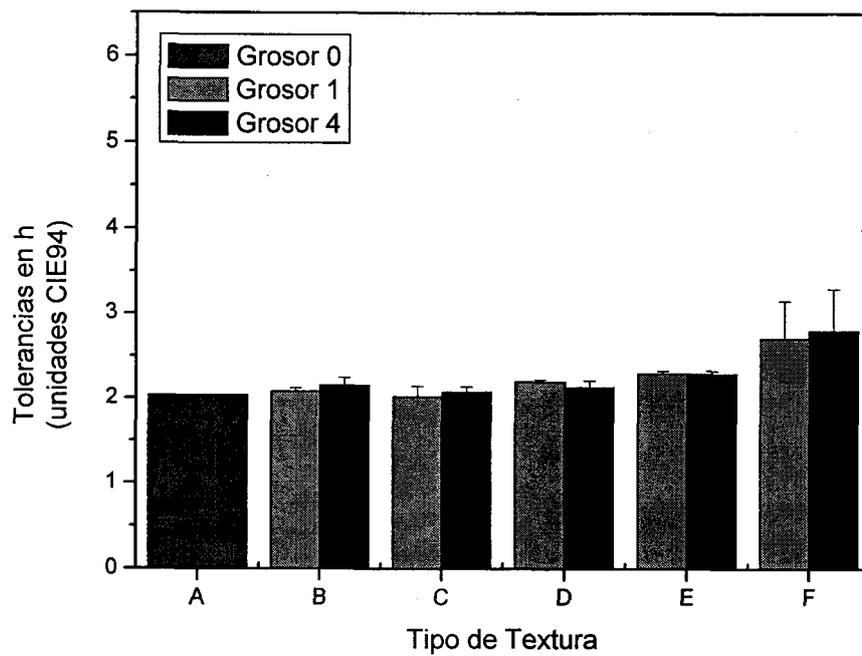


Figura 4.5.4. Tolerancias en h para todos los grososres y tipos de textura y promedio de las superficies.

Las diferencias entre grosor 1 y grosor 4 son insignificantes en todos los casos. Para el grosor 0 (muestras homogéneas) las diferencias son pequeñas respecto al grosor 1 ó 4 para las texturas relativas (B, C, D y E) y un poco mayores para la textura absoluta (F).

Las barras de error son también pequeñas en casi todos los casos, siendo un poco mayores para las texturas absolutas (tipo F) donde corresponden al promedio de superficies tan distintas como 5% y 80%.

En conclusión, no vamos a seguir estudiando la influencia del grosor pues su efecto sobre las tolerancias es muy pequeño. En adelante consideraremos la influencia de la superficie de la textura y del tipo de textura.

Influencia de la superficie de la textura

En el diseño del experimento consideramos que la textura pudiera ocupar distinta superficie de las muestras. Esta variable superficie es una medida de la “cantidad” de cada tipo de textura en una muestra. Como hemos explicado en el Capítulo “Método Experimental” hemos considerado los siguientes niveles del factor superficie: 0%, 5%, 20%, 50% y 80%. El único caso de textura que ocupa el 0% de la superficie corresponde obviamente a las muestras homogéneas o sin textura. Para las texturas relativas las posibilidades son 5%, 20% y 50% de la superficie. Más de 50% de la superficie en una textura relativa significaría invertir los conceptos de textura y fondo, y no tiene sentido. Sin embargo para la textura absoluta sí tienen sentido superficies mayores que el 50%, por lo que hemos añadido, a las anteriores superficies, el caso de 80% de la superficie ocupada por la textura.

Según los resultados que hemos obtenido en apartados anteriores, la influencia de la superficie de textura es incrementar el efecto de cada tipo de textura. En las Figuras 4.2.31, 4.3.7, 4.3.8, 4.3.9, 4.4.7 y 4.4.8 contemplamos algunos ejemplos. En la gráfica de tolerancias medias de la figura siguiente observamos mejor la influencia de la superficie de la textura.

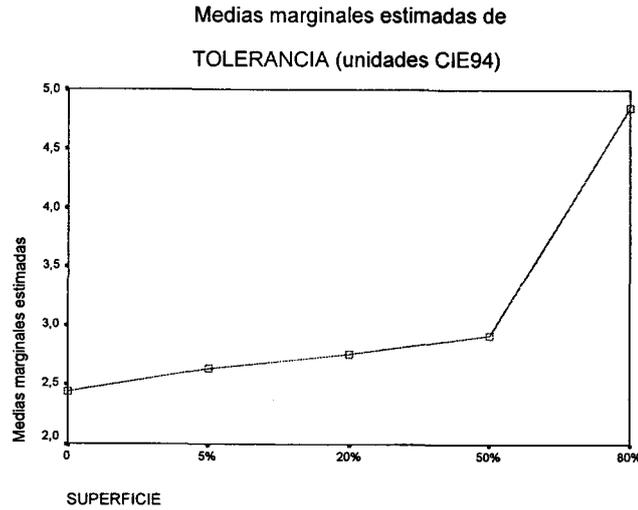


Figura 4.5.5. Gráfica de tolerancias visuales medias por superficies.

El resultado concuerda con lo que esperábamos por los análisis realizados hasta ahora. Las tolerancias medias se incrementan progresivamente con la superficie que ocupa la textura sobre la muestra. El incremento es suave al principio y abrupto para la superficie del 80%. Analizamos las diferencias entre niveles mediante las mismas pruebas a posteriori utilizadas con otros factores. Los resultados del test de Tamhane los mostramos en la Tabla 4.5.III.

SUPERFICIE		
0%	5%	0.362
	20%	0.002
	50%	0.000
	80%	0.000
5%	0%	0.362
	20%	0.043
	50%	0.000
	80%	0.000
20%	0%	0.002
	5%	0.043
	50%	0.008
	80%	0.000
50%	0%	0.000
	5%	0.000
	20%	0.008
	80%	0.000
80%	0%	0.000
	5%	0.000
	20%	0.000
	50%	0.000

Tabla 4.5.II. Resultados del test de Tamhane para las superficies.

Con los otros test se tienen resultados idénticos. Las diferencias son significativas para casi todas las superficies. Entre las muestras homogéneas y con el 5% de superficie de textura no hay diferencias significativas. Por tanto los observadores no distinguen entre muestras homogéneas y muestras con una textura que ocupe el 5% de la superficie. Entre las superficies del 5% y el 20% las diferencias son significativas, aunque con un p-valor próximo al nivel de significación del 5%. Entre el resto de las texturas las diferencias son estadísticamente significativas.

Aunque el grosor no es significativo en las tolerancias CIE94, y no lo vamos a considerar, estudiamos la posible interacción entre superficie y grosor, que es significativa según los resultados de la Tabla 4.4.II. En la gráfica de tolerancias medias por superficie y grosor, de la Figura 4.5.6, observamos las interacciones entre estos dos factores de la textura.

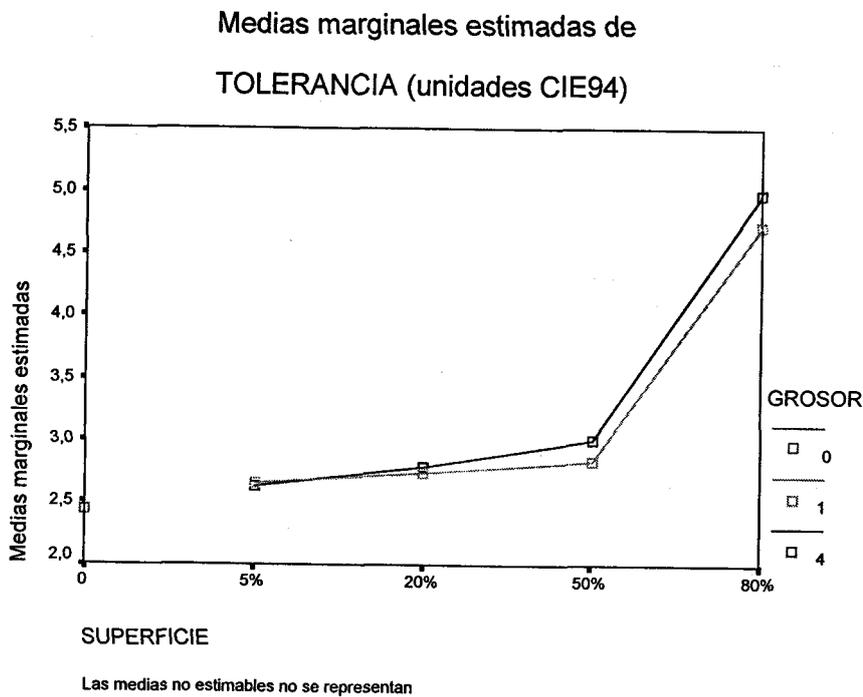


Figura 4.5.6. Gráfica de tolerancias visuales medias para superficie y grosor.

Efectivamente la diferencia entre las tolerancias para los grosores 1 y 4 son muy pequeñas (no son estadísticamente significativas). La diferencia se reduce cuando disminuye la superficie de textura. Esto significa que interacciona levemente la superficie y el grosor de la textura. Este resultado es lógico, ya que para superficies de textura muy

bajas es indiscernible la textura, y por supuesto el grosor de la misma. A medida que aumenta la superficie de textura comienza a distinguirse el grosor de los puntos, y esto se refleja en las tolerancias, aunque no tanto como para que las diferencias sean significativas. Incluso para el 80% de superficie, las diferencias entre grosor 1 y 4 son muy pequeñas, del orden de las décimas de unidad CIE94. Como hemos concluido en la sección anterior, no vamos a considerar el grosor de la textura; según acabamos de contrastar, tampoco las interacciones del grosor con la superficie.

Como conclusión de esta sección, admitimos que la superficie de la textura tiene una influencia considerable sobre las tolerancias. Como intuíamos, el factor superficie regula la “cantidad” de textura de la muestra y hace que el efecto de la textura sea mayor o menor. En adelante consideraremos como un factor importante el tanto por ciento de superficie de la textura sobre la muestra.

Influencia del tipo de textura

En todos los resultados que hemos analizado hasta ahora hemos ido observando diferencias en las tolerancias, ya sea en unidades CIELAB o en unidades CIE94, dependiendo del tipo de textura. Para las muestras homogéneas (tipo A) hemos observado los valores más bajos de las tolerancias y los mayores para las muestras con textura absoluta (tipo F). A las muestras con texturas relativas (tipos B, C, D y E) les corresponden tolerancias muy parecidas entre sí y cercanas a las muestras homogéneas. Como ejemplo podemos observar las gráficas de las Figuras 4.2.27, 4.2.28, 4.2.29, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.4.4, 4.4.5, 4.5.2, 4.5.3 y 4.5.4.

En la gráfica de tolerancias medias por tipos, de la Figura 4.5.7, representamos las diferencias en las tolerancias dependiendo del tipo de textura.

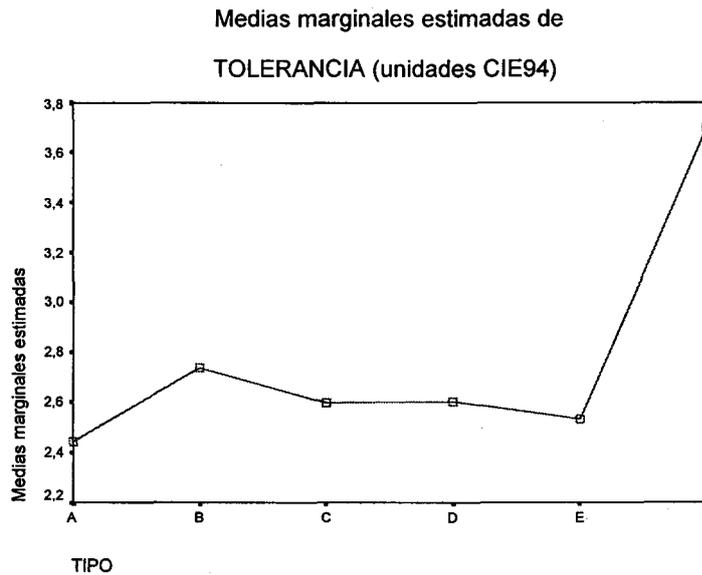


Figura 4.5.7. Gráfica de tolerancias visuales medias por tipos.

Las tolerancias medias son diferentes dependiendo del tipo de textura de las muestras. Estas diferencias son como hemos comentado en el párrafo anterior. Para las muestras homogéneas (tipo A) las tolerancias son las más bajas. Para las muestras con textura absoluta (tipo F) las tolerancias son las más altas, con una diferencia del orden de 1.3 unidades CIE94 entre ellas. Para todas las texturas relativas (tipos B, C, D y E) las diferencias son más pequeñas con las muestras homogéneas. La textura tipo B (relativa con +10 unidades en L^*) es la que obtiene diferencias mayores y la tipo E (relativa con -15 unidades en C^*) menores, respecto a las muestras homogéneas (tipo A). Analizamos las diferencias entre los tipos de textura mediante las pruebas de comparaciones múltiples con los test de Tamhane, T3 de Dunnett, y de Games-Howell, cuyos resultados coinciden. En la Tabla 4.5.III tenemos los resultados del test de Games-Howell.

A	B	0.004
	C	0.468
	D	0.957
	E	0.979
	F	0.000
B	A	0.004
	C	0.117
	D	0.004
	E	0.001
	F	0.000
C	A	0.468
	B	0.117
	D	0.822
	E	0.611
	F	0.000
D	A	0.957
	B	0.004
	C	0.822
	E	1.000
	F	0.000
E	A	0.979
	B	0.001
	C	0.611
	D	1.000
	F	0.000
F	A	0.000
	B	0.000
	C	0.000
	D	0.000
	E	0.000

Tabla 4.5.III. Resultados del test de Games-Howell para los tipos de textura.

Respecto a la tolerancia podemos agrupar los tipos de textura en 2 ó 3 grupos. Por un lado la textura absoluta (tipo F) forma un grupo completamente independiente del resto. Para los demás tipos de textura las diferencias están menos claras. Las diferencias entre los tipos D y E, ambas con textura por diferencias relativas de croma, son muy pequeñas. Estas dos texturas no tienen diferencias significativas respecto a las muestras homogéneas (tipo A). Los tipos de textura B y C son texturas relativas formadas por puntos con diferencias relativas de claridad. Las diferencias entre ellas no son significativas, pero con un p-valor bajo de 0.117. La textura tipo C no se distingue de las muestras homogéneas, mientras que la textura tipo B tiene diferencias estadísticamente significativas con las muestras homogéneas.

La gráfica de la Figura 4.5.7 y los datos de la Tabla 4.5.III corresponden al promedio del resto de los factores excepto el factor tipo. Según hemos concluido en la sección anterior es muy importante considerar la superficie de textura. Para superficies de textura bajas, del 5% ó 20%, esperamos que las diferencias entre los tipos de textura sean más pequeñas que para superficies de textura mayores. Es importante analizar la posible interacción entre los factores tipo y superficie. Tampoco podemos olvidar las interacciones que existen entre los centros y los factores tipo y coordenada. A continuación analizaremos más ampliamente las tolerancias teniendo en cuenta estas consideraciones, pues al utilizar valores promediados las interacciones pueden alterar los resultados.

Estudiaremos primero las posibles interacciones entre el tipo y la superficie de textura en la gráfica de tolerancias medias de la Figura 4.5.8.

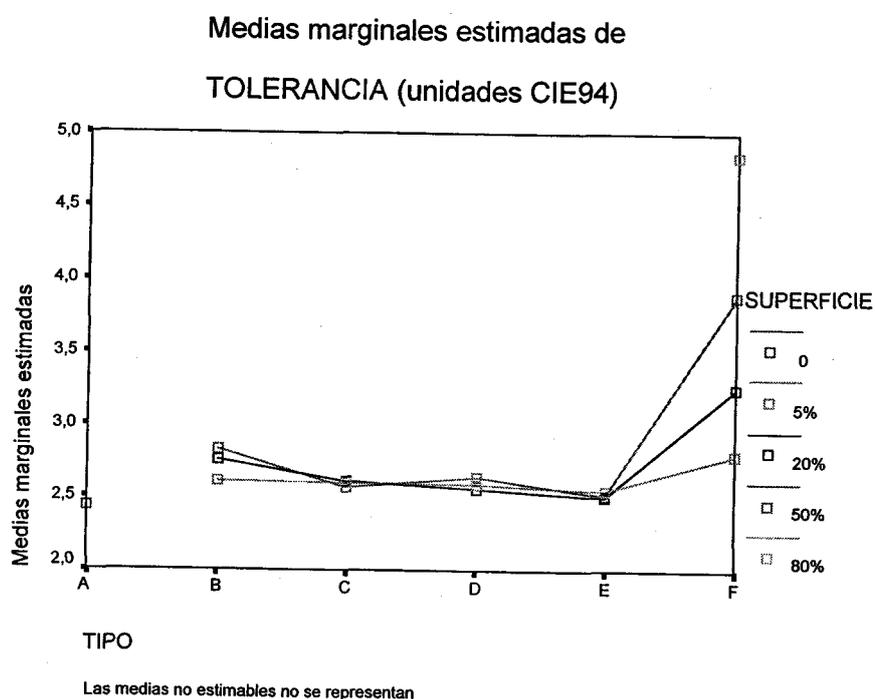


Figura 4.5.8. Gráfica de tolerancias visuales medias para tipo y superficie.

Observamos interacciones, aunque pequeñas en todos los tipos de textura. Para la textura absoluta (tipo F) el efecto de la superficie sobre las tolerancias es muy claro. Las tolerancias crecen con la superficie de textura. También con los tipos de textura B (relativa con +10 unidades en L*) y D (relativa con +15 unidades en C*), aunque las diferencias entre las tolerancias son menores. Para los tipos de textura C (relativa con -10

unidades en L*) y E (relativa con -15 unidades en C*) no hay diferencias entre las distintas superficies de textura. La variable superficie controla el grado de textura de la muestra y por tanto la influencia de esa textura. Esto ocurre claramente para la textura absoluta, mientras que para las texturas relativas no es tan claro. Además la influencia de las texturas relativas es en todo caso mucho menor que la de la textura absoluta. La gráfica de la Figura 4.5.8 clarifica que los resultados de la Figura 4.5.7 y de la Tabla 4.5.III son válidos para todas las superficies de textura, y no sólo para el promedio de las superficies. Según apuntábamos en el párrafo anterior, al promediar la superficie del 5% (sin diferencias significativas con las muestras homogéneas) con el resto, podrían tenerse resultados engañosos para los tipos de textura con superficies del 20% y 50%. Queda claro que no es así.

En las figuras siguientes representamos para todos los centros, las tolerancias en claridad, croma y tono para todos los tipos de textura y todas las superficies de textura. Hemos promediado los grosores 1 y 4, además de los observadores y los sentidos. En todas las gráficas se tiene la misma escala de ordenadas para que resulte más fácil compararlas entre ellas. En la Figura 4.5.9 representamos para el centro 1 (Gris) las tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies de textura.

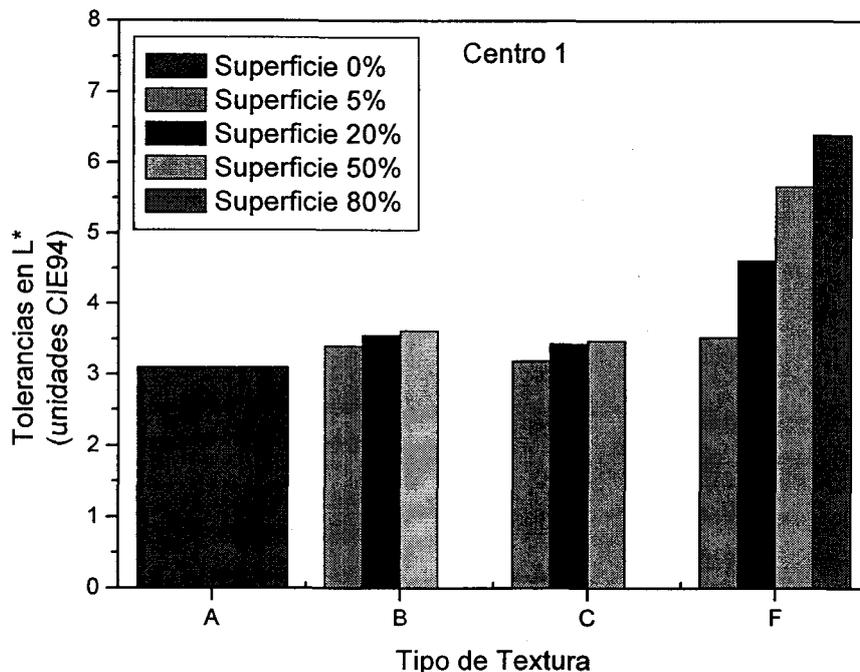


Figura 4.5.9. Tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies en el centro 1.

Con superficie del 5% no hay diferencias entre ningún tipo de textura y muestras homogéneas. Cuando crece la superficie de textura aumentan muy poquito las tolerancias con las texturas relativas y de forma considerable para la textura absoluta.

Las Figuras 4.5.10, 4.5.11 y 4.5.12 corresponden a las tolerancias en claridad, croma y tono respectivamente para el centro 2 (Rojo).

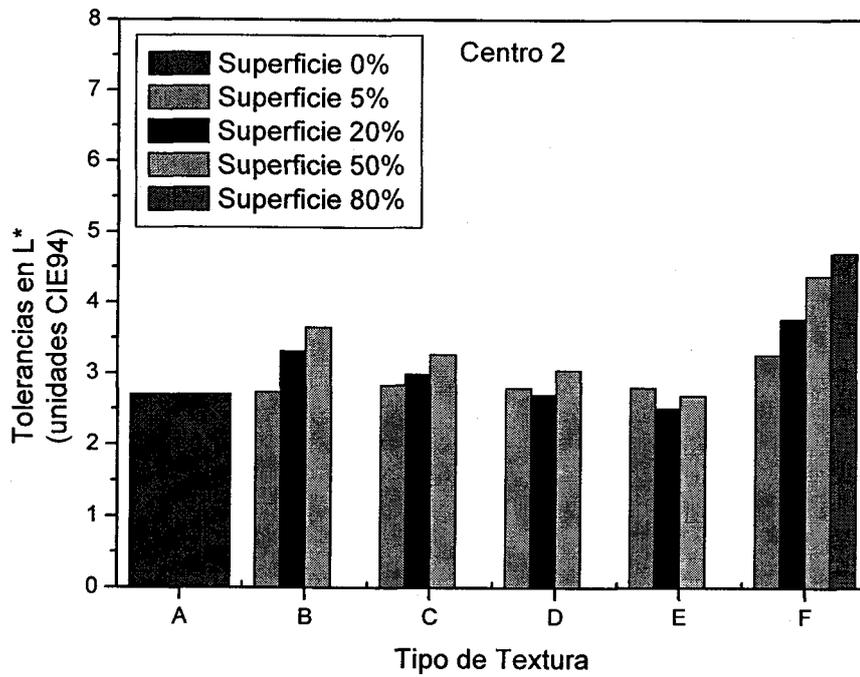


Figura 4.5.10. Tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies en el centro 2.

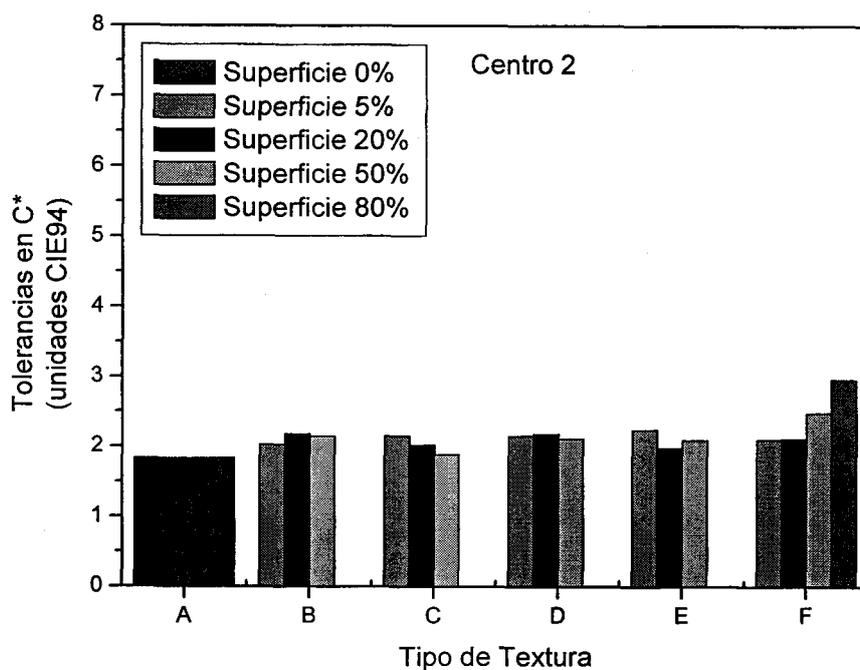


Figura 4.5.11. Tolerancias en croma para todos los tipos y superficies en el centro 2.

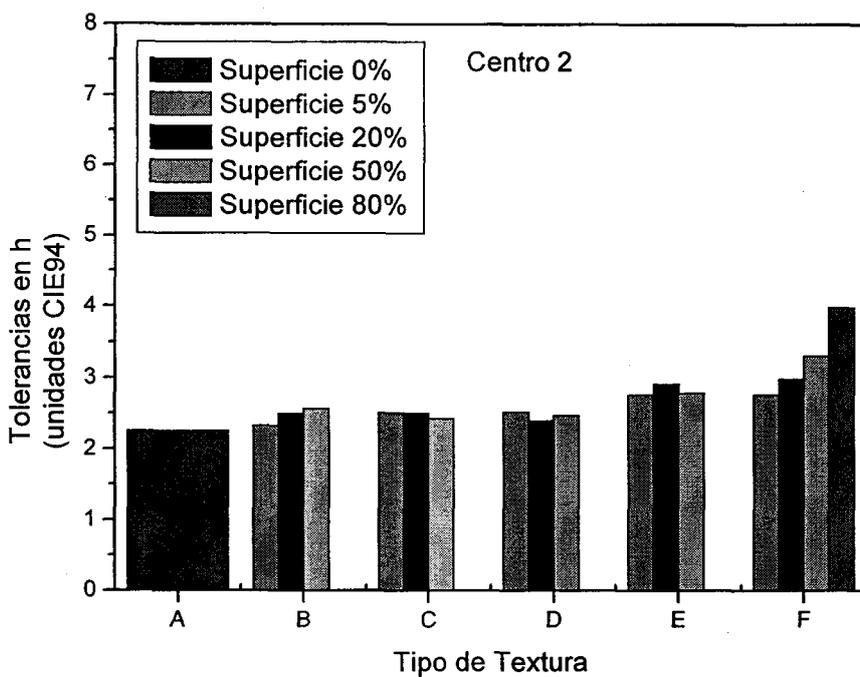


Figura 4.5.12. Tolerancias en tono para todos los tipos y superficies en el centro 2.

Para el centro 2 el comportamiento es el mismo que en el 1. La superficie de textura modula la influencia del tipo de textura. Las tolerancias en claridad son más sensibles a la superficie de textura. La textura absoluta afecta más a las tolerancias que las relativas. Los tipos de textura B (relativa con +10 unidades en L*) y C (relativa con -10 unidades en L*) afectan más a las tolerancias en claridad. En cuanto a la interacción del centro 2 con la coordenada L* observamos que las tolerancias en claridad son más bajas que para los otros centros, para todas las texturas y superficies. En consecuencia, la interacción se mantiene independientemente del tipo de textura y superficie. Como ya hemos comentado es una consecuencia del efecto “crispening”, que según hemos comprobado es independiente del tipo y superficie de textura.

Para el centro 3 (Amarillo) mostramos las gráficas en las Figuras 4.5.13, 4.5.14 y 4.5.15.

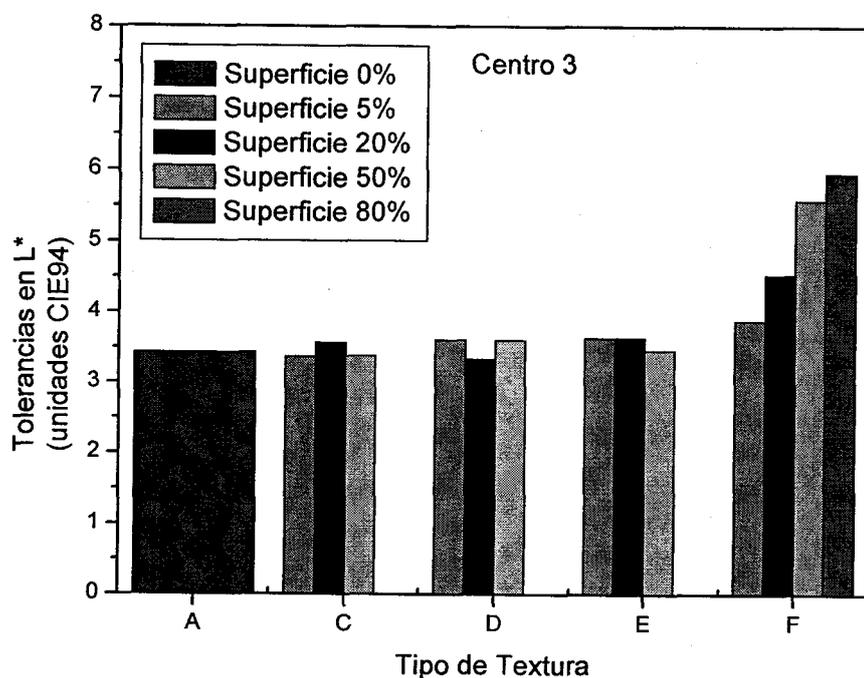


Figura 4.5.13. Tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies en el centro 3.

