

~~T - 10/14 - 21/99~~

T 10/14

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE OPTICA

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA	
GRANADA	
N.º Documento	615080365
N.º Copia	216323154

**DETERMINACION EXPERIMENTAL DE UMBRALES DE DISCRIMINACION
CROMATICA BAJO DISTINTOS MODOS DE PRESENTACION.
ADECUACION A RECIENTES FORMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR.**

MARIA DEL MAR PEREZ GOMEZ

JULIO-1994

UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Fecha 4-8-94
ENTRADA NUM. 1167

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE UMBRALES DE DISCRIMINACIÓN
CROMÁTICA BAJO DISTINTOS MODOS DE PRESENTACIÓN.
ADECUACIÓN A RECIENTES FÓRMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR.**

Visado en Granada a 19 de Julio de
1994.

LOS DIRECTORES DE LA
MEMORIA:

Fdo: Dr. D. Manuel Melgosa
Latorre, Catedrático de Escuela
Universitaria. Área de Óptica.
Universidad de Granada.

Fdo: Dr. D. Enrique Hita
Villaverde, Catedrático de Óptica
de la Universidad de Granada.

Memoria Presentada para aspirar al
grado de Doctor en Ciencias.

Fdo: María del Mar Pérez Gómez.
Licenciada en Ciencias (Sección
Físicas).



A Paco.

A Miguel.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible, de una manera u otra, la realización de este trabajo.

A los doctores Melgosa Latorre e Hita Villaverde, que, además de dirigir este trabajo de una manera eficaz, han sido mis maestros.

A los profesores Jiménez del Barco, Romero Mora y García García, por el interés mostrado en el desarrollo y realización de este trabajo.

A Eloisa Jiménez Martín, por la precisa y esmerada elaboración en las muestras empleadas en esta Memoria.

A Paco, que no sólo participó en la puesta a punto de los dispositivos, realización de las medidas experimentales y redacción, sino que siempre ha sido un buen compañero en la tarea diaria. A Miguel, por entender eso del "trabajo de mamá".

Y en general a todos aquellos compañeros cuyo constante estímulo ha supuesto una valiosa ayuda en el trabajo diario, demostrando que más que compañeros son buenos amigos. Gracias: Ana, Manolo, Paco, M^a José, José Ramón, Carlos, Juan Luis, Antonio, Juan Antonio, Ahmed, José Antonio, etc.

INDICE

	Pág.
Capítulo 1: INTRODUCCION.	1
Capítulo 2: REVISION BIBLIOGRAFICA.	9
2.1.- UMBRALES DIFERENCIALES DE COLOR	9
2.2.- FORMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR	27
2.3.- COEFICIENTES METRICOS	41
2.4.- BIBLIOGRAFIA	45
Capítulo 3: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.	52
3.1.- INTRODUCCION	52
3.2.- COLORIMETRO DE ESTIMULOS ESPECTRALES. DESCRIPCION GENERAL.	53
3.2.1.- Sistema generador de estímulos	53
3.2.2.- Sistema de observación	59
3.2.3.- Puesta a punto del dispositivo	62
3.3.- DISPOSITIVO PARA LA OBSERVACION DE MUESTRAS DESCRIPCION GENERAL.	66
3.3.1.- Introducción	66
3.3.2.- Descripción general y puesta a punto del dispositivo	67
3.3.3.- Preparación de muestras	72
3.4.- BIBLIOGRAFIA	75
Capítulo 4: CALIBRADO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.	77
4.1.- INTRODUCCION	77
4.2.- CALIBRADO DEL COLORIMETRO DE ESTIMULOS ESPECTRALES.	78
4.2.1.- Calibrado en longitud de onda de las	

escalas	78
4.2.2.- Calibrado radiométrico de cuñas grises y filtros	81
4.3.- CALIBRADO DE LAS MUESTRAS.	85
4.4.- BIBLIOGRAFIA	91
Capítulo 5: METODO GENERAL. DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS.	92
5.1.- DESCRIPCION Y JUSTIFICACION DE LOS PARAMETROS EXPERIMENTALES	93
92 5.1.1.- Parámetros fotométricos	93
5.1.2.- Parámetros temporales	97
5.1.3.- Parámetros visuales	98
5.1.4.- Observadores	101
5.2.- METODO EXPERIMENTAL. GENERALIDADES	102
5.3.- TRATAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	114
5.4.- BIBLIOGRAFIA	118
Capítulo 6: RESULTADOS EXPERIMENTALES.	122
6.1.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	122
6.2.- BIBLIOGRAFIA	180
Capítulo 7: ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.	181
7.1.- INTRODUCCION	181
7.2.- ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD INTEROBSERVADOR	183
7.3.- COMPARACION DE LOS RESULTADOS PARA DIFERENTES MODOS DE PRESENTACION	188
7.3.1.- Comparación de los resultados experimentales	188
7.3.2.- Comparación con otros resultados experimentales	200

7.4.- UMBRALES DE DISCRIMINACION CROMATICA PREDICHOS POR FORMULAS DEL SISTEMA CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)	206
7.5.- BIBLIOGRAFIA	233
Capítulo 8: APORTACIONES Y CONCLUSIONES.	236

CAPITULO 1.

INTRODUCCION.

CAPITULO 1.

INTRODUCCION.

La correlación entre el color percibido y el color medido es un problema de gran interés actual, sobre todo desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas de la Colorimetría. La posibilidad de medir el color y de especificarlo rigurosamente es sin duda de gran utilidad, pero esta utilidad sería evidentemente mucho mayor, siempre que, de algún modo, dicha medida y la percepción de los observadores con visión normal del color estuvieran fuertemente ligadas.

Un aspecto concreto de este problema es el de la correlación entre las diferencias de color percibidas (ΔV) y las medidas instrumentalmente (ΔE). Dado un par de estímulos de color, es posible juzgar por diferentes procedimientos la diferencia visual ΔV existente entre ellos (por ejemplo, si son, o no, estímulos iguales o si su diferencia de color es, o no, superior a la de un cierto par de referencia dado). Por otro lado, es también posible

medir el color de cada uno de esos estímulos (determinar sus valores triestímulo: $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$) y, función del resultado obtenido, calcular una diferencia de color ΔE , empleando lo que se ha dado en llamar una "fórmula de diferencia de color". Como es lógico, desde el punto de vista práctico, lo esencial será el juicio visual ΔV de los observadores, siendo el papel de la Colorimetría ahondar en el conocimiento de los mecanismos que generan tal juicio, a fin de lograr sistemas de especificación del color y fórmulas de diferencia de color que permitan predecirlo.

Los umbrales de discriminación de color son un tipo particular de diferencias de color de enorme importancia. Por ello se les ha prestado, históricamente (como veremos en el Capítulo siguiente) una gran atención, tanto por ser fuente de información sobre los mecanismos responsables de la visión del color como por permitir establecer las tolerancias de color aplicables en la fabricación de productos industriales. La obtención de nuevos umbrales de discriminación cromática, con una adecuada metodología y control de las condiciones experimentales de trabajo, ha sido impulsada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en recientes recomendaciones (Robertson, 1978), así como también por destacados autores (Berns, 1993), constituyendo una parte importante de la línea de investigación que ha desarrollado este Departamento.

Concretamente en el caso de los umbrales de discriminación de color se suelen analizar diferencias visuales ΔV de pequeño tamaño (aproximadamente diferencias justamente perceptibles). Tales diferencias pueden generarse con suficiente exactitud mediante mezcla aditiva de luces, con el empleo de colorímetros visuales, tal como se hiciera en algunos de los trabajos pioneros en este campo (MacAdam, 1942; Wyszecki-Fielder, 1971), si bien en los trabajos más recientes (Luo, 1986) se presta una creciente

atención al empleo de objetos iluminados, simulando las condiciones experimentales que se plantean en algunos problemas de interés industrial. El empleo de colorímetros visuales y también de objetos de color se ha sucedido en los últimos años, sin que pueda decirse que el uso de los colorímetros visuales carezca de interés actual o pertenezca sólo a las primeras etapas de la Colorimetría Diferencial. De hecho, la CIE recomienda el empleo y comparación de los resultados obtenidos por ambos procedimientos, a la vez que es frecuente en los más recientes trabajos de discriminación de color encontrar referencias a los resultados clásicos obtenidos con colorímetros visuales.

Por todo ello, nos ha parecido de interés considerar en esta Memoria los umbrales de discriminación de color obtenidos tanto con colorímetros visuales como con objetos de color, para los cinco centros expresamente recomendados por la CIE con el fin de unificar las investigaciones sobre diferencias de color (Robertson, 1978). Para ello, se han diseñado experiencias que emplean dos dispositivos diferentes y que permiten obtener estímulos (tanto luces como objetos iluminados), con diferentes modos de presentación.

Debemos hacer hincapié en que para todas las experiencias desarrolladas en esta Memoria, hemos procurado que el método de obtención de los umbrales fuese el mismo. De esta forma eludimos la variabilidad que introduce el empleo de distintos métodos y que suele entorpecer el análisis y comparación de los trabajos de diferentes autores. Igualmente, hemos procurado también que en los distintos dispositivos experimentales se mantuvieran siempre las mismas condiciones experimentales (denominadas actualmente "efectos paramétricos"), en la medida de lo posible, con el mismo objetivo de facilitar las comparaciones. En este sentido, cabe hacer notar que, por ejemplo, trabajos clásicos como los de MacAdam, 1942, con colorímetros visuales, o los de Luo y

Rigg, 1986, con objetos de color, resultan difícilmente comparables como consecuencia de que se realizan con métodos y condiciones experimentales que difieren en muchos puntos.

De esta forma creemos que hemos llegado a obtener un nuevo conjunto de resultados de discriminación de color que, según el método empleado, presentan suficientes garantías de reproducibilidad. Dichos resultados experimentales, sin olvidar tampoco los de otros autores, serán de gran utilidad para el análisis de algunas de las más recientes fórmulas de diferencia de color, que son objeto actualmente de estudio con vistas a su aplicación industrial.

Volviendo al inicio de nuestras consideraciones, puede decirse que una de las principales causas de las discrepancias entre ΔV y ΔE está relacionada con la distinción que Wyszecki hacía (Wyszecki, 1973) entre lo que denominaba "Colorimetría básica" y "Colorimetría avanzada". La Colorimetría básica es la colorimetría de las igualaciones, es decir una herramienta para predecir cuándo dos estímulos con diferente distribución espectral presentan el mismo color bajo unas ciertas condiciones de observación. Por otra parte, la Colorimetría avanzada trata sobre los métodos para evaluar la apariencia de color de los estímulos, presentados ante el observador bajo condiciones experimentales complejas, como suele suceder en la vida ordinaria. La colorimetría básica nos permite afirmar que si coinciden los valores triestímulo de dos muestras, éstas presentarán colores iguales si son observadas en idénticas condiciones por un observador promedio con visión normal del color, mientras que si los valores triestímulo son diferentes se observarán colores distintos, si bien los valores triestímulo no dan información sobre la magnitud de la desigualdad.

En otras palabras, el problema relativo a la evaluación de

diferencias de color es un problema característico de Colorimetría avanzada, con importantes repercusiones en la industria, donde el recurso a los valores triestímulo característicos de la Colorimetría básica será sólo, a lo sumo, el punto de partida. Surge así la necesidad de encontrar transformaciones apropiadas de los valores triestímulo, entre las que actualmente debemos destacar la correspondiente al sistema CIELAB, tanto por ser uno de los recomendados por la CIE desde 1976 (CIE, 1986) como por su difundido uso en las industrias de numerosos países (Kuehni, 1990).

La amplia aceptación del sistema de representación CIELAB, a pesar de sus limitaciones, ha hecho que se desarrollen varias fórmulas derivadas de él, donde se ponderan las diferencias en luminancia, croma y tono por factores apropiados, que corrigen su falta de uniformidad, y por factores paramétricos, que tienen en cuenta las condiciones experimentales empleadas. Entre estas fórmulas, cabe destacar $CMC(l:c)$ (Clarke, 1984) y $BFD(l:c)$ (Luo, 1987), así como la recientemente propuesta por el Comité Técnico 1-29 de la CIE (Alman, 1993a), que se encuentra en trámites de aprobación por los organismos de la CIE (Alman, 1993b). Entre los objetivos de esta Memoria se encuentra también el de la adecuación de estas fórmulas a nuestros resultados experimentales y los de otros autores, habida cuenta de que, en su mayoría, estas fórmulas fueron deducidas sólo a partir de ciertos resultados experimentales con observación en modo de objeto.

Brevemente, de acuerdo con el índice de las páginas anteriores, hacemos a continuación una descripción con los contenidos de los capítulos que estructuran esta Memoria.

En primer lugar, dedicaremos el próximo Capítulo a precisar conceptos básicos y a una revisión bibliográfica más detenida

acerca de los umbrales de discriminación y de las fórmulas de diferencia de color existentes, haciendo particular referencia a los coeficientes métricos, por cuanto permiten conectar los umbrales experimentales con las previsiones de algunas fórmulas de diferencia de color y viceversa.

Los Capítulos Tercero y Cuarto estarán destinados a la descripción de los dispositivos experimentales empleados (un colorímetro visual tipo Wright y un dispositivo de iluminación/observación de muestras), así como al calibrado de los mismos, que nos permitirá conocer las coordenadas de cromaticidad y luminancia de los estímulos observados. Junto a la descripción detallada de los dispositivos, el Capítulo Quinto concreta el método experimental seguido, así como las condiciones experimentales de observación empleadas, por ser factores de gran importancia e incidencia en los umbrales de discriminación de color.

Por último, el Capítulo Sexto recoge los resultados experimentales alcanzados en nuestra investigación, cuyo análisis detallado se realiza seguidamente en el Capítulo Siete donde, a partir de unas consideraciones sobre la variabilidad entre observadores, se comparan los umbrales obtenidos con diferentes modos de presentación y con las previsiones de algunas fórmulas de diferencia de color derivadas del sistema CIELAB, para los estímulos aquí estudiados y para los obtenidos por otros autores (con presentación en modo de apertura y de objeto). Con ello pasamos al Capítulo final, dedicado a las Conclusiones a que hemos llegado.

BIBLIOGRAFIA.

ALMAN, D.H., "CIE Technical Committee 1-29, Industrial color-difference evaluation progress report", Color Res. Appl., **18**, 137-139 (1993).

ALMAN, D.H., Miembros y asesores del Comité 1-29 de la CIE. Recommendation on industrial color-difference evaluation. Comunicación personal, Diciembre (1993b).

BERNS, R.; Synopsis of round table discussion on colorimetry in industry., Proc. AIC Colour'93. Vol A, 185-187 (1993).

CLARKE, R.J.J., MCDONALD, R., RIGG, B.; "Modification of the JPC79 colour-difference formula", J. Soc. Dyers., **100**, 117-148 (1984).

CIE; Publ. 15.2 Colorimetry 2nd Edition (1986).

KUEHNI, R.G.; "Industrial Color Difference progress and problems", Color Res. Appl., **5**, 261-265 (1990).

LUO, M., RIGG, B.; "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", Color Res. Appl. **11**, 25-42 (1986).

LUO, M., RIGG, B.; "BFD (l:c) colour-difference formula part 1. Development of the formula", J. Soc. Dyers. Colour., **103**, 86-94 (1987).

MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to color differences in daylight", J. Opt. Soc. Am., **33**, 247-274 (1942).

ROBERTSON, A.R.; "CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation", Color Res Appl **3**, 149-151, (1978)

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "New color matching ellipses", J. Opt. Soc. Am., **61**, 1135-1152 (1971).

WYSZECKI, G.; Current developments in Colorimetry. AIC Colour 73, 25-51 (1973).

CAPITULO 2.

REVISION BIBLIOGRAFICA.

CAPITULO 2.

REVISION BIBLIOGRAFICA.

Como hemos indicado en el capítulo anterior, nuestro objetivo es, por una parte, obtener nuevos umbrales diferenciales de color con distintos modos de presentación de estímulos (modo de apertura y objeto) y, por otra, compararlos con las predicciones que las fórmulas de diferencia de color dan de éstos. En el presente Capítulo se hace una revisión detallada de los principales trabajos realizados en estos dos campos para hacer referencia finalmente a los coeficientes métricos los que nos permitirán, la realización de esta comparación.

2.1 .- UMBRALES DIFERENCIALES DE COLOR.

Bajo un punto de vista tanto científico como técnico, a veces ofrece más interés la evaluación de diferencias entre colores, o del color de un estímulo respecto a un color patrón, que la

medida en sí de un color. Se plantea pues una doble necesidad: cuantificar estas diferencias y hacerlas reproducibles en un sistema de representación, lo que es tanto como conocer la métrica del espacio de color o el elemento de línea asociado a ella.

Tradicionalmente se han abordado estos problemas de la medida experimental de diferencias de color, entendiéndolas como "mínimas diferencias perceptibles" o, "umbrales diferenciales de color", para una posterior generalización al elemento de línea de que satisfaga la predicción de dichos resultados experimentales. En este sentido y, si bien, a veces ha surgido la polémica aún no resuelta (Wyszecki, 1972), sobre si hay diferencias entre los criterios de perceptibilidad y aceptabilidad de diferencias de color, la mayoría de los estudios en los que se basa la Colorimetría Diferencial, optan por criterios de evaluación de diferencias perceptibles. No obstante, en determinadas aplicaciones industriales sí se emplean, a veces, criterios de aceptabilidad en los procesos de control colorimétrico. Podemos decir, que el estudio de diferencias de color es más bien un problema científico, mientras que el establecimiento de tolerancias es una cuestión derivada de tipo técnico ligada a las necesidades industriales.

Entre los primeros resultados experimentales aportados en Colorimetría Diferencial cabe citar los obtenidos por Judd, 1933, que determinó los umbrales de pureza colorimétrica para luces monocromáticas y los de Wright y Pitt, 1934 que obtuvieron umbrales de longitud de onda.

Sin embargo, el primer trabajo que abordó el estudio de diferencias de color en todo el diagrama cromático es el de Wright, 1941, en el que el autor analiza la discriminación umbral a lo largo de 35 líneas en el diagrama de cromaticidad CIE-31.

Las medidas se realizaron utilizando un colorímetro visual diseñado por Wright, el cual empleó para algunas de las medidas que condujeron al establecimiento del Observador Patrón CIE-31. Un dispositivo análogo a éste es como veremos, el empleado en el desarrollo de algunas de nuestras experiencias.

El experimento de Wright se efectuó presentándole al observador un campo bipartito de 2° con un campo circundante oscuro. El observador actuaba sobre el estímulo presentado en uno de los semicampos, de tal forma que variaba las cantidades en la mezcla aditiva de los primarios cuasi-monocromáticos que originaban tal estímulo juzgando en qué momento se rompía la igualación inicialmente establecida. Las variaciones del estímulo variable eran en tono y saturación, manteniendo la luminancia constante. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto, entre otras cosas, la falta de uniformidad correspondiente al diagrama cromático CIE-31 como se puede observar en la figura 2.1, pues aparecen notables diferencias de tamaño en las mínimas diferencias perceptibles para las distintas tonalidades estudiadas. Lo que, por otro lado, era de esperar dada la diferente área asociada, en dicho diagrama, a cada una de las tonalidades, como se puede observar al analizar dicho diagrama.