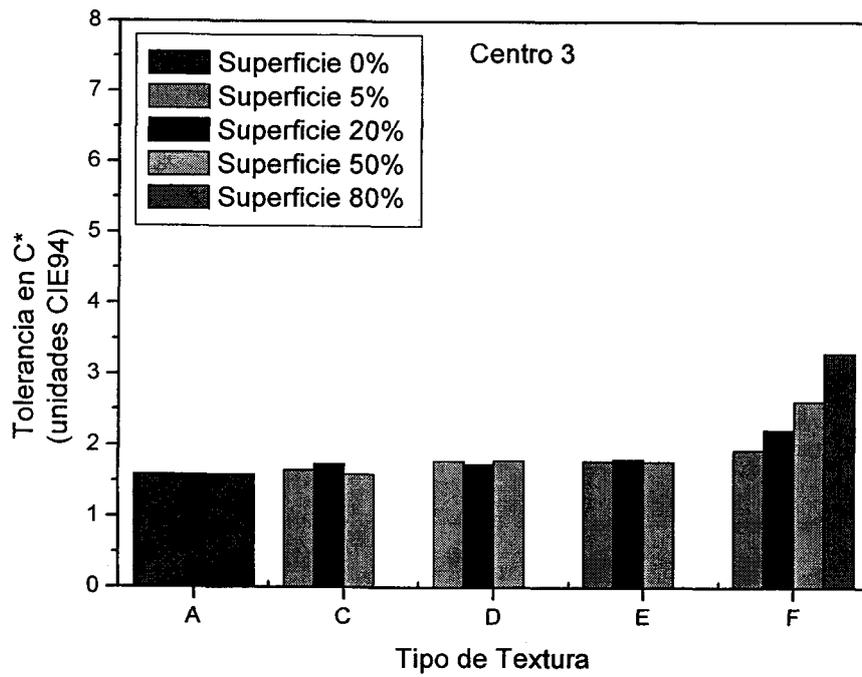


Figura 4.5.14. Tolerancias en croma para todos los tipos y superficies en el centro 3.

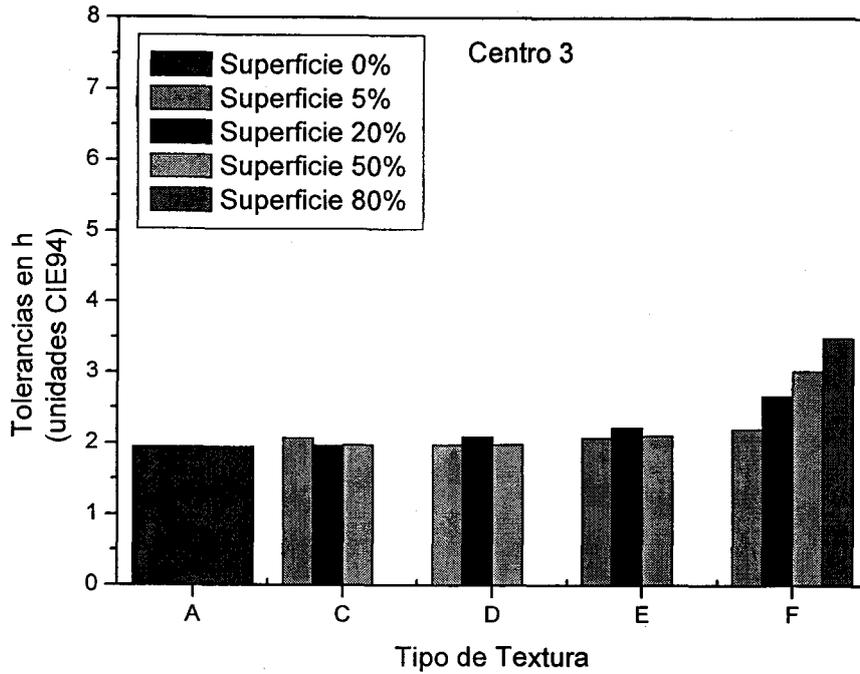


Figura 4.5.15. Tolerancias en tono para todos los tipos y superficies en el centro 3.

Para el centro 3 las texturas relativas no modifican las tolerancias ni en claridad, ni en croma ni en tono. La textura absoluta sí influye sobre las tolerancias, más en L* y C*, y la superficie modula la influencia.

Las Figuras 4.5.16, 4.5.17 y 4.5.18 corresponden a los resultados para el centro 4 (Verde).

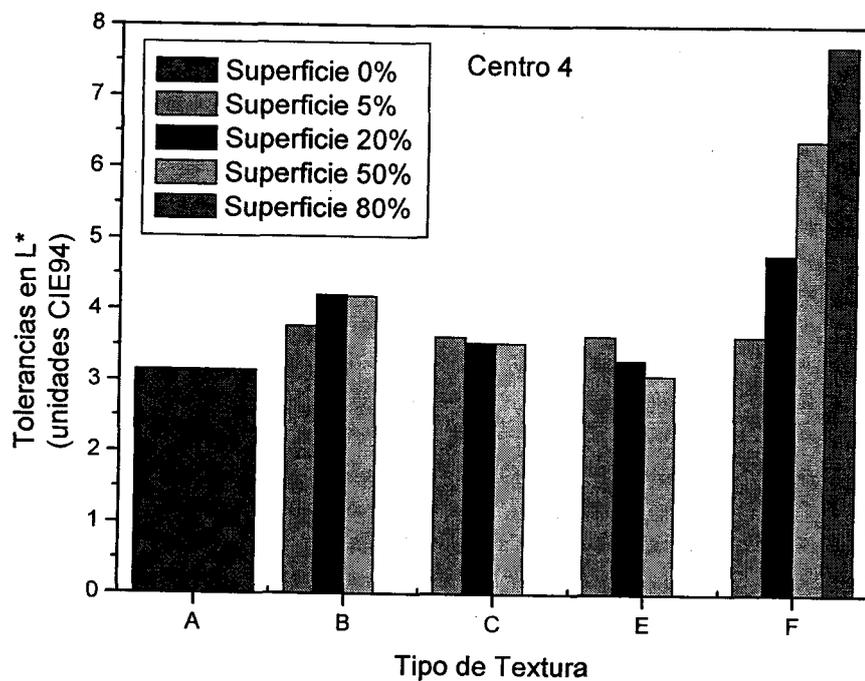


Figura 4.5.16. Tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies en el centro 4.

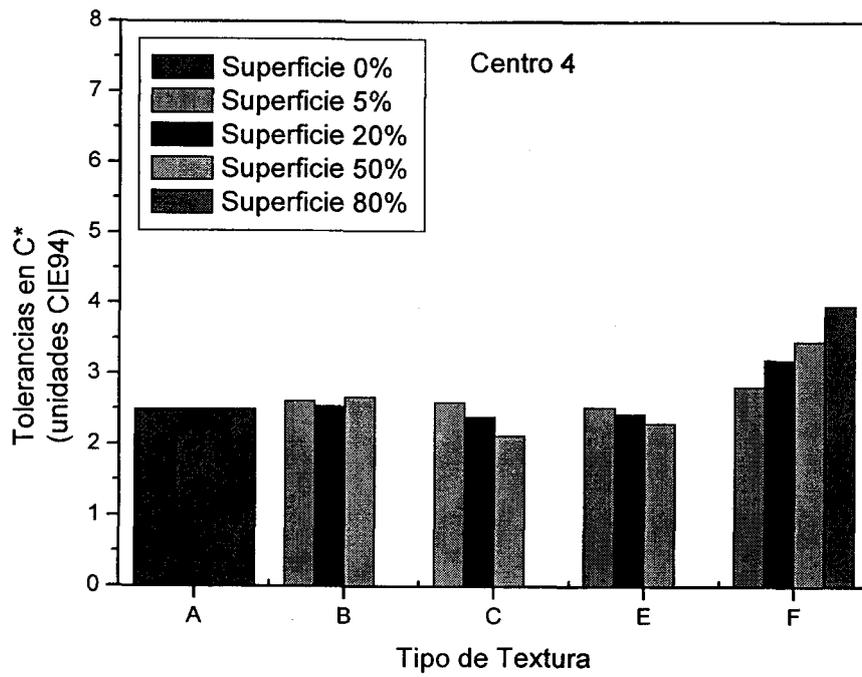


Figura 4.5.17. Tolerancias en croma para todos los tipos y superficies en el centro 4.

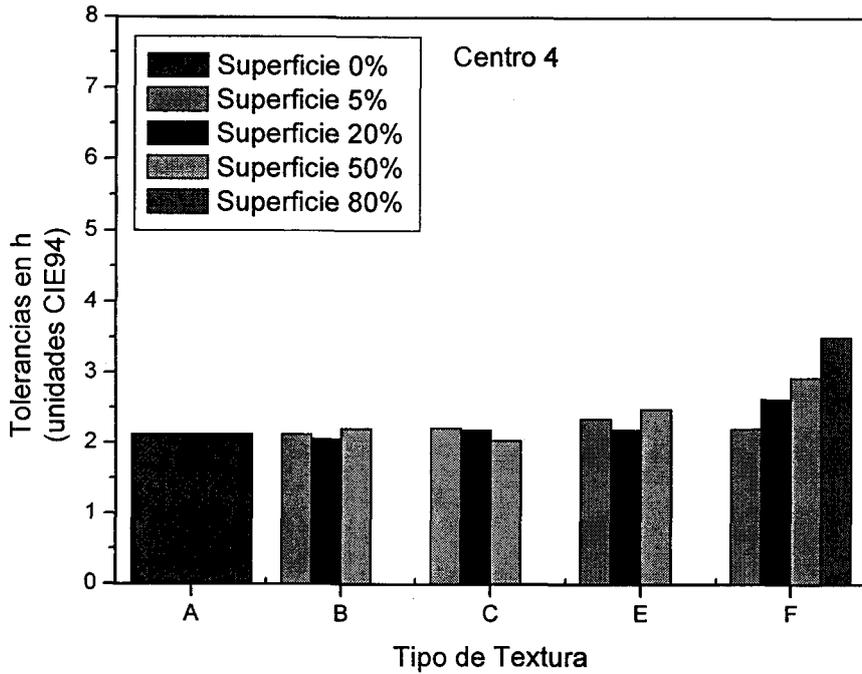


Figura 4.5.18. Tolerancias en tono para todos los tipos y superficies en el centro 4.

Para el centro 4 las texturas tipo B (relativa con +10 unidades en L*), C (relativa con -10 unidades en L*) y F (absoluta) actúan principalmente sobre las tolerancias en claridad. La superficie de textura modula la influencia de la textura absoluta (tipo F) y vagamente de las texturas relativas, que sólo influyen sobre las tolerancias en claridad.

Para el centro 5 (Azul) mostramos los resultados en las Figuras 4.5.19, 4.5.20 y 4.5.21.

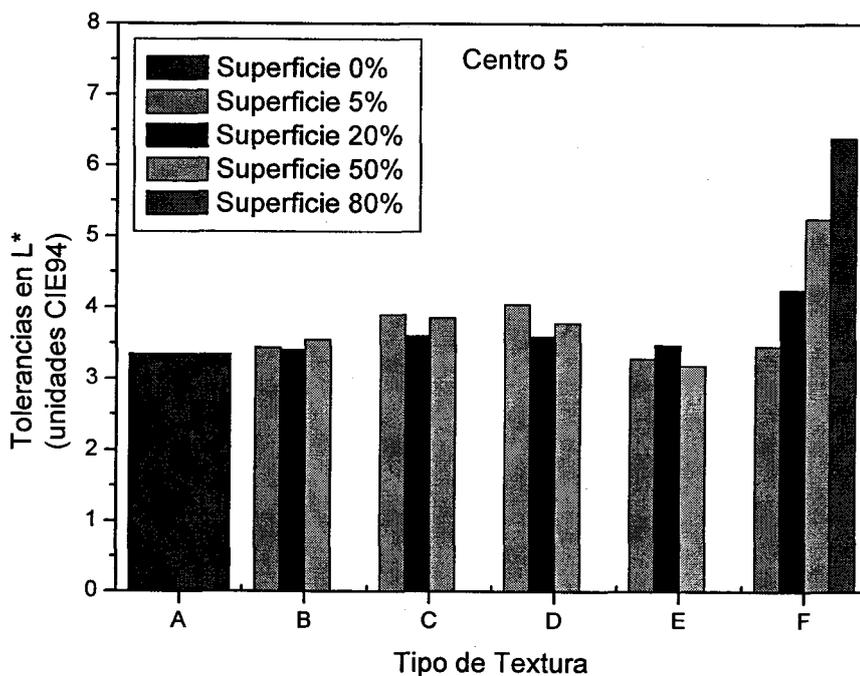


Figura 4.5.19. Tolerancias en claridad para todos los tipos y superficies en el centro 5.

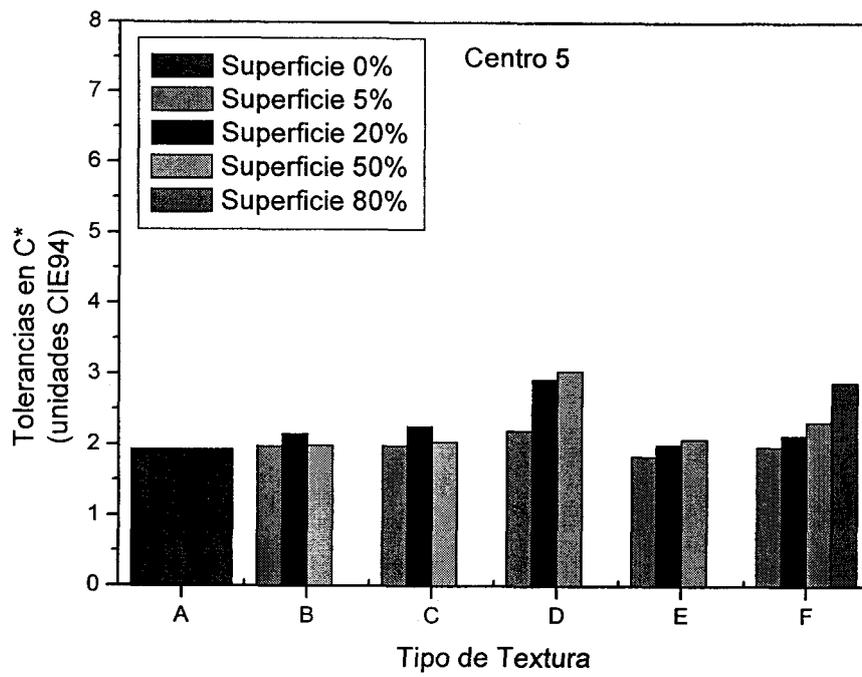


Figura 4.5.20. Tolerancias en croma para todos los tipos y superficies en el centro 5.

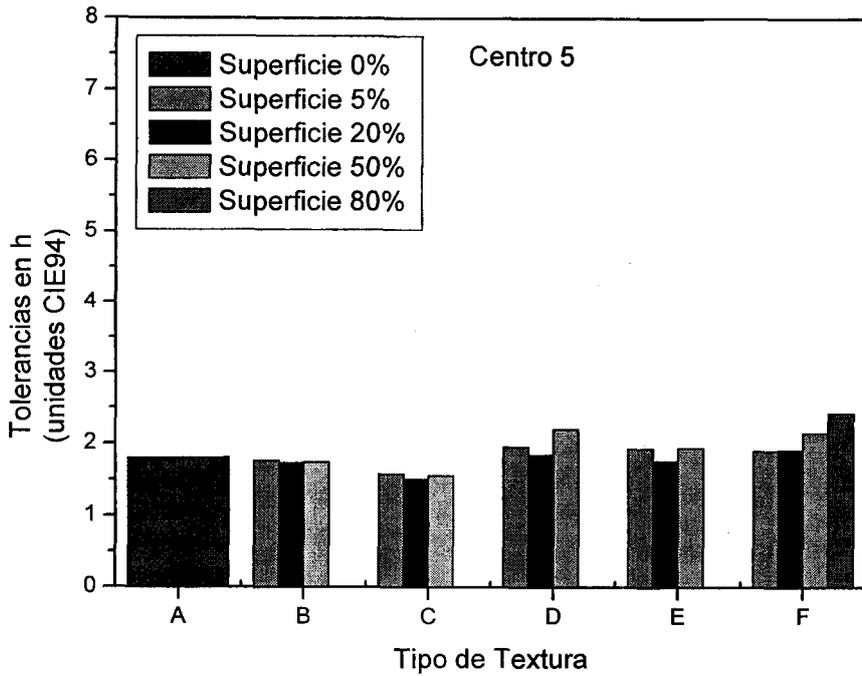


Figura 4.5.21. Tolerancias en tono para todos los tipos y superficies en el centro 5.

Para el centro 5 también influyen más las texturas en las tolerancias en claridad, sobre todo los tipos de textura C (relativa con -10 unidades en L^*), D (relativa con +15 unidades en C^*) y F (absoluta). Para las tolerancias en tono ni la textura absoluta parece tener efecto. Posiblemente porque este centro tiene la menor L^* de todos (cfr. Tabla 3.5.I), por lo que sobre él se distingue peor la textura absoluta. Por la misma razón también para las tolerancias en croma el efecto de las texturas es muy pequeño. Tan solo la textura tipo F (absoluta) y la textura tipo D (textura relativa con +15 unidades en C^*) afectan ligeramente a las tolerancias en croma. Para este centro y tolerancias en croma la textura tipo D tiene un efecto más fuerte, según hemos comentando ampliamente como una interacción entre el centro 5 y el tipo de textura D.

Tras analizar el efecto del tipo de textura y la superficie de la textura centro a centro, las conclusiones generales son que la textura absoluta es la que más influencia tiene sobre las tolerancias visuales, sobre todo en claridad. La superficie de textura modula la influencia de la textura. Las texturas relativas influyen sutilmente sobre las tolerancias. La influencia también es mayor para las tolerancias en claridad y en general más para las texturas B y C que están formadas por puntos con diferencias de claridad respecto al fondo.

4.6. Ajuste de los Coeficientes Paramétricos

Es un hecho sabido que las condiciones de observación influyen de forma importante sobre las tolerancias visuales. Dentro del concepto de condiciones de observación se incluyen muchos aspectos experimentales: iluminante, tamaño de las muestras, etc. Entre estos también se incluye la estructura o textura de las muestras. En las fórmulas CIE94 y CIEDE2000 se intenta tener en cuenta la influencia de las condiciones de observación, incluyendo unos factores que dependen de estas condiciones (cfr. Apéndice 3), llamados coeficientes paramétricos (K_L , K_C y K_H). El valor de los coeficientes paramétricos se toma igual a la unidad bajo unas condiciones de referencia establecidas, que son las siguientes (CIE, 1993; Witt, 1995):

- Iluminación: Fuente simuladora del iluminante D65.

- Iluminancia: 1000 lx.
- Observador: Con visión normal del color.
- Fondo: Gris neutro y homogéneo con $L^* = 50$.
- Modo de observación: Objeto.
- Tamaño de las muestras: Ángulo visual subtendido superior a 4° .
- Separación de las muestras: Mínima (bordes en contacto).
- Magnitud de las diferencias de color: De 0 a 5 unidades CIELAB.
- Estructura de las muestras: Visualmente homogéneas (sin texturas).

Nuestras condiciones de observación evidentemente se apartan, en algunos aspectos, de las condiciones de referencia. Precisamente en esta Memoria de Doctorado estudiamos el efecto de la textura de las muestras sobre las tolerancias visuales. En este apartado analizaremos cómo ajustar los coeficientes paramétricos para correlacionar, en las muestras con textura, las diferencias calculadas (tolerancias) y percibidas. Vamos a calcular el valor de los coeficientes paramétricos de CIE94 y CIEDE2000.

En todo caso, conviene indicar que la CIE recomienda (CIE, 1995) no hacer un uso indiscriminado de valores de los coeficientes paramétricos: tan sólo apunta la práctica actual en la industria textil de considerar $K_L=2.0$; $K_C=1.0$ y $K_H=1.0$, indicando que se desconocen las condiciones experimentales concretas que hacen recomendable esta corrección. Intentamos dar luz sobre las causas de esta corrección, que podría deberse a un efecto de la textura. Además esta recomendación no tiene efecto alguno cuando la diferencia de color en claridad entre las muestras es nula. En principio parece que se supone que la textura (de las muestras textiles) sólo afecta a las tolerancias en claridad, sin influir lo más mínimo a las tolerancias en croma o tono. La recomendación de $K_L=2.0$; $K_C=1.0$ y $K_H=1.0$ necesita una base experimental y debe ser mejor estudiada. Es por ello por lo que en esta Memoria de Doctorado hemos abordamos este estudio. En este momento, una vez analizada la influencia de la textura en nuestros resultados, estamos en condiciones de valorar como insuficiente y demasiado elemental la recomendación de coeficientes paramétricos $K_L=2.0$; $K_C=1.0$ y $K_H=1.0$ para muestras textiles, o por extensión, con textura.

Para ajustar los coeficientes paramétricos, según los resultados que hemos obtenido anteriormente, sólo vamos a considerar los siguientes factores: coordenada, y tipo y superficie de textura. Como hemos probado, para analizar la influencia de la textura, el resto de los factores no son importantes, y ya hemos analizado ampliamente en los apartados anteriores los efectos de cada uno de ellos. Los niveles que vamos a tener en cuenta son: para el factor coordenada: tolerancias en L^* , C^* o h ; para el factor tipo de textura: B (relativa con +10 unidades en L^*), D (relativa con +15 unidades en C^*) y F (absoluta); y para el factor superficie de la textura: 20%, 50% y 80%. Los niveles elegidos son los que tienen diferencias significativas en las tolerancias, salvo la textura tipo D, que la hemos incluido para tener un tipo de cada una de las texturas relativas (tipo B como relativa en claridad y tipo D como relativa en croma) y la absoluta.

Para las muestras con los niveles de los factores que hemos indicado, calculamos la diferencia de color del Par de Prueba (tolerancia visual), en unidades CIE94 y también en unidades CIEDE2000. Vamos a comparar, por parejas, las tolerancias visuales de las muestras con textura con las tolerancias correspondientes a las mismas muestras pero homogéneas. Cada pareja de datos está formada por la diferencia de color calculada entre muestras con textura (donde ajustamos los coeficientes paramétricos), y la diferencias de color calculada entre las mismas muestras homogéneas (donde mantenemos el valor unidad de los coeficientes paramétricos). Todas las parejas correspondientes a la misma coordenada, tipo y superficie las agrupamos en un conjunto de datos, que contendrá las tolerancias de los distintos observadores, centros, sentido, grosor y repetición. El número de pares de tolerancias en cada conjuntos es aproximadamente 60.

Comparamos cada conjunto de pares de tolerancias de dos formas: mediante el factor PF/3 y calculando el promedio, para todos los pares, de la diferencia de cada par. Modificando el valor de los coeficientes paramétricos minimizamos el valor del PF/3 o el valor de la diferencia promedio. Como ambas tolerancias (con y sin textura) han sido obtenidas por comparación con el mismo Par de Referencia, el valor de la tolerancia calculado en ambos casos, ajustando adecuadamente los coeficientes paramétricos, ha de ser el mismo. Como describimos en el Capítulo 3, hemos desarrollado un programa informático que calcula, de la forma explicada, los valores de los coeficientes paramétricos que minimizan uno de los dos valores: factor PF/3 o promedio de las diferencias.

Al optimizar los coeficientes paramétricos por la minimización del factor PF/3 observamos una gran cantidad de mínimos locales, haciendo muy difícil obtener resultados claros. Para nuestros conjuntos de pares de tolerancias (formados por unos 60 pares), dependiendo del valor inicial del coeficiente paramétrico y del incremento (ambos valores introducidos en el programa, que realiza la búsqueda del mínimo mediante el Método Simplex Modificado (Nelder et al., 1965; Nelder, 1979)) se obtienen resultados muy diferentes. Hemos observado que el factor PF/3 es muy poco sensible a variaciones del orden de la décima sobre uno de los coeficientes paramétricos. A un nivel de 10^{-5} sobre el valor del factor PF/3 no discriminamos suficientemente para optimizar los coeficientes paramétricos para la mayoría de las texturas. Puede deberse a que el número de pares en el cálculo del factor PF/3, alrededor de 60, quizás no es suficiente para utilizar este método de optimización.

Por tanto optimizamos el valor de los coeficientes paramétricos minimizando la diferencia (el promedio para el conjunto) entre las tolerancias calculadas en los pares con textura y sin textura. Dependiendo de que la diferencia de color del par sea fundamentalmente en L^* , C^* o h , optimizamos el coeficiente paramétrico correspondiente, manteniendo los otros dos iguales a la unidad. Esto es, calculamos K_L para tolerancias en claridad, K_C para tolerancias en croma y K_H para tolerancias en tono. En la Tabla 4.6.I presentamos los valores obtenidos para los coeficientes paramétricos de CIE94 y CIEDE2000.

B (20%)	1.19	1.14	1.02	1.21	1.14	1.01
B (50%)	1.24	1.12	1.04	1.23	1.15	1.03
D (20%)	1.06	1.20	1.16	1.06	1.20	1.15
D (50%)	1.09	1.20	1.13	1.13	1.20	1.13
F (20%)	1.42	1.24	1.33	1.44	1.26	1.32
F (50%)	1.72	1.43	1.45	1.71	1.42	1.45
F (80%)	2.13	1.80	1.71	2.09	1.80	1.71

Tabla 4.6.I. Coeficientes paramétricos optimizados para CIE94 y CIEDE2000 para las texturas consideradas.

En la gráfica de la Figura 4.6.1 representamos los valores de los coeficientes paramétricos para los tipos y superficies de textura considerados.

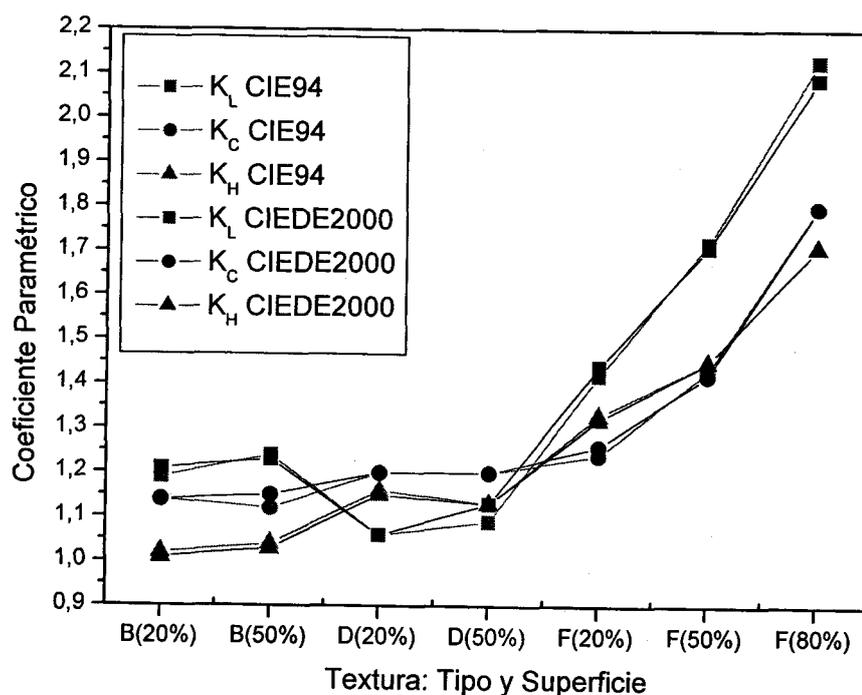


Figura 4.6.1. Coeficientes paramétricos optimizados de CIE94 y CIEDE2000 para las texturas consideradas.

Aunque en la Tabla 4.6.I los valores calculados aparecen juntos para los 3 coeficientes, pertenecen a las tolerancias de las muestras, con la textura correspondiente en cada caso, y con diferencia de color esencialmente en claridad para K_L , en croma para K_C y en tono para K_H .

En primer lugar señalamos que las diferencias entre los coeficientes de CIE94 y CIEDE2000 son muy pequeñas. Para las textura absolutas claramente el valor de los coeficientes crece con la superficie de la textura hasta valores en torno a 2. Salvo para el tipo de textura D el coeficiente K_L es mayor que K_C o K_H . Para las texturas relativas las diferencias entre las dos superficies de textura (20% y 50%) son mínimas.

Es destacable que para la textura tipo B, puntos con mayor luminancia (cfr. Tabla 3.4.I), el coeficiente K_L sea el mayor y K_H prácticamente igual a 1; mientras que para el tipo de textura D, puntos con mayor croma (cfr. Tabla 3.4.I), el coeficiente K_C es el mayor siendo ahora K_L cercano a la unidad. La consecuencia de esto es que las texturas relativas B y D (las C y E tienen menor influencia) influyen más en la tolerancia de la coordenada que forman los puntos de la textura (claridad y croma para B y D respectivamente).

Las texturas absolutas (tipo F) influyen en las tres coordenadas, aunque más en la claridad. Para las texturas absolutas con la mayor superficie de textura (80%) se alcanzan valores del coeficiente K_L parecidos a los indicados por la CIE para muestras textiles ($K_L=2$). Sin embargo observamos que no es K_L el único coeficiente a tener en cuenta en las muestras con textura, siendo muy importante ajustar convenientemente además los valores de K_C y K_H . También en nuestros resultados comprobamos que dependiendo de la textura, tipo y grado, el valor de cada coeficiente será diferente.

Nuestros ajustes de los coeficientes paramétricos corresponden a tolerancias visuales sólo en claridad, croma o tono, conforme a nuestro diseño experimental. Como explicamos en el Capítulo 3 hemos restringido los resultados a los casos en los que la diferencia de claridad (ΔL^*), croma (ΔC^*) o tono (ΔH^*), entre las muestras del Par de Prueba, es superior al 75% de la diferencia de color total CIELAB. Al no ser estrictamente la diferencia en una sola coordenada, el valor del coeficiente ajustado será un poco elevado, pues recae también sobre él el peso del ajuste de las pequeñas diferencias en las otras coordenadas (menores del 15% pero no despreciables). Por lo tanto para el caso general de cálculo de una diferencia de color entre dos muestras cualquiera con textura, habrá que tener en cuenta la combinación de los 3 coeficientes, y es probable que sus valores sean ligeramente menores a los obtenidos. En el caso general de muestras con textura de cualquier tipo, antes de utilizar la fórmula de diferencia de color, en el análisis de las condiciones de observación, habrá que hacer un estudio de la textura de las muestras para discernir qué valores han de tener los coeficientes paramétricos. De forma aproximada podemos considerar que, para casos de muestras con una textura fuerte (e.g. textura absoluta con superficie del 80%), son adecuados los valores de K_L en torno a 2 y K_C y K_H en torno a 1.7. Es de gran interés estudiar en futuros trabajos cómo ha de ser la combinación de los coeficientes paramétricos para diferencias de color en general entre muestras con texturas.

4.7. Análisis de las Medidas Instrumentales

En esta Memoria de Doctorado nos hemos planteado estudiar la influencia de la textura, no sólo sobre las tolerancias visuales supra-umbrales, sino también sobre la

medida de color. En las medidas de color hemos considerado los errores propios inherentes a cualquier medida. En el tratamiento de los errores hemos procedido, siguiendo el trabajo que presenté como Memoria de Licenciatura (Huertas, 2001), según explicamos a continuación.

Para analizar la influencia de la textura sobre la medida del color, hemos medido el color de los 5 centros estudiados con cada una de las texturas. Como expusimos en el Capítulo 3, hemos realizado las medidas mediante un espectrorradiómetro SpectraScan PR-704 de Photo Research. En las 645 comparaciones, resultantes de la combinación de todos los factores (cfr. Tabla 3.6.I), hemos medido, del Par de Prueba, la muestra correspondiente al centro CIE.

Para calcular el error de las medidas hemos considerado los valores triestímulo medidos con el espectrorradiómetro como los datos de partida. Sin embargo, los valores triestímulo resultado de cada medida no son exactamente los definidos por la CIE, que los transcribimos en la Ecuación (12), ya que no están normalizados, y por tanto tienen unidades (e.g. Y está expresado en cd/m^2). Hemos normalizado, mediante k, el resultado de cada medida del espectrorradiómetro. De esta forma Y estará comprendida entre 0 y el valor del blanco, que siempre es 100 de acuerdo con el valor de Y que da la CIE para sus iluminantes.

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda \end{aligned} \quad (12)$$

donde: $k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda}$,

R_{λ} es la reflectancia espectral de la muestra,

S_{λ} es la distribución espectral de la fuente luminosa, y

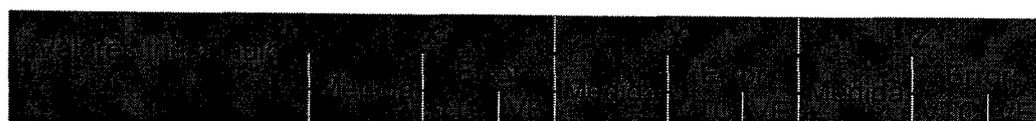
$\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$ son las funciones de mezcla espectrales del Observador Patrón, en

nuestro caso el Observador CIE 1964.

En el cálculo de las coordenadas CIELAB no influye la normalización de los valores triestímulo, pues estas coordenadas siempre dependen de cocientes entre los valores triestímulo de la muestra y los del blanco. Sin embargo, en el cálculo de los errores correspondientes a las coordenadas CIELAB, la normalización de los valores triestímulo es necesaria para obtener resultados correctos.

Para determinar el error, en la medida de los valores triestímulo, hemos realizado 3 medidas sucesivas en el mismo punto (centro) de las muestras; y 3 medidas en diferentes puntos y en diferente momento. De las 3 primeras medidas determinaremos, mediante el promedio, los valores triestímulo de la medida, y el error correspondiente a *variación temporal corta* mediante la desviación estándar. Calculando la desviación estándar de las 3 medidas realizadas en diferentes puntos obtenemos el error correspondiente a *variación espacial*. El error correspondiente a variación espacial realmente es una combinación de variación espacial y temporal larga, pues las medidas no se realizaron consecutivamente. El número total de medidas realizadas fue de 3235 (645 muestras medidas 5 veces más 10 medidas del blanco de referencia). Con estas medidas hemos calculado los valores triestímulo y los errores de variación temporal corta y variación espacial para las 645 muestras. Ahora bien, las 645 muestras medidas no son todas distintas, ya que los factores coordenada y sentido no afectan al centro CIE del Par de Prueba, que es lo que hemos medido. Entonces, promediamos los valores triestímulo y los errores correspondientes al mismo centro.

Mediante propagación cuadrática hemos propagado los errores desde los valores triestímulo hasta las coordenadas CIELAB. En el cálculo de las coordenadas CIELAB el blanco de referencia, en nuestro caso es una medida más, afectada de error, que lo hemos calculado y lo incluimos en la propagación. Como detallamos en el Capítulo 3, el blanco de referencia corresponde con el estímulo del Campo Circundante. Los valores triestímulo medidos para el blanco de referencia los mostramos en la Tabla 4.7.I.



Blanco de Referencia	92.71	0.2	0.5	100.0	0.2	0.4	135.1	0.4	0.7
----------------------	-------	-----	-----	-------	-----	-----	-------	-----	-----

Tabla 4.7.I. Valores tristímulo del blanco de referencia.

Para la propagación de los errores hemos considerado los coeficientes de correlación entre los valores tristímulo, ya que éstos no son independientes debido al solapamiento de las funciones de mezcla. Hemos calculado los coeficientes de correlación para cada una de las medidas, siguiendo el procedimiento de Gardner (Gardner et al., 1999; Gardner, 2000). Para el cálculo hemos tomado el valor de la radiancia espectral de una de las medidas de variación temporal corta. En las tablas A4.I a A4.V del Apéndice 4 mostramos los valores obtenidos.

Según las conclusiones obtenidas en la Memoria de Licenciatura (Huertas, 2001), es importante en los errores calculados incluir el error del blanco de referencia (cuando éste sea una medida más) y los coeficientes de correlación entre los valores tristímulo.

Con los valores tristímulo de cada muestra y cada uno de sus errores (de VTC y VE), los valores tristímulo del blanco de referencia y sus errores (de VTC y VE respectivamente para los errores de las muestras), y con los coeficientes de correlación entre los valores tristímulo, calculamos los errores en las coordenadas CIELAB utilizando las ecuaciones (A4) a (A8) del Apéndice 1.

A continuación analizaremos cómo influye la textura en la medida del color del estímulo. En las figuras siguientes representamos los valores de L^* , C^* y h medidos para cada centro con cada tipo y superficie de textura y grosor 1. Los segmentos de error, imperceptibles en las gráficas, corresponden con el error de variación temporal corta, propagado desde los valores tristímulo hasta la coordenada CIELAB correspondiente. En la gráfica de la Figura 4.7.1 representamos los valores de L^* medidos para el centro 1 (Gris).

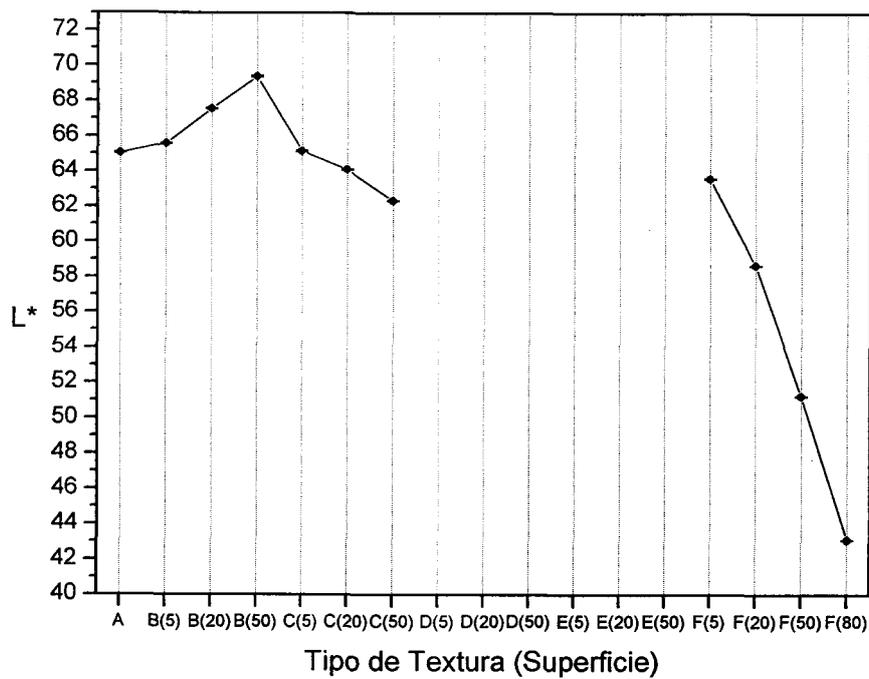


Figura 4.7.1. Valores medidos de L^* del centro 1, con su error, para todas las texturas.

El valor medido de la coordenada L^* aumenta con el tipo de textura B (textura relativa, formada por puntos con L^* 10 unidades más que el fondo), y disminuye con las texturas tipo C y F, que corresponden a texturas formadas por puntos más oscuros que el fondo (cfr. Tabla 3.4.I). La subida, o bajada, de la claridad es proporcional a la superficie de textura. Los errores en la coordenada L^* son tan pequeños que no se aprecian en la gráfica.

En las gráficas de las 3 figuras siguientes representamos los valores de las coordenadas L^* , C^* y h respectivamente, para el centro 2 (Rojo), medidos para cada tipo y superficie de textura y grosor 1.

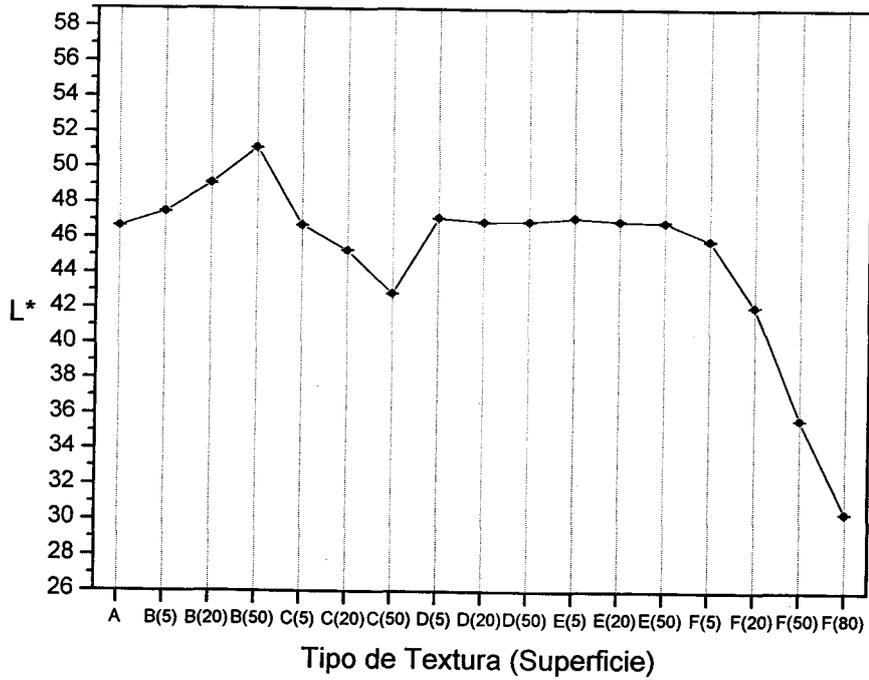


Figura 4.7.2. Valores medidos de L^* del centro 2, con su error, para todas las texturas.

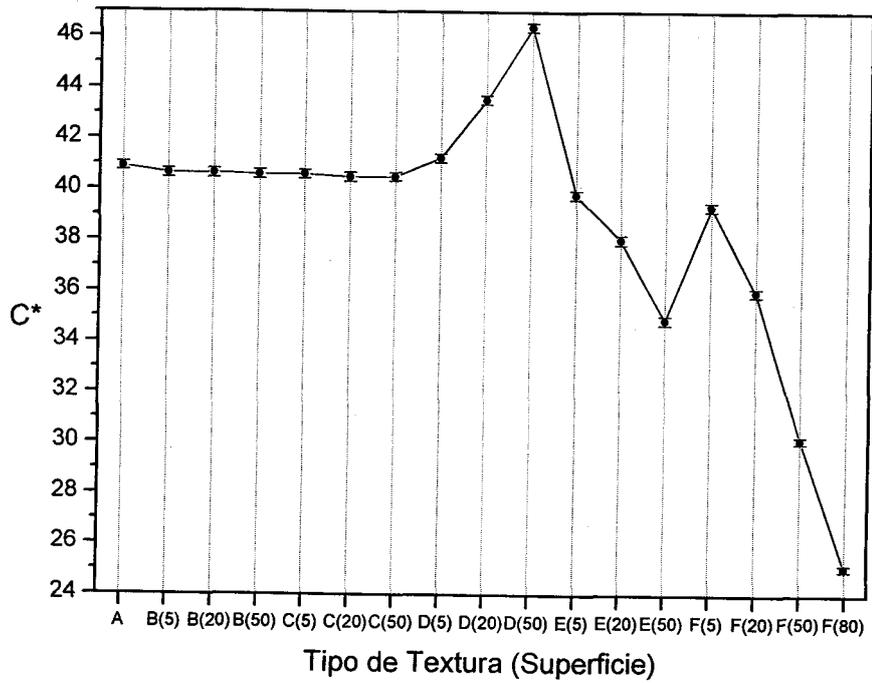


Figura 4.7.3. Valores medidos de C^* del centro 2, con su error, para todas las texturas.

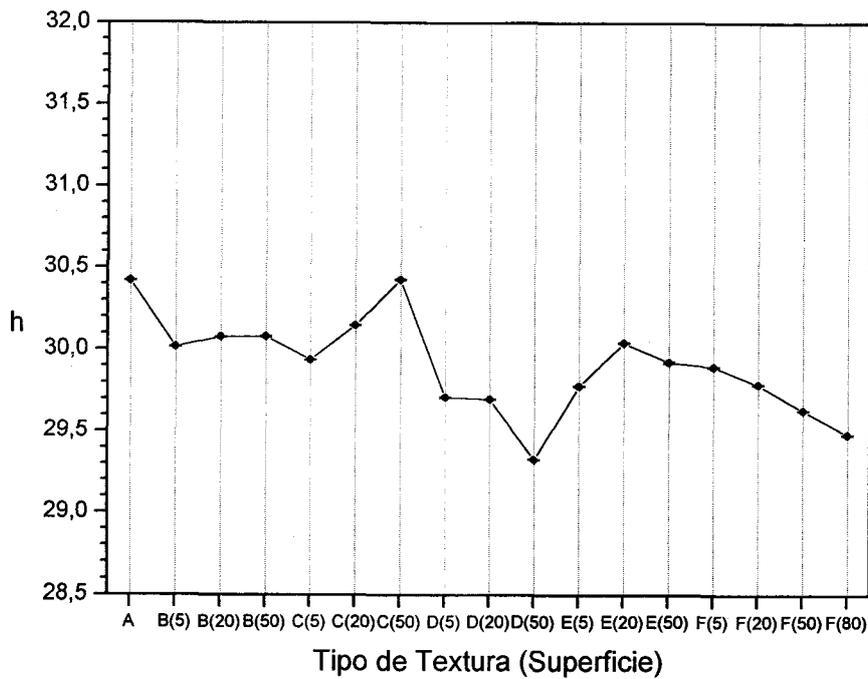


Figura 4.7.4. Valores medidos de h (en grados) del centro 2, con su error, para todas las texturas.

Para la claridad ocurre como en el centro 1 para los tipos de textura B, C y F. Para los tipos de textura D y E (texturas relativas en croma), el valor de L^* permanece casi constante. Es en la medida del croma donde se perciben estas texturas, con subidas y bajadas para los tipos D (textura relativa con +15 unidades en C^*) y E (textura relativa con -15 unidades en C^*) respectivamente. Los valores de croma no se alteran para las texturas tipo B y C. Los valores del ángulo de tono oscilan del orden de 1.5° .

Para los centros 3 (Amarillo), 4 (Verde) y 5 (Azul) representamos, en las gráficas siguientes, la claridad, croma y tono medidos para los tipos y superficies de textura estudiados. Los valores corresponden a texturas con grosor 1. Para el grosor 4 se tienen resultados análogos para todos los centros y texturas.

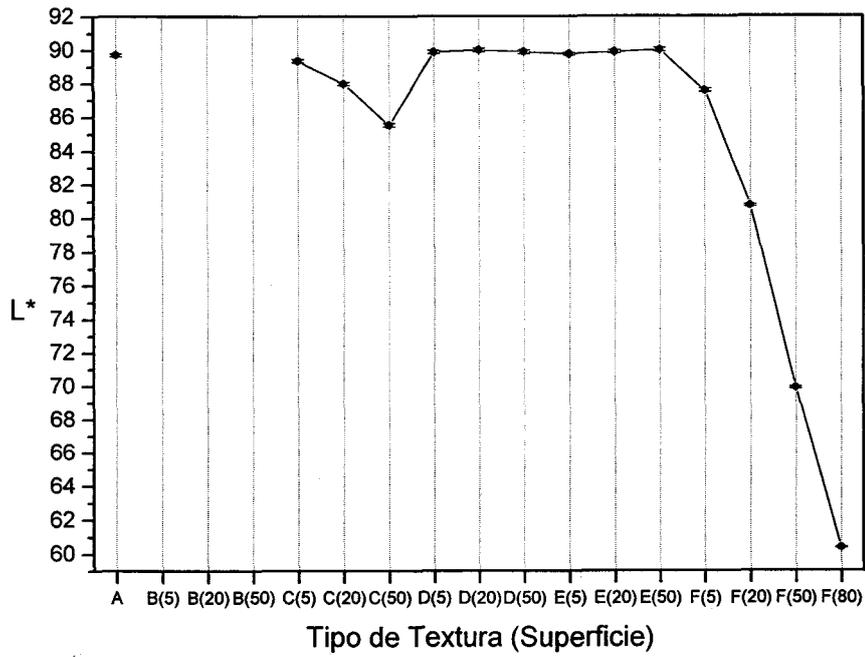


Figura 4.7.5. Valores medidos de L^* del centro 3, con su error, para todas las texturas.

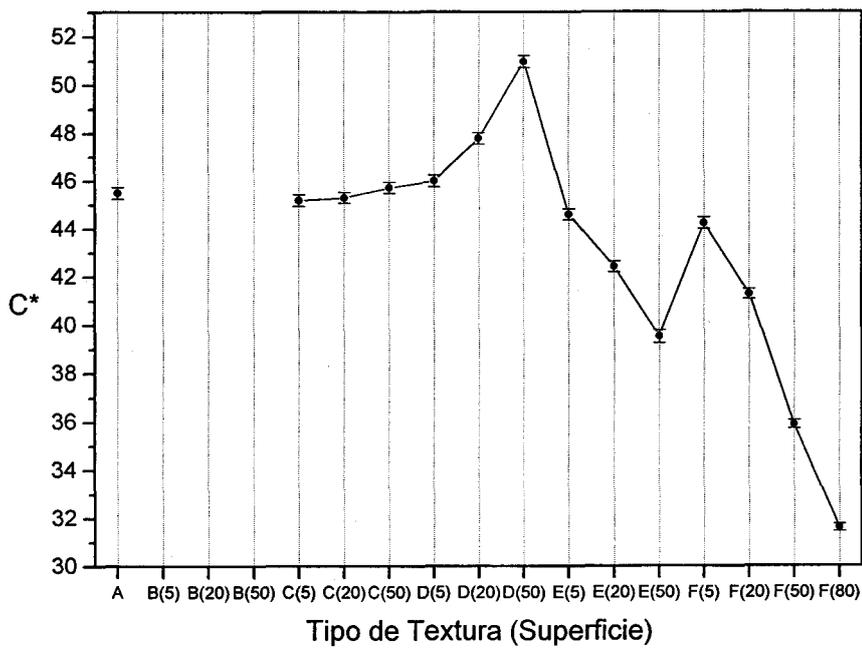


Figura 4.7.6. Valores medidos de C^* del centro 3, con su error, para todas las texturas.

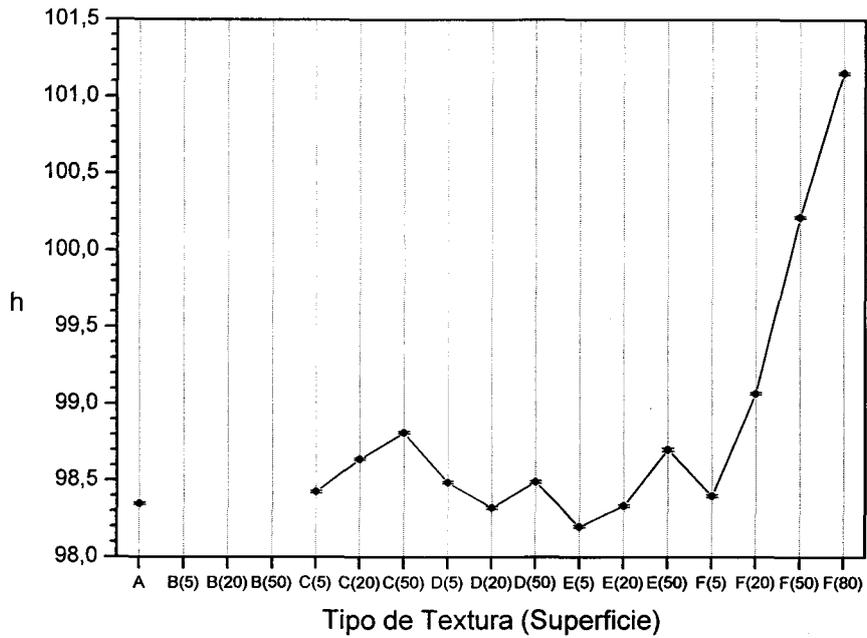


Figura 4.7.7. Valores medidos de h (en grados) del centro 3, con su error, para todas las texturas.

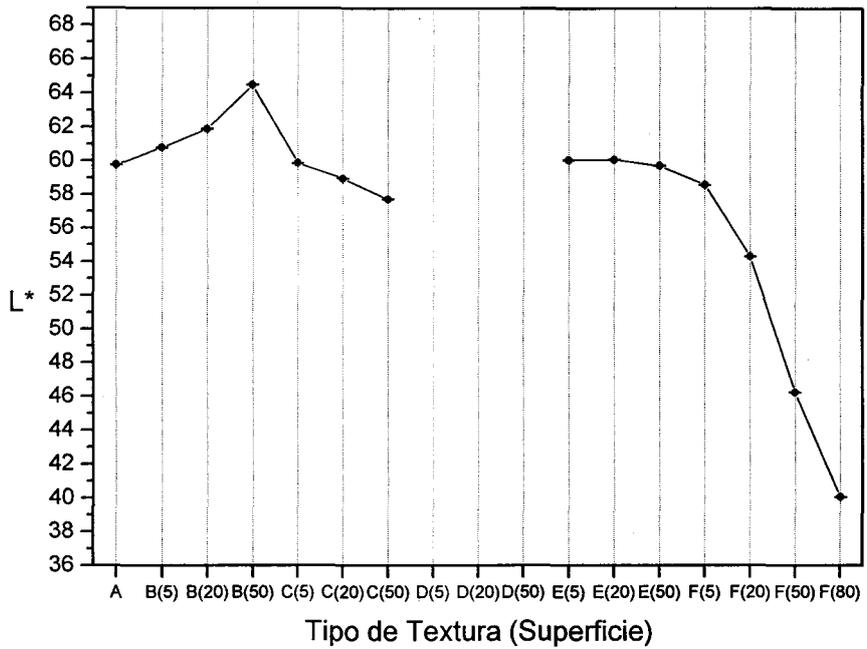


Figura 4.7.8. Valores medidos de L^* del centro 4, con su error, para todas las texturas.

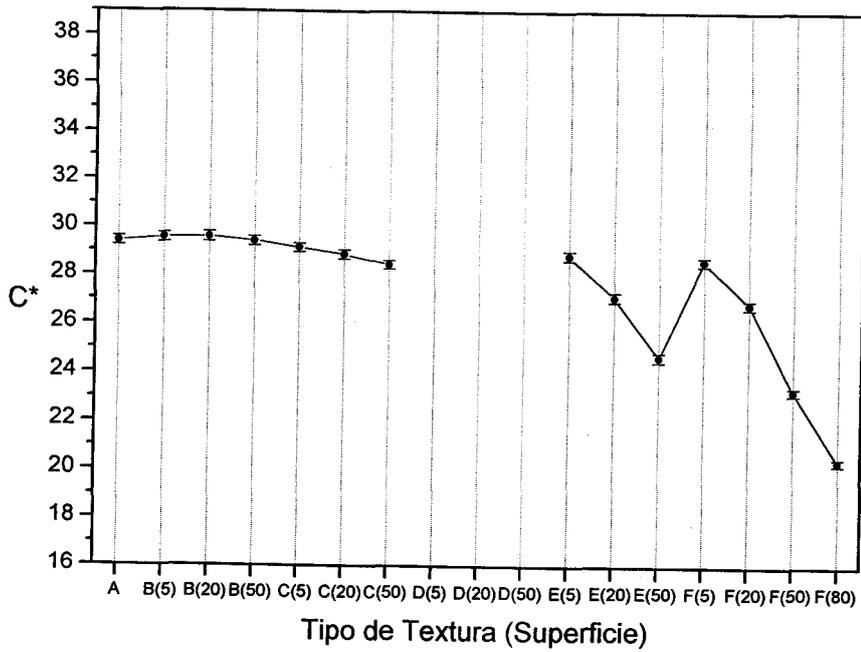


Figura 4.7.9. Valores medidos de C^* del centro 4, con su error, para todas las texturas.