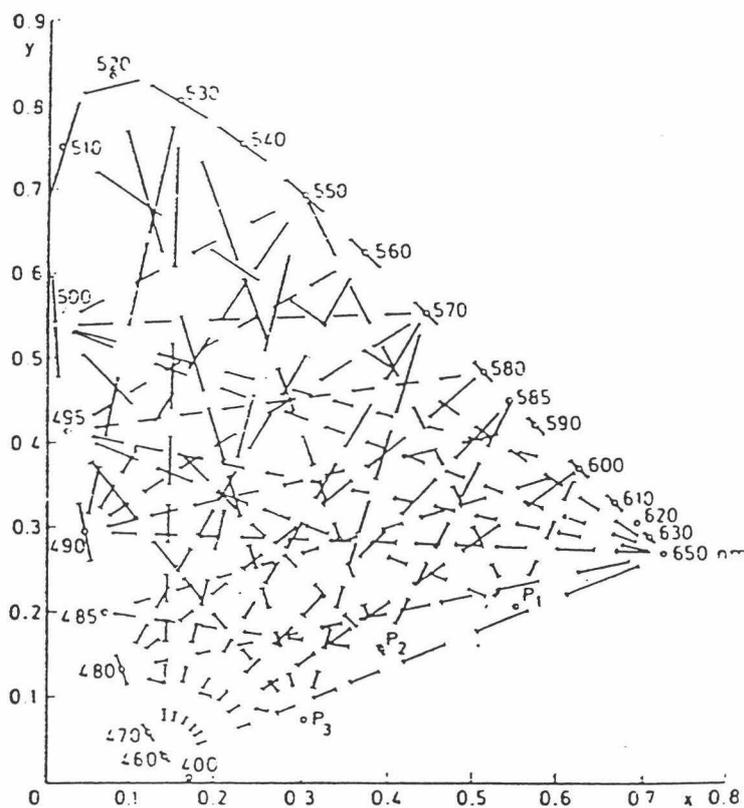


Figura 2.1.- Resultados experimentales de Wright (1941).

Posteriormente, se plantea la conveniencia de no restringir el estudio a "umbrales de dirección" y abordar qué ocurre cuando se compara un color de referencia con otros situados alrededor de él en distintas direcciones del diagrama cromático. En base a esta idea surge el trabajo pionero de MacAdam (1942) en el que un sólo observador PGN realizó igualaciones de color, a luminancia constante, actuando sobre los mandos de un colorímetro visual con el que puede controlar una de las mitades del campo de observación (estímulo variable). Con cada estímulo de referencia y para cada dirección utilizada se realiza varias veces la

igualación tomando la desviación típica como medida de la capacidad de discriminación. Las desviaciones de esas igualaciones permiten construir el umbral, siendo también importante este trabajo porque desde él se suele adoptar la elipse como forma de representación geométrica del umbral diferencial de cromaticidad.

MacAdam realizó sus experiencias con un campo circular bipartito de 2° y una luminancia de 48 cd/m^2 rodeado por un campo circundante similar al iluminante C con una luminancia de 24 cd/m^2 , empleando observación monocular y utilizando una pupila artificial de 2,6 mm de diámetro. Los resultados de MacAdam, 10 veces aumentados, se muestran en la figura 2.2.

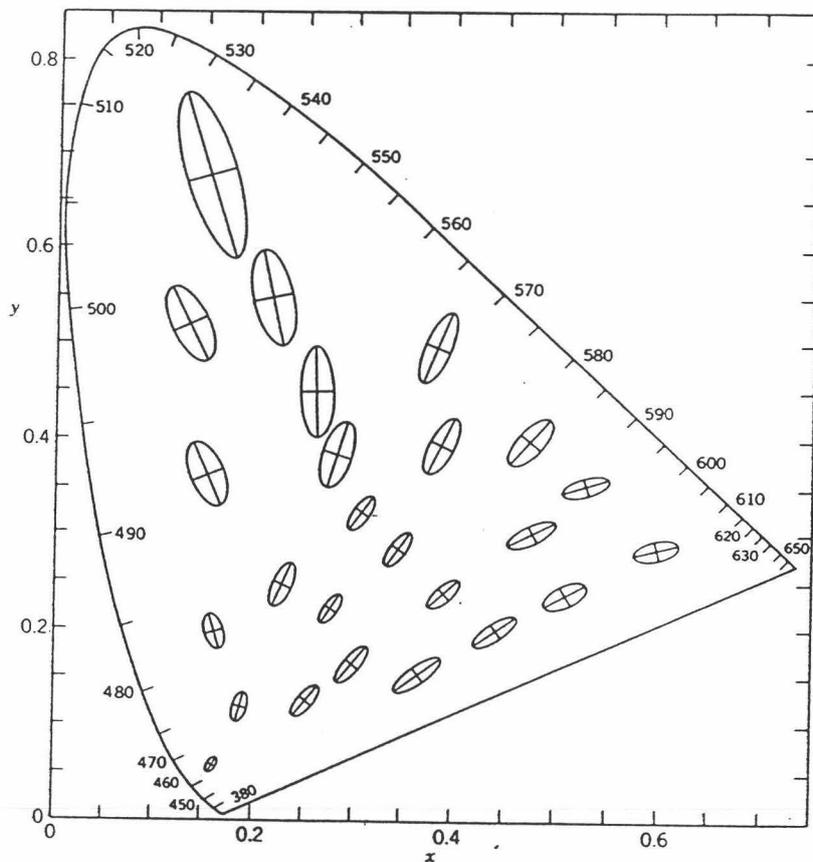


Figura 2.2.- Resultados experimentales de MacAdam (1942).

El trabajo de MacAdam, junto a su posterior ampliación a umbrales de color introduciendo como nueva variable la luminancia (Brown-MacAdam, 1949), se puede considerar básico en el desarrollo de la Colorimetría Diferencial.

La distribución de sucesivas igualaciones de color respecto a un centro fijo ha sido también estudiada por otros métodos (Silberstein y MacAdam, 1945). En efecto, si se supone que estas igualaciones se distribuyen normalmente en el espacio de color, se demuestra que el lugar geométrico de los puntos con una misma desviación es un elipsoide, (o una elipse representable en el diagrama cromático CIE-1931, si nos referimos a estímulos de luminancia constante). Silberstein y MacAdam analizan los datos correspondientes a la experiencia de MacAdam, 1942 y concluyen que esencialmente esos datos son consistentes con suponer una distribución normal, o gaussiana, de las igualaciones. También Brown, 1952 e Hita (Hita et al. 1982a ,1985), han comprobado experimentalmente esta presunción de normalidad con resultados hasta cierto punto positivos. Es, sin embargo, obligado citar que algunos autores como Parra, 1970 o Dupont - Henius, 1977 han mostrado objeciones respecto a esta geometría de los umbrales, si bien no se proponen soluciones alternativas. Cabe también citar como aportación reciente en este sentido la propuesta de los denominados "city-block", que sugieren una métrica no euclídea para evaluar diferencias de color (Indow, 1991).

A pesar de estas objeciones, en la mayor parte de las investigaciones suelen adoptarse elipses o elipsoides para representar los umbrales, ya sea porque es la geometría más manejable por procedimientos estadísticos o matemáticos, o también porque es lo que permite comparar más fácilmente los resultados con los de otros autores. En cualquier caso, es interesante tener en cuenta las limitaciones que ofrece este tipo

de representación, en particular, si se consideran diferencias de color de tamaño superior al umbral (Robertson, 1978).

Las restricciones del trabajo de MacAdam, 1942 a puntos de igual luminancia es superada en el trabajo de Brown-MacAdam, 1949, en el cual, se realizaron experiencias con un dispositivo distinto al que anteriormente había usado MacAdam, cuyas características más importantes son: campo circular bipartito de 2° con circundante oscuro, visión monocular y pupila natural. Se estudiaron 38 estímulos con una luminancia variable, comprendida entre 2 y 34 cd/m^2 y dos observadores (WRJB y DLM), obteniéndose como figura representativa del umbral de discriminación global elipsoides. La figura 2.3 representa las secciones principales o umbrales de cromaticidad, obtenidas si cortamos estos elipsoides por un plano de luminancia constante que pase por su centro.

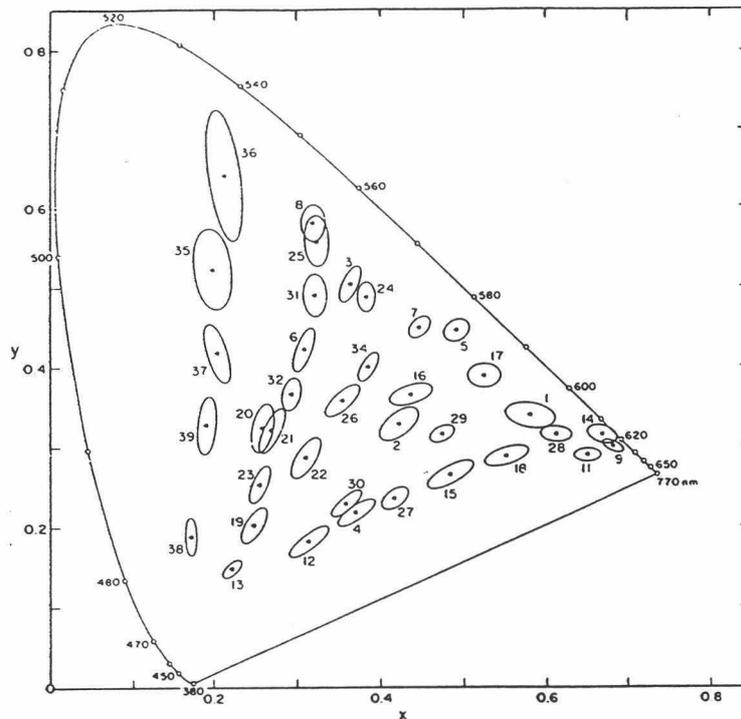


Figura 2.3.- Resultados experimentales de Brown-MacAdam (1949) para el observador WRJB, 10 veces aumentados.

El trabajo de Brown-MacAdam fue ampliado más tarde en unas experiencias con doce observadores (Brown, 1957), empleando un dispositivo con campo fotométrico circular y bipartito de 10° , campo circundante acromático de luminancia 9 cd/m^2 y visión binocular.

Para cada uno de los 22 estímulos analizados por Brown se obtiene un umbral diferencial promediado y otro ponderado. Se trabajó con luminancias comprendidas entre 10.3 y 20.6 cd/m^2 . La figura 2.4 representa las secciones elípticas principales de los umbrales de color medidos.

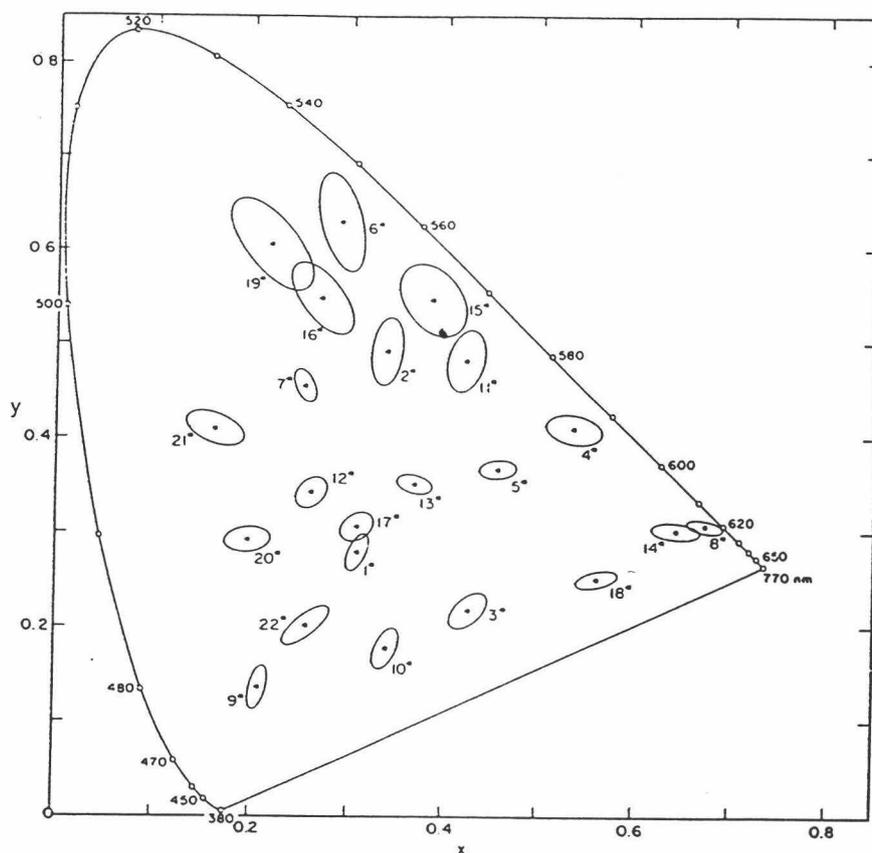


Figura 2.4.- Resultados de Brown (1957) obtenidos como media ponderada de doce observadores. Las secciones elípticas aparecen 10 veces aumentadas.

Otros importantes resultados clásicos empleando colorímetros visuales para la determinación de umbrales son los de Wyszecki-Fielder, 1971a que estudian una zona más reducida del diagrama cromático que la de otros trabajos previos, debido al conjunto de primarios empleados. En este trabajo se determinan los umbrales diferenciales de color de 28 estímulos, empleando 3 observadores (GW, AR, GF), que realizaban igualaciones entre dos campos hexagonales yuxtapuestos de 3° cada uno, rodeados por un campo acromático de 6 cd/m^2 y un diámetro de 40° . La visión era monocular y con pupila natural. La luminancia de los 28 estímulos era constante y de aproximadamente 12 cd/m^2 . La figura 2.5 muestra los resultados obtenidos para el observador GW.

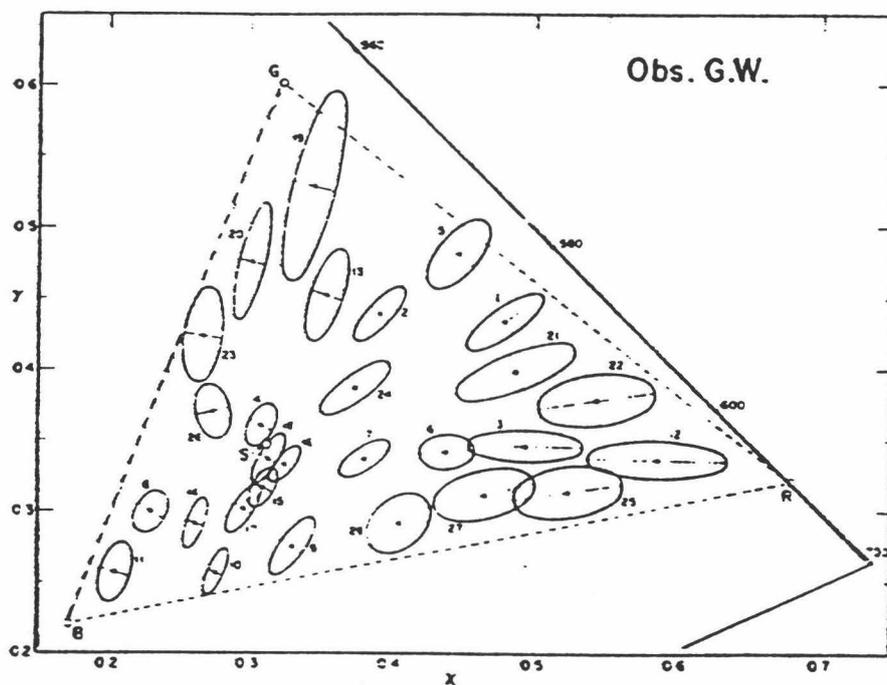


Figura 2.5.- Resultados experimentales de Wyszecki-Fielder (1971) para el observador GW.

Es importante destacar el método estadístico utilizado en este último trabajo. Para cada estímulo se realizaban 30 igualaciones, que eran ajustadas a un elipsoide de tal forma que el 95 % de ellas quedan en el interior del elipsoide. Una modificación de este método es el que utilizaremos en nuestro trabajo.

También, estos mismos autores realizaron otros estudios diferentes de igualación de diferencias de color, Wyszecki-Fielder, 1971b y 1972, obteniendo elipses que guardan cierta correlación con las iniciales de igualación de color, (Wyszecki, 1971a), si bien es superior el área de estas últimas (en particular cuando aumenta el tamaño de la diferencia de color que se iguala).

Quisiéramos también aquí hacer una breve referencia a los resultados experimentales de discriminación cromática en modo de apertura obtenidos en numerosas investigaciones previas realizadas en este Departamento (Hita, 1975, Melgosa, 1989, Hita et al., 1986, García et al. 1992, etc.). Para no entrar en excesivos detalles específicos sobre estos trabajos indicaremos simplemente que ofrecen múltiples resultados de discriminación de color coherentes con los anteriores y específicamente con los de MacAdam, 1942.

Como es bien sabido son varias las condiciones experimentales que afectan a los umbrales diferenciales de color (e.g. el tamaño del campo de observación, nivel de luminancia, cromaticidad del campo circundante, etc.). En este sentido hay numerosos trabajos de interés en la literatura, así como recopilaciones de la influencia de las condiciones experimentales de observación sobre los umbrales (Robertson, 1981) que se designan actualmente como efectos paramétricos (CIE, 1993). En general, los elipsoides obtenidos con diferentes tamaños de campo son similares en

orientación y forma pero difieren en tamaño (Brown, 1952). En cuanto al nivel de luminancia, los resultados son similares en el fotópico dentro del rango de 3 a 30 cd/m². Por lo que respecta al tiempo de exposición de los estímulos a comparar (Siegel, 1965; Hita et al., 1982), se considera que se estabiliza a partir de 1 segundo. En cualquier caso, son muchos los efectos paramétricos aún no estudiados en profundidad (grado de metamerismo, tamaño de las diferencias de color, etc.). De las conclusiones de todos estos trabajos cabe extraer gran parte de las condiciones bajo las que se desarrollarán nuestras experiencias, como se indica en el Capítulo 5 de esta Memoria.

Paralelamente a los resultados citados previamente se desarrollan otros trabajos de índole más práctico y relativos a la necesidad industrial de evaluar tolerancias de color y de medir la diferencia del mismo correspondiente a dos muestras. Usualmente son objetos coloreados de diferentes materiales (papel, textil, plástico, etc.), analizados bajo unas determinadas condiciones de observación e iluminación. Los primeros resultados en este terreno son posiblemente los obtenidos a partir del sistema Munsell (Munsell, 1905). Los valores de claridad, tono y croma del sistema Munsell han servido de base para varias fórmulas de diferencia de color que evalúan numéricamente la diferencia entre muestras (Nickerson, 1936; Balinkin, 1941). La renotación Munsell (Newhall, 1943) permitió mejorar la utilidad del sistema y ponerlo más exactamente en conexión con el sistema CIE.

Posteriormente, se realizaron estudios más complejos en este campo. Davidson y Friede, 1953 obtuvieron elipses de discriminación que incluyen las muestras que habían sido aceptadas como iguales a una muestra de referencia al menos en el 50 % de las veces que fueron presentadas. También, son diversos los trabajos efectuados basándose en necesidades industriales

concretas utilizando muestras de color, entre los que destacamos: MacLaren, 1971; Rich-Billmeyer, 1975; Kuenhi-Marcus, 1979; McDonald, 1980a y 1980b, etc.

Cuando se trata de analizar comparativamente estos trabajos y los referentes a colorímetros visuales surgen dificultades importantes. Surgen así, las disquisiciones sobre la evaluación de las diferencias cromáticas según criterios de aceptabilidad (muy frecuentes en la industria) y de perceptibilidad (más exactos y útiles científicamente), que aún hoy no han sido resueltas de forma definitiva. También sucede que las diferencias de color que tienen mayor interés industrial suelen ser de tamaño ligeramente superior al umbral, sin llegar a ser tan elevadas como las existentes entre muestras Munsell, y sin que los resultados puedan generalizarse de unas a otras (Kuehni, 1979) de forma inmediata. A todo esto cabe añadir, como indicábamos anteriormente, la multiplicidad de métodos y condiciones experimentales bajo las que se efectúan las observaciones.

Para contribuir a solucionar estos problemas en 1978 el Subcomité de diferencias de color de la CIE TC-1.3 publicó un conjunto de recomendaciones, con el objeto de coordinar las investigaciones sobre diferencias de color (Robertson, 1978). Entre otras cosas aconsejaba el empleo de 5 puntos específicos del diagrama cromático (centros CIE) y estudiar la influencia de algunos parámetros experimentales (efectos paramétricos) que pueden influir sobre los umbrales; por ejemplo, separación entre las muestras, textura, color del campo circundante, etc. Desde nuestro punto de vista es también destacable que en estas orientaciones se haga referencia explícita a continuar utilizando colorímetros visuales, en distintas formas, tal como se ha hecho en la presente Memoria. No podemos olvidar tampoco que esta guía señala algunos importantes experimentos y modelos de optimización para la realización de umbrales de discriminación cromática,

(método de Rich-Billmeyer-Howe, 1975 etc.).

En conexión con estas recomendaciones (Robertson, 1978) surgen una serie de trabajos que estudian la influencia de varios efectos paramétricos. Así, Alder, 1982 estudia empleando 42 centros (536 pares de muestras) bajo iluminante D65 y 39 centros (531 pares de muestras) bajo iluminante A, el efecto del iluminante y la luminancia sobre las elipses experimentalmente obtenidas, encontrando que el tamaño de dichas elipses se incrementa cuando crece el valor de Y especialmente para valores muy bajos de ésta. Witt y Döring, 1983 analizaron la influencia sobre los umbrales de discriminación cromática del método de obtención del umbral. Para ello emplearon muestras coloreadas alrededor de un sólo punto (Verde CIE). También ha sido estudiada la influencia de otros parámetros importantes como son el número de observadores y de muestras necesarios para la obtención de umbrales fiables y reproducibles (Strocka, 1983). Buena parte de la incidencia de estos efectos paramétricos han sido recientemente recopilada en la publicación N°101 de la CIE (CIE, 1993).

Como ya indicamos antes, es importante extraer información de las conclusiones de estos y otros importantes trabajos sobre efectos paramétricos cuando se van a realizar experiencias en modo de objeto, puesto que de ahí extraeremos gran parte de la información necesaria para establecer las condiciones bajo las cuales se deben desarrollar nuestras experiencias posteriores con muestras coloreadas, a las que nos referimos en el Capítulo 5 de esta Memoria.

En la tabla 2.1 (Lozano, 1988) se indican varias características de algunos trabajos realizados con objetos de color, detallando el número de muestras comparadas y el valor medio de las diferencias empleadas (en unidades CIELAB),

distinguiendo perceptibilidad y aceptabilidad. Es de destacar, una vez más, la multiplicidad en las condiciones experimentales y metodología de los diferentes trabajos. Además, sorprende también que el tamaño promedio de las diferencias de color para los datos de aceptabilidad es menor que para los de perceptibilidad, contra lo que razonablemente cabría esperar (Lozano, 1988).

PERCEPTIBILIDAD	Nº Muestras	ΔE^*
1.- Alder, C. (1982)	567	2.3
2.- Cheung, M.- Rigg, B. (1986)	317	2.9
3.- Elamin, E. Y. M. (1983)	103	2.5
4.- Friele, L. F. C. (1978)	200	0.9
5.- Kuehni, R. G. - Marcus, R.T. (1979)	170	2.1
6.- Luo, M. R. - Rigg, B. (1986)	533	4.4
7.- Morley, D. I. (1975)	548	5.2
8.- Strocka, D. (1983)	47	2.0
9.- Witt, K. - Doring, G. (1983)	291	0.5
ACEPTABILIDAD	Nº Muestras	ΔE^*
1.- Davidson, H. R. - Friede, E. (1953)	196	1.9
2.- Jaeckel, S. M. (1973)	454	2.2
3.- Kuehni, R.G. (1971)	101	2.1
4.- Kuehni, R. G. - Marcus, R. T. (1979)	97	1.9
5.- Mc Donald, R. (1980)	44	3.2
6.- Wardman, R. H: (1981)	260	2.0

Tabla 2.1. Trabajos experimentales en modo de objeto.

Luo y Rigg, 1986 realizaron un importante trabajo de homogeneización de distintos resultados experimentales previos en Colorimetría de objetos, tanto para juicios de perceptibilidad como de aceptabilidad. En este trabajo, en primer lugar, se realiza una selección sobre 188 elipses obtenidas por autores anteriores (a fin de usar sólo las más reproducibles), mediante la utilización de un procedimiento tipo Montecarlo de simulación de errores experimentales de cada caso.

De esta forma, son elegidas finalmente 132 elipses. Su representación en el diagrama CIE-1931 permite observar ciertas discontinuidades en el sentido de que los parámetros característicos de estas elipses (relación de semiejes, orientación y área) a veces no siguen una variación sistemática y continua al desplazarnos desde un estímulo a los que están en sus proximidades. Estas discontinuidades se refieren principalmente al tamaño de las elipses, lo cual es razonable debido a las diferentes escalas visuales utilizadas en los diferentes trabajos y a los diferentes valores de la luminancia.

Usando 413 muestras próximas a las iniciales Luo y Rigg consiguen calcular factores de escala entre las elipses de los distintos trabajos y refieren los resultados de todos los autores a un mismo factor de luminancia. El resultado final es que mejora la uniformidad del conjunto de elipses. Este conjunto final de elipses puede considerarse altamente fiable en lo que respecta a su obtención y constituye, en nuestra opinión, un paso importante en relación a las primeras etapas de las recomendaciones de la CIE antes citadas (Robertson, 1978). De hecho estas elipses de Luo-Rigg, 1986 junto con la base de datos RIT-Dupont son el fundamento sobre el que se apoya la nueva fórmula propuesta por el Comité Técnico 1-29 de la CIE, como alternativa a la recomendación vigente desde 1976 (CIELUV y CIELAB).

La figura 2.6 recoge los umbrales finales obtenidos por Luo y Rigg, una vez realizada la homogeneización antes citada, en el diagrama (x,y). Cinco de esas elipses son los centros CIE y corresponden a las medidas experimentales de Cheung y Rigg, 1986.

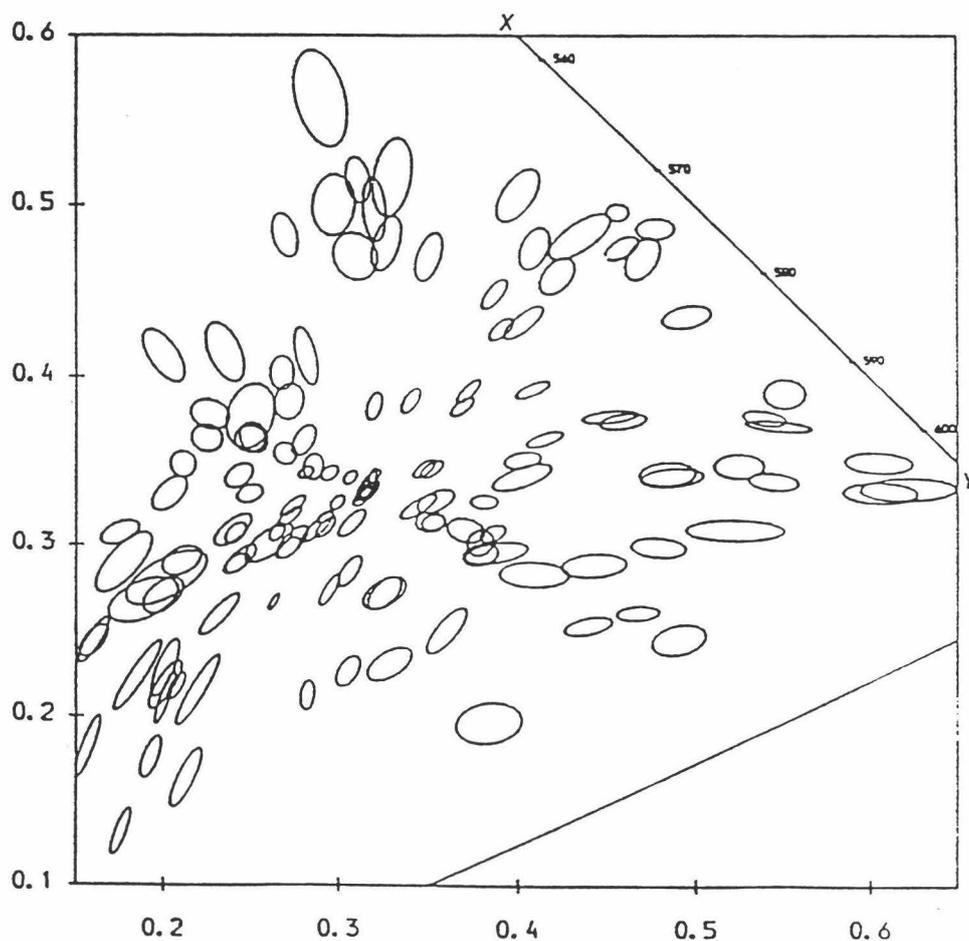


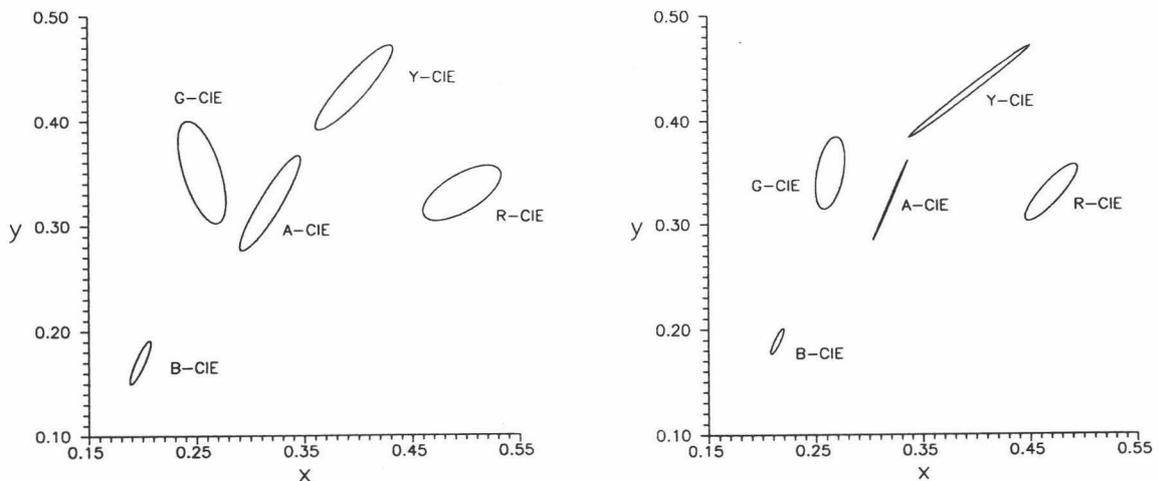
Figura 2.6.- Elipses finales del trabajo de Luo y Rigg (aumentadas 1.5 veces).

Por último, es destacable por su actualidad la obtención de elipses y elipsoides de discriminación cromática con simulación de superficies de color, en conexión con las recomendaciones de la CIE. En esta línea Indow et al., 1992 han calculado

diferencias de color para los cinco estímulos CIE, empleando dos observadores (MI y TI) y dos métodos experimentales (igualación y estímulos constantes), utilizando monitores en color y programas adecuados para el control de la tarjeta gráfica.

En este trabajo los colores eran presentados con dos campos circundantes: oscuro (presentación en modo de apertura) y luminoso (presentación en modo de objeto), lo que les ha permitido realizar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos por estos modos de presentación bajo unas mismas condiciones experimentales.

La figura 2.7 muestra los resultados obtenidos para los dos observadores. Puede observarse, entre otras cosas, que el tamaño de las elipses obtenidas es mayor en modo de apertura que en el modo de objeto; sin embargo, las orientaciones de las elipses son aproximadamente las mismas.



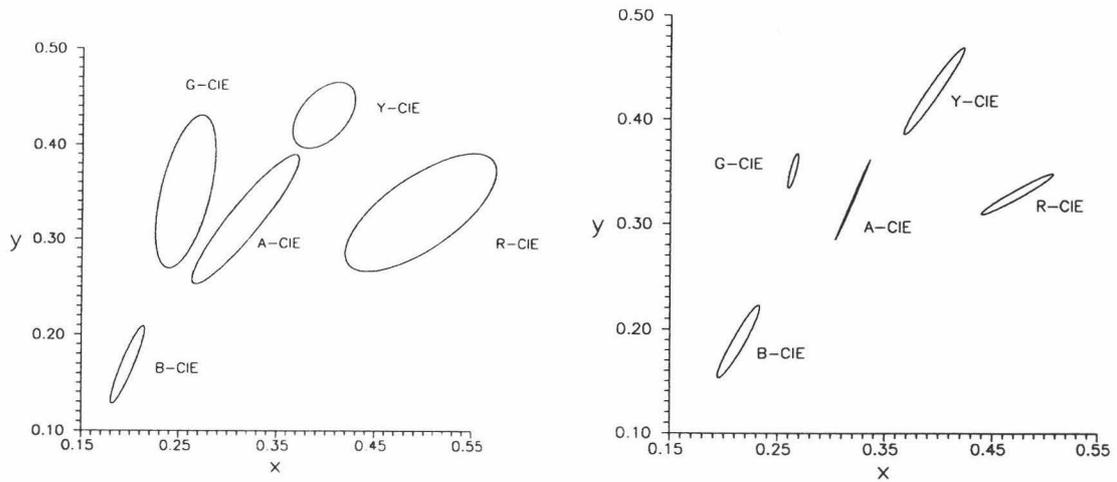


Figura 2.7.- Resultados experimentales de Indow et al. 1992 para los observadores TI y MI. A la izquierda se presentan los resultados obtenidos en modo de apertura y a la derecha los obtenidos en modo de objeto.

2.2.- FORMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR.

A continuación se hace una síntesis de las principales fórmulas empleadas para evaluar diferencias de color, haciendo hincapié en las que emplearemos en esta Memoria. Las expresiones detalladas de éstas y otras fórmulas de diferencia de color pueden encontrarse en publicaciones de recopilación previas (McDonald, 1982, Melgosa et al., 1990).

Posiblemente la primera propuesta de una cantidad que describa la diferencia de color entre dos estímulos, observados bajo ciertas condiciones experimentales, fue abordada basándose en las coordenadas que suministra el sistema Munsell (tono, H; claridad, V y croma, C). Fue Nickerson, 1936 quien propuso una expresión para evaluar la decoloración, que consiste en una simple suma de las medias ponderadas de los incrementos de estas coordenadas. Posteriormente, Balinkin (1941) propone una fórmula que contiene lo esencial de la de Nickerson, con algunas correcciones:

$$\Delta E = [(0.4 C \Delta H)^2 + (6 \Delta V)^2 + (6.37 \Delta C)^2]^{1/2}$$

donde Δ indica las diferencias entre la muestra de prueba y la muestra de referencia (patrón).

En esta misma línea Adams (1942) propone una nueva fórmula basada en los valores Munsell, V_x , V_y , V_z (relacionados con los valores triestímulo) que es precursora de otras fórmulas importantes en la colorimetría CIE: un término W_y evalúa la claridad mientras que W_x y W_z evalúan la cromaticidad teniendo en cuenta como base la diferencia de funciones $V_x - V_y$ y $V_z - V_y$, respectivamente. La fórmula final de Adams, 1942, es conocida como ANLAB y ha tenido una notable aplicación en la industria textil, además de haber sido sugerido su estudio por la CIE hasta

1973. Concretamente, de esta última fórmula derivan las de la raíz cúbica de Glasser y CIELAB, que comentaremos posteriormente.

En la fórmula de la raíz cúbica de Glasser, cuya expresión damos a continuación, podemos ver un claro precedente de CIELAB. Se definen L^* , a^* , b^* en la forma:

$$L^* = 25.29 G^{1/3} - 18.38$$

$$a^* = 42.34 (R^{1/3} - G^{1/3})$$

$$b^* = 106 (G^{1/3} - B^{1/3})$$

siendo R , G , y B funciones lineales sencillas de los valores triestímulo; finalmente, la diferencia de color se calcula con la expresión:

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

También, tiene interés referirse a las distintas fórmulas propuestas por MacAdam y sus colaboradores, pues en ellas se trabaja expresamente con coeficientes métricos. Las principales de estas fórmulas son las que proponen como medida la correspondiente a la distancia en un espacio de Riemann, donde es preciso evaluar los coeficientes métricos en cada punto del espacio o del diagrama de cromaticidad (según la fórmula sea válida o no para colores con diferente luminancia). Considera como punto de partida el espacio CIE (MacAdam, 1943) y suministra transformaciones de los valores triestímulo en dicho espacio que sirven para definir las fórmulas de MacAdam FMC1 y FMC2. En la observación en particular de estas dos últimas fórmulas se aprecia una notable complejidad por la multitud de parámetros y cálculos implicados. Esta complejidad no es deseable, y sólo se

justifica por el deseo de que las fórmulas se ajusten a los resultados experimentales, en particular a los obtenidos por el propio MacAdam. También, partiendo de los trabajos de MacAdam (MacAdam, 1943) se han propuesto en este Departamento expresiones de los coeficientes métricos para cualquier punto del diagrama cromático CIE-31, dando lugar a las fórmulas designadas como cdf-G^* y cdf-G^{**} (Romero et al. 1989 y García et al, 1992).

Otro capítulo importante lo constituyen las fórmulas derivadas de transformaciones del sistema CIE-31, como por ejemplo los sistemas propuestos por Hunter, 1942 y 1948 o Scofield, 1960 basados en la idea de conseguir espacios de mayor uniformidad que el sistema CIE-1931, del cual proceden. En esta línea se encuentra el sistema denominado UCS-60, reconocido por la CIE en 1964 y propuesto por MacAdam, 1937, que origina un diagrama de cromaticidad con una transformación proyectiva de sencillos coeficientes, para estímulos con pequeñas diferencias de luminancia.

En 1964, la CIE recomendó, a propuesta de Wyszecki, una extensión del diagrama UCS-60 a tres dimensiones. La nueva fórmula es conocida como CIE 1964 (U^*, V^*, W^*). Esta fórmula presenta, por primera vez, la evaluación de la luminosidad en función de la raíz cúbica del valor triestímulo Y.

En base a este último espacio, con ligeras modificaciones, surgió en 1976 el sistema CIE 1976 (L^*, u^*, v^*) o CIELUV con su correspondiente fórmula de diferencia de color. A este sistema haremos referencia posteriormente con más detenimiento por ser uno de los que actualmente la CIE recomienda para estudio y uno de los empleados para expresar nuestros resultados experimentales.

También se han propuesto otras fórmulas de diferencia de color que implican transformaciones no lineales, para proceder más tarde a calcular las diferencias de color en el espacio euclídeo a partir de 3 magnitudes dadas por dichas transformaciones. En 1973 el Comité Técnico de la CIE 1-3 (TC1-3) recomienda una nueva fórmula basada en los resultados conseguidos por la fórmulas de Glasser y ANLAB (recordemos que estas fórmulas implican transformaciones no lineales con raíces cúbicas). Esta nueva fórmula está basada principalmente en experiencias con objetos de color y se conoce como CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) o CIELAB. Tres años más tarde, el mismo Comité, teniendo en cuenta los resultados recogidos, propone que se recomienden conjuntamente las fórmulas CIELUV y CIELAB. Esta propuesta fue controvertida, con posiciones en contra de la existencia de dos fórmulas oficiales que no son equivalentes y también, en contra de la propuesta de una fórmula (CIELUV) basada en otra (UCS-60), que ya se consideraba desfasada. A pesar de estos desacuerdos, como indica Ganz, 1975 la decisión de la CIE constituye un buen avance al haber evitado, en parte, la dispersión inicial reduciendo el problema al uso de sólo dos fórmulas: CIELAB y CIELUV. Las expresiones que definen las fórmulas de diferencia de color CIELUV y CIELAB son:

CIELUV. CIE 1976 (L^* , u^* , v^*)

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad \text{para } (Y/Y_0) > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 (Y/Y_0) \quad \text{para } (Y/Y_0) \leq 0.008856$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_0)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_o)$$

$$\Delta E_{uv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

siendo u'_o y v'_o los valores de u' y v' respectivamente, para el estímulo acromático de referencia o el iluminante patrón utilizado; análogamente, Y_o es el valor triestímulo correspondiente a dicho estímulo de referencia.