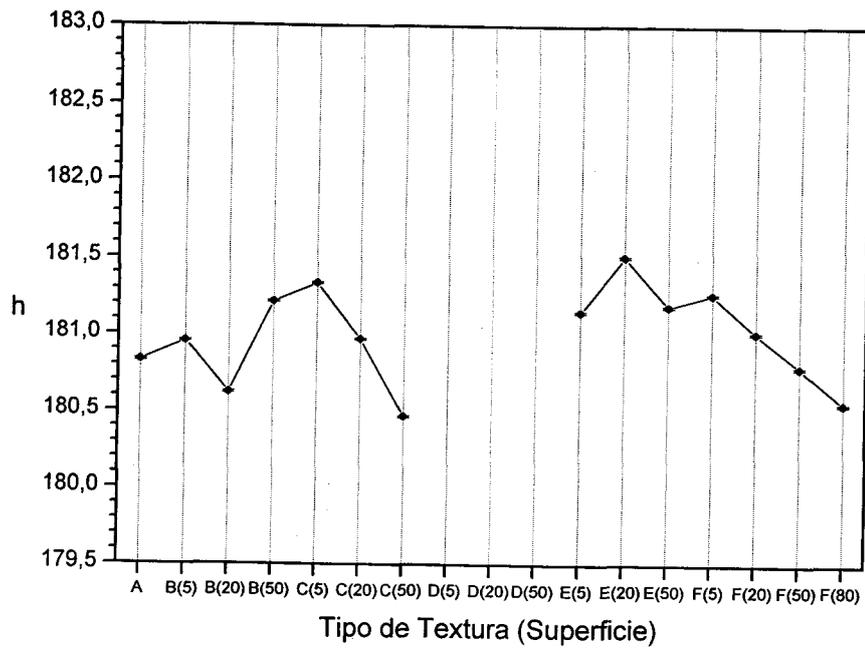


Figura 4.7.10. Valores medidos de h (en grados) del centro 4, con su error, para todas las texturas.

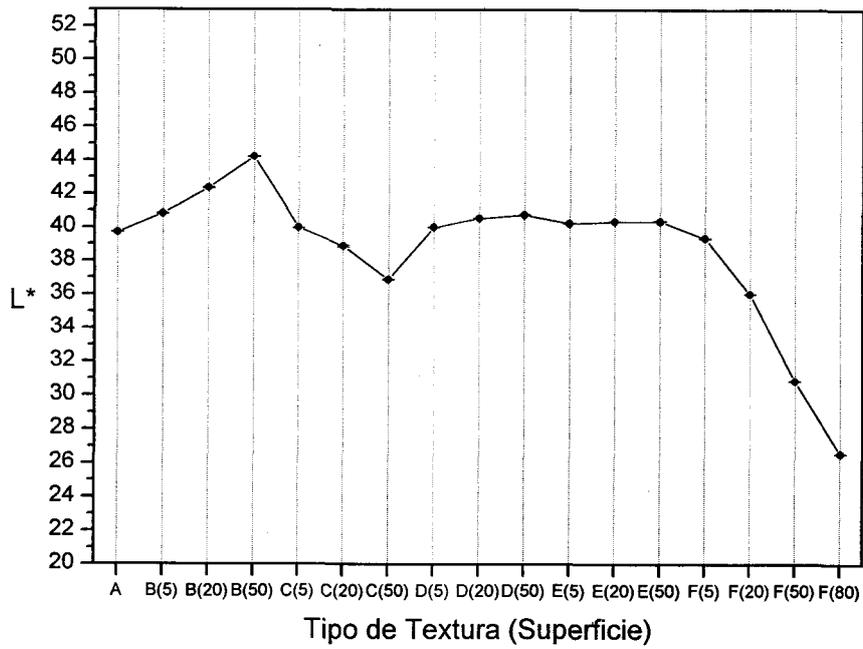


Figura 4.7.11. Valores medidos de L^* del centro 5, con su error, para todas las texturas.

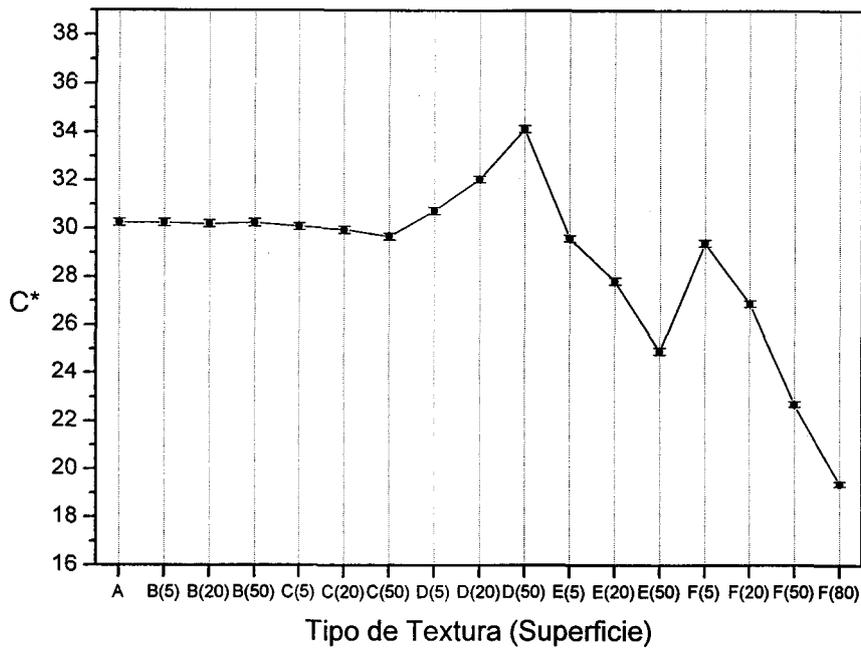


Figura 4.7.12. Valores medidos de C^* del centro 5, con su error, para todas las texturas.

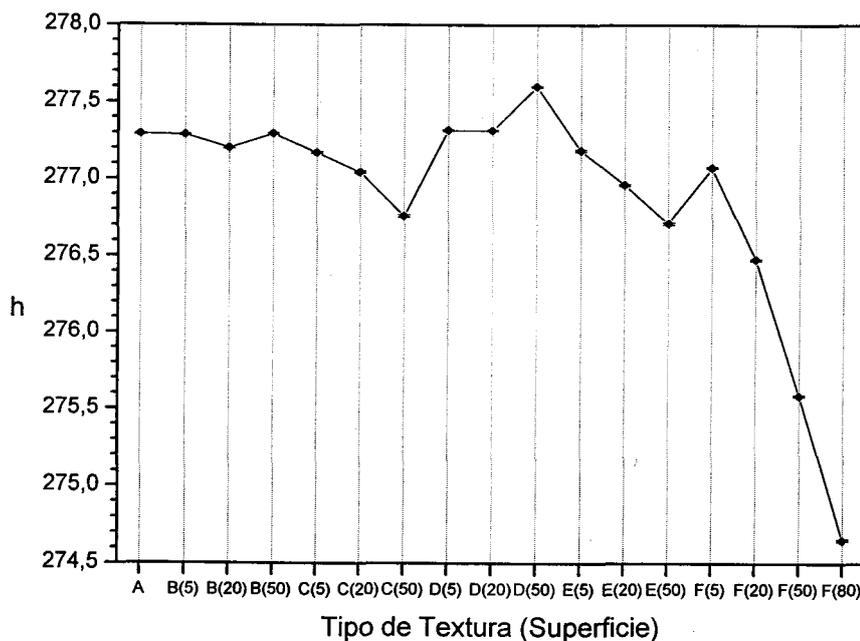


Figura 4.7.13. Valores medidos de h (en grados) del centro 5, con su error, para todas las texturas.

En todos los centros el efecto de la textura sobre la medida de las coordenadas de color es el mismo. En general, las texturas consideradas influyen menos sobre el ángulo de tono, con cambios del orden de 3° en el mayor de los casos. La influencia más clara y lógica es sobre la claridad y el croma.

El efecto de las texturas relativas es principalmente sobre la coordenada que diferencia la textura del fondo: L^* para los tipos B y C, y C^* para los tipos D y E. El valor de la coordenada aumenta o disminuye de acuerdo con el tipo de textura, y proporcionalmente a la superficie de la textura. El efecto de los tipos B y C sobre L^* y D y E sobre C^* parece ser de igual cuantía, aunque B y C se diferencian del fondo en 10 unidades de L^* y D y E en 15 unidades de C^* . Para el 50% de la superficie, el aumento o la disminución en las coordenadas medidas es del orden de 5 unidades en L^* o C^* para las texturas B, C y D, E respectivamente. Para 5% de la superficie los valores de L^* y C^* aumentan o disminuyen por debajo de una unidad.

La textura absoluta, formada por puntos negros, siempre disminuye los valores de L^* y C^* . También influye sobre los valores del ángulo de tono, disminuyendo su valor en todos los centros, excepto el centro 3 (Amarillo). La superficie de textura modula la disminución, que también depende del valor inicial de la coordenada. Lógicamente, a

mayores valores iniciales de L^* o C^* mayor es la disminución conforme aumenta la superficie de textura F (absoluta).

En todos los casos el error de las coordenadas CIELAB, propagado desde los valores triestímulo, es despreciable. De hecho no se distingue en ninguna de las gráficas de las Figuras 4.7.1 a 4.7.13. A continuación vamos a analizar en profundidad esos errores, y los correspondientes a variación espacial. En la gráfica de la Figura 4.7.14 representamos el error de las coordenadas L^* , C^* y h para el centro 1 (Gris). Los errores corresponden a variación temporal corta, tanto en el centro como en el blanco de referencia.

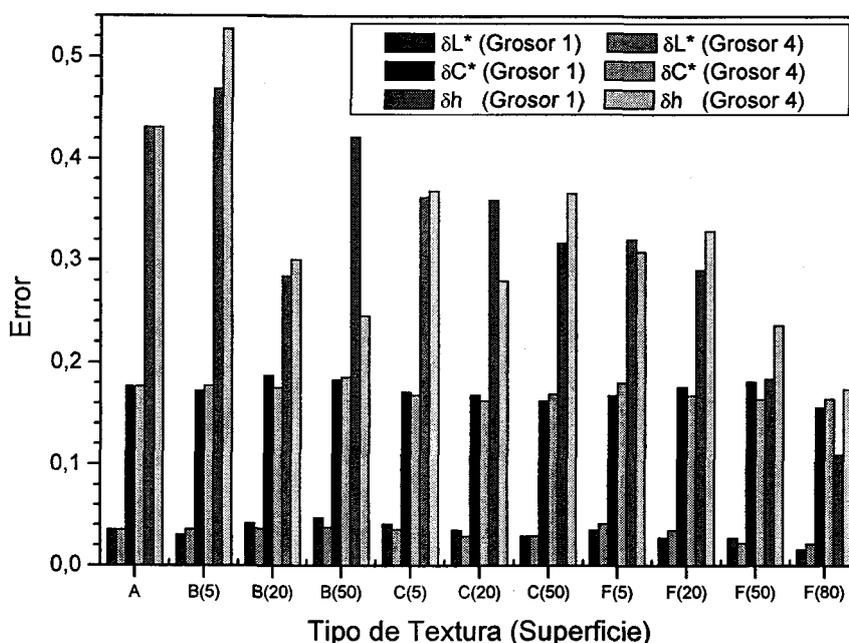


Figura 4.7.14. Error en las coordenadas L^* , C^* y h para todas las texturas del centro 1.

En primer lugar llama la atención que el error asociado a la coordenada h , (δh , en radianes) es mucho mayor, en casi todos los casos, que los de las coordenadas L^* o C^* . El centro 1 es acromático (cfr. Tabla 3.5.I), lo que significa que el croma es bajo y, por tanto no tiene mucho sentido, para este centro, el ángulo de tono. Al medir los valores de croma, y sobre todo de tono, obtenemos un error experimental muy grande. Para las texturas absolutas disminuye el error en h y se hace más parecido al error en C^* . Para la coordenada L^* el error es especialmente pequeño para todas las texturas. Las diferencias

entre los errores para grosor 1 y 4 son muy pequeñas.

En la figura siguiente representamos, para el centro 2 (Rojo), el valor de los errores de variación temporal corta (en los centros y en el blanco de referencia) para todos los tipos de textura, superficie y grosor.

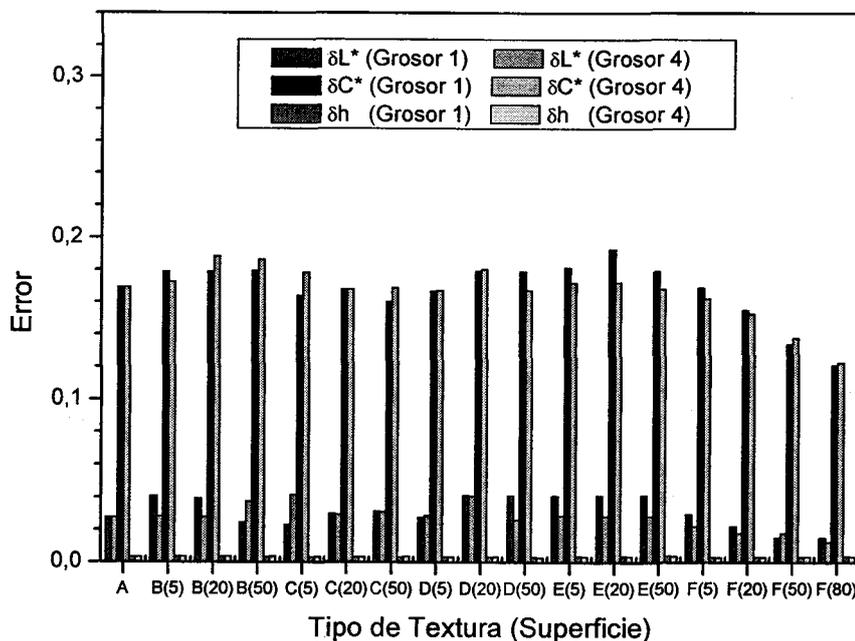


Figura 4.7.15. Error en las coordenadas L^* , C^* y h para todas las texturas del centro 2.

El error obtenido en la medida de la coordenada C^* es mucho mayor que para L^* o h . El error de L^* es muy pequeño, y el de h cercano a 0, como obtuvimos en trabajos previos de medidas de muestras Munsell (Huertas, 2001). No existen diferencias entre los errores para las diferentes texturas: ni por tipo, superficie o grosor.

Los errores correspondientes al centro 3 (Amarillo) se muestran en la gráfica de la Figura 4.7.16.

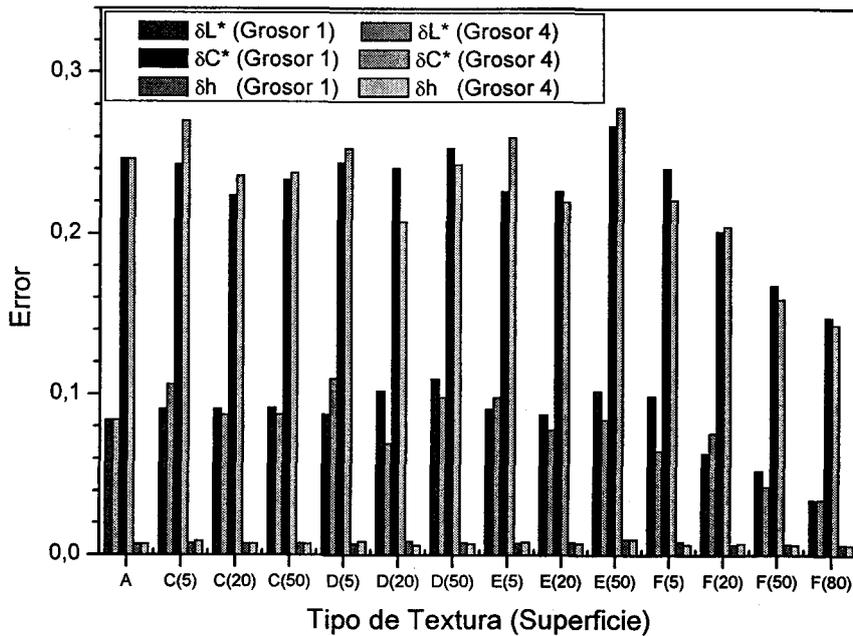


Figura 4.7.16. Error en las coordenadas L^* , C^* y h para todas las texturas del centro 3.

Los errores correspondientes al cromatismo siguen siendo los mayores, y son del mismo orden que en el centro 2. Sin embargo, para el centro 3 los errores de L^* son mucho mayores que para el centro 2. El centro 3 es el que tiene el mayor valor de L^* , y como observamos, los errores mayores en L^* . El error del ángulo de tono (en radianes) sigue siendo despreciable. Para los centros 4 (Verde) y 5 (Azul) representamos los errores en las gráficas de las Figuras 4.7.17 y 4.7.18.

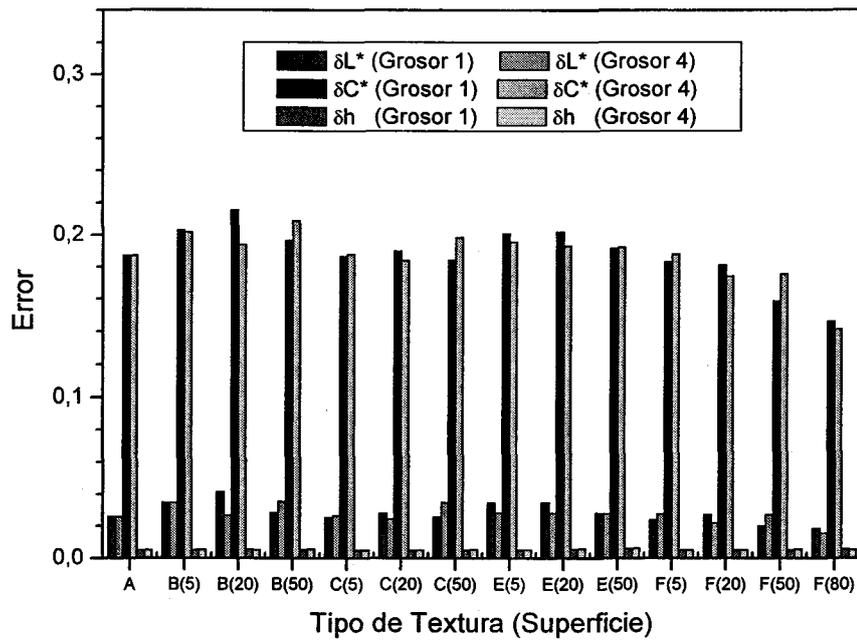


Figura 4.7.17. Error en las coordenadas L^* , C^* y h para todas las texturas del centro 4.

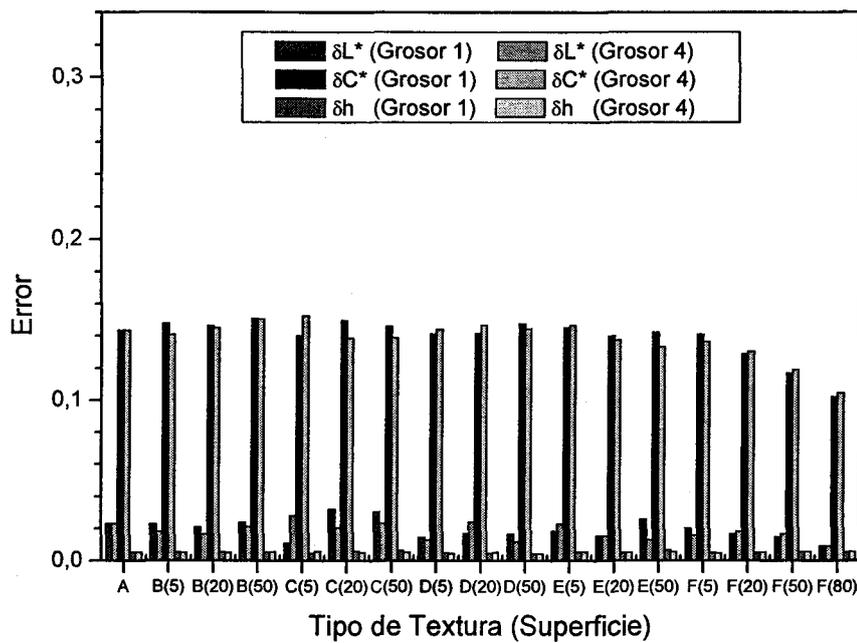


Figura 4.7.18. Error en las coordenadas L^* , C^* y h para todas las texturas del centro 5.

Los errores de C^* siguen siendo los mayores y los de h muy pequeños. Los errores de la coordenada L^* son muy parecidos a los del centro 2, ya que los valores de

L^* de los centros 2, 4 y 5 son similares.

No observamos diferencias grandes, en los errores de las coordenadas, en las distintas texturas, para ninguno de los centros. Lo más destacable es una tendencia a disminuir el error en L^* y C^* para el tipo de textura F (absoluta) a medida que aumenta la superficie de textura. Esta tendencia está conectada con la disminución de los valores de L^* y C^* , para todos los centros, con la textura tipo F. Entre los grosores 1 y 4 las diferencias son completamente despreciables en todos los casos. Como conclusión, las texturas cambian las coordenadas de color medidas, pero no los errores de variación temporal corta de las medidas.

Sí obtenemos diferencias entre los errores correspondientes a medidas de variación temporal corta y variación espacial. En la Figura 4.7.19 mostramos ambos tipos de errores para todos los centros. Hemos promediado los errores calculados para medidas de muestras con texturas con grosor 1 y grosor 4. También hemos promediado todas las texturas de cada centro. Los segmentos de error corresponden a la desviación estándar del promedio de las texturas.

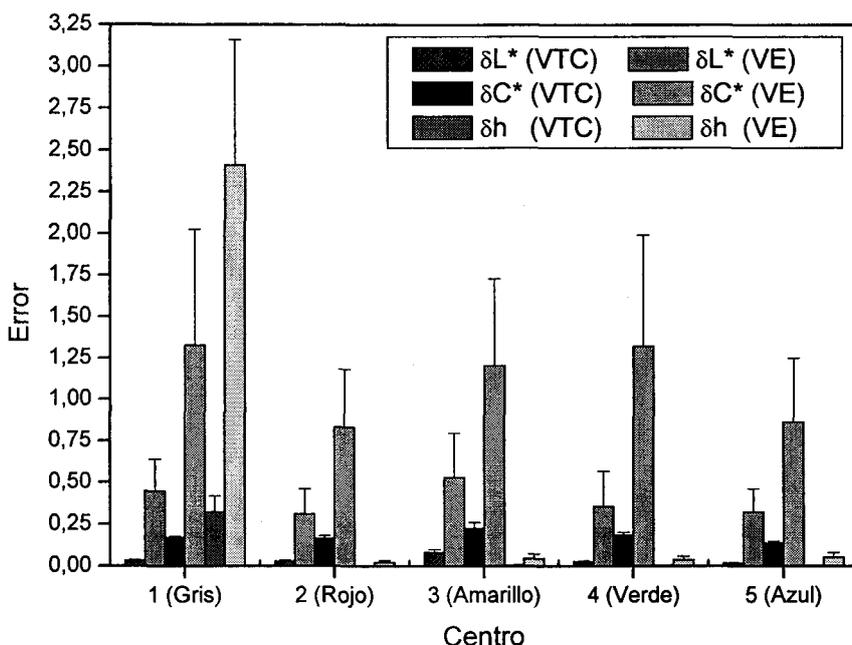


Figura 4.7.19. Errores, de variación temporal corta y variación espacial, en las coordenadas L^* , C^* y h para todos los centros.

Para las medidas de variación espacial los errores son más del doble que para las medidas de variación temporal corta. El error asociado a la medida del croma es el mayor, mientras que el correspondiente al ángulo de tono (en radianes) es despreciable, tanto con medidas de variación temporal corta como de variación espacial. El centro 1, por ser acromático, es un caso especial, como ya hemos comentado. Los segmentos de error, correspondientes a la desviación estándar del promedio de las texturas, son muy pequeños para las medidas de variación temporal corta, y considerables para las de variación espacial. Como hemos comentado en las figuras 4.7.14-4.7.18, las medidas de variación temporal corta tienen errores muy parecidos para todos los tipos de textura. No ocurre lo mismo para las medidas de variación espacial. En la gráfica de la Figura 4.7.20 representamos los errores de variación espacial, para todos los tipos de textura y superficies. Los datos pertenecen al centro 2. En este caso los segmentos de error corresponden a la desviación estándar del promedio de los grosores 1 y 4.

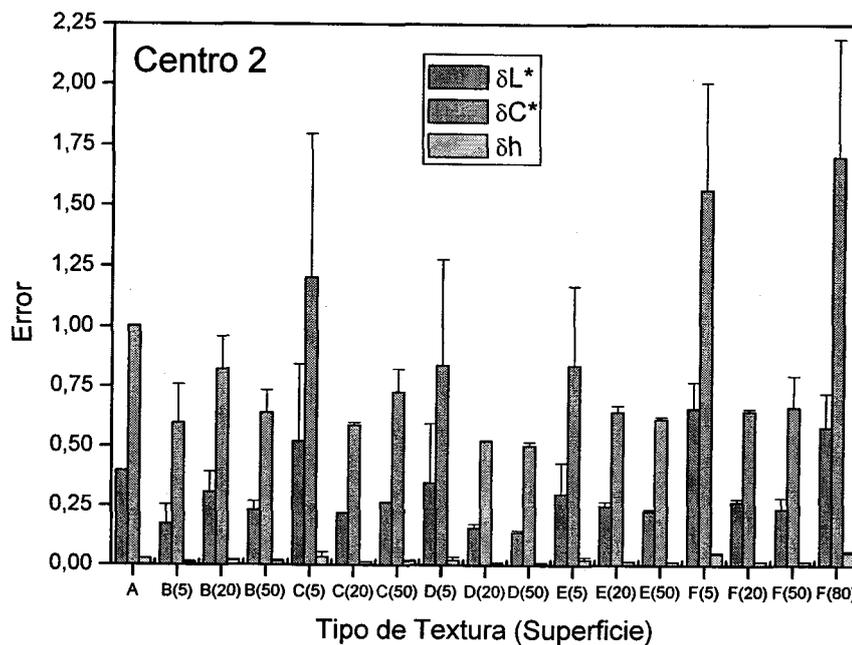
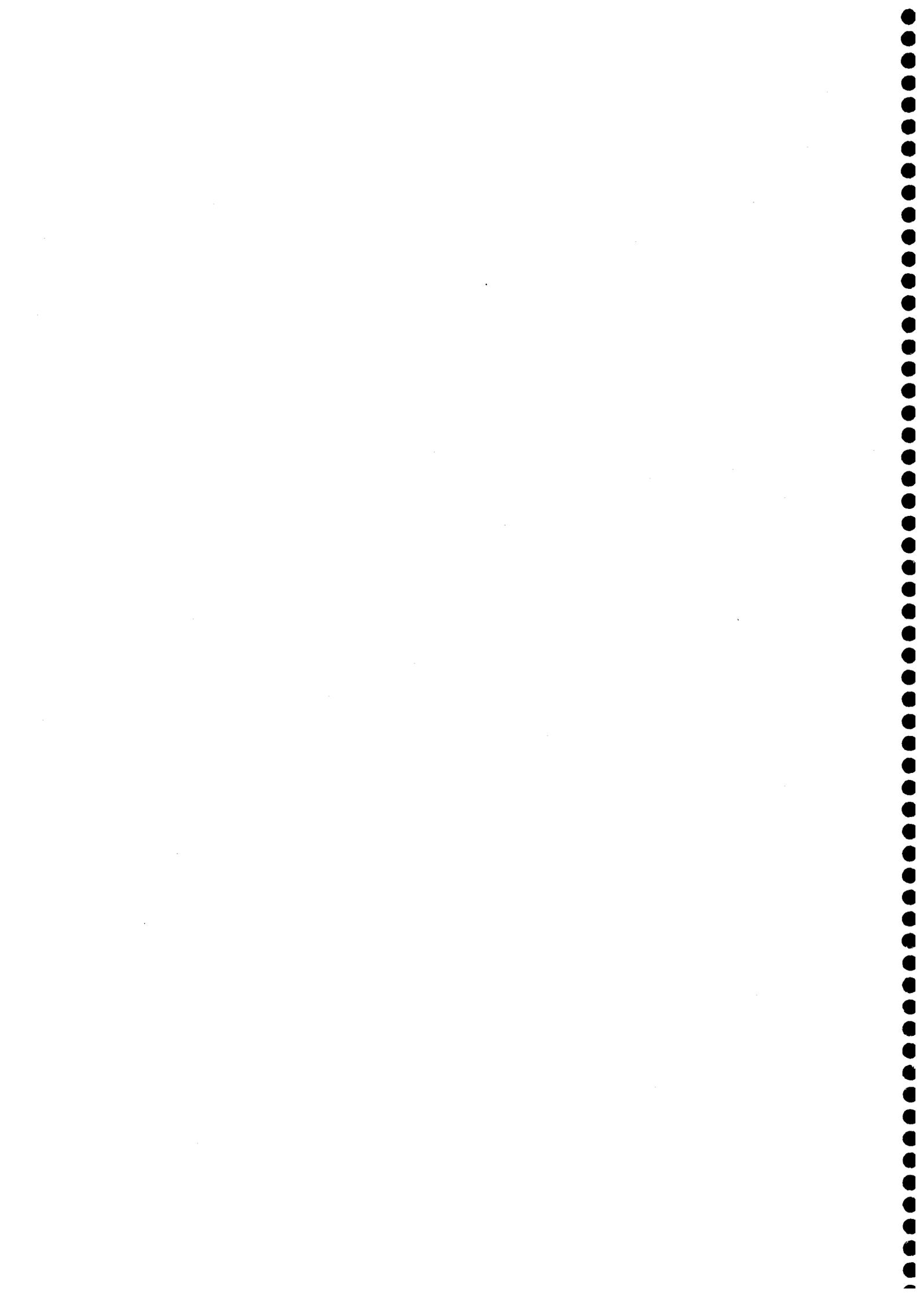


Figura 4.7.20. Errores de variación espacial para todas las texturas y coordenadas del centro 2.