CIELAB. CIE 1976 (L^*, a^*, b^*)

$$L^* = 116 (Y/Y_o)^{1/3} - 16 \quad \text{para } (Y/Y_o) > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 (Y/Y_o) \quad \text{para } (Y/Y_o) \leq 0.008856$$

$$a^* = 500 [f(X/X_o) - f(Y/Y_o)]$$

$$b^* = 200 [f(Y/Y_o) - f(Z/Z_o)]$$

Donde la función f es de la forma :

$$f(\&) = (\&)^{1/3} \quad \text{cuando } (\&) > 0.008856$$

$$f(\&) = 7.787 (\&) + (16/116) \quad \text{cuando } (\&) \leq 0.008856$$

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

donde, como anteriormente, X_o, Y_o, Z_o son los valores triestímulo correspondientes al estímulo acromático de referencia.

En 1975 el Comité Técnico del la CIE TC1-3 propuso una serie de atributos cromáticos definidos a partir del sistema CIE 1976 (L^*, a^*, b^*) o CIE 1976 (L^*, u^*, v^*). Destacamos entre ellos:

Croma C*:

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2}$$

Angulo métrico de tonalidad h*:

$$h_{ab}^* = \text{artg} (b^*/a^*)$$

$$h_{uv}^* = \text{artg} (v^*/u^*)$$

A partir de estas definiciones, las ecuaciones anteriores de diferencias de color para CIELUV y CIELAB se pueden también expresar muy útilmente en las formas:

$$\Delta E_{uv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2]^{1/2}$$

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2]^{1/2}$$

Expresiones que resultan de gran utilidad, al ser muy intuitivo que a la diferencia de color existente contribuyan separadamente diferencias en los 3 atributos básicos de la percepción cromática: claridad, saturación y tono.

Recientemente, han sido propuestas expresiones alternativas, a CIE 1976 (L^*, a^*, b^*) por Sève (1991) y Stokes y Brill (1992) para calcular la diferencia de tono CIELAB, ΔH_{ab}^* :

$$\Delta H_{ab}^* = [2(C_1^* C_2^* - a_1^* a_2^* - b_1^* b_2^*)]^{1/2}$$

si $a_1^* b_2^* > a_2^* b_1^*$ entonces $s = -1$, en cualquier otro caso $s = 1$.

Por otra parte, ya en 1978 la CIE (Robertson, 1978) recomienda nuevas orientaciones para avanzar coordinadamente hacia nuevas fórmulas más adecuadas. En esta línea, una de las mejoras sugeridas a la fórmula CIELAB es la propuesta por Richter (1980) y conocida como LABNHU. Su utilidad se ha mostrado en particular para los resultados obtenidos con CIELAB en estímulos de tonalidad anaranjada.

De todos modos, aunque como fuente de acuerdo el resultado sea positivo, los sistemas de representación CIELAB y CIELUV no han estado exentos de críticas. MacLaren, 1986 indica que aunque CIELAB sea la mejor fórmula posible, en el uso práctico de ésta se ha verificado que las tolerancias de cada uno de sus componentes C_{ab}^* y H_{ab}^* es diferente para distintas zonas del espacio cromático como muestran los trabajos de Pointer, 1981, Kuehni, 1982 e Hita et al. 1983 y 1984 que han analizado datos de discriminación cromática en estos espacios.

Por otra parte, la aplicación industrial ligada a la evaluación de tolerancias, y más específicamente en relación a los controles de calidad en experiencias del tipo aceptación/rechazo, sugiere mejoras respecto a las fórmulas anteriormente citadas. Sobre esta base McDonald, 1980a y 1980b realiza un estudio de optimización y propone una nueva fórmula designada por JPC79, que pondera los valores de ΔL_{ab}^* , ΔC_{ab}^* y ΔH_{ab}^* calculados con la fórmula CIELAB. JPC79 define los límites de tolerancia para croma, claridad y tono partiendo del espacio CIELAB. Esta fórmula fue incorporada a gran parte de la industria textil inglesa dando una buena correlación en relación a los

juicios visuales de aceptabilidad. La expresión de JPC79 es:

$$L_t = 0.08195 L^* / (1 + 0.01765 L^*)$$

$$C_t = 0.638 + [0.0638 C^* / (1 + 0.0131 C^*)]$$

$$H_t = T C_t$$

$$T = 1 \text{ cuando } C^* < 0.638$$

Para valores de $C^* \geq 0.638$ el parámetro T vale :

$$T = 0.36 + |0.4 \cos (h + 35^\circ)|$$

$$T = 0.56 + |0.2 \cos (h + 168^\circ)| \quad \text{si } 164^\circ \leq h \leq 345^\circ$$

$$\Delta E = [(\Delta L^* / L_t)^2 + (\Delta C^* / C_t)^2 + (\Delta H^* / H_t)^2]^{1/2}$$

L^* , C^* , h^* son los valores de la luminancia, croma y ángulo de tono de la muestra patrón, calculados a partir de CIELAB. Los incrementos indican diferencias calculadas mediante CIELAB.

Posteriormente en 1984, el Comité de Medición del Color (CMC) de Gran Bretaña propone una mejora a esta fórmula, basándose en los trabajos de Clarke, McDonald y Rigg, que se denomina CMC(*l:c*). Esta nueva fórmula es similar a su predecesora. Por ejemplo, el semieje de tono sigue siendo una fracción del semieje correspondiente al croma, si bien procura corregir algunas anomalías detectadas con JPC79 en muestras casi acromáticas y sobre todo en la evaluación de la tolerancia en claridad de muestras muy oscuras. La fórmula designada como CMC(*l:c*) intenta

compatibilizar la "dicotomía" perceptibilidad-aceptabilidad incluyendo l y c como dos parámetros a optimizar según las condiciones experimentales: para datos de perceptibilidad la ecuación más idónea parece ser CMC (1:1), mientras que para aceptabilidad parece dar mejor correlación con las estimaciones visuales un aumento de la tolerancia en claridad, usando CMC (1.4:1) o en general una valoración próxima a CMC (2:1).

A continuación se formulan las expresiones correspondientes a la fórmula de diferencia de color CMC ($l:c$) :

$$S_1 = 0.040975 L_1^* / (1 + 0.01765 L_1^*) \quad \text{para } L^* \geq 16$$

$$S_1 = 0.511 \quad \text{para } L^* < 16$$

$$S_c = 0.638 + [0.0638 C_1^* / (1 + 0.0131 C_1^*)]$$

$$S_h = S_c (Tf + 1 - f)$$

$$T = 0.36 + |0.4 \cos (h + 35^\circ)|$$

$$T = 0.56 + |0.2 \cos (h + 168^\circ)| \quad \text{si } 164^\circ \leq h \leq 345^\circ$$

$$f = [(C_1^*)^4 / [(C_1^*)^4 + 1900]]^{1/2}$$

$$\Delta E = [(\Delta L^* / l S_1)^2 + (\Delta C^* / c S_c)^2 + (\Delta H^* / S_h)^2]^{1/2}$$

donde L_1^* , C_1^* y h_1 son la luminancia, croma y tono correspondientes a la muestra standard del par de muestras, calculadas según CIELAB. Igualmente ΔL^* , ΔC^* y ΔH^* son diferencias calculadas también mediante CIELAB. Los parámetros l

y c ponderan también las diferencias de luminancia y croma en la fórmula final, quedando a elección en cada aplicación particular (tipo de sustrato, aceptabilidad-perceptibilidad, etc.).

Luo y Rigg en 1987a y 1987b realizaron un extenso trabajo que estudia el comportamiento de distintas fórmulas, frente a diversos resultados experimentales, entre otros los suyos (Luo-Rigg, 1986). A raíz de estas investigaciones sugieren una nueva modificación a las anteriores fórmulas CMC ($l:c$), principalmente en el sentido de desviar la orientación de las elipses de discriminación de la dirección radial en el plano (a^* , b^*) para los estímulos de tonalidad azul. Las nuevas fórmulas propuestas se conocen como BFD ($l:c$) y, aunque tienen una estructura similar a CMC ($l:c$) aumentan notablemente su complejidad respecto a aquéllas, introduciendo un nuevo término en la expresión final, a fin de actuar sobre las orientaciones de las elipses de discriminación. Concretamente BFD ($l:c$) se define en la forma:

$$D_c = [0.035 \bar{C}^* / (1 + 0.00365 \bar{C}^*)] + 0.521$$

$$D_h = D_c (GT' + 1 - G)$$

$$G = [(\bar{C}^*)^4 / [(\bar{C}^*)^4 + 14000]]^{1/2}$$

$$T' = 0.627 + 0.055 \cos (\bar{h} - 254^\circ) - 0.04 \cos (2\bar{h} - 136^\circ) + \\ + 0.07 \cos (3\bar{h} - 32^\circ) + 0.049 \cos (4\bar{h} + 114^\circ) - \\ - 0.015 \cos (5\bar{h} - 103^\circ)$$

$$R_t = R_h R_c$$

$$R_h = - 0.26 \cos (\bar{h} - 308^\circ) - 0.379 \cos (2\bar{h} - 160^\circ) - \\ - 0.636 \cos (3\bar{h} + 254^\circ) + 0.226 \cos (4\bar{h} + 140^\circ) -$$

$$- 0.194 \cos (5\bar{h} - 103^\circ)$$

$$R_c = [(\bar{C}^*)^6 / [(\bar{C}^*)^6 + 7 \cdot 10^7]]^{1/2}$$

$$L_{\text{BFD}} = 54.6 \log (Y + 1.5) - 9.6$$

La expresión final es:

$$\Delta E = [(\Delta L_{\text{BFD}}^* / l)^2 + (\Delta C^* / c D_c)^2 + (\Delta H^* / D_h)^2 + R_t (\Delta C^* / D_c) (\Delta H^* / D_h)]^{1/2}$$

donde \bar{C}^* es el promedio del croma de la muestra patrón y la muestra evaluada; análogamente, \bar{h} el promedio del ángulo de tono de h del color o muestra patrón y la muestra evaluada, siendo ambos calculados con CIELAB. Por último Y , está calculada respecto del color patrón. Los parámetros l y c que aparecen en la fórmula de diferencia de color final son similares a los de $\text{CMC}(l:c)$ y no tienen un valor determinado, siendo usual $l = 1$ y $c = 1$ en experiencias de perceptibilidad y $l = 2$ en experiencias de aceptabilidad. Los valores de ΔL^* , ΔC^* y ΔH^* se calculan mediante CIELAB. Por último, señalar, que el valor de R_t determina la magnitud de la rotación de las elipses en este espacio.

La utilización por parte de la industria de muy distintas fórmulas ha sido recientemente analizada (Kuehni, 1990). Independientemente de los problemas que esto conlleva, en este estudio se encuesta a diferentes usuarios sobre las fórmulas empleadas y sobre sus aplicaciones. Se concluye la amplia difusión de CIELAB en la actualidad, frente a cualquier otra

fórmula. Los resultados de esta encuesta realizada en USA concuerdan con los realizados en otros países sobre este mismo tema (Komatsuraba, 1988). A pesar de la gran difusión y aplicabilidad de CIELAB, la introducción de nuevas métricas derivadas de él ha dado resultados positivos entre los que cabe citar, por ejemplo, los obtenidos por CMC, muy difundida en la industria inglesa.

En esta línea, recientemente el Comité Técnico 1.29 (TC1-29) de la CIE sobre evaluación industrial de diferencias de color, ha propuesto mejoras en dos sentidos: a) corrección para mejorar la uniformidad de CIELAB, y b) incorporación del efecto de factores paramétricos que ponderan la influencia de las condiciones experimentales sobre las percepción de diferencias de color. Más en concreto, se propone mantener el modelo CIELAB como espacio de color aproximadamente uniforme con unas funciones de peso T_l , T_c , T_h para corregir la falta de uniformidad de este espacio y unas funciones K_l , K_c , K_h para corregir los efectos paramétricos, al igual que hacían los parámetros l y c de CMC y BFD. Las expresiones de T_l , T_c , T_h son especialmente sencillas, si las comparamos con las complicadas dependencias que proponen estas 2 últimas fórmulas.

La propuesta del TC1-29 se basa en los resultados experimentales recopilados en dos amplias bases de datos (las 132 elipses/elipsoides de Luo y Rigg y las tolerancias de la base de datos de RIT-Dupont) junto con algunos otros trabajos (Witt, 1987). En realidad, la propuesta simplifica considerablemente la fórmula CMC sin más que tener en cuenta los efectos más significativos que esta fórmula trata de corregir en CIELAB: aumento sustancial de la tolerancia en croma ΔC^* con el croma C_{ab}^* y un ligero aumento de la tolerancia en tono ΔH^* con el croma C_{ab}^* .

Esta propuesta del TC1-29, con el que colaboran miembros de este Departamento, es en definitiva una fórmula de diferencia de color del tipo:

$$\Delta E = [(\Delta L^* / K_l T_l)^2 + (\Delta C^* / K_c T_c)^2 + (\Delta H^* / K_h T_h)^2]^{1/2}$$

donde ΔL^* , ΔC^* , ΔH^* son las diferencias obtenidas mediante CIELAB y los factores T_l , T_c , T_h valen:

$$S_l = 1$$

$$S_c = 1 + 0.045 C_{ab}^*$$

$$S_h = 1 + 0.015 C_{ab}^*$$

Los factores paramétricos K_l , K_c y K_h son términos "correctivos" introducidos para tener en cuenta las variaciones debidas a los efectos paramétricos. Sus valores dependerán del tipo de experiencia, aunque el TC1-29 señala que, en ciertas condiciones básicas próximas a las usuales en numerosos problemas industriales, los valores de estos factores son la unidad ($K_l = K_c = K_h = 1$), por lo que no afectan en la expresión final.

Por último, destacar que las nuevas métricas CMC(l:c), BFD (l:c) y la más reciente TC1-29 son, como ya indicamos, métricas derivadas de CIELAB. En CIELAB las diferencias se calculan sólo como una distancia euclídea en el espacio definido o, si se prefiere, como el resultado de una diferencia de la contribución de las diferencias en luminancia, croma y tono ΔL^* , ΔC^* y ΔH^* ,

repectivamente. En cambio, en estas nuevas métricas estas diferencias aparecen ponderadas por funciones más o menos complejas y, a veces con efectos similares como veremos más adelante. Las figuras 2.8 y 2.9 muestran algunas de estas funciones para las fórmulas CMC, BFD y TC1-29, conforme a las expresiones que vamos indicando.

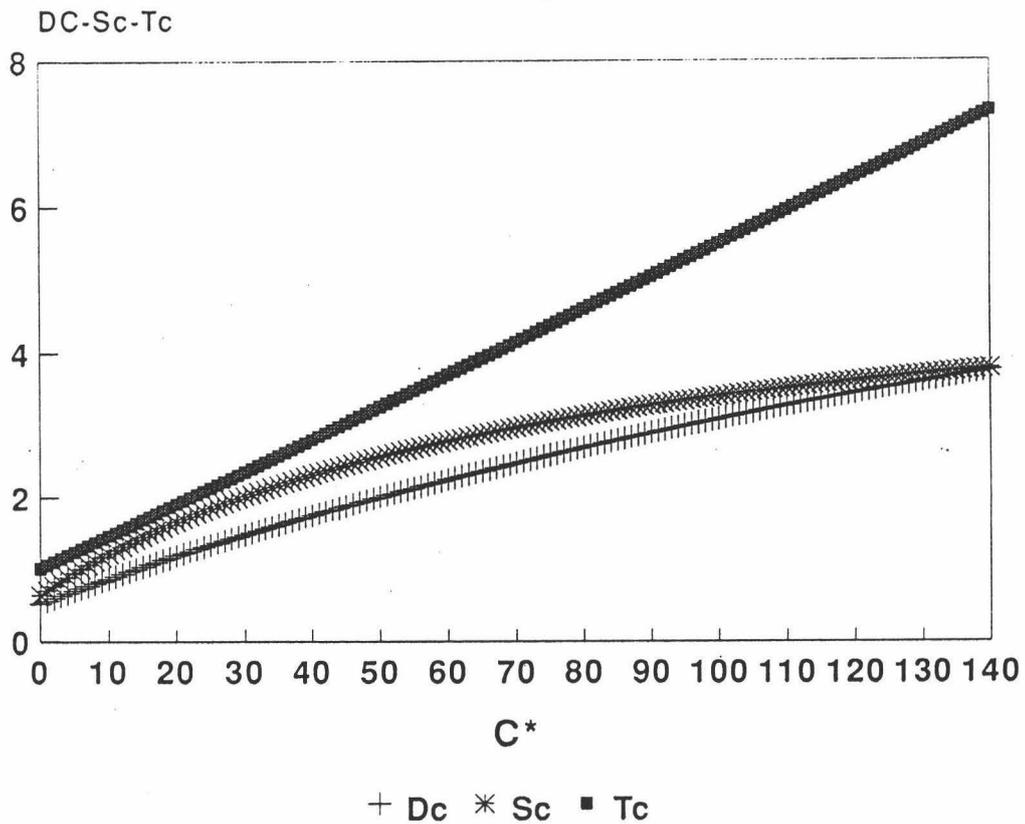


Figura 2.8.- D_c , S_c , T_c son los factores que ponderan a ΔC^* en las fórmulas CMC, BFD y TC1-29, respectivamente (ver ecuaciones previas).

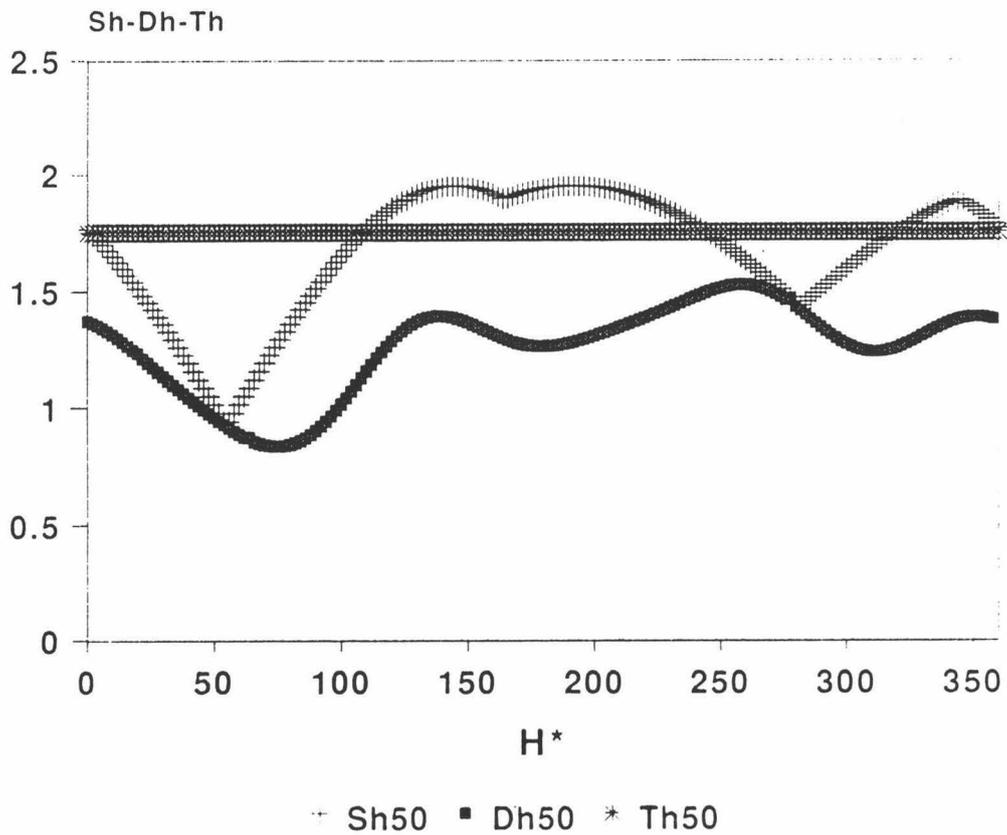


Figura 2.9.- D_h , S_h , T_h son los factores que ponderan a ΔH^* en las fórmulas CMC, BFD y TC1-29, respectivamente, para $C^* = 50$ (ver ecuaciones previas).

2.3.- COEFICIENTES METRICOS.

Cualquier punto de coordenadas x, y en el diagrama cromático CIE-31 puede llevar asociado, en principio, una elipse de discriminación cromática. Como hemos visto con anterioridad, esta

es la representación más clásica de los umbrales o de los estímulos con una misma diferencia cromática "justamente perceptible", en relación a un centro dado.

La expresión matemática de esta elipse es :

$$ds^2 = g_{11} dx^2 + 2g_{12} dx dy + g_{22} dy^2$$

donde dx es la diferencia de la coordenada "x" del centro de la elipse y cualquier punto de ella; análogamente, dy es la diferencia en la coordenada "y" para los puntos antes citados, g_{11} , g_{12} y g_{22} son valores constantes para cada elipse que dependen del centro de cromaticidad elegido y que se denominan coeficientes métricos. Por otra parte, ds^2 es una constante que fija el tamaño de las elipses.

La elipse representativa de los umbrales de discriminación viene caracterizada principalmente por su orientación θ (ángulo que forma el eje mayor de la elipse con la dirección positiva del eje de abscisas) y por las distancias máxima y mínima desde el centro de la elipse a un punto cualquiera de la misma (semieje mayor a y menor b, respectivamente). La figura 2.10 muestra estos parámetros:

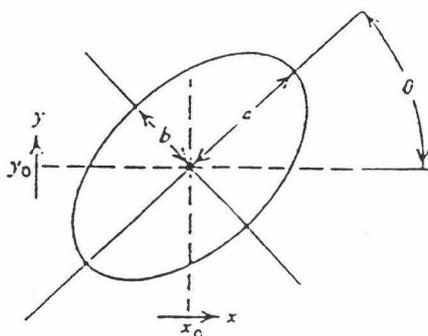


Figura 2.10.- Parámetros característicos de las elipses de discriminación cromática.

Los parámetros citados se relacionan con los coeficientes métricos a través de las expresiones:

$$g_{11} = (1/ a^2) \cos^2 \theta + (1/b^2) \operatorname{sen}^2 \theta$$

$$g_{12} = (1/a^2 - 1/b^2) \operatorname{sen} \theta \cos \theta$$

$$g_{22} = (1/a^2) \operatorname{sen}^2 \theta + (1/b^2) \cos^2 \theta$$

Estas ecuaciones nos permiten calcular los coeficientes métricos basándonos en los resultados experimentales de discriminación referentes a los umbrales. Ello puede constituir un método empírico que conduce a fórmulas de diferencia de color, si se dispone de resultados experimentales en un conjunto de puntos del diagrama cromático suficientemente amplio y representativo.

Análogamente se pueden encontrar, por referencia, las relaciones recíprocas que nos permiten obtener información directa sobre la elipse a partir de los coeficientes métricos:

$$\theta = (1/2) \operatorname{arctg} (2g_{12} / (g_{11} - g_{22}))$$

siendo $\theta < 90^\circ$ cuando $g_{12} < 0$ y $\theta > 90^\circ$ si $g_{12} > 0$

$$a = 1/ (g_{22} + g_{12} \operatorname{cotg} \theta)^{1/2}$$

$$b = 1/ (g_{11} - g_{12} \operatorname{cotg} \theta)^{1/2}$$

En la práctica para analizar los umbrales, como haremos en esta Memoria, es usual dar además de la orientación θ , la



relación de semiejes y el área de la elipse (πab).

Por otra parte, partiendo de una fórmula de diferencia de color podemos hallar los coeficientes métricos asociados a ella (Melgosa et al., 1991), lo que permite obtener información de la adecuación de esta fórmula a los resultados experimentales, así como un estudio de comparación entre ellas.

En resumen, a partir de las definiciones correspondientes a un sistema de representación del color determinado, así como de sus fórmulas de diferencia de color asociadas, es posible obtener los coeficientes métricos referidos a un sistema determinado, tal y como señala MacAdam, 1985.

2.3.- BIBLIOGRAFIA.

ADAMS, E.Q.; "X-Z planes in the 1931 CIE System of colorimetry" J. Opt. Soc., **32**, 168-173 (1942).

ALDER, C., CHANG, K.P., CHONG, T.F., COATES, E., KHALILI, A.; "Uniform chromaticity scales-New experimental data", J. Soc. Dyers Colourists, **98**, 14-20 (1982).

BALINKIN, I.; "Measurement and designation of small color differences", Am. Cer. Soc. Bull. **20**, 392-402 (1941).

BERNS, R., ALMAM, D., RENIFF, L., SNYDER, G., BALONON, M.; "Visual determination of suprathresholds color-difference tolerances using probits analysis" Color Res. Appl. **16**, 297-316 (1991).

BROWN, W.R.J., MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences", J. Opt. Soc. Am., **39**, 808-834 (1949).

BROWN, W.R.J.; "Statistics of color-matching data", J. Opt. Soc. Am., **42**, 252-256 (1952).

BROWN, W.R.J.; "Color discrimination of twelve observers", J. Opt. Soc. Am., **47**, 137-143 (1957).

CIE. TC1-28 Technical Report, Parametric effects in colour difference evaluation.

CHEUNG, M., RIGG, B.; "Colour-Difference ellipsoids for five CIE colour centres", Color Res. Appl., **11**, 185-195 (1986).

CLARKE, R.J.J., MCDONALD, R., RIGG, B.; "Modification of the

JPC79 colour-difference formula", J. Soc. Dyers. Colourists, **100**, 117-148 (1984).

DAVIDSON, H.R., FRIEDE, E.; "The size of acceptable color differences", J. Opt. Soc. Am., **43**, 581-589 (1953).

DUPONT-HENIUS, G.; "Diferential color perception thresholds", Proc. AIC "Color 77", New York, 492-494 (1977).

GARCIA, J.A., ROMERO, J., GARCIA-BELTRAN, A., JIMENEZ, J.R.; "Interobserver variability of chromaticity discrimination and color representation spaces", J. Optics, **24**, 65-69 (1992).

GARCIA, J.A., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L., HITA, E.; "Improved formula for evaluating color-differential thresholds" Appl. Opt., **31**, 6292-6298 (1992).

GLASSER, L.G., MCKINNEY, A.H., REILLY, C.D. SCHNELLE, P.D.; "Cube root color coordinate system" J. Opt. Soc. Am., **48**, 736-740 (1980).

HITA, E.; "Influencia de las condiciones experimentales en los umbrales diferenciales de color" Tesis Doctoral, Universidad de Granada (1975).

HITA, E., GONZALEZ, F., CERVANTES, A.; "On the geometric structures of color specification systems", Die Farbe, **30**, 55-64 (1982a).

HITA, E., JIMENEZ DEL BARCO, L., MARTINEZ, R.; "Temporal aspects of color discrimination", J. Opt. Soc. Am., **72**, 578-582 (1982b).

HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L., CERVANTES, A.; "Uniform color scales. A comparative analysis for color

discrimination data", Die Farbe, **31**, 229-242, (1983/84).

HITA, E., JIMENEZ DEL BARCO, L., ROMERO, J.; "Differential color thresholds from metameric matches: experimental results concerning failures of colorimetric additivity", J. Opt, Soc. Am., **3**, 1203-1209 (1986).

INDOW, T., MORRISON, M.L.; "Construction of discrimination ellipsoids for surface colors by method of constant stimuli", Color Res. Appl., **16**, 42-56 (1991).

INDOW, T., ROBERTSON, A.R., VON GRANAU, M., FIELDER, G.H.; "Discrimination ellipsoids of aperture and simulated surface colors by matching and paired comparison", Color Res.,Appl. **17**, 6-22 (1992).

KOMATSUBARA, H., KAWAKAMI, G.; "Research on the application of color-difference formulas to industry". Studies of Color, **35**, 6-20 (1988).

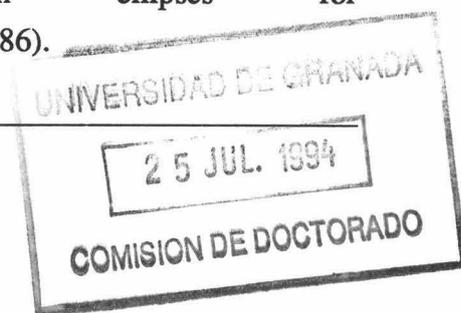
KUEHNI, R.G., MARCUS, R.T.; "An experiment in visual scaling of small color differences", Color Res. Appl., **4**, 83-91 (1979).

KUEHNI, R.G.; "Advances in color-difference formulas". Color Res. Appl., **7**, 19-23 (1982).

KUEHNI, R.G.; "Industrial Color Difference progress and problems", Color Res. Appl., **5**, 261-265 (1990).

LOZANO, R.D.; "Lecturas escogidas II (Técnicas avanzadas) División Optica INTI de Buenos Aires (1988).

LUO, M.R., RIGG, B.; "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", Color Res. Appl., **11**, 25-42 (1986).



LUO, M.R., RIGG, B.; "BFD (l:c) colour-difference formula Part 1- Development of the formula", J. Soc. Dyers. Colourists, **103**, 86-94 (1987a).

LUO, M.R., RIGG, B.; "BFD (l:c) colour-difference formula Part 2- Performance of the formula", J. Soc. Dyers. Colourists, **103**, 126-132 (1987b).

MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to color differences in daylight", J. Opt. Soc. Am., **32**, 247-274 (1942).

MACADAM, D.L.; "The graphical representation of small color differences". J. Opt. Soc. Am., **33**, 675-679 (1943).

MACADAM, D.L.; "Metric coefficients for CIE color-difference formulas", Color Res. Appl., **10**, 45-49 (1985).

MCDONALD, R.; "Industrial Pass/Fail colour matching: Preparations of visual colour-matching data", J. Soc. Dyers. Colourists, **96**, 372-376 (1980a).

MCDONALD, R.; "Industrial Pass/Fail colour matching: Methods of fitting tolerance ellipsoids", J.Soc. Dyers. Colourists, **96**, 418-433 (1980b).

MCDONALD, R.; "A review of the relationship between visual and instrumental assessment of colour difference, part 1", J. Oil Col. Chem. Assc., **65**, 43-53 (1982a).

MCDONALD, R.; "A review of the relationship between visual and instrumental assessment of colour difference, part 2*", J. Oil Col. Chem. Assc., **65**, 93-106 (1982b).

MCLAREN, K; "Adam-Nickerson colour-difference formula", J. Soc. Dyers. Colourists, **87**, 159-165 (1971)

MELGOSA, M.; Estudio comparativo de datos colorimétricos obtenidos con presentación en modo de apertura y de objeto. Tesis Doctoral, Universidad de Granada(1989).

MELGOSA, M., HITTA, E. ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L;
"Fórmulas de diferencia de color", Opt. Pur. Apl., **23**, 137-145 (1990).

MUNSELL, A.H.; "A new classification of color" Trans. New England Cotton Mfrs. Assn. N° 78, (1905).

NEWHALL, S.M., NICKERSON, D., JUDD, D.B.; "Final report of the OSA subcommittee on the spacing of Munsell colors", J. Opt. Soc. Am., **33**, 385-418 (1943).

NICKERSON, D.; "The specification of color tolerance", Text. Res., **6**, 505-514 (1936).

PARRA, F.; "Seuils différentiels de couleur", Proc. "Color 69". Stockholm. Göttingen: Musterschmidt, 727-733 (1970).

POINTER, M.R.; "A comparison of the CIE 1976 colour spaces". Color Res. Appl., **6**, 108-118 (1981).

RICH, R.M., BILLMEYER, J.R., HOWE, W.G.; "Method for deriving color-difference perceptibility ellipses for surface color samples", J. Opt. Soc. Am., **65**, 956-959 (1975).

RICHTER, K.; "Cube-root color spaces and chromatic adaptation"., Color Res. Appl., **3**, 149-151 (1980).

ROBERTSON, A.R.; "CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation", *Color Res. Appl.*, **3**, 149-151 (1978).

ROBERTSON, A.R.;" Colour differences" *Die Farbe* **29**, 273-296 (1981).

ROMERO, J., HITTA, E., LOPEZ-LAFUENTE, M.; "Análisis y obtención de elementos de línea en el diagrama cromático CIE-1931", *Opt. Pur. Apl.*, **19**, 179-203 (1986).

ROMERO, J., GARCIA, J.A., JIMENEZ DEL BARCO, L., HITTA, E.; "Color difference formula tested by application to chromatic discrimination data and new formula". *Appl. Opt.*, **28**, 4697-4702 (1989).

SEVE, R.; "New formula for the computation of CIE 1976 hue difference", *Color Res. Appl.*, **16**, 217-218 (1991).

SIEGEL, M.H.; "Color discrimination as a function of exposure time" *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 566-568 (1965).

SILBERSTEIN, L., MACADAM, D.L.; "The distribution of color matching around a color center", *J. Opt. Soc. Am.*, **35**, 32-39 (1945).

STOCKES, M., BRILL, M.H.; "Efficient computation of ΔH_{ab}^* ", *Color Res. Appl.*, **16**, 410-411 (1992).

STROCKA, D., BROCKES, A., PAFFHAUSEN, W.; "Influence of experimental parameters on the evaluation of color-difference ellipsoids", *Color Res. Appl.*, **8**, 169-175 (1983).

UCHIKAWA, K., IKEDA, M.; "Temporal deterioration of wavelength

discrimination with successive comparison method", *Vision Res.*, **21**, 591-595 (1981).

WITT, K., DORING, G.; "Parametric variations in a threshold color-difference ellipsoid for green painted samples", *Color Res. Appl.*, **8**, 153-163 (1983).

WITT, K.; "Three-dimensional threshold of color-difference perceptibility in painted samples: Variability of observers in four CIE color regions", *Color Res. Appl.*, **12**, 128-134 (1987).

WRIGHT, W.D., y PITT, F.G.H.; "Hue discrimination in normal color vision", *Proc. Phys. Soc. (London)*, **46**, 459-473 (1934).

WRIGHT, W.D.; "The sensitivity of the eye to small colour differences", *Proc. Phys. Soc. (London)*, **53**, 93-112 (1941).

WYSZECKI, G.; "Color matching and color-difference matching", *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 117-128 (1972).

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "New color matching ellipses", *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 1135-1152 (1971a).

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "Color-difference matches", *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 1501-1513 (1971b).

WYSZECKI, G.; "Color matching and color-difference matching", *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 117-128 (1972).

CAPITULO 3.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

CAPITULO 3.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

3.1.- INTRODUCCION.

En este capítulo analizaremos los dispositivos utilizados para la realización de las medidas correspondientes a nuestro planteamiento. Se han utilizado esencialmente dos dispositivos experimentales: a) Un colorímetro de primarios espectrales tipo Wright, procedente del Instituto de Optica "Daza de Valdés", C.S.I.C (A. Cruz, 1967), que suministra estímulos para la observación en modo de apertura, empleando luces dirigidas. Sobre el mismo se han introducido algunas modificaciones en las partes mecánicas y se ha tratado de automatizar el sistema global, mediante la incorporación de dispositivos de control de las radiancias de los primarios y temporalización de las observaciones. Todo ello con la posibilidad de control manual o electrónico asistido por ordenador, b) Para las experiencias con presentación en modo de objeto o de apertura con objetos

coloreados, se utiliza un dispositivo de observación junto a conjuntos de muestras que, en nuestro caso, son muestras coloreadas generadas mediante pinturas acrílicas sobre papel blanco.

Ambos equipos poseen las características más usuales de los empleados en el estudio de la Colorimetría Diferencial. Entre ellas cabe destacar, principalmente, la necesaria solidez y versatilidad que nos permita realizar un alto número de medidas, así como la fiel reproducibilidad de éstas.

Para cada uno de los dispositivos experimentales consideramos los siguientes apartados:

1.- Descripción general de los componentes del equipo y puesta a punto del mismo.

2.- Calibrado y determinación de las coordenadas de cromaticidad y luminancia de los estímulos de color. Por extensión este apartado se considerará, ampliamente, en el próximo capítulo.

3.2.- COLORIMETRO DE ESTIMULOS ESPECTRALES.

DESCRIPCION GENERAL.

3.2.1.- SISTEMA GENERADOR DE ESTIMULOS.

En la figura 3.1 se representa esquemáticamente el sistema óptico del dispositivo.

La luz procedente de la lámpara de filamento M, (SYLVANIA, 650W - 220V) alimentada mediante un estabilizador, es concentrada

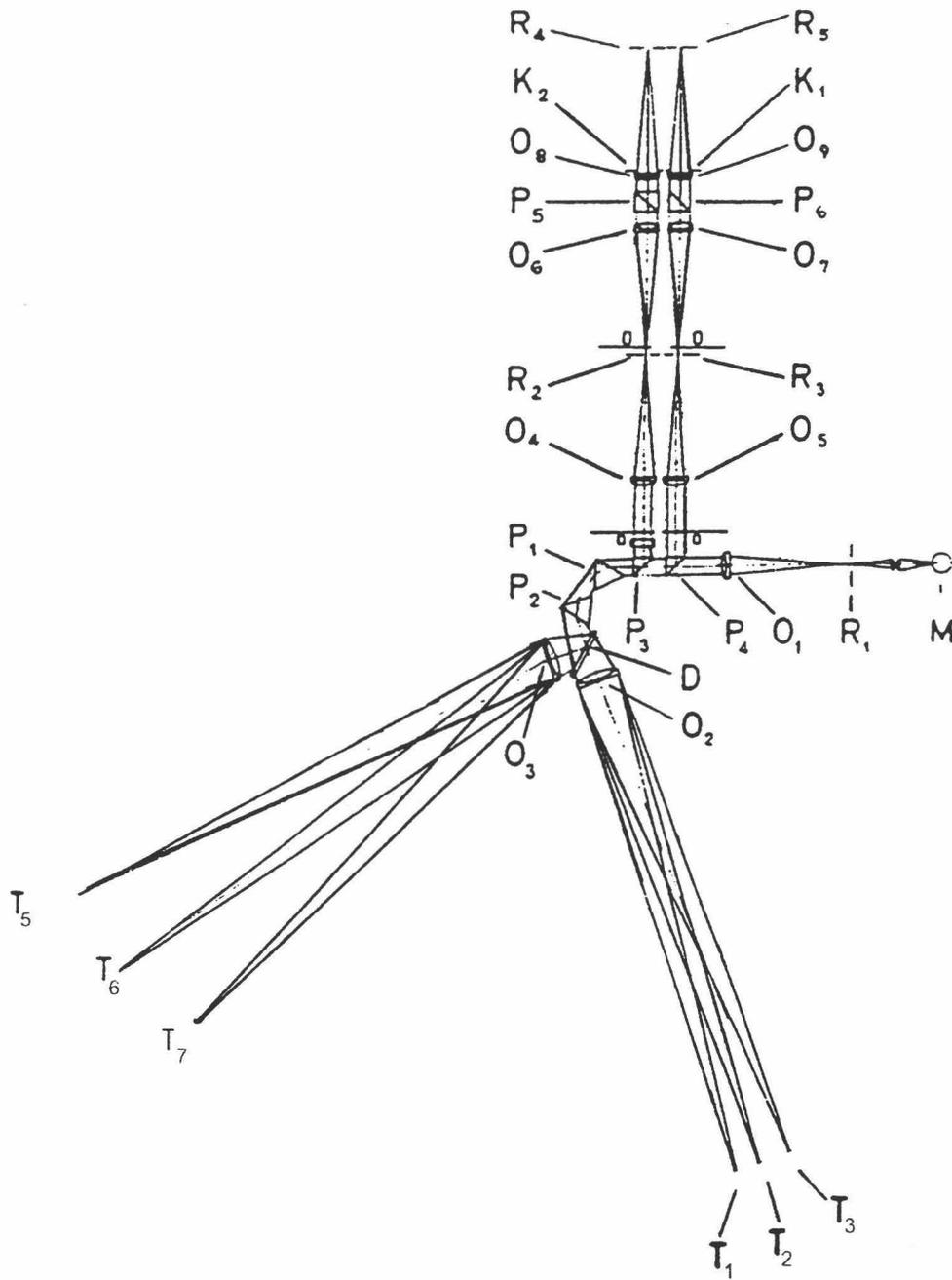


Figura 3.1.- Esquema del colorímetro de estímulos espectrales.

sobre la rendija R_1 y la emergente recogida por el objetivo O_1 , doblete acromático de focal 250 mm, que da lugar a un haz colimado el cual atraviesa la mitad superior de los prismas dispersores de 60° P_1 y P_2 . Dichos prismas son de vidrio Flint denso SF5 (52593) SCHOTT, que al ser un vidrio de dispersión elevada permite obtener un espectro suficientemente separado.