De la Figura 4.7.20 concluimos que para los errores de variación espacial es importante tanto el tipo de textura como la superficie. Incluso la desviación estándar entre los grosores es también grande. En el resto de los centros los resultados son similares. No observamos ninguna tendencia en los errores con la superficie, tipo de

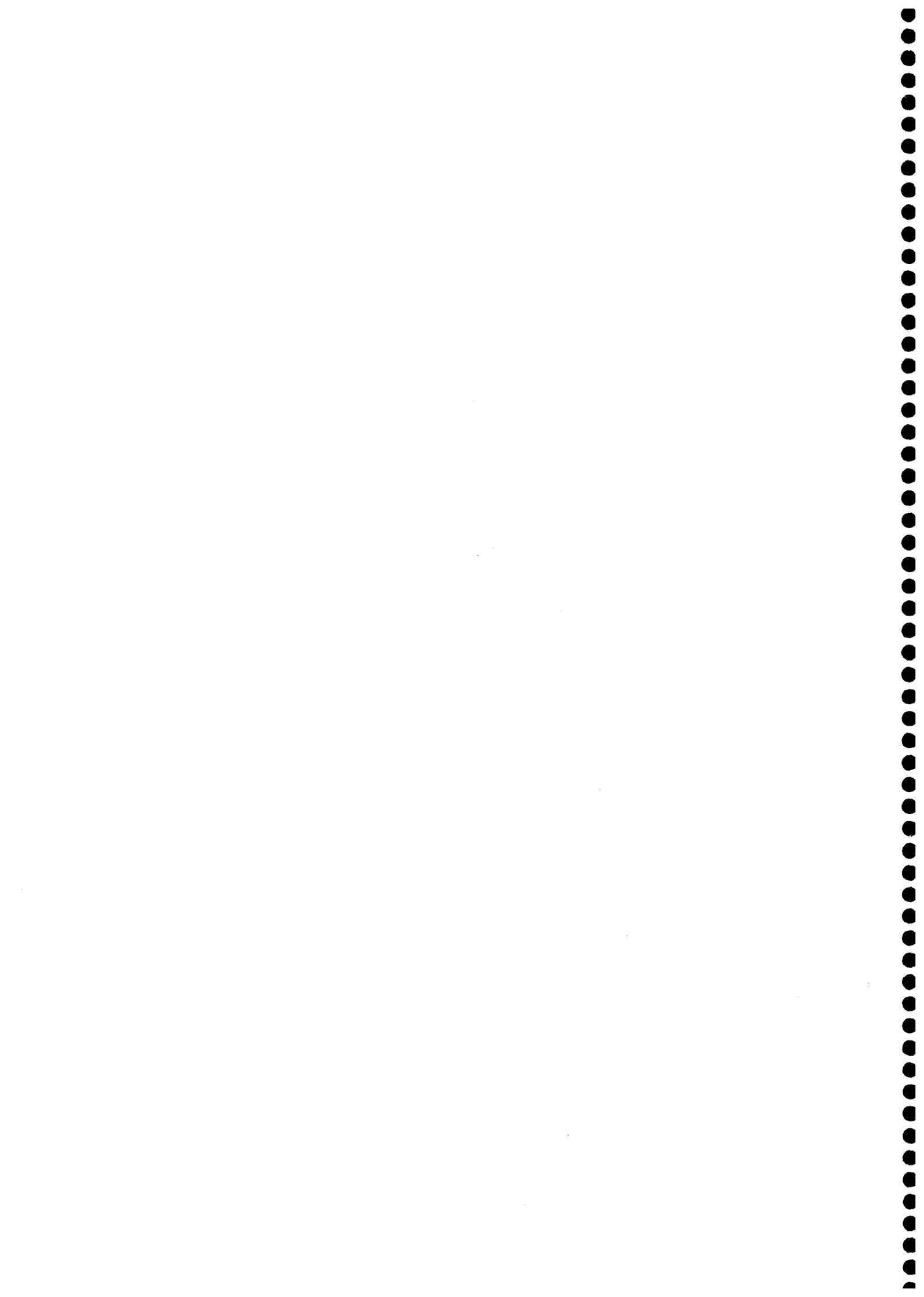
textura o grosor. Por tanto, en los errores por variación espacial existe mayor dispersión de valores, tanto por tipo, superficie y grosor de la textura, como era de esperar.

En resumen, los errores propagados desde los valores triestímulo hasta las coordenadas L^* , C^* y h , dependen del tipo de medida que realicemos. En general son mayores los errores correspondientes al croma, y despreciables los correspondientes al ángulo de tono. En el caso de medidas de variación temporal corta, los errores son muy parecidos para todas las texturas. Para medidas de variación espacial los errores son mucho mayores y varían más de unas medidas a otras, pero no de forma sistemática. En general los errores en las medidas que hemos realizado son pequeños. Estos errores dependerán por supuesto de la instrumentación utilizada y, en cada caso, habrá que considerarlos y evaluarlos. Los errores de variación temporal corta de las medidas que nosotros hemos realizado estarán por debajo del umbral visual (Huertas, 2001).





CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A lo largo del capítulo anterior hemos ido exponiendo las conclusiones derivadas de cada uno de los análisis realizados. En este Capítulo reunimos, resumidas en los siguientes puntos, las principales conclusiones obtenidas en esta Memoria de Doctorado.

- 1 Hemos realizado un programa de ordenador para estudiar la influencia de la textura en las diferencias de color percibidas mediante un monitor. El programa controla el calibrado del monitor y la presentación de las sesiones experimentales, que se han hecho mediante el método de Estímulos Constantes con Par de Referencia. Concretamente hemos estudiado la influencia de la textura sobre los 5 centros recomendados por la CIE en 1978, utilizando texturas simuladas de puntos aleatorios, que nos permiten controlar el grado de textura. Hemos considerado 2 tamaños o grosores de los puntos, 4 porcentajes de la superficie de la muestra ocupada por la textura, y puntos de la textura de diferentes tipos, que corresponden a: *A*, muestras homogéneas; *B*, textura relativa al fondo formada por puntos con 10 unidades en L^* más que el fondo e igual croma y tono; *C*, textura relativa al fondo formada por puntos con 10 unidades en L^* menos que el fondo e igual croma y tono; *D*, textura relativa al fondo formada por puntos con 15 unidades en C^*_{ab} más que el fondo e igual claridad y tono; *E*, textura relativa al fondo formada por puntos con 15 unidades en C^*_{ab} menos que el fondo e igual claridad y tono; y *F*, textura absoluta formada por puntos negros.

- 2 Como resultado de cada comparación experimental obtenemos una tolerancia visual, calculada como una diferencias de color. Hemos probado estadísticamente que las variables de las que depende la tolerancia visual son: el observador que realiza la comparación, el centro CIE que se compara, la coordenada CIELAB (L^* , C^*_{ab} o h_{ab}) que diferencia casi exclusivamente al par de muestras comparadas, el tipo de textura, la superficie que ocupa la textura y el grosor de los puntos de la textura. También son significativas la mayoría de las interacciones entre estos factores. No son significativas la variable sentido de la diferencia de color entre las muestras, ni el orden de repetición en la realización de las comparaciones.
- 3 Tanto la variabilidad en los resultados de un mismo observador, como la variabilidad entre observadores, son independientes de las variables centro, coordenada, y los parámetros de la textura (grosor, superficie y tipo). La precisión individual media de los observadores es de 27.9 calculada en términos de PF/3, con un rango entre 21.3 y 36.2. La exactitud individual media, en términos de PF/3, es de 18.9, con un rango entre 16.3 y 22.8. Entre los observadores, en términos de PF/3 la precisión es de 68.5 y la exactitud de 42.3.
- 4 Respecto a las tolerancias visuales se dividen los observadores en dos grupos bien diferenciados. Sin embargo, todos los factores considerados influyen de la misma forma sobre las tolerancias, independientemente del observador. Gracias a esta independencia de las tolerancias respecto a los observadores, hemos promediado sus resultados y los consideramos representativos del comportamiento de cualquier observador con visión normal del color.
- 5 Del estudio de los centros concluimos que los resultados agrupan a los centros en dos conjuntos muy diferenciados, sobre todo debido a las tolerancias en croma y tono. Respecto a las diferencias entre las tolerancias debidas al resto de los factores, destaca la tolerancia en claridad disminuida para el centro 2 (Rojo) por efecto “crispening”, al tener este centro un valor de L^* próximo al del fondo utilizado. Hemos detectado también que las tolerancias visuales en croma para el centro 5 (Azul) son elevadas cuando presenta textura tipo D (relativa con +15 unidades en C^*_{ab} respecto al fondo).

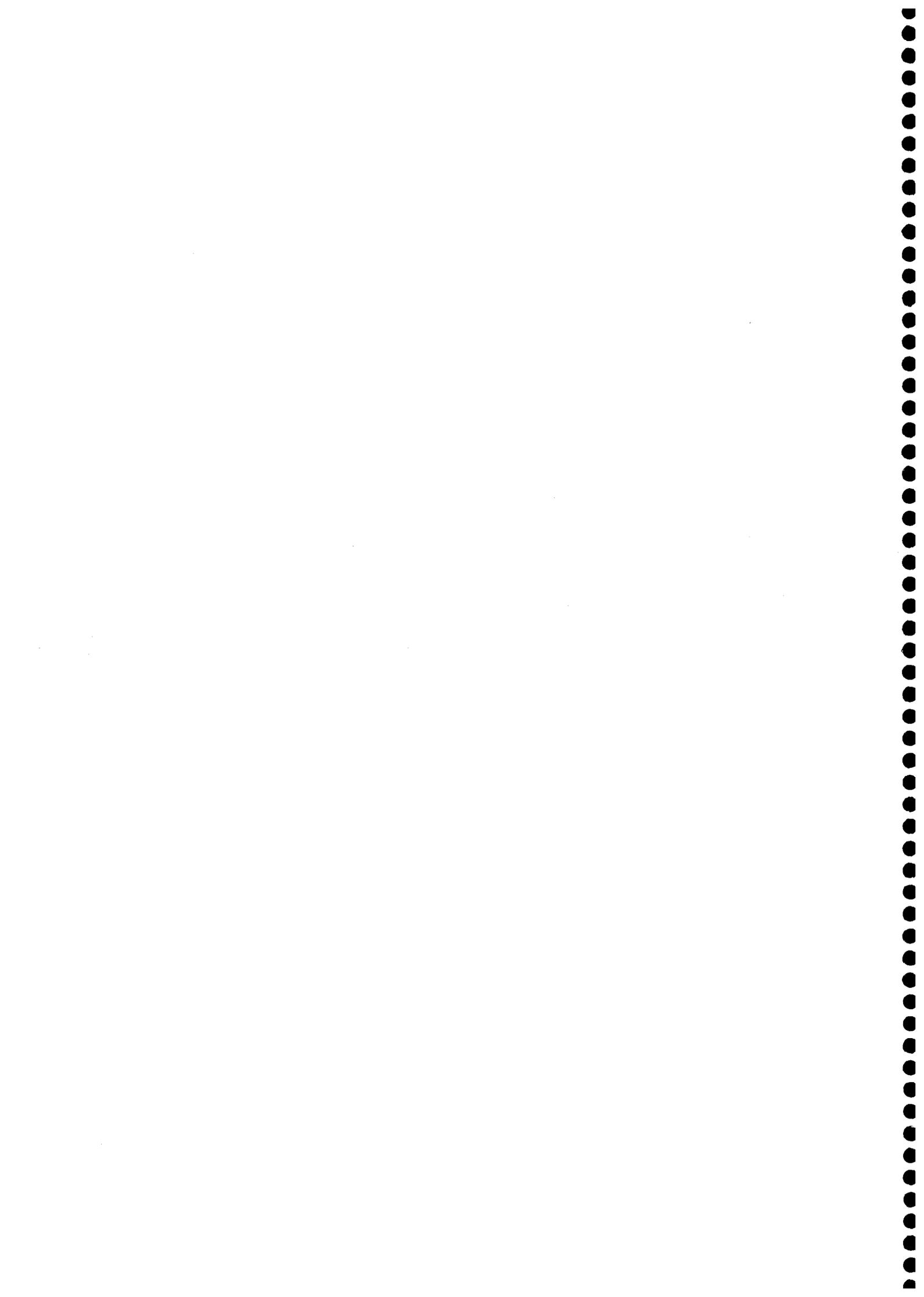
- 6 Al analizar las tolerancias visuales en función de la coordenada CIELAB principal en la diferencia de color, hemos constatado la falta de homogeneidad del espacio CIELAB. Esta es la causa esencial de las diferencias encontradas entre las tolerancias de los centros. Al corregir, con el croma, las tolerancias en croma y en tono, según propone CIE94, se reducen las diferencias entre los centros. Las tolerancias corregidas (en unidades CIE94) muestran la necesidad de la corrección de las tolerancias en claridad con la claridad, propuesta por CIEDE2000.
- 7 El tamaño de los puntos de la textura (grosor de la textura) no tiene influencia sobre las tolerancias visuales ni interacciona con el resto de variables. Las diferencias entre las tolerancias correspondientes a muestras con texturas de grosor 1 y texturas de grosor 4 no son estadísticamente significativas.
- 8 El porcentaje de superficie de la muestra ocupada por los puntos de la textura es influyente sobre las tolerancias visuales obtenidas. Este porcentaje, que es una medida de la “cantidad de textura”, no modifica, pero modula, la influencia de cada tipo de textura sobre las tolerancias, salvo la superficie del 5% que no produce efectos significativos sobre las tolerancias.
- 9 Respecto a los distintos tipos de textura considerados, la influencia sobre las tolerancias es notable para la textura absoluta (tipo F) y pequeña para las texturas relativas. De las texturas relativas, las tolerancias correspondientes a la textura relativa formada por puntos con 10 unidades de L^* por encima del fondo (tipo B), es la única con diferencias significativas respecto a las tolerancias de las muestras homogéneas.
- 10 Para analizar la textura con las más recientes fórmulas de diferencias de color, consideramos, por su influencia sobre las tolerancias, los tipos de textura B (relativa con +10 unidades en L^* respecto el fondo e iguales C^*_{ab} y h_{ab}), y D (relativa con +15 unidades en C^*_{ab} respecto al fondo e iguales L^* y h_{ab}) con las superficies de 20%, 50%; y el tipo de textura F (absoluta) con las superficies de 20%, 50% y 80%. Todas las texturas provocan un aumento de las tolerancias (tanto ΔL^* , como ΔC^*_{ab} y ΔH^*_{ab}), o equivalentemente una disminución de la diferencia de color percibida. Los valores de los coeficientes paramétricos ajustados dependen del ti-

po y superficie de la textura, y de la coordenada principal de la diferencia de color (ΔL^* , ΔC^*_{ab} o ΔH^*_{ab}). Las texturas relativas afectan exclusivamente a las tolerancias en la coordenada en la que se diferencian del fondo y su influencia es pequeña. La textura absoluta afecta principalmente a las tolerancias en claridad (ΔL^*), y algo menos a las tolerancias en croma y tono (ΔC^*_{ab} y ΔH^*_{ab}). Los valores de los coeficientes paramétricos aumentan con la superficie de la textura absoluta hasta alcanzar valores en torno a 2.0 para K_L y 1.7 para K_C y K_H , para superficie del 80%.

- 11 En cuanto al efecto de las texturas sobre las medidas de color, los resultados obtenidos son muy claros y lógicos. La textura produce un incremento o disminución de las coordenadas L^* o C^*_{ab} de la muestra homogénea de acuerdo con las coordenadas de los puntos de la textura. Básicamente los tipos de textura B y C (relativas al fondo con 10 unidades en L^* más o menos que el fondo respectivamente, y C^*_{ab} y h_{ab} iguales) modifican principalmente los valores de L^* ; y los tipos D y E (relativas al fondo con 15 unidades en C^*_{ab} más o menos que el fondo respectivamente, y L^* y h_{ab} iguales) los valores de C^*_{ab} . La textura absoluta (tipo F) produce siempre una disminución, respecto de la muestra sin textura, de los valores de L^* y C^*_{ab} .
- 12 Los errores estimados para el caso de variación temporal corta son muy pequeños, y no les afecta la presencia de textura en las muestras. Los errores por variación espacial, lógicamente son mayores, y varían considerablemente con los distintos parámetros de la textura, aunque no de una forma sistemática. En la mayoría de los casos, especialmente con variación temporal corta, los errores estimados son inferiores al umbral visual humano de discriminación cromática.
- 13 La presencia de textura afecta a la percepción visual de diferencias de color, como ha sugerido la CIE. Consideramos conveniente la obtención de nuevos resultados experimentales que complementen los obtenidos en esta Memoria, considerando nuevos tipos de textura, entre otros factores.



CAPÍTULO 6
REFERENCIAS



CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

En este Capítulo listamos el conjunto de citas bibliográficas que hemos ido referenciado a lo largo de la Memoria. Las citas están clasificadas en apartados dependiendo del capítulo donde aparece. Dentro de cada apartado las citas están ordenadas alfabéticamente por el apellido del primer autor, nombre del primer autor, apellidos de los siguientes autores y antigüedad de mayor a menor.

6.1. Capítulo 1

- ☞ CIE Publ. 116, "Industrial Color-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (1995).
- ☞ CIE Publ. 142-2001, "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (2001).
- ☞ F. J. J. Clarke, R. McDonald and B. Rigg. "Modification to the Jpc79 Color-Difference Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **100** (4): 128-132. (1984).
- ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (l:c) Color-Difference Formula. 1. Development of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (2): 86-94. (1987).

- ☞ A. R. Robertson. "CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **3**: 149-151. (1978).
- ☞ K. Witt. "CIE Guidelines for Coordinated Future Work on Industrial Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **20** (6): 399-403. (1995).

6.2. Capítulo 2

- ☞ Y. Adini, D. Sagi and M. Tsodyks. "Context-enabled learning in the human visual system". *Nature*, **415** (6873): 790-793. (2002).
- ☞ M. Al-Rawi and Y. Jie. "Illumination invariant recognition of color texture using correlation and covariance functions". *Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*, SPRINGER-VERLAG BERLIN, Berlin. (2001).
- ☞ C. Anagnostopoulos, D. Vergados, E. Kayafas, V. Loumos and G. Stassinopoulos. "A computer vision approach for textile quality control". *Journal of Visualization and Computer Animation*, **12** (1): 31-44. (2001).
- ☞ A. Basole, L. E. White and D. Fitzpatrick. "Mapping multiple features in the population response of visual cortex". *Nature*, **423** (6943): 986-990. (2003).
- ☞ D. Benavente, F. Martinez-Verdu, A. Bernabeu, V. Vigueira, R. Fort, M. A. del Cura, C. Illueca and S. Ordonez. "Influence of surface roughness on color changes in building stones". *Color Research and Application*, **28** (5): 343-351. (2003).
- ☞ R. S. Berns. "The Mathematical Development of CIE TC 1-29 proposed color difference equation: CIELCH". AIC COLOUR 93, Budapest, C-19-1-4. (1993).
- ☞ R. S. Berns. "Deriving Instrumental Tolerances from Pass-Fail and Colorimetric Data". *Color Research and Application*, **21** (6): 459-472. (1996).
- ☞ R. S. Berns. "Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology". 3rd Edition, John Wiley & Sons(2000).

- ∞ F. W. Billmeyer. "Precision of Color Measurement with Ge Spectrophotometer. I. Routine Industrial Performance". *Journal of the Optical Society of America*, **55** (6): 707-717. (1965).
- ∞ M. G. Bloj, D. Kersten and A. C. Hurlbert. "Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination". *Nature*, **402** (6764): 877-879. (1999).
- ∞ D. Bloyet, P. Herlin, E. Masson, B. Plancoulaine, F. Duigou, F. Angot, J. P. Signolle, D. Deman, A. M. Mandard, P. Belhomme, T. Datry and O. Rougereau. "Image analysis software for automatic DNA ploidy assessment of archival solid tumours". *Cytometry*, **37** (4): 267-274. (1999).
- ∞ V. Botchko, T. Jaaskelainen and J. P. S. Parkkinen. "Multispectral Texture Model for Color and Highlight Reproduction". *CGIV2002, Poitiers (France)*. (2002).
- ∞ E. Brenner, J. S. Ruiz, E. M. Herraiz, F. W. Cornelissen and J. B. J. Smeets. "Chromatic induction and the layout of colours within a complex scene". *Vision Research*, **43** (13): 1413-1421. (2003).
- ∞ J. Brochard and M. Khoudeir. "1D-Moment Signatures for Random Colored Texture Characterization". *CGIV2002, Poitiers (France)*. (2002).
- ∞ P. D. Burns and R. S. Berns. "Error propagation analysis in color measurement and imaging". *Color Research and Application*, **22** (4): 280-289. (1997).
- ∞ H. J. Caulfield, I. Moreno, J. Campos and M. J. Yzuel. "Coherent recognition of colored patterns". *Optics Communications*, **133** (1-6): 77-81. (1997).
- ∞ C. H. Chen and C. Y. Lee. "A JPEG-like texture compression with adaptive quantization for 3D graphics application". *Visual Computer*, **18** (1): 29-40. (2002a).
- ∞ K. M. Chen and S. Y. Chen. "Color texture segmentation using feature distributions". *Pattern Recognition Letters*, **23** (7): 755-771. (2002b).
- ∞ Y. C. Cheng and S. Y. Chen. "Image classification using color, texture and

- regions". *Image and Vision Computing*, **21** (9): 759-776. (2003).
- ☞ S. Choo and Y. Kim. "Effect of color on fashion fabric image". *Color Research and Application*, **28** (3): 221-226. (2003).
 - ☞ W. S. Chou. "Classifying image pixels into shaped, smooth, and textured points". *Pattern Recognition*, **32** (10): 1697-1706. (1999).
 - ☞ H. C. Chung, J. Liang, S. Kushiya and M. Shinozuka. "Digital image processing for non-linear system identification". *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **39** (5): 691-707. (2004).
 - ☞ CIE Report of Committe E-1.3.1, "Compt. Rend." CIE Central Bureau, Vienna. (1963).
 - ☞ CIE Publ. 15.2, "Colorimetry". 2nd Ed. CIE Central Bureau, Vienna. (1986).
 - ☞ CIE Publ. 101, "Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (1993).
 - ☞ CIE Publ. 116, "Industrial Color-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (1995).
 - ☞ CIE Publ. 142-2001, "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (2001).
 - ☞ F. J. J. Clarke, R. McDonald and B. Rigg. "Modification to the Jpc79 Color-Difference Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **100** (4): 128-132. (1984).
 - ☞ J. M. Clause, G. H. Kirby and S. S. Nikiel. "Fractal palettes for texturing". *Computers & Graphics-Uk*, **25** (5): 875-881. (2001).
 - ☞ E. Coates, K. Y. Fong and B. Rigg. "Uniform Lightness Scales". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **97** (4): 179-183. (1981).
 - ☞ J. L. F. De Kerf. "Accuracy of Tristimulus Computations". *Journal of the Optical*

- Society of America, **48** (5): 334-338. (1958).
- ∞ J. M. Dischler and D. Ghazanfarpour. "A survey of 3D texturing". *Computers & Graphics-Uk*, **25** (1): 135-151. (2001).
 - ∞ A. Drimbarean and P. F. Whelan. "Experiments in colour texture analysis". *Pattern Recognition Letters*, **22** (10): 1161-1167. (2001).
 - ∞ D. F. Dunn and N. E. Mathew. "Extracting color halftones from printed documents using texture analysis". *Pattern Recognition*, **33** (3): 445-463. (2000).
 - ∞ T. Echigo and S. Iisaku. "Unsupervised Segmentation of Colored Texture Images by Using Multiple GMRF Models and a Hypothesis of Merging Primitives". *Systems and Computers in Japan*, **31** (2): 29-39. (2000).
 - ∞ M. Fahle, T. Quenzer, C. Braun and K. Spang. "Feature-specific electrophysiological correlates of texture segregation". *Vision Research*, **43** (1): 7-19. (2003).
 - ∞ M. Fairchild. "Color Appearance Models". Addison-Wesley(1998).
 - ∞ M. D. Fairchild and L. Reniff. "Propagation of Random Errors in Spectrophotometric Colorimetry". *Color Research and Application*, **16** (6): 360-367. (1991).
 - ∞ J. L. Gardner. "Uncertainty estimation in colour measurement". *Color Research and Application*, **25** (5): 349-355. (2000).
 - ∞ J. L. Gardner and R. B. Frenkel. "Correlation coefficients for tristimulus response value uncertainties". *Metrologia*, **36** (5): 477-480. (1999).
 - ∞ P. Gibbs and L. W. Turnbull. "Textural analysis of contrast-enhanced MR images of the breast". *Magnetic Resonance in Medicine*, **50** (1): 92-98. (2003).
 - ∞ O. Gimeno, D. Ansorena, I. Astiasaran and J. Bello. "Characterization of chorizo de Pamplona: instrumental measurements of colour and texture". *Food Chemistry*, **69** (2): 195-200. (2000).

- ☞ N. Goda and M. Fujii. "Sensitivity to modulation of color distribution in multicolored textures". *Vision Research*, **41** (19): 2475-2485. (2001).
- ☞ L. D. Griffin and A. Sepehri. "Performance of CIE94 for nonreference conditions". *Color Research and Application*, **27** (2): 108-115. (2002).
- ☞ A. Y. Grigoriev, S. A. Chizhik and N. K. Myshkin. "Texture classification of engineering surfaces with nanoscale roughness". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **38** (5-6): 719-724. (1998).
- ☞ S. Grossberg and L. Pessoa. "Texture segregation, surface representation and figure-ground separation". *Vision Research*, **38** (17): 2657-2684. (1998).
- ☞ S. Grossberg and J. R. Williamson. "A self-organizing neural system for learning to recognize textured scenes". *Vision Research*, **39** (7): 1385-1406. (1999).
- ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "A colour-difference formula for assessing large colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 344-355. (1999a).
- ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using large colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 356-368. (1999b).
- ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using small colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 331-343. (1999c).
- ☞ B. Han, C. W. Cui and M. R. Luo. "Texture Effect on Evaluation of Colour Difference". *Color Communication and Managemet (AIC Interim Meeting)*, Bangkok. (2003).
- ☞ Y. Horikawa. "Comparison of Combining Methods in Invariant Color Texture Classification with Cross-Bispectral Features". *CGIV2002, Poitiers (France)*. (2002).
- ☞ R. Huertas. "Estudio sobre el Error Asociado a los Parámetros de Color CIELAB y CIELUV". *Memoria de Licenciatura. Departamento de Óptica, Universidad de Granada. Granada*. (2001).
- ☞ R. W. G. Hunt. "Measuring Colour". *Ellis Horwood Limited, West Sussex*,

- England. (1987).
- ☞ ISO. "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization".(1993).
 - ☞ T. Itoh, K. Miyata and K. Shimada. "Generating organic textures with controlled anisotropy and directionality". *Ieee Computer Graphics and Applications*, **23** (3): 38-45. (2003).
 - ☞ J. Jiman and A. Mohamed. "Radiant Colours and Textures: The Importance of Natural Resources and Their Influences to Malaysian Animation". CGIV2002, Poitiers (France). (2002).
 - ☞ D. Jirak, M. Dezortova, P. Taimr and M. Hajek. "Texture analysis of human liver". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **15** (1): 68-74. (2002).
 - ☞ D. G. Jones and P. T. Jackway. "Granolds: a novel texture representation". *Pattern Recognition*, **33** (6): 1033-1045. (2000).
 - ☞ A. Khotanzad and O. J. Hernandez. "Color image, retrieval, using multispectral random field texture model and color content features". *Pattern Recognition*, **36** (8): 1679-1694. (2003).
 - ☞ M. Khoudeir, A. Benslimane and C. Oliver. "Contribucion to the Separation of Color Information from the Relief Information on Textured Images". CGIV2002, Poitiers (France). (2002).
 - ☞ D. H. Kim, E. K. Cho and J. P. Kim. "Evaluation of CIELAB-based colour-difference formulae using a new dataset". *Color Research and Application*, **26** (5): 369-375. (2001).
 - ☞ H. Komatsubara and G. Kawakami. "Research on the Application of Color-Difference Formulas to Industry". *Studies of Color*, **35**: 6-20. (1988).
 - ☞ R. G. Kuehni. "Analysis of Returned Questionnaires of ISCC Problem Subcommittee 34 "Color Difference Problems"". *ISCC Newsletter*, **225**: 1-2. (1973).