La luz dispersada, incide sobre un espejo divisor, D, constituido por dos espejos rectangulares separados por una abertura, también rectangular, de tal forma que del haz incidente una mitad se refleja en el espejo superior hacia el objetivo O_3 , mientras la otra mitad pasa por la abertura hacia el objetivo O_2 . El espejo divisor, como se indica en el esquema general, forma un ángulo de 45° con el haz que se dirige al objetivo O_2 encontrándose su centro a 60 mm de este objetivo. El diámetro de estos dos objetivos, ambos dobletes acromáticos, es de 50 mm y sus focales son de 1200 mm.

En los planos focales de los objetivos O_2 y O_3 se forman sendos espectros. En el plano focal del doblete O_2 se disponen tres prismas de techo, denotados en la figura como T_1 , T_2 y T_3 . En estos prismas la luz que entra por la cara hipotenusa es reflejada totalmente por cada una de las caras de "techo", volviendo exactamente en el sentido contrario y en un plano inferior al de incidencia, debido a una ligera inclinación de los prismas. El material utilizado en la fabricación de los prismas T_1 , T_2 y T_3 es un vidrio crown denso C. 1455 de la casa Parra Montois.

Los prismas de techo anteriores se pueden desplazar sobre una guía recta en el plano focal del objetivo O_2 pudiendo seleccionar cualquier parte del espectro en la retro-reflexión. Así, una vez que la luz llega a los prismas de techo, éstos reflejan una banda

estrecha del espectro hacia el doblete O_2 , a menor altura que el haz incidente, de tal manera que el haz reflejado pasa por la abertura del espejo divisor D y llega a los prismas dispersores P_1 y P_2 , desde donde se dirigirá al sistema de observación.

En el dispositivo original existe, junto a los prismas T_1 , T_2 y T_3 un cuarto prisma T_4 , que va montado en el extremo de un brazo móvil y con el cual se puede también seleccionar cualquier longitud de onda. Este prisma no ha sido utilizado en nuestras experiencias.

Por otra parte, en el plano focal del objetivo O_3 se encuentran los prismas de techo T_5 , T_6 y T_7 , que pueden situarse en dos guías paralelas muy próximas y graduadas; con ellos, pueden seleccionarse zonas cualesquiera del espectro con el fin de conseguir estímulos compuestos por una mezcla aditiva de una, dos o tres radiaciones, como ocurre con los prismas T_1 , T_2 y T_3 .

Al igual que los anteriores, cada uno de estos prismas de techo refleja la luz correspondiente a una banda espectral estrecha hacia el objetivo O_3 y a un nivel más bajo que el incidente, de tal modo que el haz de vuelta incide sobre la parte inferior del espejo divisor, que lo refleja hacia la parte inferior de los prismas de dispersión P_1 y P_2 .

El prisma T_5 , que se encuentra situado sólo en una de las guías o deslizaderas, puede moverse manualmente o mediante dispositivo electrónico. Para desplazamientos pequeños, el movimiento se realiza mediante un husillo de 1 mm de paso. La cabeza de mando de este husillo lleva un tambor de 100 divisiones, con lo cual, se pueden leer avances del prisma de la centésima de milímetro. Para el control electrónico se emplea un motor trifásico de 1500 r.p.m. que consigue un avance del prisma

de 30 mm por minuto. Este motor va conectado a la red informática de control.

Los otros dos prismas (T_6 y T_7) pueden ser situados sobre esta guía o sobre la segunda, y pueden moverse indistintamente, arrastrados por T_5 , con desplazamientos tan sensibles como los de éste.

Los haces reflejados por los prismas de techo, al pasar de nuevo a través del sistema dispersor P_1 y P_2 , se recombinan para neutralizar la dispersión original dando por resultado la mezcla aditiva de las radiaciones seleccionadas con aquéllos.

Los dos haces que emergen a diferente nivel de los prismas dispersores se reflejan en los prismas rectangulares, denotados por P_3 y P_4 en la figura. Estos prismas son de diferente altura de tal forma que el prisma P_3 recoge la luz procedente de los prismas de techo T_1 , T_2 y T_3 y el prisma P_4 la radiación procedente de los T_5 , T_6 y T_7 . Tras atravesar dichos prismas el haz es recogido por los dobletes O_4 y O_5 , respectivamente, los cuales forman imágenes sobre los planos de los diafragmas R_2 y R_3 . Las imágenes que se obtienen son ligeramente ensanchadas, debido a la dispersión que tiene lugar cuando cada haz pasa de nuevo por el sistema dispersor, ya que en los prismas de techo la luz que entra por el lado izquierdo emerge por el derecho, por lo que la luz en el camino de vuelta es dispersada de nuevo.

Los prismas de techo dan en los planos de los diafragmas R_2 y R_3 manchas luminosas de área apreciable, de las cuales dichos diafragmas sólo dejan pasar una parte que es un estímulo (mezcla aditiva) homogéneo.

En resumen, podemos señalar, según el esquema del dispositivo,

que los prismas de techo T_5 , T_6 y T_7 generan un estímulo que servirá como estímulo de referencia, mientras que los prismas T_1 , T_2 y T_3 generan distintos estímulos muy próximos a aquél, siendo presentados ambos estímulos yuxtapuestos al observador.

Finalmente, los dobletes acromáticos O_6 , O_7 , O_8 y O_9 tienen por misión representar las aperturas R_2 y R_3 sobre las pupilas de salida del dispositivo, muy próximos a R_4 y R_5 , de forma tal que puedan coincidir con las pupilas del observador. En realidad R_4 y R_5 están un poco adelantados respecto a la posición donde se forman las imágenes de R_2 y R_3 y su misión es servir de referencia para situar el lugar de observación.

Cada una de las tres radiaciones cuasi-monocromáticas reflejadas por los prismas T_1 , T_2 y T_3 pueden ser controladas, independientemente, en intensidad mediante unas cuñas fotométricas grises móviles, colocadas delante de los prismas de techo. Dichas cuñas grises fueron construidas por la casa Ilford, sus dimensiones son 254 mm de largo y 19 mm de ancho, y tienen una densidad óptica que varía de 0.0 a 1.5 de manera progresiva, pero como la luz pasa a través de ellas dos veces, la variación efectiva es de 0.0 a 3.0. Estas cuñas se encuentran sujetas mediante una montura de forma rectangular de modo que la cuña queda en el interior, sin sufrir sobrepresiones.

El movimiento de las cuñas grises se realiza mediante el empleo de un sistema de cuerdas y poleas. Las posiciones en las que se pueden situar cada una de estas cuñas están controladas por ordenador mediante motores paso a paso instalados a tal efecto.

Análogamente, la variación de la intensidad de las radiaciones seleccionadas por el resto de los prismas de techo (T_5 , T_6 y T_7)

es también posible, mediante la utilización de un juego de filtros grises de diferente densidad óptica que pueden ser colocados, mediante ranuras apropiadas, delante de estos prismas. En nuestro caso disponemos, a tal efecto, de un juego de 10 filtros grises Ealing Electro-Optics plc. Watford, WD2 4PW, con densidades ópticas de 0.1 a 1.0 en intervalos de 0.1. Al igual que para los restantes prismas de techo, como la luz pasa a través de ellos dos veces, el rango de densidades ópticas disponibles es de 0.2 a 2.0.

3.2.2.- SISTEMA DE OBSERVACION.

Aunque en la descripción general del sistema óptico del dispositivo experimental se hicieron ya algunas referencias al sistema de observación, realizaremos a continuación una descripción más detallada de éste, ya que de él dependerán algunas de las condiciones experimentales bajo las cuales se realiza nuestro trabajo.

El sistema de observación está formado por dos anteojos, cuyos sistemas ópticos son idénticos como se observa en el esquema general de la figura 3.1. Cada antejo está formado por tres dobletes. Los dos primeros dobletes (O_4-O_6 y O_5-O_7), se sitúan de forma que coinciden sus focos imagen y objeto respectivamente, formando un antejo astronómico de aumento unidad. El tercer doblete (O_8-O_9) recoge los rayos paralelos que salen del anterior y forma una imagen del diafragma de apertura sobre la pupila del observador, con lo cual, se obtiene el tipo de visión conocida en la literatura como maxweliana (Wyszecki, 1982). Al coincidir la pupila de salida del aparato con la pupila del observador, el rendimiento luminoso que se obtiene es máximo.

Inmediatamente después de los terceros dobletes (O_8-O_9), están los diafragmas K_1 y K_2 que limitan el tamaño y nos dan la forma del campo. Estos diafragmas están contruidos con una chapa de 0.2 mm de espesor. Por interés, en otras posibles experiencias, para obtener distintos tamaños de campo disponemos de un juego de diafragmas que se pueden intercambiar fácilmente, pues van montados en una ranura.

Finalmente, donde se coloca el ojo se encuentran los diafragmas R_4 y R_5 de 5 mm de diámetro, que no tienen ninguna misión óptica, sólo sirven de referencia para colocar el ojo.

Para visión monocular sólo se utiliza el diafragma K_2 que ahora es de forma cuadrada, de manera que el campo de visión será entonces un cuadrado dividido verticalmente en dos subcampos rectangulares. En este caso, se ha de situar entre los objetivos O_7 y O_9 un prisma recto P_6 que desvía los rayos lateralmente y un cubo fotométrico P_5 cuya misión es presentar yuxtapuestos en los dos subcampos los estímulos procedentes del O_6 y O_7 , respectivamente. Tanto el prisma de reflexión como el cubo fotométrico van cementados sobre una base de latón que lleva cuatro agujeros para fijarlos. Este montaje permite colocar tanto el prisma como el cubo en distintas formas; de esta manera, puede utilizarse el aparato en forma monocular con el antejo derecho o izquierdo (intercambiando el prisma y el cubo de los antejos), o como "colorímetro industrial" colocando las muestras a un lado.

Entendemos como colorímetro industrial, una modificación del anterior colorímetro de estímulos espectrales en la que no se usa como estímulo de referencia el generado por los prismas de techo T_5 , T_6 y T_7 sino la luz reflejada difusamente por una muestra debidamente iluminada por una fuente auxiliar (lámpara halógena OSRAM HALOSTAR, 150 W, 220-230 V.). Para ello, en el dispositivo

original hemos incorporado una plataforma con un émbolo móvil para la colocación de la lámpara de iluminación y un soporte para la colocación de muestras. Este soporte está ligeramente inclinado ($+3^\circ$) para evitar los efectos de la reflexión especular y se encuentra situado entre el prisma P_4 y el doblete O_5 de manera que la luz reflejada pasa a través de este último dirigiéndose al sistema de observación al igual que ocurría con las luces que provienen de los prismas T_5 , T_6 y T_7 .

El sistema de iluminación de las muestras es análogo al que se utiliza en el dispositivo de observación/iluminación de las mismas, que describiremos ampliamente en el próximo apartado.

Situado delante del último diafragma R_4 , que sirve de referencia para colocar el ojo, hay un obturador electromagnético. El obturador es sencillamente una pequeño brazo metálico con una pequeña chapa en su extremo que cierra la abertura del diafragma y que se mueve por la acción de una bobina, la cual actúa como electroimán bajo el control de un generador de pulsos eléctricos. Se puede controlar la duración de los pulsos, así como también el intervalo de tiempo entre pulsos sucesivos; de esta manera, controlamos el tiempo de exposición de los estímulos y también entre exposiciones sucesivas. El control del generador de impulsos eléctricos se realiza a través de ordenador mediante programas informáticos adecuados.

El dispositivo original también dispone de dos romboedros, que no aparecen en la figura 1, que sirven para variar la distancia interpupilar en caso de que se emplee observación binocular. En nuestras experiencias no fue necesario, ya que sólo utilizamos observación monocular.

El dispositivo dispone de un ocular con un juego de lentes

para compensar posibles ametropías del observador.

Por último, para inmovilizar la cabeza del observador se ha utilizado una mentonera, la cual dispone de mecanismos de desplazamiento vertical y horizontal que permiten a aquél alinearse con el eje óptico del sistema. El observador se sitúa en el interior de una cabina, pudiendo adaptarse a la oscuridad y observar solamente los estímulos que le son presentados, libre de la acción de luces parásitas y de las evoluciones del experimentador. También se han usado carcasas a fin de evitar en todo el dispositivo experimental la influencia de luces parásitas.

Como se desprende de lo dicho, nuestro dispositivo es un colorímetro tipo Wright (Wright, 1927) modificado, que reúne en nuestra opinión excelentes características para la realización de múltiples experiencias en el campo de la Colorimetría, o de la visión en general, tales como las que se presentan en esta Memoria.

3.2.3.-PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO.

Antes de comenzar las medidas experimentales se procedió al montaje de los diferentes componentes del dispositivo. Este se debe realizar con la suficiente precisión como para poder minimizar las posibles causas de error sistemáticas y garantizar la reproducibilidad de las medidas.

En primer lugar, y con el fin de que los componentes ópticos mantengan sus posiciones relativas frente a posibles vibraciones, todos los componentes ópticos descritos van montados sobre bases metálicas o monturas (según qué componente) provistas de

tornillos de nivelación; actuando sobre estos tornillos se consigue la orientación e inclinación correcta y necesaria para la puesta a punto del dispositivo. Las bases están unidas por brazos rígidos, contruidos a tal efecto, unidos unos a otros mediante soldaduras. Soportes hechos de pletina de acero sujetan los brazos a la mesa donde está apoyado todo el aparato. Esta mesa, a su vez, va fijada al suelo mediante tornillos. Todo el dispositivo se encuentra situado en un sótano, lo que asegura, aún más, la estabilidad del mismo.

Una vez colocada la lámpara de filamento M sobre una plataforma que permite controlar tanto el movimiento horizontal como el vertical, se procede a la nivelación de los prismas de 60° midiendo la altura de cada uno de ellos y moviendo los tornillos de nivelación hasta que éstas sean iguales. Un proceso similar se sigue para los prismas de techo.

Por otra parte, el espejo D que sirve para desviar los rayos que han de formar el espectro se ha de nivelar y orientar. Para ello, actuamos sobre los tornillos de nivelación hasta que el espectro se sitúe horizontalmente sobre los prismas de techo y, posteriormente, el espejo se orienta de modo que el espectro quede centrado respecto a las guías donde se mueven dichos prismas de techo.

Una vez centrado el espectro, orientamos correctamente los dobletes de los anteojos del dispositivo de observación. Para ello actuamos sobre los tornillos de nivelación correspondientes hasta observar el momento en que la luz reflejada por los prismas de techo marcha a la altura correcta e incidiendo con una inclinación tal que tras pasar por el espejo divisor y los prismas dispersores, entre en los anteojos.

Finalmente, una vez conseguida la puesta a punto global, se fijan los tornillos y se sellan, o inmovilizan, todos los componentes. La operación detallada es muy importante, ya que una ligera inclinación de los prismas durante las experiencias, aunque no sea tan importante como para que la luz deje de pasar por los espejos, podría producir cambios en los valores obtenidos de la radiancia.

Una vez que los componentes ópticos fueron alineados, como acabamos de explicar, se procedió a la puesta a punto de los sistemas que controlan las partes mecánicas y eléctricas del dispositivo. Estas consisten, fundamentalmente, en tres motores paso a paso que permiten el control de cada una de las cuñas grises situadas ante los prismas T_1 , T_2 y T_3 así como, por otro lado, el dispositivo generador de impulsos eléctricos, que actúa sobre el sistema de obturación.

Los motores paso a paso fueron expresamente montados en los talleres de nuestro Departamento y consisten, esencialmente, en un rotor con imanes de manera que al llegar un impulso eléctrico, el motor rota, en una determinada dirección, un determinado "paso". Estos pasos son siempre iguales, independientemente del impulso eléctrico recibido. Una de las ventajas que presentan estos motores es que reducen la inercia mecánica que pudiera producirse.

El dispositivo generador de impulsos eléctricos, que actúa sobre el obturador, es esencialmente un temporizador que ha sido previamente calibrado empleando un reloj GRIFFIN-GEORGE TKL-900V de alta sensibilidad, al cual va acoplada una célula fotoeléctrica. Con esta medida conocemos el tiempo de exposición real y el de adaptación a la oscuridad entre presentaciones sucesivas, habida cuenta del pequeño error que puede derivarse de

las inercias mecánicas del sistema obturador.

El control de los motores paso a paso y el del dispositivo de regulación del tiempo de obturación se realiza mediante un dispositivo informático, consistente en un ordenador básico, para el que se diseñaron programas adecuados de control, en lenguaje BASIC, así como interfaces apropiados que permiten actuar sobre aquéllos.

Una vez conectado el dispositivo de control de los motores paso a paso hubo que buscar un sistema de tracción de las cuñas grises lo menos elástico posible para que no absorbiera los pulsos de los motores en ninguna de las posiciones. En nuestras experiencias se utilizaron, para ello, unas cuerdas de tracción de hilo apropiado y lastres o contrapesos para tensarlos. Se realizaron pruebas para comprobar que todas las posiciones indicadas por el ordenador se correspondían siempre con las mismas posiciones de las cuñas, para cada una de las mismas, lográndose dicho objetivo gracias a las características del montaje y componentes

En nuestro interés por conseguir constancia en la reproducción de los estímulos generados, la fuente luminosa se encuentra alimentada mediante un estabilizador marca BOAR-1000-2ST transistorizado con una precisión de regulación del 0.3% ; margen de tensión de entrada 190-269 V y margen de frecuencia de 45-55 Hz. Este mismo estabilizador de la fuente se utilizó también para alimentar todos los instrumentos radiométricos de medida que usamos en la realización de los calibrados y que posteriormente indicaremos. Tanto la lámpara M del dispositivo como la lámpara auxiliar que empleamos para iluminar las muestras, cuando éste actúa como colorímetro industrial, fueron inicialmente envejecidas aproximadamente durante 20 horas.

También, con el fin de que las experiencias se desarrollasen a una temperatura estacionaria, así como para lograr una mayor duración de las lámparas, se dispusieron turboventiladores refrigerantes próximos a ellas en el dispositivo experimental.

El control de otros efectos menores, y en principio difíciles de prever, viene garantizado mediante la realización de calibrados periódicos y frecuentes; de este modo se asegura que los valores de las radiancias utilizados en los cálculos posteriores coincidan con los valores reales que se observan, dentro del error instrumental del dispositivo.

3.3.- DISPOSITIVO PARA LA OBSERVACION DE MUESTRAS. DESCRIPCION GENERAL.

3.3.1.- INTRODUCCION.

La utilización de colorímetros visuales, como el antes descrito, permite generar una amplia variedad de estímulos de color, por lo que han sido tradicionalmente muy empleados en los trabajos de Colorimetría Diferencial frente a los que utilizan objetos de color, en los que la obtención y reproducción de muchas muestras es más difícil de conseguir. Cabe, sin embargo, destacar que los objetos de color tienen un gran interés en la práctica industrial e interesa comparar los resultados obtenidos con ellos y con el empleo de colorímetros visuales.

La principal diferencia que presentan, quizá, las experiencias realizadas con objetos de color radica en que, mientras que en los colorímetros visuales usamos luces dirigidas producidas por

la fusión de primarios, en el caso de los objetos usamos luces reflejadas difusamente por superficies. Dicha luz reflejada depende, en general, de la fuente que ilumina, de la geometría de iluminación/observación y de las propiedades del propio objeto, por lo que este tipo de experiencias requiere de dispositivos que, si bien no son complejos, sí deben tener en cuenta las diferentes condiciones antes descritas. Además, en general, las experiencias de discriminación cromática requieren de un número elevado de estímulos muy similares y bien distribuidos alrededor de uno de referencia situados en muy diversas direcciones del espacio de color, lo que, en el caso de trabajar con objetos de color es difícil de conseguir por las limitaciones existentes en la elección de pigmentos colorantes y modo de elaboración.