- ☞ W. Lee and M. Sato. "Visual perception of texture of textiles". *Color Research and Application*, **26** (6): 469-477. (2001).
- ☞ A. Li and Q. Zaidi. "Perception of three-dimensional shape from texture is based on patterns of oriented energy". *Vision Research*, **40** (2): 217-242. (2000).
- ☞ A. Li and Q. Zaidi. "Information limitations in perception of shape from texture". *Vision Research*, **41** (12): 1519-1534. (2001).
- ☞ W. Li and X. L. Yuan. "Visual evaluation of moderate and large color-differences - Effect of color-difference size on color-difference evaluation". *Progress in Natural Science*, **9** (9): 696-702. (1999).
- ☞ M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg. "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000". *Color Research and Application*, **26** (5): 340-350. (2001).
- ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (1:c) Color-Difference Formula. 1. Development of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (2): 86-94. (1987).
- ☞ D. L. Macadam. "Dependence of Color-Mixture Functions on Choice of Primaries". *Journal of the Optical Society of America*, **43** (6): 533-538. (1953).
- ☞ D. L. Macadam. "Chromatic Significance of Spectrophotometric Errors". *Journal of the Optical Society of America*, **47** (8): 766-766. (1957).
- ☞ J. A. Martinez, A. J. Poza, M. Melgosa and E. Hita. "Influence of colour-matching functions on threshold and large colour differences". *Journal of Optics-Nouvelle Revue D Optique*, **28** (1): 26-36. (1997).
- ☞ R. McDonald. "A Review of the Relationship between Visual and Instrumental Assessment of Color Difference, .1". *Journal of the Oil & Colour Chemists Association*, **65** (2): 43-53. (1982a).
- ☞ R. McDonald. "A Review of the Relationship between Visual and Instrumental Assessment of Color Difference, .2". *Journal of the Oil & Colour Chemists Association*, **65** (2): 43-53. (1982b).

- Association, **65** (3): 93-106. (1982b).
- ∞ M. Melgosa. "Testing CIELAB-based color-difference formulas". *Color Research and Application*, **25** (1): 49-55. (2000).
 - ∞ M. Melgosa and E. Hita. "Color differences under illuminants D65 and A". *Optik*, **107** (1): 5-10. (1997a).
 - ∞ M. Melgosa, E. Hita, L. J. del Barco and J. Romero. "Comparative-Analysis of Color Discrimination Data Obtained with Aperture-Colors and Surface-Colors". *Journal of Optics-Nouvelle Revue D Optique*, **21** (5): 223-231. (1990a).
 - ∞ M. Melgosa, E. Hita, A. J. Poza, D. H. Alman and R. S. Berns. "Suprathreshold color-difference ellipsoids for surface colors". *Color Research and Application*, **22** (3): 148-155. (1997b).
 - ∞ M. Melgosa, E. Hita, J. Romero and L. Jiménez del Barco. "Fórmulas de Diferencia de Color". *Óptica Pura y Aplicada*, **23**: 137-146. (1990b).
 - ∞ M. Melgosa, M. M. Perez, A. El Moraghi and E. Hita. "Color discrimination results from a CRT device: Influence of luminance". *Color Research and Application*, **24** (1): 38-44. (1999).
 - ∞ M. Melgosa, M. J. Rivas, L. Gomez and E. Hita. "Towards a colorimetric characterization of the human iris". *Ophthalmic and Physiological Optics*, **20** (3): 252-260. (2000).
 - ∞ S. Merillou, J. M. Dischler and D. Ghazanfarpour. "Surface scratches: measuring, modeling and rendering". *Visual Computer*, **17** (1): 30-45. (2001).
 - ∞ M. Mirmehdi and R. Perissamy. "Perceptual image indexing and retrieval". *Journal of Visual Communication and Image Representation*, **13** (4): 460-475. (2002).
 - ∞ K. Miyata, T. Itoh and K. Shimada. "A method for generating pavement textures using the square packing technique". *Visual Computer*, **17** (8): 475-490. (2001).

- ∞ E. D. Montag and R. S. Berns. "Visual determination of hue suprathreshold color-difference tolerances using CRT-generated stimuli". *Color Research and Application*, **24** (3): 164-176. (1999).
- ∞ E. D. Montag and R. S. Berns. "Lightness dependencies and the effect of texture on suprathreshold lightness tolerances". *Color Research and Application*, **25** (4): 241-249. (2000).
- ∞ N. K. Myshkin, A. Y. Grigoriev, S. A. Chizhik, K. Y. Choi and M. I. Petrokovets. "Surface roughness and texture analysis in microscale". *Wear*, **254** (10): 1001-1009. (2003).
- ∞ D. Nickerson and K. F. Stultz. "Color Tolerance Specification". *Journal of the Optical Society of America*, **34** (6): 550-570. (1944).
- ∞ I. Nimeroff. "Propagation of Errors in Spectrophotometric Colorimetry". *Journal of the Optical Society of America*, **43** (6): 531-533. (1953).
- ∞ G. Paschos. "Chromatic correlation features for texture recognition". *Pattern Recognition Letters*, **19** (8): 643-650. (1998).
- ∞ G. Paschos. "Fast color texture recognition using chromaticity moments". *Pattern Recognition Letters*, **21** (9): 837-841. (2000).
- ∞ G. Paschos and M. Petrou. "Histogram ratio features for color texture classification". *Pattern Recognition Letters*, **24** (1-3): 309-314. (2003).
- ∞ M. M. Pérez, M. Melgosa, A. El Moraghi and E. Hita. "Usefulness of cathode ray tube color displays in chromaticity-discrimination experiments". *Applied Optics*, **39** (22): 4021-4030. (2000).
- ∞ A. V. Popple. "Context effects on texture border localization bias". *Vision Research*, **43** (7): 739-743. (2003).
- ∞ A. R. Robertson. "Colorimetric Significance of Spectrophotometric Errors". *Journal of the Optical Society of America*, **57** (5): 691-698. (1967).

- ∞ A. R. Robertson. "The CIE 1976 Color-Difference Formulae". *Color Research and Application*, **2**: 7-11. (1977).
- ∞ A. R. Robertson. "CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **3**: 149-151. (1978).
- ∞ A. R. Robertson. "Historical Development of Cie Recommended Color Difference- Equations". *Color Research and Application*, **15** (3): 167-170. (1990).
- ∞ A. R. Robertson and W. D. Wright. "International Comparison of Working Standards for Colorimetry". *Journal of the Optical Society of America*, **55** (6): 694-706. (1965).
- ∞ C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani and R. Scopigno. "Acquiring, stitching and blending diffuse appearance attributes on 3D models". *Visual Computer*, **18** (3): 186-204. (2002).
- ∞ A. Rosenfeld. "Image-Analysis and Computer Vision - 1992". *Cvqip-Image Understanding*, **58** (1): 85-135. (1993).
- ∞ A. Rosenfeld. "Image analysis and computer vision: 1999". *Computer Vision and Image Understanding*, **78** (2): 222-285. (2000).
- ∞ Y. Rubner, J. Puzicha, C. Tomasi and J. M. Buhmann. "Empirical evaluation of dissimilarity measures for color and texture". *Computer Vision and Image Understanding*, **84** (1): 25-43. (2001).
- ∞ P. Salek, J. Tarasiuk and K. Wierzbowski. "Application of genetic algorithms to texture analysis". *Crystal Research and Technology*, **34** (8): 1073-1079. (1999).
- ∞ A. E. Seiffert and P. Cavanagh. "Position-based motion perception for color and texture stimuli: effects of contrast and speed". *Vision Research*, **39** (25): 4172-4185. (1999).
- ∞ T. Shipley and G. L. Walker. "Chromatic Significance of Spectrophotometric Errors". *Journal of the Optical Society of America*, **46** (12): 1052-1060. (1956).

- ☞ J. A. Shufelt. "Texture analysis for enhanced color image quantization". *Graphical Models and Image Processing*, **59** (3): 149-163. (1997).
- ☞ L. Simonot and M. Elias. "Color change due to surface state modification". *Color Research and Application*, **28** (1): 45-49. (2003).
- ☞ D. Steen and D. Dupont. "Defining a practical method of ascertaining textile color acceptability". *Color Research and Application*, **27** (6): 391-398. (2002).
- ☞ P. H. Suen and G. Healey. "Modeling and classifying color textures using random fields in a random environment". *Pattern Recognition*, **32** (6): 1009-1017. (1999).
- ☞ A. Turiel and N. Parga. "The multifractal structure of contrast changes in natural images: From sharp edges to textures". *Neural Computation*, **12** (4): 763-793. (2000).
- ☞ J. M. Vandenberg. "A Collaborative Study of Cary Spectrophotometers". *Journal of the Optical Society of America*, **44** (8): 641-643. (1954).
- ☞ A. L. Wiens and B. J. Ross. "Gentropy: evolving 2D textures". *Computers & Graphics-Uk*, **26** (1): 75-88. (2002).
- ☞ K. Witt. "Parametric Effects on Surface Color-Difference Evaluation at Threshold". *Color Research and Application*, **15** (4): 189-199. (1990).
- ☞ K. Witt. "CIE Guidelines for Coordinated Future Work on Industrial Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **20** (6): 399-403. (1995).
- ☞ K. Witt. "Geometric relations between scales of small colour differences". *Color Research and Application*, **24** (2): 78-92. (1999).
- ☞ W. D. Wright. "Color Standards in Commerce and Industry". *Journal of the Optical Society of America*, **49** (4): 384-388. (1959).
- ☞ S. M. Wuerger, L. T. Maloney and J. Krauskopf. "Proximity Judgments in Color Space - Tests of a Euclidean Color Geometry". *Vision Research*, **35** (6): 827-835. (1995).

- ∞ J. H. Xin, C. C. Lam and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs". *Color Research and Application*, **26** (5): 376-383. (2001).
- ∞ J. H. Xin, C. C. Lam and M. R. Luo. "Investigation of Texture Effect on CRT Color Difference Evaluation". *Color Communication and Management (AIC Interim Meeting)*, Bangkok. (2003).
- ∞ H. S. Xu, H. Yaguchi and S. Shioiri. "Estimation of color-difference formulae at color discrimination threshold using CRT-generated stimuli". *Optical Review*, **8** (2): 142-147. (2001a).
- ∞ H. S. Xu, H. Yaguchi and S. Shioiri. "Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference". *Color Research and Application*, **27** (5): 349-359. (2002).
- ∞ H. S. Xu, H. Yaguchi and S. Shioiri. "Testing CIELAB-based color-difference formulae using large color differences". *Optical Review*, **8** (6): 487-494. (2001b).
- ∞ Q. Zaidi and A. Li. "Limitations on shape information provided by texture cues". *Vision Research*, **42** (7): 815-835. (2002).
- ∞ Z. Zhang, R. E. Scarberry and M. A. Simaan. "Quantitative measurement of texture orientation in biomedical images using an artificial neural network". *International Journal of Imaging Systems and Technology*, **9** (5): 351-355. (1998).
- ∞ Y. Zhong and A. K. Jain. "Object localization using color, texture and shape". *Pattern Recognition*, **33** (4): 671-684. (2000).

6.3. Capítulo 3

- ∞ R. S. Berns. "Methods for characterizing CRT displays". *Displays*, **16** (4): 173-182. (1996).

- ☞ R. S. Berns, D. H. Alman, L. Reniff, G. D. Snyder and M. R. Balononrosen. "Visual Determination of Suprathreshold Color-Difference Tolerances Using Probit Analysis". *Color Research and Application*, **16** (5): 297-316. (1991).
- ☞ P. R. Bevington and D. K. Robinson. "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences". Second Edition, McGraw-Hill, Inc.(1992).
- ☞ D. Bloyet, P. Herlin, E. Masson, B. Plancoulaine, F. Duigou, F. Angot, J. P. Signolle, D. Deman, A. M. Mandard, P. Belhomme, T. Datry and O. Rougreau. "Image analysis software for automatic DNA ploidy assessment of archival solid tumours". *Cytometry*, **37** (4): 267-274. (1999).
- ☞ D. H. Brainard. "Calibration of a Computer-Controlled Color Monitor". *Color Research and Application*, **14** (1): 23-34. (1989).
- ☞ R. C. Carter and E. C. Carter. "Cie L-Star-U-Star-V-Star Color-Difference Equations for Self- Luminous Displays". *Color Research and Application*, **8** (4): 252-253. (1983).
- ☞ F. Charte. "Programación con C++ Builder 5". Primera, ANAYA, Madrid. (2000).
- ☞ Y. C. Cheng and S. Y. Chen. "Image classification using color, texture and regions". *Image and Vision Computing*, **21** (9): 759-776. (2003).
- ☞ CIE Publ. 15.2, "Colorimetry". 2nd Ed. CIE Central Bureau, Vienna. (1986).
- ☞ E. Coates, K. Y. Fong and B. Rigg. "Uniform Lightness Scales". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **97** (4): 179-183. (1981).
- ☞ G. H. Cui, M. R. Luo, B. Rigg and W. Li. "Colour-difference evaluation using CRT colours. Part I: Data gathering and testing colour difference formulae". *Color Research and Application*, **26** (5): 394-402. (2001a).
- ☞ G. H. Cui, M. R. Luo, B. Rigg and W. Li. "Colour-difference evaluation using CRT colours. Part II: Parametric effects". *Color Research and Application*, **26** (5):

- 403-412. (2001b).
- ☞ L. J. del Barco, J. A. Diaz, J. R. Jimenez and M. Rubino. "Considerations on the Calibration of Color Displays Assuming Constant Channel Chromaticity". *Color Research and Application*, **20** (6): 377-387. (1995).
 - ☞ J. A. Diaz, J. R. Jimenez, E. Hita and L. J. del Barco. "Optimizing the constant-channel chromaticity and color gamut of CRT color displays by control of brightness and contrast levels". *Applied Optics*, **35** (10): 1711-1718. (1996).
 - ☞ T. Echigo and S. Iisaku. "Unsupervised Segmentation of Colored Texture Images by Using Multiple GMRF Models and a Hypothesis of Merging Primitives". *Systems and Computers in Japan*, **31** (2): 29-39. (2000).
 - ☞ J. L. Gardner and R. B. Frenkel. "Correlation coefficients for tristimulus response value uncertainties". *Metrologia*, **36** (5): 477-480. (1999).
 - ☞ P. Gibbs and L. W. Turnbull. "Textural analysis of contrast-enhanced MR images of the breast". *Magnetic Resonance in Medicine*, **50** (1): 92-98. (2003).
 - ☞ S. Grossberg and J. R. Williamson. "A self-organizing neural system for learning to recognize textured scenes". *Vision Research*, **39** (7): 1385-1406. (1999).
 - ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using small colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 331-343. (1999).
 - ☞ R. Huertas. "Estudio sobre el Error Asociado a los Parámetros de Color CIELAB y CIELUV". Memoria de Licenciatura. Departamento de Óptica, Universidad de Granada. Granada. (2001).
 - ☞ J. R. Jimenez, J. F. Reche, J. A. Diaz, L. J. del Barco and E. Hita. "Optimization of color reproduction on CRT-color monitors". *Color Research and Application*, **24** (3): 207-213. (1999).
 - ☞ D. Jirak, M. Dezortova, P. Taimr and M. Hajek. "Texture analysis of human liver". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **15** (1): 68-74. (2002).

- ☞ A. Khotanzad and O. J. Hernandez. "Color image, retrieval, using multispectral random field texture model and color content features". *Pattern Recognition*, **36** (8): 1679-1694. (2003).
- ☞ D. H. Kim, E. K. Cho and J. P. Kim. "Evaluation of CIELAB-based colour-difference formulae using a new dataset". *Color Research and Application*, **26** (5): 369-375. (2001).
- ☞ R. G. Kuehni. "Threshold color differences compared to supra-threshold color differences". *Color Research and Application*, **25** (3): 226-229. (2000).
- ☞ A. M. Lara Porras. "Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Tems Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS". Primera Edición, Proyecto Sur de Ediciones, S. L., Granada. (2000).
- ☞ M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg. "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000". *Color Research and Application*, **26** (5): 340-350. (2001).
- ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (l:c) Color-Difference Formula. 1. Development of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (2): 86-94. (1987a).
- ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (l:c) Color-Difference Formula. 2. Performance of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (3): 126-132. (1987b).
- ☞ D. L. MacAdam. "Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight". *Journal of the Optical Society of America*, **32**: 247-274. (1942).
- ☞ M. Melgosa, E. Hita, A. J. Poza and M. M. Perez. "The weighting function for lightness in the CIE94 color-difference model". *Color Research and Application*, **21** (5): 347-352. (1996).
- ☞ M. Melgosa, E. Hita, J. Romero and L. J. del Barco. "Some Classical Color Differences Calculated with New Formulas". *Journal of the Optical Society of*

- America a-Optics Image Science and Vision, **9** (8): 1247-1254. (1992).
- ☞ M. Melgosa, R. Huertas, A. Yebra and M. M. Perez. "Are Chroma Tolerances Dependent on Hue-angle?" Color Research and Application. (Aceptado).
 - ☞ M. Melgosa, M. M. Perez, A. El Moraghi and E. Hita. "Color discrimination results from a CRT device: Influence of luminance". Color Research and Application, **24** (1): 38-44. (1999).
 - ☞ E. D. Montag and R. S. Berns. "Visual determination of hue suprathreshold color-difference tolerances using CRT-generated stimuli". Color Research and Application, **24** (3): 164-176. (1999).
 - ☞ E. D. Montag and D. C. Wilber. "A comparison of constant stimuli and gray-scale methods of color difference scaling". Color Research and Application, **28** (1): 36-44. (2003).
 - ☞ A. Moraghi. "Estudio de Umbrales de Discriminación de Color Obtenidos Mediante un Monitor CRT". Tesis Doctoral. Departamento de Óptica, Universidad de Granada. Granada. (1999).
 - ☞ J. A. Nelder. "Citation Classic - Simplex Method for Function Minimization". Current Contents/Engineering Technology & Applied Sciences, (15): 12-12. (1979).
 - ☞ J. A. Nelder and R. Mead. "A Simplex-Method for Function Minimization". Computer Journal, **7** (4): 308-313. (1965).
 - ☞ A. Palomares, A. Lorente, V. Arnau, F. M. Verdu and J. M. Artigas. "A new method for the optimum generations of real colours on CRT monitors". Journal of Optics-Nouvelle Revue D Optique, **28** (3): 107-111. (1997).
 - ☞ C. Pérez. "Técnicas Estadísticas con SPSS". Prentice Hall, Madrid. (2001).
 - ☞ M. M. Pérez, M. Melgosa, A. El Moraghi and E. Hita. "Usefulness of cathode ray tube color displays in chromaticity-discrimination experiments". Applied Optics, **39** (22): 4021-4030. (2000).

- ∞ D. L. Post and C. S. Calhoun. "An Evaluation of Methods for Producing Desired Colors on Crt Monitors". *Color Research and Application*, **14** (4): 172-186. (1989).
- ∞ D. C. Rich, D. L. Alston and L. H. Allen. "Psychophysical Verification of the Accuracy of Color and Color-Difference Simulations of Surface Samples on a Crt Display". *Color Research and Application*, **17** (1): 45-56. (1992).
- ∞ A. R. Robertson. "Colorimetric Significance of Spectrophotometric Errors". *Journal of the Optical Society of America*, **57** (5): 691-698. (1967).
- ∞ A. R. Robertson. "CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **3**: 149-151. (1978).
- ∞ W. Schultze. "The usefulness of colour-difference formular for fixing colour tolerances." AIC1972, Soesterberg (Holland), 254-265. (1972).
- ∞ Y. Sugiyama and H. Wright. "Paired Comparisons of Color Differences". *Journal of the Optical Society of America*, **53** (10): 1214-1222. (1963).
- ∞ A. Turiel and N. Parga. "The multifractal structure of contrast changes in natural images: From sharp edges to textures". *Neural Computation*, **12** (4): 763-793. (2000).
- ∞ J. H. Xin, C. C. Lam and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs". *Color Research and Application*, **26** (5): 376-383. (2001).

6.4. Capítulo 4

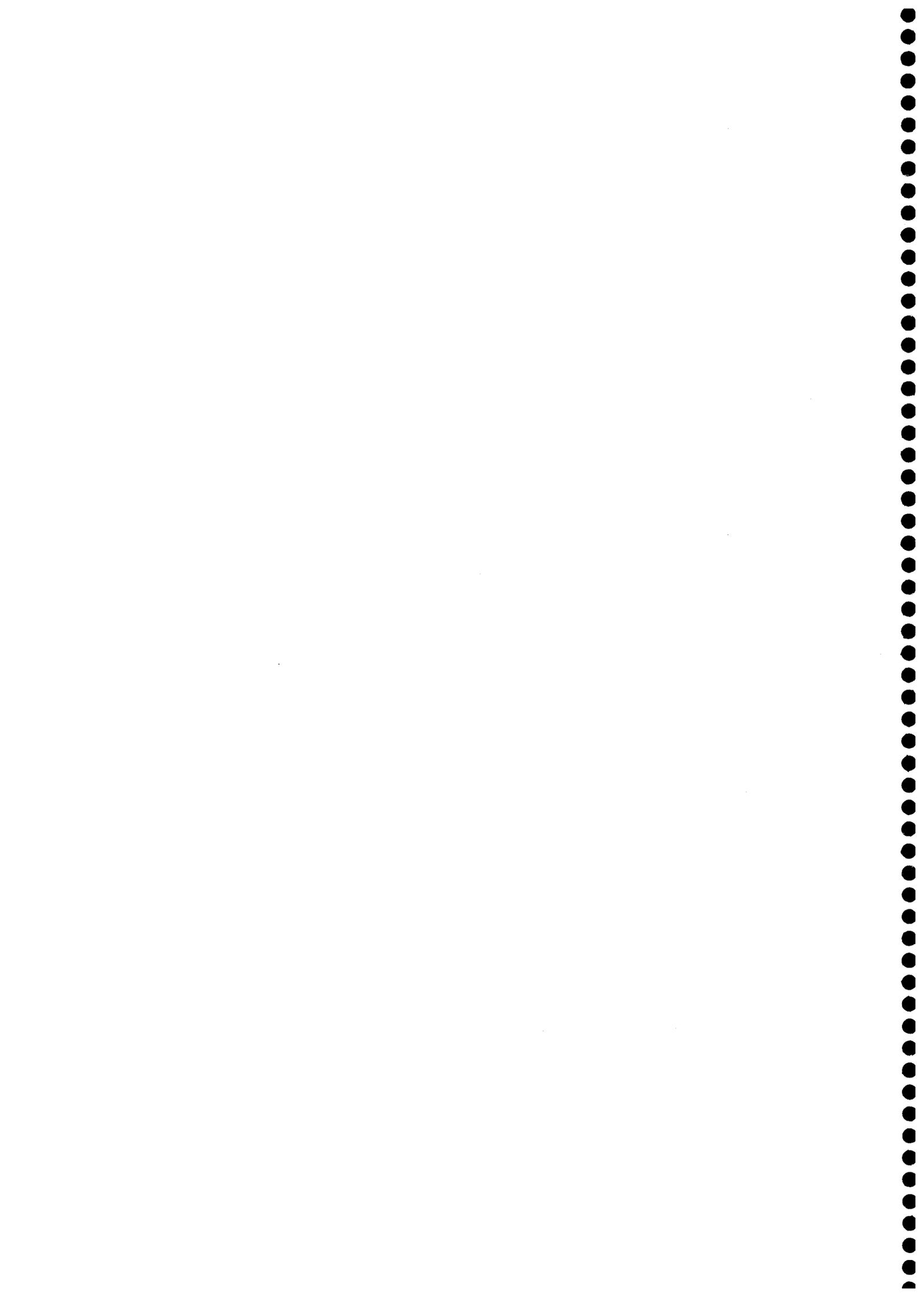
- ∞ CIE Publ. 101, "Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (1993).
- ∞ CIE Publ. 116, "Industrial Color-Difference Evaluation". CIE Central Bureau, Vienna. (1995).
- ∞ CIE Publ. 142-2001, "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation".

- CIE Central Bureau, Vienna. (2001).
- ☞ F. J. J. Clarke, R. McDonald and B. Rigg. "Modification to the Jpc79 Color-Difference Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **100** (4): 128-132. (1984).
 - ☞ E. Coates, K. Y. Fong and B. Rigg. "Uniform Lightness Scales". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **97** (4): 179-183. (1981).
 - ☞ M. Fairchild. "Color Appearance Models". Addison-Wesley(1998).
 - ☞ J. L. Gardner. "Uncertainty estimation in colour measurement". *Color Research and Application*, **25** (5): 349-355. (2000).
 - ☞ J. L. Gardner and R. B. Frenkel. "Correlation coefficients for tristimulus response value uncertainties". *Metrologia*, **36** (5): 477-480. (1999).
 - ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "A colour-difference formula for assessing large colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 344-355. (1999a).
 - ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using large colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 356-368. (1999b).
 - ☞ S. S. Guan and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using small colour differences". *Color Research and Application*, **24** (5): 331-343. (1999c).
 - ☞ B. Han, C. W. Cui and M. R. Luo. "Texture Effect on Evaluation of Colour Difference". *Color Communication and Managemet (AIC Interim Meeting)*, Bangkok. (2003).
 - ☞ R. Huertas. "Estudio sobre el Error Asociado a los Parámetros de Color CIELAB y CIELUV". Memoria de Licenciatura. Departamento de Óptica, Universidad de Granada. Granada. (2001).
 - ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (l:c) Color-Difference Formula. 1. Development of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (2): 86-94. (1987a).

- ☞ M. R. Luo and B. Rigg. "Bfd (1:c) Color-Difference Formula. 2. Performance of the Formula". *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **103** (3): 126-132. (1987b).
- ☞ E. D. Montag and R. S. Berns. "Lightness dependencies and the effect of texture on suprathreshold lightness tolerances". *Color Research and Application*, **25** (4): 241-249. (2000).
- ☞ J. A. Nelder. "Citation Classic - Simplex Method for Function Minimization". *Current Contents/Engineering Technology & Applied Sciences*, (15): 12-12. (1979).
- ☞ J. A. Nelder and R. Mead. "A Simplex-Method for Function Minimization". *Computer Journal*, **7** (4): 308-313. (1965).
- ☞ A. R. Robertson. "CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **3**: 149-151. (1978).
- ☞ K. Witt. "CIE Guidelines for Coordinated Future Work on Industrial Colour-Difference Evaluation". *Color Research and Application*, **20** (6): 399-403. (1995).
- ☞ J. H. Xin, C. C. Lam and M. R. Luo. "Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs". *Color Research and Application*, **26** (5): 376-383. (2001).
- ☞ J. H. Xin, C. C. Lam and M. R. Luo. "Investigation of Texture Effect on CRT Color Difference Evaluation". *Color Communication and Management (AIC Interim Meeting)*, Bangkok. (2003).



APÉNDICES



APÉNDICE 1. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE ERRORES

En este apéndice de ecuaciones incluimos las expresiones analíticas del cálculo de las coordenadas CIELAB en función de los valores tristímulo. También las ecuaciones de los errores en las coordenadas CIELAB en función de los errores en los valores tristímulo. Para las coordenadas cilíndricas de CIELAB, el croma y el ángulo de tono, los errores dependen de los errores de a^* y b^* .

El sistema CIELAB, viene definido mediante las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 && \text{para } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) > 0.008856 \\
 L^* &= 903.3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) && \text{para } \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \leq 0.008856 \\
 a^* &= 500 [f(X/X_0) - f(Y/Y_0)] \\
 b^* &= 200 [f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0)]
 \end{aligned} \tag{A1}$$

donde la función f tiene la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 f(\alpha) &= \alpha^{1/3} && \text{para } \alpha > 0.008856 \\
 f(\alpha) &= 7.787\alpha + \frac{16}{116} && \text{para } \alpha \leq 0.008856
 \end{aligned} \tag{A2}$$

Las coordenadas cilíndricas de CIELAB están definidas en función de a^* y b^* :

$$\begin{aligned}
 C_{ab}^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\
 h_{ab} &= \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \\
 C_{uv}^* &= \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2} \\
 h_{uv} &= \arctg\left(\frac{v^*}{u^*}\right)
 \end{aligned} \tag{A3}$$

Aplicando la Ecuación (11) a la Ecuación (A1) obtenemos las ecuaciones de los errores en las coordenadas de color CIELAB:

$$\sigma^2(L^*) = \begin{cases} \left(\frac{116}{3Y_0} \left(\frac{Y_0}{Y} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^2 \sigma^2(Y) + \left(\frac{-116}{3Y_0} \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \right)^2 \sigma^2(Y_0) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \\ \left(\frac{903.3}{Y_0} \right)^2 \sigma^2(Y) + \left(\frac{-903.3Y}{Y_0^2} \right)^2 \sigma^2(Y_0) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} \leq 0.008856 \end{cases} \quad (A4)$$

$$\sigma^2(a^*) = 500^2 \left[\begin{aligned} & (f(X, X_0))^2 \sigma^2(X) + (f(Y, Y_0))^2 \sigma^2(Y) - \\ & - 2 \cdot r_{XY} f(X, X_0) f(Y, Y_0) \sigma(X) \sigma(Y) + \\ & + (g(X, X_0))^2 \sigma^2(X_0) + (g(Y, Y_0))^2 \sigma^2(Y_0) - \\ & - 2 \cdot r_{X_0, Y_0} g(X, X_0) g(Y, Y_0) \sigma(X_0) \sigma(Y_0) \end{aligned} \right] \quad (A5)$$

$$\sigma^2(b^*) = 200^2 \left[\begin{aligned} & (f(Y, Y_0))^2 \sigma^2(Y) + (f(Z, Z_0))^2 \sigma^2(Z) - \\ & - 2 \cdot r_{YZ} f(Y, Y_0) f(Z, Z_0) \sigma(Y) \sigma(Z) + \\ & + (g(Y, Y_0))^2 \sigma^2(Y_0) + (g(Z, Z_0))^2 \sigma^2(Z_0) - \\ & - 2 \cdot r_{Y_0, Z_0} g(Y, Y_0) g(Z, Z_0) \sigma(Y_0) \sigma(Z_0) \end{aligned} \right] \quad (A6)$$

donde las funciones f y g están definidas de la forma siguiente:

$$f(c, d) = \begin{cases} \frac{1}{3d} \left(\frac{d}{c} \right)^{\frac{2}{3}} & \text{si } \frac{c}{d} > 0.008856 \\ 7.787 \frac{1}{d} & \text{si } \frac{c}{d} \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$g(c, d) = \begin{cases} \frac{-1}{3d} \left(\frac{c}{d} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } \frac{c}{d} > 0.008856 \\ -7.787 \frac{c}{d^2} & \text{si } \frac{c}{d} \leq 0.008856 \end{cases}$$

En el caso del croma y el ángulo de tono, las desviaciones estándar calculadas mediante propagación cuadrática, dependen de los errores en las coordenadas a* y b*. En este caso hemos aplicado la Ecuación (10) a la Ecuación (A3) para derivar las expresiones ya que en esta Memoria consideramos que las variables a* y b* son independientes entre si. Los errores en el croma y el ángulo de tono son las siguientes:

$$\sigma(C_{ab}^*)^2 = (\cos h_{ab})^2 \sigma(a^*)^2 + (\sin h_{ab})^2 \sigma(b^*)^2 \quad (A7)$$

$$\sigma(h_{ab})^2 = \left(\frac{-\sin h_{ab}}{C_{ab}^*} \right)^2 \sigma(a^*)^2 + \left(\frac{\cos h_{ab}}{C_{ab}^*} \right)^2 \sigma(b^*)^2 \quad (A8)$$



APÉNDICE 2. TABLAS DE TOLERANCIAS

En las tablas siguientes reproducimos los valores de las tolerancias visuales medias, en unidades CIELAB y CIE94, obtenidas por cada uno de los observadores. En cada tabla presentamos las tolerancias correspondientes a un centro con la diferencia de color, entre las muestras del par, principalmente en una de las coordenadas L^* , C^*_{ab} o h_{ab} .

Variable			Observador				
Tipo	Superf.	Grosor	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.89	4.00	2.41	3.19	3.00
B	50	1	2.26	3.78	2.52	4.63	3.89
B	50	4	2.61	3.57	2.62	5.95	4.31
B	20	1	2.23	4.15	2.29	5.00	3.09
B	20	4	2.50	4.45	2.43	6.62	2.81
B	5	1	2.58	4.23	1.90	5.13	3.15
B	5	4	2.57	4.21	2.07	4.99	3.13
C	50	1	2.49	4.04	2.14	4.94	2.49
C	50	4	2.75	4.70	2.34	6.11	2.75
C	20	1	2.20	4.66	2.27	4.66	2.71
C	20	4	2.53	4.37	2.21	5.68	3.06
C	5	1	2.68	4.43	2.68	3.54	2.91
C	5	4	2.10	4.41	1.81	4.05	3.29
F	50	1	4.01	6.49	3.61	10.52	4.26
F	50	4	4.48	5.92	4.23	13.12	4.47
F	20	1	3.30	5.05	2.92	8.34	3.31
F	20	4	3.77	5.35	3.06	7.09	3.97
F	5	1	2.64	4.85	2.48	4.96	3.05
F	5	4	2.25	4.80	1.81	5.06	3.39
F	80	1	3.87	7.32	3.84	14.33	4.94
F	80	4	5.48	7.85	5.29	14.33	5.87

Tabla A2.I. Tolerancias visuales en claridad para el centro 1.

Variable			Observador				
Tipo	Superf.	Grosor	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.14	3.03	2.15	4.25	1.96
B	50	1	2.25	3.85	2.23	6.00	2.24
B	50	4	3.55	4.39	2.80	7.02	2.15
B	20	1	2.71	3.61	2.23	5.36	2.02
B	20	4	1.80	4.24	2.37	6.82	1.98
B	5	1	2.45	3.71	1.72	5.24	1.65
B	5	4	1.80	3.12	2.06	3.93	1.65
C	50	1	2.15	3.37	2.36	5.48	1.92
C	50	4	2.71	4.10	2.23	5.98	2.35
C	20	1	2.23	3.33	2.03	4.16	2.24
C	20	4	2.24	4.27	1.97	5.38	2.06
C	5	1	1.97	3.38	2.50	5.02	1.96
C	5	4	2.25	3.46	1.54	4.88	1.41
D	50	1	2.20	3.51	1.87	4.27	1.51
D	50	4	2.43	4.01	2.54	6.04	2.06
D	20	1	3.20	3.46	2.06	4.75	1.56
D	20	4	2.00	2.94	2.03	3.58	1.39
D	5	1	2.40	3.02	2.24	3.68	2.30
D	5	4	2.18	3.26	2.08	5.07	1.69
E	50	1	2.62	3.64	2.02	4.79	1.35
E	50	4	1.48	3.01	2.06	4.19	1.71
E	20	1	2.15	3.26	1.87	3.88	1.77
E	20	4	1.79	3.39	1.97	3.79	1.22
E	5	1	1.66	3.32	1.80	5.19	2.00
E	5	4	2.48	3.27	2.04	4.75	1.44
F	50	1	2.99	5.38	2.72	7.65	2.97
F	50	4	3.05	5.08	3.01	7.65	3.28
F	20	1	3.10	4.27	2.41	6.44	2.14
F	20	4	2.65	4.96	2.61	6.57	2.59
F	5	1	2.68	4.32	1.72	5.57	1.50
F	5	4	2.99	4.41	1.96	5.59	1.89
F	80	1	4.10	6.79	3.32		4.13
F	80	4	4.20	6.09	4.28		4.61

Tabla A2.II. Tolerancias visuales en claridad para el centro 2.

Variables			Observadores									
Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB					Unidades CIE94				
			AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	3.83	7.78	5.09	7.63	2.75	1.31	2.64	1.71	2.58	0.93
B	50	1	5.19	10.08	4.42	10.92	3.21	1.75	3.44	1.48	3.70	1.09
B	50	4	3.10	8.18	5.28	9.32	3.70	1.06	2.76	1.78	3.14	1.26
B	20	1	4.66	9.81	4.65	9.50	3.73	1.55	3.34	1.55	3.25	1.24
B	20	4	4.31	8.87	4.45	11.09	3.36	1.45	3.01	1.51	3.73	1.13
B	5	1	3.66	7.72	4.50	7.67	4.08	1.23	2.62	1.52	2.57	1.39
B	5	4	4.40	9.31	4.36	10.94	3.31	1.47	3.15	1.47	3.72	1.14
C	50	1	4.10	6.99	4.43	8.17	3.50	1.37	2.39	1.50	2.78	1.18
C	50	4	3.40	8.49	3.96	8.87	3.90	1.14	2.86	1.34	2.94	1.33
C	20	1	3.49	8.69	4.03	9.32	3.07	1.18	2.87	1.37	3.14	1.05
C	20	4	4.23	9.29	3.85	10.37	3.64	1.43	3.18	1.30	3.49	1.24
C	5	1	5.04	9.46	4.72	9.60	3.80	1.73	3.27	1.59	3.33	1.27
C	5	4	3.95	9.59	3.90	9.36	3.39	1.33	3.27	1.32	3.23	1.14
D	50	1	4.35	7.45	5.28	8.77	4.24	1.47	2.51	1.78	2.97	1.45
D	50	4	3.88	9.09	4.85	10.63	3.80	1.33	3.04	1.65	3.63	1.29
D	20	1	4.30	8.57	4.71	8.70	3.75	1.44	2.90	1.59	3.01	1.26
D	20	4	5.29	8.31	4.90	11.56	3.92	1.80	2.85	1.66	3.93	1.33
D	5	1	4.34	9.18	5.30	8.82	4.03	1.46	3.12	1.80	2.95	1.37
D	5	4	4.12	9.50	4.67	9.87	3.60	1.39	3.24	1.58	3.35	1.21
E	50	1	4.22	7.29	4.89	8.58	3.26	1.43	2.50	1.63	2.94	1.11
E	50	4	4.73	9.82	4.28	10.64	3.47	1.61	3.37	1.43	3.72	1.17
E	20	1	4.29	8.30	4.39	8.85	3.67	1.44	2.77	1.49	2.94	1.24
E	20	4	3.88	8.46	4.91	8.36	3.71	1.31	2.85	1.68	2.81	1.26
E	5	1	5.10	10.03	4.27	10.08	3.77	1.71	3.44	1.44	3.46	1.28
E	5	4	5.07	8.76	4.44	10.71	3.25	1.69	3.04	1.50	3.67	1.12
F	50	1	4.25	10.27	4.47	12.66	4.66	1.44	3.49	1.51	4.29	1.57
F	50	4	5.76	9.42	4.79	11.50	4.83	1.92	3.18	1.63	4.02	1.65
F	20	1	4.93	9.50	3.70	9.63	3.81	1.66	3.21	1.25	3.29	1.30
F	20	4	4.55	9.13	4.21	9.14	3.73	1.54	3.13	1.42	3.12	1.25
F	5	1	4.23	9.55	3.94	9.97	3.46	1.43	3.29	1.33	3.47	1.16
F	5	4	3.86	10.06	3.94	9.06	3.52	1.30	3.44	1.32	3.10	1.18
F	80	1	5.68	10.59	5.16	13.63	5.11	1.93	3.62	1.75	4.67	1.72
F	80	4	6.71	11.98	6.17	14.82	6.52	2.31	4.11	2.09	5.16	2.20

Tabla A2.III. Tolerancias visuales en croma para el centro 2.

Variable	Observador											
	Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB				Unidades CIE94				
				AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP
A	0	0	2.82	6.35	3.13	4.08	2.28	1.71	3.84	1.89	2.47	1.38
B	50	1	2.71	7.21	3.16	4.46	2.36	1.64	4.36	1.91	2.69	1.43
B	50	4	2.94	8.26	3.18	5.40	2.76	1.78	4.99	1.92	3.27	1.67
B	20	1	2.58	6.59	3.51	4.31	2.75	1.56	3.98	2.12	2.60	1.66
B	20	4	2.99	7.71	3.04	5.44	2.34	1.81	4.66	1.84	3.29	1.42
B	5	1	2.37	6.57	3.16	4.82	2.43	1.44	3.97	1.91	2.92	1.47
B	5	4	2.57	6.81	3.06	4.58	2.12	1.56	4.12	1.85	2.77	1.28
C	50	1	2.36	6.59	2.98	4.01	2.20	1.43	4.19	1.80	2.42	1.33
C	50	4	3.35	7.89	3.17	4.90	2.43	2.02	4.77	1.92	2.96	1.47
C	20	1	3.16	7.77	2.83	5.04	2.27	1.91	4.70	1.71	3.05	1.37
C	20	4	2.96	6.95	2.95	4.95	2.51	1.79	4.20	1.78	2.99	1.51
C	5	1	3.29	8.26	2.72	4.46	2.04	1.99	5.00	1.65	2.70	1.23
C	5	4	2.83	7.43	3.18	4.59	2.60	1.71	4.49	1.92	2.77	1.57
D	50	1	2.91	7.74	2.94	4.64	2.51	1.76	4.68	1.78	2.81	1.52
D	50	4	3.05	6.71	3.42	4.69	2.29	1.85	4.06	2.07	2.83	1.38
D	20	1	2.83	6.80	3.41	4.44	2.68	1.71	4.12	2.06	2.68	1.62
D	20	4	3.13	6.91	2.84	4.78	1.90	1.89	4.18	1.72	2.89	1.15
D	5	1	3.19	7.29	3.29	5.05	2.57	1.93	4.41	1.99	3.05	1.56
D	5	4	2.94	7.54	2.92	4.22	2.66	1.78	4.56	1.77	2.55	1.61
E	50	1	3.41	7.49	3.02	6.41	2.67	2.06	4.53	1.83	3.88	1.61
E	50	4	3.90	7.65	2.93	6.05	2.51	2.36	4.63	1.77	3.66	1.52
E	20	1	3.89	8.99	3.05	6.69	2.44	2.35	5.44	1.84	4.05	1.48
E	20	4	3.78	8.38	2.76	5.73	2.46	2.29	5.07	1.67	3.46	1.48
E	5	1	3.53	8.75	3.06	6.34	2.37	2.14	5.29	1.85	3.83	1.43
E	5	4	2.94	7.59	2.87	5.90	2.34	1.78	4.59	1.73	3.56	1.41
F	50	1	3.31	9.03	3.04	7.54	3.05	2.00	5.47	1.84	4.56	1.84
F	50	4	3.53	8.84	4.12	8.75	3.53	2.13	5.35	2.49	5.29	2.14
F	20	1	3.34	9.55	2.95	5.71	2.50	2.02	5.77	1.78	3.45	1.51
F	20	4	3.53	9.55	3.18	6.36	2.68	2.14	5.77	1.92	3.85	1.62
F	5	1	3.29	8.85	2.82	5.63	2.79	1.99	5.35	1.70	3.40	1.69
F	5	4	2.94	8.38	2.84	5.62	2.52	1.78	5.07	1.72	3.40	1.52
F	80	1	4.58	10.62	4.00	10.72	4.08	2.77	6.42	2.42	6.48	2.46
F	80	4	4.69	9.96	4.21	8.33	4.78	2.83	6.02	2.54	5.03	2.89

Tabla A2.IV. Tolerancias visuales en tono para el centro 2.

Tipo	Variable		Observador				
	Superf.	Grosor	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.85	4.20	2.17	4.99	2.92
C	50	1	2.35	4.65	2.39	4.55	2.68
C	50	4	2.43	4.56	2.44	7.99	3.28
C	20	1	2.89	4.89	2.44	6.47	2.94
C	20	4	2.89	4.74	2.48	6.26	2.97
C	5	1	2.58	4.81	2.51	4.77	2.64
C	5	4	2.56	4.29	2.70	4.68	2.99
D	50	1	2.94	4.69	2.55	5.52	2.88
D	50	4	2.55	4.11	2.57	5.40	2.78
D	20	1	2.90	4.80	2.53	4.44	2.68
D	20	4	3.16	3.93	2.48	5.63	2.78
D	5	1	3.21	4.94	2.45	4.94	2.72
D	5	4	3.27	5.06	2.46	4.93	2.93
E	50	1	2.27	4.40	3.61	4.62	3.09
E	50	4	2.24	4.42	2.35	6.48	2.93
E	20	1	2.76	4.70	2.54	5.01	3.19
E	20	4	3.13	4.69	2.84	5.57	2.90
E	5	1	3.23	4.67	2.93	5.12	2.59
E	5	4	3.04	5.14	2.88	4.81	2.75
F	50	1	3.96	6.53	4.03	12.20	4.48
F	50	4	4.79	5.74	5.21	13.37	4.17
F	20	1	3.34	5.64	3.01	10.42	3.33
F	20	4	2.68	5.46	3.76	10.73	3.85
F	5	1	2.75	5.62	2.59	7.74	3.04
F	5	4	3.77	5.07	2.38	8.16	2.45
F	80	1	5.48	7.90	4.79		5.69
F	80	4	6.60	6.81	6.19		6.81

Tabla A2.V. Tolerancias visuales en claridad para el centro 3.

Variable	Observador											
	Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB				Unidades CIE94				
				AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP
A	0	0	3.86	6.80	4.33	6.64	3.01	1.23	2.20	1.39	2.14	0.97
C	50	1	3.97	6.79	4.17	6.32	3.54	1.29	2.17	1.34	2.02	1.13
C	50	4	3.45	6.91	3.62	7.21	3.85	1.09	2.22	1.16	2.29	1.23
C	20	1	4.40	8.75	3.16	9.22	2.69	1.40	2.83	1.02	2.89	0.86
C	20	4	3.66	7.82	3.90	7.71	3.08	1.17	2.51	1.26	2.48	0.98
C	5	1	3.42	8.04	4.26	6.87	2.85	1.09	2.58	1.37	2.20	0.91
C	5	4	3.81	8.23	3.78	7.10	3.15	1.20	2.64	1.22	2.28	1.01
D	50	1	4.39	8.17	4.95	6.28	3.84	1.43	2.67	1.59	2.04	1.22
D	50	4	4.60	7.79	4.69	6.39	4.34	1.46	2.47	1.51	2.06	1.40
D	20	1	4.64	7.59	4.00	6.72	3.24	1.48	2.46	1.27	2.16	1.04
D	20	4	4.84	7.00	4.84	7.31	4.01	1.53	2.28	1.54	2.37	1.27
D	5	1	4.73	7.79	3.86	7.03	3.97	1.51	2.47	1.25	2.25	1.29
D	5	4	4.24	7.67	4.56	7.74	3.86	1.34	2.49	1.45	2.55	1.22
E	50	1	4.73	7.34	3.71	7.74	3.46	1.50	2.33	1.19	2.47	1.10
E	50	4	5.45	7.34	4.13	7.23	4.24	1.76	2.38	1.33	2.32	1.36
E	20	1	4.96	8.36	4.02	7.62	3.31	1.58	2.69	1.29	2.47	1.06
E	20	4	4.59	7.35	4.86	7.44	3.63	1.47	2.35	1.58	2.39	1.17
E	5	1	5.09	8.65	3.43	8.99	3.63	1.64	2.81	1.10	2.92	1.16
E	5	4	4.72	7.10	4.01	6.16	3.70	1.50	2.25	1.28	1.96	1.19
F	50	1	5.28	10.16	5.35	14.35	5.27	1.70	3.28	1.70	4.74	1.68
F	50	4	5.43	9.93	5.92	14.28	5.11	1.73	3.23	1.91	4.58	1.64
F	20	1	5.30	10.16	4.03	9.09	4.09	1.69	3.31	1.30	2.90	1.30
F	20	4	5.09	11.12	4.36	11.08	4.64	1.65	3.67	1.38	3.56	1.48
F	5	1	4.33	9.03	3.66	7.88	3.09	1.38	2.90	1.17	2.53	0.99
F	5	4	5.31	10.15	4.48	8.95	3.62	1.69	3.30	1.43	2.84	1.15
F	80	1	9.30	14.62	5.80	17.80	6.95	2.93	4.69	1.86	5.84	2.21
F	80	4	7.23	9.70	7.23	17.33	6.48	2.31	3.12	2.29	5.69	2.09

Tabla A2.VI. Tolerancias visuales en croma para el centro 3.

Variable			Observador									
Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB					Unidades CIE94				
			AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.60	4.51	2.55	4.40	2.53	1.52	2.64	1.49	2.58	1.48
C	50	1	2.16	4.71	2.13	4.57	2.31	1.26	2.76	1.25	2.67	1.35
C	50	4	1.95	5.34	2.36	5.84	2.40	1.14	3.13	1.38	3.42	1.40
C	20	1	2.19	5.17	2.10	5.48	2.75	1.28	3.03	1.23	3.21	1.61
C	20	4	2.28	4.27	2.62	4.46	2.34	1.33	2.50	1.53	2.61	1.37
C	5	1	2.51	5.24	2.78	4.97	2.47	1.47	3.07	1.62	2.91	1.44
C	5	4	2.70	5.22	1.96	5.39	2.16	1.58	3.05	1.14	3.15	1.26
D	50	1	1.93	5.27	2.65	4.83	2.35	1.13	3.08	1.55	2.83	1.38
D	50	4	2.52	5.36	2.28	4.27	2.52	1.47	3.13	1.33	2.49	1.47
D	20	1	2.52	5.59	2.65	4.64	2.61	1.48	3.27	1.55	2.72	1.53
D	20	4	2.48	4.85	2.87	4.94	2.64	1.45	2.84	1.67	2.89	1.54
D	5	1	2.66	5.27	2.67	4.22	2.68	1.55	3.08	1.56	2.47	1.57
D	5	4	2.26	4.69	2.59	4.27	2.56	1.32	2.74	1.51	2.50	1.49
E	50	1	2.68	4.53	2.89	4.36	3.32	1.57	2.65	1.69	2.55	1.94
E	50	4	2.98	5.20	2.41	4.48	3.18	1.74	3.04	1.41	2.62	1.86
E	20	1	2.60	5.04	2.80	5.03	2.87	1.52	2.95	1.64	2.94	1.68
E	20	4	3.17	5.86	2.04	5.52	3.07	1.85	3.43	1.19	3.23	1.80
E	5	1	2.26	5.43	2.43	4.30	2.64	1.32	3.18	1.42	2.52	1.54
E	5	4	2.61	5.47	2.60	5.05	2.68	1.53	3.20	1.52	2.95	1.57
F	50	1	2.52	6.88	3.54	10.54	3.90	1.47	4.03	2.07	6.17	2.28
F	50	4	3.41	7.16	4.01	12.16	4.16	1.99	4.18	2.35	7.11	2.43
F	20	1	3.22	6.61	2.58	7.58	2.79	1.89	3.87	1.51	4.44	1.63
F	20	4	2.53	6.37	3.00	7.84	3.11	1.48	3.72	1.75	4.59	1.82
F	5	1	2.87	5.99	2.09	4.84	2.97	1.68	3.50	1.22	2.83	1.74
F	5	4	2.61	5.76	2.02	5.88	2.63	1.52	3.37	1.18	3.44	1.54
F	80	1	3.41	8.13	4.18	12.66	4.25	2.00	4.76	2.44	7.40	2.48
F	80	4	4.56	7.82	4.31	12.66	5.13	2.67	4.57	2.52	7.40	3.00

Tabla A2.VII. Tolerancias visuales en tono para el centro 3.

Variable Tipo	Variable		Observador				
	Superf.	Grosor	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.63	3.94	2.39	4.89	1.91
B	50	1	3.03	6.10	1.97	6.92	2.27
B	50	4	4.11	4.83	2.87	6.05	3.81
B	20	1	2.69	5.19	2.33	7.61	2.86
B	20	4	3.58	5.98	1.91	7.07	2.86
B	5	1	3.22	5.01	2.33	6.72	2.26
B	5	4	2.67	4.29	2.51	5.02	3.69
C	50	1	2.51	4.41	2.27	5.38	2.75
C	50	4	3.08	4.65	2.51	5.01	2.86
C	20	1	1.97	5.19	2.15	6.39	2.49
C	20	4	2.67	5.37	1.97	5.37	1.91
C	5	1	2.15	5.38	2.50	7.26	1.91
C	5	4	2.51	4.64	1.97	5.56	2.39
E	50	1	2.50	4.47	2.33	4.29	2.14
E	50	4	2.02	4.89	1.91	4.17	2.15
E	20	1	2.50	5.19	2.15	5.93	2.15
E	20	4	2.38	4.53	2.63	3.34	2.27
E	5	1	3.40	5.19	1.97	4.48	2.26
E	5	4	3.21	4.77	2.51	6.87	1.79
F	50	1	3.70	6.48	3.22	11.70	3.81
F	50	4	5.19	7.38	3.76	13.52	5.13
F	20	1	3.39	5.93	2.50	7.72	3.21
F	20	4	2.87	6.57	3.93	9.13	2.62
F	5	1	1.79	4.83	2.15	5.56	2.39
F	5	4	3.39	5.37	2.15	6.57	2.15
F	80	1	4.73	8.37	4.41	14.40	4.65
F	80	4	6.05	8.96	5.98	14.28	5.33

Tabla A2.VIII. Tolerancias visuales en claridad para el centro 4.

Variable			Observador									
Tipo	Superficie	Grosor	Unidades CIELAB					Unidades CIE94				
			AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	4.70	7.78	4.67	7.11	3.21	2.12	3.60	2.08	3.26	1.41
B	50	1	4.86	8.02	3.67	9.53	4.12	2.17	3.73	1.62	4.51	1.83
B	50	4	3.72	7.41	4.31	8.69	4.12	1.64	3.41	1.92	4.07	1.83
B	20	1	3.97	7.39	3.97	7.22	3.82	1.76	3.40	1.76	3.32	1.69
B	20	4	4.52	8.27	4.12	7.60	5.08	2.02	3.85	1.83	3.51	2.28
B	5	1	4.31	7.41	5.06	8.16	4.87	1.92	3.41	2.27	3.79	2.19
B	5	4	3.66	8.47	4.51	7.23	3.82	1.61	3.95	2.01	3.32	1.69
C	50	1	3.53	7.41	2.68	4.04	2.38	1.56	3.42	1.17	1.79	1.04
C	50	4	3.67	8.75	2.38	9.29	2.52	1.62	4.11	1.04	4.39	1.10
C	20	1	4.20	8.59	2.78	7.41	3.09	1.86	4.01	1.22	3.41	1.37
C	20	4	3.95	7.84	2.78	8.99	2.87	1.75	3.62	1.22	4.23	1.26
C	5	1	4.57	8.47	3.66	7.98	3.82	2.04	3.95	1.61	3.71	1.69
C	5	4	4.20	8.69	3.28	8.85	3.36	1.86	4.07	1.44	4.15	1.48
E	50	1	3.47	6.54	4.31	7.00	3.02	1.53	2.98	1.92	3.20	1.32
E	50	4	3.47	7.98	3.97	7.40	3.67	1.53	3.71	1.76	3.43	1.62
E	20	1	6.25	8.29	3.07	7.00	2.88	2.84	3.86	1.35	3.20	1.26
E	20	4	3.89	7.51	3.63	7.21	3.97	1.73	3.46	1.60	3.33	1.76
E	5	1	3.28	7.42	4.78	7.00	3.65	1.44	3.43	2.14	3.20	1.61
E	5	4	5.06	7.25	6.71	6.97	3.67	2.27	3.33	3.07	3.19	1.62
F	50	1	4.20	8.39	5.67	12.69	5.68	1.87	3.91	2.56	6.28	2.56
F	50	4	6.42	8.87	4.78	11.90	5.49	2.92	4.15	2.14	5.80	2.47
F	20	1	6.54	9.42	3.50	10.30	3.82	2.98	4.45	1.54	4.91	1.69
F	20	4	5.96	9.43	4.53	10.29	5.24	2.70	4.47	2.02	4.91	2.36
F	5	1	5.64	8.41	4.20	7.58	3.97	2.55	3.92	1.86	3.50	1.76
F	5	4	5.06	9.72	3.72	8.87	4.35	2.27	4.60	1.64	4.15	1.94
F	80	1	4.58	9.73	6.25	13.09	5.68	2.05	4.62	2.84	6.51	2.56
F	80	4	6.67	10.29	6.25	14.27	6.87	3.05	4.91	2.84	7.21	3.14

Tabla A2.IX. Tolerancias visuales en croma para el centro 4.