En los siguientes apartados hacemos una descripción detallada del dispositivo desarrollado para la observación de muestras, así como de su puesta a punto, en la que haremos especial referencia a la elaboración de aquellas muestras con las que posteriormente trabajamos.

3.3.2.- DESCRIPCION GENERAL Y PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO DE ILUMINACION/OBSERVACION.

En lo que se refiere a nuestras experiencias realizadas con objetos de color, el dispositivo utilizado consiste, por una parte, en un sistema apropiado para la iluminación/observación de muestras y, por otra, en la preparación de conjuntos adecuados de las mismas, para cada uno de los estímulos a estudiar, con variaciones simultáneas de luminancia y de cromaticidad y con cromaticidades distribuidas a lo largo de distintas direcciones del diagrama cromático.

El dispositivo de iluminación/observación fue diseñado y realizado en nuestros laboratorios; un esquema general del mismo aparece en la figura 3.2. Como puede observarse, este dispositivo es más sencillo que el colorímetro de estímulos espectrales antes descrito, ya que los estímulos no son generados por el propio dispositivo, sino que son conjuntos de muestras que en principio pueden ser de diferente material y elaboración (textiles tintados, papeles coloreados etc.), siendo elaboradas independientemente del dispositivo de iluminación/observación.

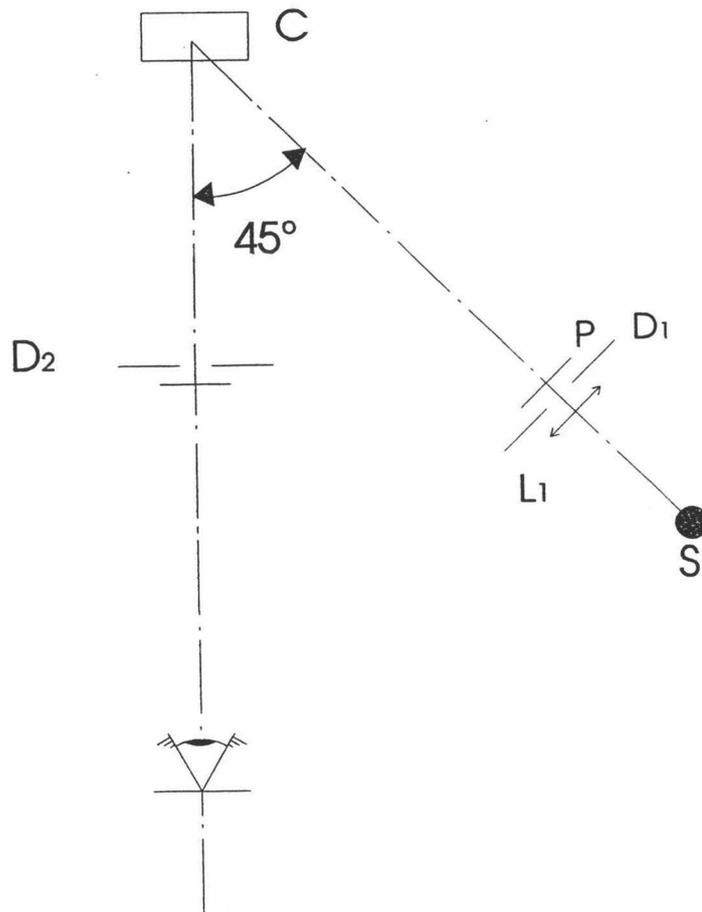


Figura 3.2.- Esquema del dispositivo de iluminación/observación de muestras.

En el dispositivo usado podemos considerar tres partes fundamentales: a) sistema de iluminación de muestras; b) cajetín para la colocación de éstas; c) sistema de observación, que nos permite seleccionar el tamaño del campo y la regulación de los tiempos de exposición de los estímulos, entre otras variables.

El sistema de iluminación consiste en una lámpara halógena, S, (OSRAM HALOSTAR, 150 W, 220-230 V) alimentada a través de un estabilizador de tensión regulable BOAR-1000-2ST. La distribución espectral de esta fuente luminosa es similar a la del iluminante A. La lámpara halógena está situada en un soporte metálico y sobre una plataforma con un brazo que puede girar, lo cual, permite seleccionar el ángulo de iluminación de las muestras. Se ha procurado que la dirección de iluminación/observación corresponda exactamente a una de las geometrías propuestas por la CIE (CIE, 1986); concretamente la $45^{\circ}/0^{\circ}$, donde se admite un error de $\pm 5^{\circ}$.

Es muy importante usar una geometría bien definida, pues afecta significativamente a las experiencias aún cuando las muestras, como en nuestro caso, no sean goniocromáticas (Lozano, 1978). Para garantizar el mismo ángulo de iluminación para toda la superficie a observar, detrás de la lámpara se coloca un doblete acromático L_1 situado de manera que la luz incide a 45° sobre el cajetín de sujeción de muestras. Por último, disponemos de un iris D_1 con un sistema de sujeción para la colocación de filtros P por si fueran necesarios para variar el nivel de luminancia. Los dispositivos de sujeción de la lámpara, lente e iris van fijados a una mesa mediante tornillos de presión.

Para situar las muestras se ha elaborado un cajetín C con una base de forma rectangular de unos 0.5 mm de espesor y unas ranuras de 0.3 mm de grosor, suficiente para que las muestras

queden perfectamente acopladas. Las ranuras permiten tanto la perfecta sujeción de los pares de muestras, como el fácil cambio de éstas a lo largo de las sesiones experimentales.

Por otra parte, para poder realizar experiencias en las que las muestras sean observadas con diferentes campos circundantes, el cajetín dispone de un sistema de sujeción para colocar "paneles", que, rodeando las muestras, realizan esta función. En nuestro caso, fueron usados campos circundantes grises y negros, similares a los empleados en trabajos de otros autores (Witt, 1983; Strocka, 85; Indow, 1992).

A continuación del cajetín y a una distancia de 5 cm, se sitúa un diafragma cuadrado D_2 , que permite obtener el tamaño y tipo de campo deseados. Este diafragma lleva incorporado un obturador electromagnético. El obturador consiste en una placa negra soldada a una varilla de hierro que penetra en el interior de una bobina, la cual actúa como electroimán bajo el control de un generador de pulsos eléctricos. Al igual que en el colorímetro tipo Wright, con este mecanismo se puede controlar tanto la duración de los pulsos como el intervalo de presentación entre ellos; de esta manera, controlamos el tiempo de observación de los estímulos y, también, el tiempo entre presentaciones sucesivas, durante el cual un experimentador puede actuar y colocar o intercambiar en el cajetín el par de muestras que va a ser observado.

Finalmente, en el extremo del banco óptico donde van colocados el diafragma y el obturador, se sitúa una mentonera, con posible desplazamiento vertical y horizontal, para que cada observador pueda acoplarse al eje óptico del sistema, fijándose esta posición durante todas las experiencias realizadas por el mismo.

El sistema de iluminación se encuentra aislado del resto del dispositivo mediante carcasas construidas a tal efecto. Igualmente, el observador se sitúa en el interior de una cabina que le aísla respecto al resto del dispositivo y de esta manera observa simplemente los estímulos que le son presentados, libre de la acción de posibles luces parásitas y ajeno a las actuaciones del experimentador.

Antes de comenzar las medidas, se llevó a cabo la puesta a punto del dispositivo experimental mediante el montaje de los componentes del dispositivo de observación y la elaboración de muestras, descrita en el próximo apartado.

La colocación de los diferentes componentes del dispositivo se hace según las condiciones de observación e iluminación elegidas. La CIE (CIE, 1986) recomienda entre otras, como hemos mencionado, la adopción de las geometrías de iluminación-visión, $0/45^\circ$ o $45/0^\circ$; esta última fue la elegida para el montaje del dispositivo, figura 3.2. Una vez elegida la geometría, se procedió a la colocación de los componentes sobre bancos ópticos y, a continuación, mediante un láser, a su alineación.

El dispositivo de iluminación se encuentra alimentado a través de un estabilizador de tensión regulable BOAR-1000-2ST al que nos hemos referido con anterioridad. La lámpara fue envejecida, aproximadamente 20 horas, a fin de conseguir que la emisión de la misma fuese más estable a lo largo de todas las experiencias.

También, y con el objeto de que las experiencias se desarrollasen a temperatura constante, así como para una mejor conservación de las lámparas, se colocó un turboventilador dentro de las carcasas que las encierran; de este modo podemos controlar la temperatura en su interior.

El dispositivo generador de impulsos eléctricos que actúa sobre el obturador es, esencialmente, un temporizador que ha sido previamente calibrado con un reloj GRIFFIN-GEORGE TKL-900V de alta sensibilidad, al cual se acopla una célula fotoeléctrica. Con esta medida, al igual que en el anterior dispositivo experimental, conocemos el tiempo de exposición real y el de adaptación a la oscuridad entre presentaciones sucesivas.

3.3.3.- PREPARACION DE MUESTRAS.

Como se ha indicado con anterioridad, los estímulos para este tipo de experiencias no son generados por el dispositivo sino que son conjuntos de muestras coloreadas con cromaticidades y luminancias no muy diferentes a la considerada como referencia. Se consideran como estímulos de referencia cada uno de los 5 centros recomendados por la CIE, (Robertson, 1978). En nuestras experiencias utilizamos muestras que han sido obtenidas en nuestro laboratorio utilizando pinturas acrílicas sobre papel blanco.

Para la obtención de los cinco conjuntos de muestras, se han seguido los siguientes pasos: en primer lugar, buscar cada una de las cinco muestras standard o de referencia cuyas coordenadas de cromaticidad y luminancia coincidan, lo más exactamente posible, con las de los cinco estímulos que propone la CIE. Para ello, utilizamos como guía un amplio muestrario desarrollado previamente en nuestro laboratorio (Jiménez, 1994), con fines diversos y que cuenta con más de 2900 muestras distribuidas por muy distintas zonas del espacio de color. Este muestrario tiene la ventaja de que todas las muestras que lo forman están generadas mediante la mezcla sustractiva (Albers, 1979; Koppers,

1978) de sucesivas parejas de dos pigmentos básicos (Jiménez, 1986) mezclados en diferentes proporciones, lo que proporciona amplias sucesiones de muestras aunque con grandes diferencias de color entre ellas, en algunos casos, superiores a 10 unidades CIELAB. Cada una de estas muestras tiene una etiqueta con dos referencias de identificación: una de ellas identifica, mediante iniciales, los colores básicos utilizados y la otra, mediante un número, la proporción de uno de los pigmentos frente a la cantidad empleada del otro. De todas las muestras, por tanto, se conoce su composición y, puesto que con anterioridad se habían medido sus reflectancias, también es posible conocer sus coordenadas de cromaticidad para un iluminante dado. De esta manera es posible conocer a priori, aproximadamente, cuáles de las muestras del atlas pueden ser útiles a nuestros propósitos (obtención de los 5 centros recomendados por la CIE).

En segundo lugar, para obtener definitivamente la muestra standard, partiendo de la muestra seleccionada del atlas, se mezclan los 2 pigmentos básicos que la componen con una pequeña proporción de otros pigmentos, generando de esta forma nuevas muestras cuyas coordenadas se aproximan aún más a las buscadas. Después del secado se midieron sus coordenadas de cromaticidad y de todas las obtenidas se seleccionó aquella que se encontraba más próxima a la deseada. Este proceso se realizó para las 5 muestras standard o patrón.

Finalmente, y en tercer lugar, se han de obtener las muestras alrededor de la muestra standard que utilizaremos para comparar con aquella y evaluar el umbral diferencial de color.

Partiendo de la muestra elegida como referencia para cada estímulo, se realizaron nuevas muestras, aproximadamente, del mismo color y tales que las diferencias entre éstas y la standard

sean de diferentes tamaños, siempre muy inferiores a los del muestrario inicial, y que a la vez estén distribuidas en diferentes direcciones del espacio de color. Para ello, se mezclan las pinturas que componen la standard con un 5% aproximadamente de otras tonalidades, o también, aumentando y disminuyendo en pequeñas proporciones los colores de partida.

Todas las muestras se realizaron con pinturas acrílicas marca Vallejo sobre papel blanco Geler normal y pinceles planos de cerda fina, al igual que se hizo en el muestrario inicial. Las muestras que componen cada uno de los 5 conjuntos se elaboraron con igual tipo de pinturas colorantes para evitar problemas de metamerismo (Robertson, 1978).

Todas las muestras preparadas eran de forma rectangular, con un tamaño de (4 x 3) cm, aunque después, el diafragma limita el tamaño a observar de éstas y el tamaño del campo circundante. Las muestras disponen de una pestaña para cogerlas adecuadamente sin deteriorarlas y para asignarles su código de clasificación.

Finalmente, es importante indicar que se realizaron una media de 150 muestras para cada uno de los estímulos, de las cuales, se eliminaron aquéllas que presentaban algún tipo de irregularidad o heterogeneidad. Después de la medida de cada una de ellas, se seleccionaron aproximadamente 50 por estímulo, buscando que éstas estén distribuidas en todas las direcciones del espacio de color y que el número de muestras elegido no sea tan alto que prolongue innecesariamente la realización de las experiencias.

3.4.- BIBLIOGRAFIA.

ALBERS, J.; "La interacción del color". Alianza Editorial. (1979).

CRUZ, A.; Determinación de las funciones de mezcla de colores para observadores españoles. C.S.I.C. Tesis Doctoral. Madrid (1967).

CIE. Colorimetry, 2nd ed, publ. N° 15-2, Central Bureau of CIE, Vienna, (1986).

INDOW, T., ROBERTSON, A.R., VON GRANAU, M., FIELDER, G.M.; "Discrimination ellipsoids of aperture and simulated surface colors by matching and paired comparison", Color Res. Appl., 17, 6-22 (1992).

JIMENEZ, E.; El color desde su naturaleza física y apreciación fisiológica a su expresión psicológica y plástica. Memoria de Licenciatura. Sevilla, 1986.

JIMENEZ, E.; El color y su expresión plástica: estudio de la mezcla de pinturas acrílicas de forma cubriente y homogénea. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Granada, 1994.

KUPPERS, H.; Fundamentos de la teoría de los colores. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1978.

LOZANO, R.D.; El color y su medición. Americalee. Buenos Aires. (1a ed.1978).

ROBERTSON, A. R.; "CIE guidelines for coordinated research on

colour-difference evaluation", *Color Res. Appl.*, **3**, 149-151 (1978).

STROCKA, D., BROCKES, A., PAFFHAUSEN, W.; Influence of experimental parameters on the evaluation of color-difference ellipsoids", *Color Res. Appl.*, **8**, 169-175 (1983).

WITT, K.; DORING G.; "Parametric variations in a thresholds color-difference for green painted samples", *Color Res. Appl.*, **8**, 153-163 (1983).

WRIGHT, W.D.; "A trichromatic colorimeter with spectral primaries", *Trans. Opt. Soc.*, **29**, 225-242, (1927-1928).

CAPITULO 4.

**CALIBRADO DEL DISPOSITIVO
EXPERIMENTAL.**

CAPITULO 4.

CALIBRADO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

4.1.- INTRODUCCION.

Una vez descritos los dispositivos experimentales empleados, así como su puesta a punto, dedicaremos este capítulo al calibrado de los mismos; es decir, la descripción de los instrumentos y métodos necesarios para conocer los valores triestímulo (o las coordenadas de cromaticidad y luminancia) de los estímulos analizados con sus correspondientes cotas de error. A partir de dichos valores triestímulo (empleando también los juicios del observador) podemos obtener los umbrales de discriminación de color, objetivo esencial en este trabajo.

Con este fin, se ha dispuesto un sistema de calibrado del colorímetro de estímulos espectrales que permite conocer la radiancia emergente en cada una de las posiciones de las cuñas de los prismas. Igualmente, mediante programas adecuados, podemos calcular también las radiancias (posiciones de las cuñas)

necesarias para obtener los estímulos deseados en nuestras experiencias, o las de los estímulos variables a comparar con aquéllos. El procedimiento de calibrado seguido para el colorímetro de estímulos espectrales corresponde básicamente al indicado en trabajos previos (A. Cruz, 1967).

La segunda parte de este capítulo se dedicará al método empleado para la determinación de las coordenadas de cromaticidad y luminancia de lo que hemos denominado objetos. Es conocido que la información visual que obtenemos de los objetos no transparentes que nos rodean, se extrae de la luz reflejada en forma difusa por los mismos, así como de la luz reflejada por los demás objetos situados en su entorno y de las propias características del observador (Wyszecki, 1982). Aunque el proceso es ciertamente complejo, podemos decir que la composición espectral de la luz reflejada por los objetos depende básicamente de las propiedades de reflectancia espectral de las superficies y de la distribución espectral del iluminante. Por tanto, el conocimiento de la reflectancia de los objetos y de la emisión del iluminante resulta indispensable para el cálculo de las coordenadas de cromaticidad y luminancia de los mismos, las que, en nuestras experiencias, son como ya hemos indicado, muestras elaboradas previamente.

4.2.- CALIBRADO DEL COLORIMETRO VISUAL.

4.2.1.- CALIBRADO EN LONGITUD DE ONDA DE LAS ESCALAS.

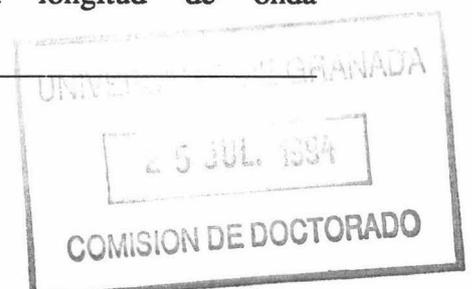
El calibrado de las escalas de las guías donde se sitúan los prismas T_5 , T_6 y T_7 se hace en función de algunas longitudes de onda conocidas. Como es usual, utilizamos distintas lámparas espectrales (mercurio, sodio, helio y cadmio), además de un láser He-Ne, con el fin de obtener líneas suficientemente intensas en

distintas zonas del espectro.

Una vez colocada la correspondiente lámpara espectral delante de la rendija de entrada al dispositivo, situamos un microscopio enfocado a la pupila de salida del aparato; al mover el prisma T_5 a lo largo de su deslizadera se verán pasar sucesivamente las rayas espectrales por dicha pupila. Cuando la imagen de la rendija de entrada dada para cada una de estas líneas espectrales se encuentre en el centro de la pupila, sabremos que la posición que se lee en la escala corresponde a la longitud de onda reflejada en ese momento por el prisma.

Empleamos este procedimiento para un total de 18 líneas espectrales, con lo que se obtiene un número suficiente de datos para realizar la curva de calibrado. La gráfica 4.1 muestra la curva obtenida para la escala asociada al prisma T_5 . Conocida ésta, podemos seleccionar las longitudes de onda reflejadas por este prisma sin más que buscar las posiciones adecuadas del mismo a lo largo de su guía o deslizadera. Un procedimiento análogo se utiliza para la escala de los prismas T_6 y T_7 , sólo que ahora necesitamos el prisma T_5 para arrastrar a éstos.