Variable	Observador											
	Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB				Unidades CIE94				
				AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP
A	0	0	2.57	4.04	2.38	3.74	2.66	1.77	2.79	1.65	2.58	1.83
B	50	1	2.64	4.21	2.29	4.01	2.52	1.82	2.90	1.58	2.77	1.74
B	50	4	2.29	4.48	2.36	4.46	2.76	1.58	3.09	1.63	3.08	1.90
B	20	1	2.43	4.11	2.57	2.92	2.57	1.68	2.83	1.77	2.01	1.77
B	20	4	2.47	4.53	2.34	3.48	2.52	1.71	3.12	1.61	2.40	1.74
B	5	1	2.66	4.12	2.80	2.93	2.87	1.83	2.84	1.94	2.02	1.98
B	5	4	2.57	4.22	2.71	3.60	2.34	1.77	2.92	1.87	2.49	1.61
C	50	1	2.36	3.85	2.29	3.18	2.34	1.63	2.66	1.58	2.19	1.61
C	50	4	2.29	5.01	2.29	3.64	2.34	1.58	3.45	1.58	2.51	1.61
C	20	1	2.85	4.55	2.29	3.45	2.52	1.96	3.15	1.58	2.38	1.74
C	20	4	2.57	4.74	2.29	4.01	2.47	1.77	3.27	1.58	2.77	1.71
C	5	1	2.56	4.71	2.38	4.42	2.52	1.77	3.25	1.65	3.05	1.74
C	5	4	2.57	4.30	2.47	3.80	2.43	1.77	2.96	1.71	2.62	1.68
E	50	1	2.91	5.56	2.57	4.74	2.87	2.01	3.83	1.77	3.27	1.98
E	50	4	2.57	4.21	2.91	5.09	2.71	1.77	2.90	2.01	3.51	1.87
E	20	1	2.70	4.83	2.64	3.54	2.74	1.87	3.34	1.82	2.44	1.89
E	20	4	2.79	4.24	2.47	3.06	2.83	1.93	2.93	1.71	2.11	1.95
E	5	1	2.43	4.66	2.85	4.21	2.74	1.68	3.21	1.96	2.90	1.89
E	5	4	3.45	4.74	2.97	4.30	1.72	2.38	3.27	2.05	2.97	1.19
F	50	1	2.75	5.43	3.06	6.34	3.19	1.90	3.74	2.11	4.37	2.19
F	50	4	2.85	5.56	3.92	6.37	3.19	1.96	3.83	2.70	4.38	2.19
F	20	1	2.57	5.44	2.85	5.09	2.70	1.77	3.75	1.96	3.51	1.86
F	20	4	3.35	5.56	2.85	5.38	2.52	2.31	3.83	1.96	3.72	1.74
F	5	1	2.36	4.39	2.36	3.93	2.34	1.63	3.02	1.63	2.71	1.61
F	5	4	2.43	5.01	2.29	4.21	2.70	1.68	3.45	1.58	2.90	1.86
F	80	1	3.74	5.56	3.55	7.75	3.68	2.57	3.83	2.45	5.34	2.53
F	80	4	3.54	6.63	3.64	8.64	4.22	2.44	4.58	2.51	5.96	2.91

Tabla A2.X. Tolerancias visuales en tono para el centro 4.

Tipo	Variable		Observador				
	Superf.	Grosor	AY	MJR	MM	MP	RH
A	0	0	2.81	4.83	2.96	4.12	2.01
B	50	1	2.60	4.34	2.57	4.00	2.22
B	50	4	2.53	6.16	2.97	5.69	2.40
B	20	1	2.17	4.98	2.35	5.06	2.44
B	20	4	2.03	5.81	2.67	4.19	2.37
B	5	1	2.54	5.46	2.37	4.74	2.05
B	5	4	2.75	5.72	2.36	4.77	1.62
C	50	1	2.73	5.16	2.62	5.17	2.01
C	50	4	2.87	6.31	2.49	6.52	2.68
C	20	1	2.99	5.56	2.89	4.49	2.87
C	20	4	3.50	5.16	2.75	3.82	2.01
C	5	1	3.47	5.29	2.17	5.83	2.25
C	5	4	2.90	5.69	2.87	6.52	2.01
D	50	1	2.01	5.49	2.49	6.72	2.68
D	50	4	2.49	4.89	3.09	5.70	2.25
D	20	1	3.50	5.10	2.68	3.69	2.60
D	20	4	3.09	5.08	2.25	5.73	2.25
D	5	1	3.28	5.69	2.49	7.96	2.33
D	5	4	3.47	5.69	2.25	5.30	2.01
E	50	1	3.00	4.78	2.34	4.44	1.96
E	50	4	2.39	4.62	2.24	4.56	1.56
E	20	1	2.58	5.44	2.41	5.65	1.93
E	20	4	2.62	5.34	2.54	3.87	1.51
E	5	1	2.38	4.69	2.87	4.85	2.14
E	5	4	2.51	4.99	2.46	4.15	1.83
F	50	1	3.88	7.08	3.18	9.18	3.19
F	50	4	4.03	6.48	3.30	8.62	3.52
F	20	1	2.70	6.57	2.60	6.17	2.33
F	20	4	2.47	6.47	3.30	7.50	2.41
F	5	1	2.45	6.24	2.35	5.28	1.97
F	5	4	2.46	5.18	2.25	4.47	1.91
F	80	1	4.36	8.62	3.49	12.28	4.30
F	80	4	4.71	7.86	4.51	14.12	4.15

Tabla A2.XI. Tolerancias visuales en claridad para el centro 5.

Variable	Observador											
	Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB				Unidades CIE94				
				AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP
A	0	0	3.48	7.54	3.30	6.37	2.42	1.44	3.21	1.36	2.64	1.00
B	50	1	3.61	6.35	3.61	6.75	3.31	1.50	2.68	1.49	2.86	1.37
B	50	4	3.49	7.63	3.22	6.36	2.96	1.46	3.28	1.33	2.72	1.22
B	20	1	3.66	8.26	3.62	6.89	2.70	1.51	3.54	1.50	2.96	1.12
B	20	4	3.87	8.19	3.49	7.19	3.04	1.63	3.54	1.44	3.02	1.26
B	5	1	3.47	6.69	3.23	6.07	2.87	1.46	2.81	1.35	2.58	1.19
B	5	4	3.62	7.68	3.49	6.85	2.80	1.51	3.35	1.44	2.94	1.16
C	50	1	3.48	7.22	3.47	5.60	2.93	1.49	3.22	1.49	2.45	1.25
C	50	4	2.24	8.60	3.83	6.21	3.12	0.95	3.90	1.65	2.75	1.34
C	20	1	3.57	7.79	3.83	7.29	3.65	1.53	3.50	1.65	3.25	1.57
C	20	4	3.83	8.05	3.31	6.99	3.11	1.65	3.63	1.41	3.12	1.33
C	5	1	3.48	7.53	3.12	5.21	2.75	1.49	3.37	1.33	2.28	1.17
C	5	4	3.57	7.80	3.57	5.43	2.93	1.53	3.50	1.53	2.40	1.25
D	50	1	4.89	8.05	4.60	10.27	4.71	2.13	3.62	2.00	4.76	2.05
D	50	4	5.45	8.35	4.86	11.96	4.34	2.38	3.78	2.11	5.70	1.88
D	20	1	5.45	10.05	4.60	7.83	3.47	2.38	4.64	2.00	3.54	1.49
D	20	4	5.41	8.65	4.71	10.67	4.35	2.36	3.93	2.05	4.97	1.88
D	5	1	3.55	7.55	5.15	5.15	3.29	1.52	3.39	2.25	2.25	1.41
D	5	4	3.31	7.80	4.09	7.29	2.93	1.41	3.50	1.76	3.25	1.25
E	50	1	3.61	7.09	3.30	6.91	2.78	1.51	2.99	1.37	2.96	1.15
E	50	4	3.87	7.70	3.22	7.68	3.22	1.61	3.27	1.33	3.25	1.33
E	20	1	3.53	6.70	3.17	7.02	2.76	1.47	2.85	1.31	2.99	1.15
E	20	4	3.48	7.53	3.74	6.76	2.78	1.47	3.22	1.56	2.88	1.15
E	5	1	3.58	5.83	3.40	6.36	2.59	1.49	2.43	1.42	2.67	1.08
E	5	4	3.52	5.98	3.57	6.46	2.69	1.46	2.49	1.49	2.71	1.13
F	50	1	3.65	7.34	3.57	8.02	4.00	1.52	3.11	1.48	3.42	1.66
F	50	4	4.39	7.35	4.14	8.39	4.17	1.84	3.13	1.73	3.62	1.73
F	20	1	3.91	7.78	3.22	7.26	3.13	1.63	3.36	1.34	3.07	1.29
F	20	4	4.12	7.24	3.35	7.11	3.39	1.71	3.12	1.40	3.02	1.41
F	5	1	3.49	6.60	2.96	6.92	3.05	1.44	2.82	1.23	2.88	1.27
F	5	4	3.53	7.44	3.36	6.54	3.13	1.48	3.18	1.40	2.72	1.29
F	80	1	5.02	9.17	4.12	15.54	4.66	2.09	4.06	1.70	7.75	1.92
F	80	4	5.55	8.29	4.89	14.16	4.08	2.33	3.58	2.05	6.92	1.69

Tabla A2.XII. Tolerancias visuales en croma para el centro 5.

Variable	Observador											
	Tipo	Superf.	Grosor	Unidades CIELAB				Unidades CIE94				
				AY	MJR	MM	MP	RH	AY	MJR	MM	MP
A	0	0	1.91	3.83	2.27	3.57	1.68	1.30	2.61	1.54	2.43	1.14
B	50	1	1.88	4.10	2.17	3.01	1.85	1.28	2.79	1.47	2.04	1.26
B	50	4	1.63	3.63	2.30	3.34	1.77	1.11	2.47	1.56	2.27	1.20
B	20	1	1.85	3.71	2.17	3.15	1.43	1.25	2.53	1.47	2.14	0.97
B	20	4	2.08	3.98	2.14	3.26	1.78	1.41	2.70	1.45	2.22	1.21
B	5	1	1.98	4.06	2.13	3.55	1.65	1.34	2.77	1.44	2.42	1.12
B	5	4	1.71	3.90	1.80	3.49	1.68	1.16	2.66	1.23	2.37	1.14
C	50	1	1.81	2.85	1.83	2.51	1.70	1.23	1.94	1.24	1.70	1.15
C	50	4	1.70	3.47	1.94	3.22	1.94	1.16	2.36	1.32	2.19	1.32
C	20	1	2.18	3.12	1.99	2.74	1.28	1.48	2.12	1.35	1.86	0.87
C	20	4	1.85	2.71	1.74	2.89	1.70	1.25	1.84	1.18	1.96	1.16
C	5	1	1.57	2.97	2.12	2.97	1.53	1.07	2.02	1.44	2.02	1.04
C	5	4	1.66	3.97	1.88	2.99	1.66	1.13	2.69	1.28	2.03	1.13
D	50	1	2.18	3.99	3.34	4.51	1.73	1.48	2.71	2.27	3.07	1.18
D	50	4	2.80	4.78	2.63	4.47	1.94	1.90	3.25	1.78	3.03	1.32
D	20	1	2.10	4.36	2.37	3.69	1.63	1.43	2.96	1.61	2.51	1.11
D	20	4	1.66	3.53	2.37	4.03	1.48	1.12	2.40	1.61	2.74	1.00
D	5	1	2.54	4.16	2.04	4.57	1.38	1.72	2.83	1.38	3.10	0.94
D	5	4	1.96	4.16	2.62	3.63	1.68	1.33	2.83	1.78	2.47	1.14
E	50	1	2.03	3.90	2.34	3.75	1.89	1.38	2.66	1.59	2.55	1.28
E	50	4	2.55	4.29	2.11	4.07	1.54	1.74	2.93	1.43	2.77	1.04
E	20	1	1.60	3.59	2.53	3.19	1.84	1.09	2.45	1.72	2.17	1.25
E	20	4	2.01	4.06	2.14	3.41	1.54	1.37	2.76	1.45	2.32	1.05
E	5	1	2.19	3.66	2.49	3.45	1.65	1.49	2.49	1.69	2.35	1.12
E	5	4	2.30	4.54	2.16	4.23	1.72	1.56	3.10	1.47	2.89	1.17
F	50	1	2.68	4.46	2.48	4.74	2.11	1.82	3.04	1.69	3.22	1.44
F	50	4	2.21	4.20	2.76	4.98	2.50	1.50	2.86	1.88	3.38	1.70
F	20	1	2.12	4.52	2.16	3.53	1.85	1.44	3.08	1.47	2.40	1.26
F	20	4	2.14	4.44	1.98	3.32	2.16	1.45	3.03	1.35	2.26	1.47
F	5	1	2.05	4.15	2.00	4.11	2.07	1.39	2.83	1.36	2.81	1.40
F	5	4	1.87	4.18	2.00	3.73	1.73	1.27	2.84	1.36	2.54	1.18
F	80	1	2.94	4.98	2.89	7.20	2.53	2.00	3.38	1.96	4.89	1.72
F	80	4	2.83	4.98	2.98	7.44	2.88	1.92	3.38	2.03	5.06	1.95

Tabla A2.XIII. Tolerancias visuales en tono para el centro 5.



APÉNDICE 3. FÓRMULAS CIE94 Y CIEDE2000

A continuación detallamos las ecuaciones para el cálculo de las diferencias de color con la fórmula CIE94.

El cálculo de la diferencia de color se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{K_H S_H}\right)^2} \quad (\text{A9})$$

Donde las diferencias de claridad, croma y tono (ΔL^* , ΔC^* y ΔH^*) se calculan como en CIELAB, según las expresiones siguientes:

$$\Delta L^* = |L_2^* - L_1^*| \quad (\text{A10})$$

$$\Delta C^* = |C_2^* - C_1^*| \quad (\text{A11})$$

$$\Delta H^* = 2\sqrt{C_1^* C_2^*} \sin\left(\frac{\Delta h}{2}\right) \quad (\text{A12})$$

siendo:

$$\Delta h = |h_2 - h_1| \quad (\text{A13})$$

Los factores S_L , S_C y S_H , denominados factores de ponderación, vienen definidos por las expresiones siguientes:

$$S_L = 1.0 \quad (\text{A13})$$

$$S_C = 1 + 0.045 C^*_{ab} \quad (\text{A14})$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^*_{ab} \quad (\text{A15})$$

donde: $C^*_{ab} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$ es la media geométrica del croma de las 2 muestras consideradas.

Los coeficientes o factores paramétricos, K_L , K_C y K_H , dependen de las condiciones de observación y se toman como la unidad bajo unas condiciones de

referencia establecidas por la CIE.

Respecto a CIEDE2000, la fórmula de diferencia de color es la siguiente:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad A(16)$$

En este caso los factores de ponderación se definen de la forma siguiente:

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}} \quad (A17)$$

$$S_C = 1 + 0.045\overline{C'} \quad (A18)$$

$$S_H = 1 + 0.015\overline{C'}T \quad (A19)$$

donde:

$$T = 1 - 0.17 \cos(\overline{h'} - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\overline{h'}) + 0.32 \cos(3\overline{h'} + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\overline{h'} - 63^\circ) \quad (A20)$$

La barra superior sobre la variable indica la media aritmética de los dos valores de la variable.

Los coeficientes paramétricos se toman igual que en CIE94 bajo las mismas condiciones de referencia.

El factor de rotación está definido de la forma siguiente:

$$R_T = -\sin(2 \Delta\theta)R_C \quad (A21)$$

siendo:

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{(\overline{h'} - 275^\circ)}{25}\right]^2\right\} \quad (A22)$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{C'^7}{C'^7 + 25^7}} \quad (A23)$$

Previamente hay que realizar una serie de transformaciones y cálculos que nos

llevan al sistema de coordenadas “prima” utilizado en las ecuaciones precedentes. Estos cálculos son los siguientes:

$$L' = L^* \quad (A24)$$

$$a' = (1 + G)a^* \quad (A25)$$

$$b' = b^* \quad (A26)$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad (A27)$$

$$h' = \arctg\left(\frac{b'}{a'}\right) \quad (A28)$$

donde G es un parámetro que tiende a la unidad fuera de la zona de estímulos acromáticos, y cuyo valor viene dado por la expresión:

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^{*7}}}{C_{ab}^{*7} + 25^7}} \right) \quad (A29)$$

en la que $\overline{C_{ab}^*}$ indica la media aritmética del valor de C_{ab}^* de las dos muestras comparadas.

A continuación, se calculan las componentes de la diferencia de color entre las 2 muestras:

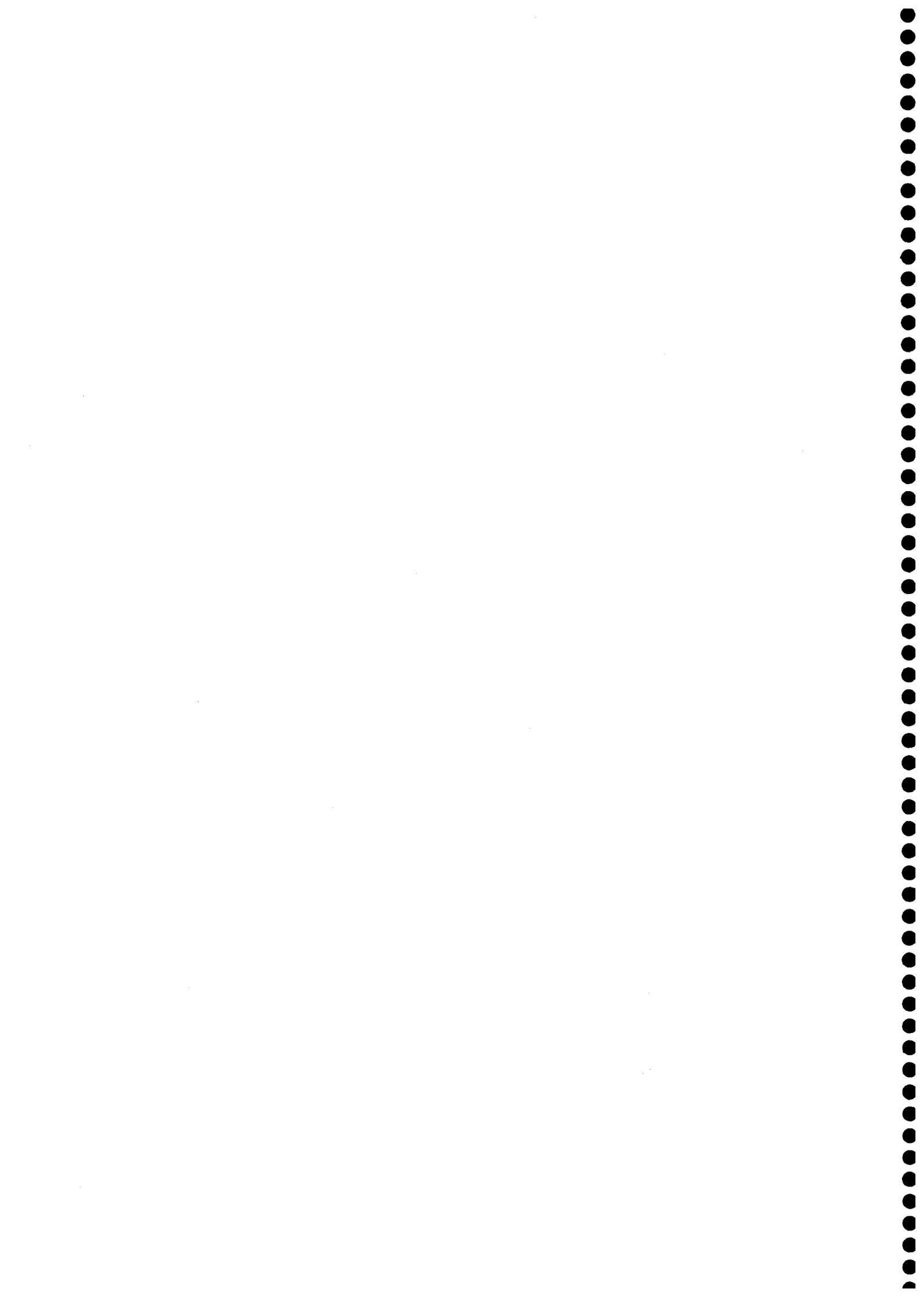
$$\Delta L' = |L'_2 - L'_1| \quad (A30)$$

$$\Delta C' = |C'_2 - C'_1| \quad (A31)$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_2 C'_1} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (A32)$$

siendo

$$\Delta h' = |h'_2 - h'_1| \quad (A33)$$



APÉNDICE 4. TABLAS DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

En la tablas siguientes mostramos los coeficientes de correlación calculados, según el procedimiento propuesto por Gardner, para cada uno de los centros con las diferentes texturas.

Centro	Variables			Coeficientes de correlación		
	Tipo	Superf.	Grosor	r_{xy}	r_{yz}	r_{xz}
	Blanco de Referencia			0.6482	0.0914	0.3570
1	A	0	0	0.6465	0.0922	0.3665
1	B	50	1	0.6467	0.0920	0.3658
1	B	50	4	0.6468	0.0920	0.3652
1	B	20	1	0.6464	0.0920	0.3667
1	B	20	4	0.6475	0.0919	0.3629
1	B	5	1	0.6467	0.0917	0.3639
1	B	5	4	0.6472	0.0921	0.3638
1	C	50	1	0.6477	0.0920	0.3639
1	C	50	4	0.6467	0.0918	0.3639
1	C	20	1	0.6475	0.0920	0.3639
1	C	20	4	0.6468	0.0921	0.3658
1	C	5	1	0.6471	0.0919	0.3646
1	C	5	4	0.6477	0.0917	0.3634
1	F	50	1	0.6460	0.0918	0.3674
1	F	50	4	0.6469	0.0918	0.3653
1	F	20	1	0.6459	0.0918	0.3670
1	F	20	4	0.6468	0.0920	0.3656
1	F	5	1	0.6470	0.0919	0.3654
1	F	5	4	0.6468	0.0921	0.3654
1	F	80	1	0.6450	0.0919	0.3714
1	F	80	4	0.6462	0.0916	0.3660

Tabla A4.1. Coeficientes de correlación calculados entre los valores triestímulo para el centro 1.

Centro	Variables			Coeficientes de correlación		
	Tipo	Superf.	Grosor	r_{xy}	r_{yz}	r_{xz}
2	A	0	0	0.9078	0.0434	0.0770
2	B	50	1	0.8912	0.0478	0.0888
2	B	50	4	0.8914	0.0478	0.0890
2	B	20	1	0.8967	0.0466	0.0859
2	B	20	4	0.8963	0.0468	0.0865
2	B	5	1	0.9002	0.0458	0.0840
2	B	5	4	0.9004	0.0456	0.0832
2	C	50	1	0.9170	0.0408	0.0704
2	C	50	4	0.9108	0.0432	0.0785
2	C	20	1	0.9103	0.0427	0.0751
2	C	20	4	0.9058	0.0444	0.0807
2	C	5	1	0.9041	0.0446	0.0813
2	C	5	4	0.9031	0.0450	0.0823
2	D	50	1	0.9274	0.0385	0.0687
2	D	50	4	0.9281	0.0383	0.0684
2	D	20	1	0.9185	0.0407	0.0716
2	D	20	4	0.9129	0.0425	0.0768
2	D	5	1	0.9060	0.0443	0.0804
2	D	5	4	0.9057	0.0443	0.0807
2	E	50	1	0.8739	0.0520	0.1001
2	E	50	4	0.8748	0.0516	0.0989
2	E	20	1	0.8923	0.0476	0.0887
2	E	20	4	0.8884	0.0486	0.0910
2	E	5	1	0.9018	0.0452	0.0823
2	E	5	4	0.8982	0.0463	0.0852
2	F	50	1	0.8925	0.0471	0.0853
2	F	50	4	0.8904	0.0483	0.0910
2	F	20	1	0.8960	0.0468	0.0864
2	F	20	4	0.8985	0.0462	0.0852
2	F	5	1	0.9015	0.0453	0.0827
2	F	5	4	0.9040	0.0446	0.0807
2	F	80	1	0.8690	0.0533	0.1045
2	F	80	4	0.8781	0.0511	0.0978

Tabla A4.II. Coeficientes de correlación calculados entre los valores triestímulo para el centro 2.

Centro	Variables			Coeficientes de correlación		
	Tipo	Superf.	Grosor	r_{xy}	r_{yz}	r_{xz}
3	A	0	0	0.6884	0.0902	0.1293
3	C	50	1	0.6894	0.0915	0.1240
3	C	50	4	0.6908	0.0900	0.1260
3	C	20	1	0.6887	0.0899	0.1286
3	C	20	4	0.6900	0.0894	0.1294
3	C	5	1	0.6891	0.0893	0.1304
3	C	5	4	0.6895	0.0894	0.1294
3	D	50	1	0.6917	0.0939	0.1144
3	D	50	4	0.6922	0.0942	0.1129
3	D	20	1	0.6909	0.0910	0.1223
3	D	20	4	0.6906	0.0914	0.1223
3	D	5	1	0.6904	0.0894	0.1280
3	D	5	4	0.6900	0.0896	0.1279
3	E	50	1	0.6864	0.0850	0.1532
3	E	50	4	0.6868	0.0850	0.1517
3	E	20	1	0.6884	0.0868	0.1409
3	E	20	4	0.6886	0.0872	0.1396
3	E	5	1	0.6892	0.0886	0.1321
3	E	5	4	0.6894	0.0883	0.1338
3	F	50	1	0.6872	0.0886	0.1381
3	F	50	4	0.6870	0.0894	0.1350
3	F	20	1	0.6881	0.0887	0.1349
3	F	20	4	0.6899	0.0886	0.1317
3	F	5	1	0.6909	0.0885	0.1305
3	F	5	4	0.6897	0.0896	0.1284
3	F	80	1	0.6857	0.0887	0.1418
3	F	80	4	0.6874	0.0884	0.1377

Tabla A4.III. Coeficientes de correlación calculados entre los valores triestímulo para el centro 3.

Centro	Variables			Coeficientes de correlación		
	Tipo	Superf.	Grosor	r_{xy}	r_{yz}	r_{xz}
4	A	0	0	0.6834	0.0937	0.5634
4	B	50	1	0.6778	0.0943	0.5630
4	B	50	4	0.6767	0.0943	0.5638
4	B	20	1	0.6826	0.0938	0.5608
4	B	20	4	0.6787	0.0943	0.5660
4	B	5	1	0.6801	0.0943	0.5677
4	B	5	4	0.6812	0.0941	0.5659
4	C	50	1	0.6815	0.0942	0.5651
4	C	50	4	0.6819	0.0942	0.5644
4	C	20	1	0.6802	0.0943	0.5684
4	C	20	4	0.6805	0.0943	0.5675
4	C	5	1	0.6804	0.0942	0.5684
4	C	5	4	0.6800	0.0943	0.5689
4	E	50	1	0.6684	0.0944	0.5526
4	E	50	4	0.6682	0.0944	0.5492
4	E	20	1	0.6746	0.0945	0.5640
4	E	20	4	0.6788	0.0939	0.5564
4	E	5	1	0.6809	0.0940	0.5648
4	E	5	4	0.6783	0.0945	0.5674
4	F	50	1	0.6799	0.0941	0.5632
4	F	50	4	0.6802	0.0943	0.5643
4	F	20	1	0.6801	0.0944	0.5669
4	F	20	4	0.6803	0.0941	0.5663
4	F	5	1	0.6812	0.0940	0.5666
4	F	5	4	0.6809	0.0941	0.5669
4	F	80	1	0.6791	0.0941	0.5598
4	F	80	4	0.6807	0.0940	0.5578

Tabla A4.IV. Coeficientes de correlación calculados entre los valores triestímulo para el centro 4.

Centro	Variables			Coeficientes de correlación		
	Tipo	Superf.	Grosor	r_{xy}	r_{yz}	r_{xz}
5	A	0	0	0.4581	0.1681	0.8601
5	B	50	1	0.4761	0.1600	0.8302
5	B	50	4	0.4767	0.1600	0.8287
5	B	20	1	0.4685	0.1637	0.8430
5	B	20	4	0.4696	0.1633	0.8411
5	B	5	1	0.4624	0.1663	0.8531
5	B	5	4	0.4621	0.1670	0.8540
5	C	50	1	0.4442	0.1742	0.8817
5	C	50	4	0.4486	0.1723	0.8753
5	C	20	1	0.4556	0.1693	0.8648
5	C	20	4	0.4559	0.1693	0.8643
5	C	5	1	0.4584	0.1681	0.8597
5	C	5	4	0.4573	0.1685	0.8612
5	D	50	1	0.4317	0.1818	0.8979
5	D	50	4	0.4350	0.1804	0.8936
5	D	20	1	0.4466	0.1739	0.8773
5	D	20	4	0.4466	0.1748	0.8776
5	D	5	1	0.4525	0.1706	0.8685
5	D	5	4	0.4510	0.1712	0.8707
5	E	50	1	0.5045	0.1485	0.7788
5	E	50	4	0.4976	0.1506	0.7912
5	E	20	1	0.4788	0.1591	0.8262
5	E	20	4	0.4824	0.1575	0.8194
5	E	5	1	0.4649	0.1651	0.8494
5	E	5	4	0.4655	0.1651	0.8484
5	F	50	1	0.4806	0.1565	0.8264
5	F	50	4	0.4768	0.1593	0.8320
5	F	20	1	0.4675	0.1634	0.8461
5	F	20	4	0.4653	0.1647	0.8497
5	F	5	1	0.4606	0.1667	0.8561
5	F	5	4	0.4620	0.1670	0.8543
5	F	80	1	0.4915	0.1519	0.8088
5	F	80	4	0.4927	0.1525	0.8071

Tabla A4.V. Coeficientes de correlación calculados entre los valores triestímulo para el centro 5.