Para calibrar las escalas donde van montados los prismas T_1 , T_2 y T_3 que reflejan el espectro a partir del cual se generan los tres estímulos denominados en la bibliografía como estímulos primarios (Wright, 1927; Cruz, 1967), aunque se podía haber utilizado el mismo método antes descrito, consideramos más cómodo y conveniente seguir la técnica siguiente: colocamos un espectroscopio con la rendija de entrada muy abierta en la pupila de salida del aparato (ésta actúa ahora como rendija de entrada del espectroscopio), a través de él se observan unas manchas ligeramente ovaladas correspondientes a los colores seleccionados por los prismas. Moviendo el prisma T_5 a lo largo de la guía se selecciona, usando la curva de calibrado, la longitud de onda



correspondiente a uno de los primarios y en el espectroscopio aparece la mancha del color correspondiente a las longitudes de onda del pequeño ancho de banda de este primario; posteriormente, se mueve el prisma del primario a lo largo de la deslizadera hasta que se vean dos imágenes de colores iguales (una correspondiente a la luz reflejada por el prisma T_5 y otra al primario), ligeramente desplazadas una respecto de la otra. Mediante un movimiento por la guía del prisma y pivotando de derecha a izquierda se va desplazando la imagen de la mancha, hasta superponerse con la del T_5 . En este momento la lectura de la escala nos dará la posición del primario.

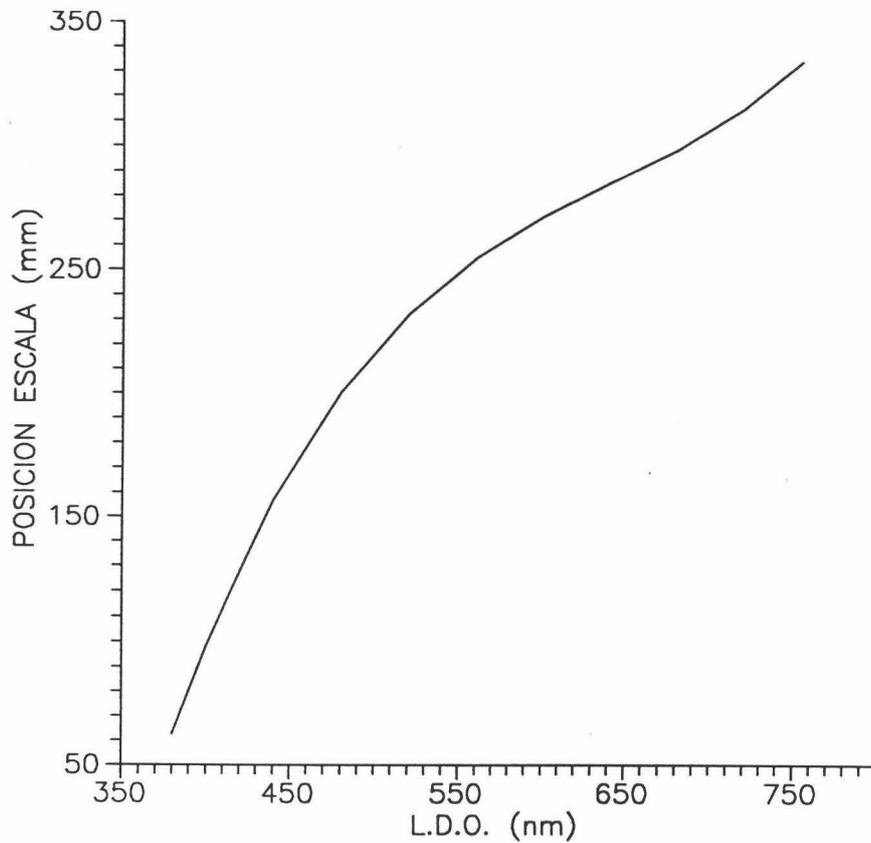


Figura 4.1.- Curva de calibrado en longitud de onda de la escala del prisma T_5 .

Esta operación se repitió para los dos prismas restantes, hasta conseguir los tres estímulos primarios deseados; en nuestras experiencias utilizamos como primarios las tres mismas longitudes de onda que empleara Wright (Wright 1927): 460 , 530 y 650 nm.

4.2.2.- CALIBRADO RADIOMETRICO DE CUÑAS GRISES Y FILTROS.

Una vez se finalizó el calibrado de las escalas de los primarios (T_1 , T_2 y T_3) y de los prismas (T_5 , T_6 y T_7) se realizó el calibrado radiométrico del dispositivo. Empleamos para ello un fotodiodo HUV-4000B suministrado por EG&G, con una etapa de alimentación para el detector de ± 15 V. La señal obtenida del fotodiodo se recoge en un multímetro digital RACAL-DANA-4003 de resolución $1\mu\text{V}$, precisión 0.04% y $10\text{ M}\Omega$ de impedancia de entrada en continua. De esta forma conocemos las tensiones de salida del fotodetector.

El fotodiodo de silicio lleva acoplado un amplificador operacional para que puedan ser apreciadas las tensiones de salida, ya que en algunos casos los impulsos luminosos que excitan el fotodiodo son muy pequeños. La elección de este fotodiodo frente a otros dispositivos de responsividad alta, tales como fotomultiplicadores, viene dada por las ventajas del mismo en estabilidad, resistencia ante vibraciones, así como menores dimensiones y peso. Además, el tipo de fotodetector utilizado ofrece óptimas características de estabilidad, sensibilidad y baja relación señal-ruido, en relación a las medidas colorimétricas.

Evidentemente, la respuesta que registramos en el voltímetro digital no es una medida directa de la radiancia espectral del

estímulo. En concreto, es preciso tener en cuenta la responsividad espectral absoluta del fotodiodo R_λ . La radiancia espectral es proporcional a Le_λ :

$$Le_\lambda = \frac{M_\lambda}{R_\lambda}$$

donde, M_λ es la medida leída en el voltímetro para la longitud de onda λ correspondiente.

La figura 4.2 representa la curva de responsividad espectral absoluta del fotodiodo, conforme al calibrado del mismo realizado en el Servicio de Radiometría del Instituto de Optica "Daza de Valdés" del C.S.I.C.

Como ya indicamos, para asegurar la constancia de los estímulos de color generados por nuestro colorímetro disponemos de un estabilizador de tensión regulable BOART 1000-2ST transistorizado y con una precisión de regulación del 0.3 % con una potencia de salida de 2000 VA. Tanto la lámpara del colorímetro como los dispositivos de calibrado se mantuvieron a una tensión constante 219 V, empleando este estabilizador. Dicha tensión se comprobaba, además, con un multímetro digital Goldstar DM-6133, que tiene un error en la tensión de salida 0.05 V, antes de cada sesión experimental o de calibrado.

El fotodetector va encerrado en una carcasa hermética, abierta solamente por un orificio que encaja perfectamente en la pupila de salida del aparato. De esta manera sólo se recoge la luz proveniente de los prismas evitando luces parásitas y asegurándose un calibrado correcto y fiable.

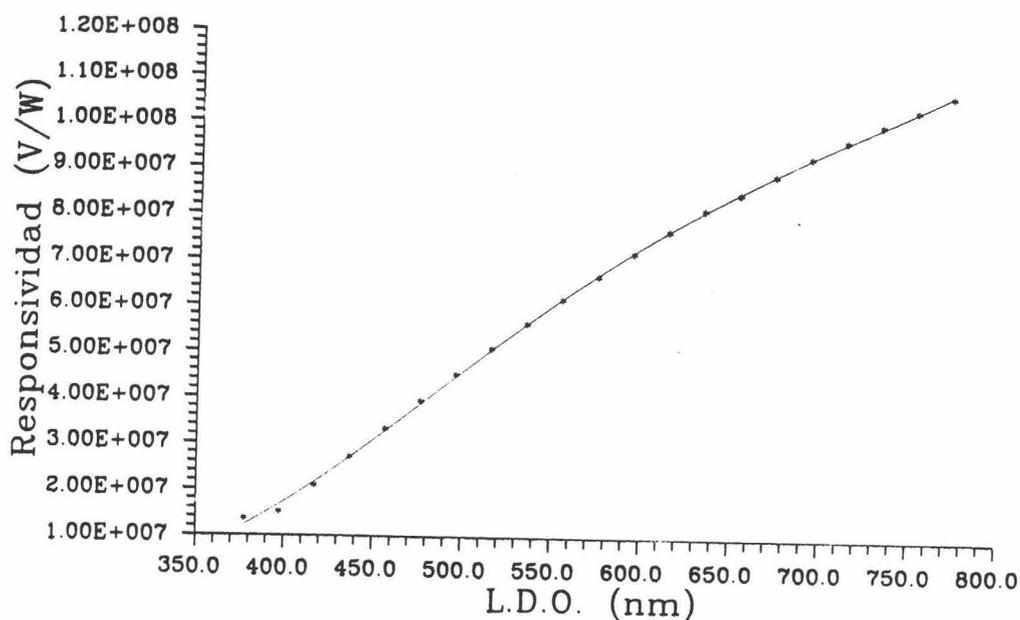


Figura 4.2.- Responsividad espectral del fotodiodo HUV-4000B.

Una vez que se acopla el fotodetector a la pupila de salida del colorímetro, ajustamos la tensión a 219 V, se cierran las trampillas correspondientes a dos de los primarios y se va desplazando la cuña correspondiente al restante mediante el motor paso a paso. Se tomaron los valores indicados por el voltímetro para cada una de las posiciones de las cuñas, aproximadamente 220 posiciones para cada cuña. Seguidamente esta operación se repitió para las dos cuñas restantes.

Finalizada esta operación de calibrado de los primarios, se procede al calibrado de los filtros grises que se intercalan delante de los prismas T_5 , T_6 y T_7 . La finalidad de estos filtros es análoga a la de las cuñas grises situadas ante los prismas T_1 , T_2 y T_3 ; concretamente disponemos, como ya se dijo, de un juego

de 10 filtros cada uno con densidades ópticas que oscilan entre 0.1 y 1.0. Se coloca el prisma T_5 en la posición correspondiente a los 400 nm y se realiza un barrido por todo el espectro hasta los 700 nm en intervalos de 5 nm poniendo en cada una de estas posiciones, cada uno de los 10 filtros grises para medir la respuesta del fotodetector. Esta misma operación se realizó también para el prisma sin utilizar ninguno de los filtros.

La operación se repitió para los prismas restantes, T_6 y T_7 ; se obtuvo así la respuesta del voltímetro para cada longitud de onda con la que posteriormente trabajaríamos.

Con el fin de controlar posibles efectos difíciles de prever que pudieran influir en el valor de las radiancias obtenidas (efectos de foco calorífico, problemas de inercia en los motores paso a paso, etc.), se realizaron calibrados periódicos y frecuentes; de este modo se garantiza que los valores de las radiancias utilizadas en los cálculos posteriores coincidan con los valores reales que se observan.

Como resultado del calibrado podemos calcular los valores triestímulo (X,Y,Z) o bien, las coordenadas (x,y,Y) de un estímulo, para lo que empleamos las funciones de mezcla del Observador Patrón CIE-1931, de acuerdo con el tamaño de campo que utilizamos. En cuanto al error en los valores de estas medidas, hemos estimado el error asociado a los instrumentos de medida y el asociado al considerar el pequeño ancho de banda del haz reflejado por los prismas en el cálculo de los valores de la radiancia. Con objeto de conocer su alcance se calcularon los intervalos que definen la pureza de los estímulos que en nuestro caso son de 1 a 7 nm siendo los intervalos más pequeños para las longitudes de onda corta aumentando para las longitudes de onda largas. Una estimación global aproximada puede ser de un error de 0.005 para los valores de las coordenadas y de 5% para los de la

luminancia.

Los resultados de los distintos calibrados revelan que las coordenadas de los estímulos sufren variaciones del orden de 3 unidades en la tercera cifra decimal. Respecto a la luminancia se observa una variación del orden del 5% en los casos más desfavorables.

Por otra parte, los errores accidentales los hemos considerado sujetos a la propagación del error en colorimetría, descrita por Nimeroff, 1957 y Wyszecki, 1959, lo que, por otro lado, fundamenta el cálculo estadístico del elipsoide de discriminación cromática representativo del umbral.

4.3.- CALIBRADO DE LAS MUESTRAS.

Una vez que se realizó la puesta a punto de los componentes del dispositivo de iluminación/observación de muestras, se procedió al calibrado de las mismas; es decir, la medida de sus valores triestímulo o de sus coordenadas de cromaticidad y luminancia mediante un dispositivo apropiado.

En el caso de los objetos de color para los que la luz que reflejan es parte de la luz que les llega, no se puede asignar a priori un color sin especificar antes la distribución espectral de la energía radiante $E(\lambda)$ que incide sobre ellos. En nuestras experiencias es una lámpara halógena, cuya curva de distribución espectral se muestra en la figura 4.3.

El color de los objetos no sólo queda caracterizado por el iluminante, sino que, como hemos dicho con anterioridad, depende también de las propiedades intrínsecas del propio objeto; de su capacidad de modificar la distribución espectral de la luz que

recibe. Lo que va a caracterizar las propiedades moduladoras del mismo va a ser el factor de reflectancia espectral, $\beta(\lambda)$, del objeto. Este factor se define como la razón entre la radiancia $L_{\lambda}d\lambda$ del objeto y la radiancia $L_{o\lambda}d\lambda$ del difusor perfecto, idénticamente irradiado (Wyszecki, 1982). $\beta(\lambda)$ es también, en general, una función de las direcciones en las que el objeto es iluminado y visto; en nuestras experiencias utilizamos la geometría $45^{\circ}/0^{\circ}$ recomendada por la CIE, como veíamos en el capítulo anterior. Usamos esa geometría para iluminar/observar y también para iluminar/calibrar, así el calibrado se corresponde con lo que se observa, como es de desear.

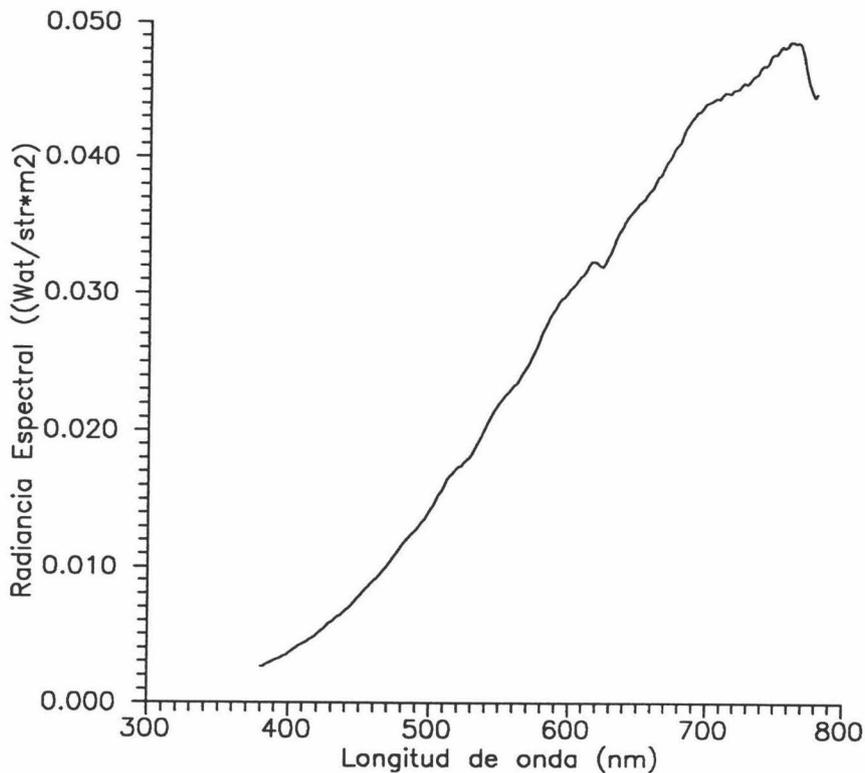


Figura 4.3.- Curva de emisión espectral de la lámpara empleada.

Una vez conocido el factor de reflectancia espectral del objeto para todas las longitudes de onda, así como la irradiancia

que recibe, $E(\lambda)$, es inmediato calcular los valores triestímulo (Martín, 1973) y por tanto, las coordenadas de cromaticidad y luminancia del estímulo sin más que usar las funciones de mezcla del Observador Patrón adecuado.

En lugar de realizar estas medidas de $E(\lambda)$ y $\beta(\lambda)$ con un espectrofotómetro hemos preferido calibrar nuestras muestras directamente con un espectrorradiómetro SpectraScan modelo PR-704/pc de Photo Research, dotado de software apropiado, cuyo esquema general damos en la figura 4.4. Este instrumento consta de un cabezal óptico con espejo tipo Pritchard que dirige la radiación óptica incidente hacia una red de difracción y hacia el ocular. A continuación de la red de difracción se halla una matriz lineal de fotodiodos detectores en una cámara. Esta matriz tiene 256 elementos o pixels, enfriados termoeléctricamente a 0°C en la cámara, sellada para eliminar virtualmente la contaminación por el polvo y las fluctuaciones de temperatura. Además, está presurizada con nitrógeno para prevenir la condensación. Aproximadamente 245 de los pixels son los responsables de obtener las medidas y los restantes no se usan. Teniendo en cuenta el rango del espectro de medida (380-780 nm), cada pixel mide en incrementos de 1.6 nm, aunque los resultados se expresan en incrementos de 2 nm por conveniencia. Antes de realizar la medición, cada detector se carga eléctricamente, dicha carga disminuye al incidir radiación sobre el elemento y se traduce en una señal analógica que se transmite a la tarjeta controladora instalada en el ordenador, a través del cable que conecta el espectrorradiómetro con él. Un convertidor analógico digital de 12 bits en la tarjeta transforma la señal analógica en su equivalente digital que se usa para realizar los cálculos adecuados.

En lo que se refiere al software que controla al espectrorradiómetro se dispone del programa Spectra-View 2.10

desarrollado por Photo-Research y que incluye, entre otras opciones, las siguientes:

-Cálculo de Luminancia, Iluminancia, Radiancia, Irradiancia, Temperatura de color.

-Valores triestímulo X,Y,Z, coordenadas de cromaticidad en los sistemas CIE 1931; CIE 1960; CIE 1976 (L^*,a^*,b^*) y CIE 1976 (L^*,u^*,v^*), longitud de onda dominante y pureza colorimétrica.

-Diferencias de color en los sistemas CIELUV y CIELAB.

-Cálculo de reflectancias y transmitancias fotométricas o radiométricas.

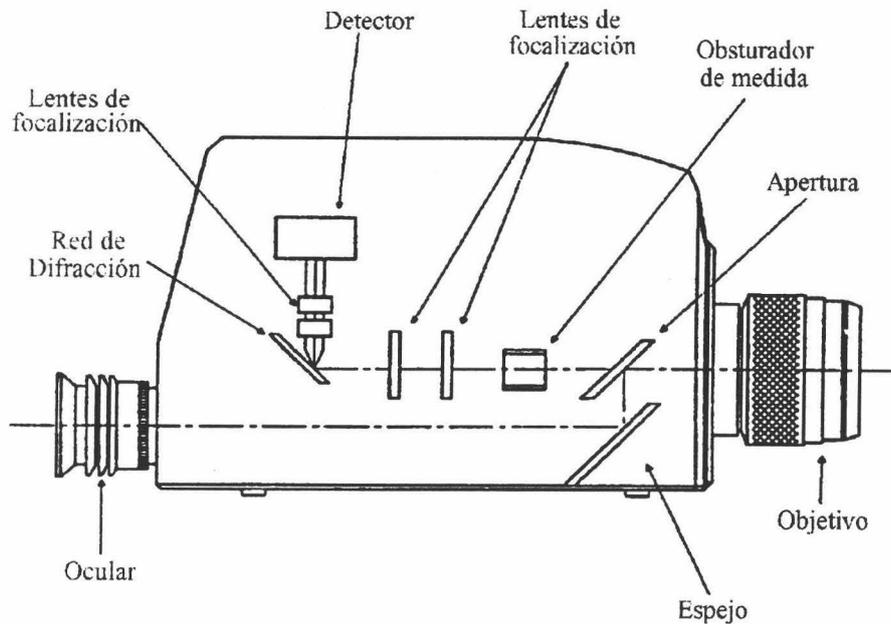


Figura 4.4.- Esquema general del espectrorradiómetro PR-704/pc.

Para la realización de las medidas, el espectrorradiómetro se situó sobre un trípode a una distancia, aproximada de 80 cm de las muestras y perpendicular al plano donde se sitúa el cajetín de colocación de éstas. Dicha posición es muy próxima a la que ocupaba el observador en las sesiones experimentales. El monitor que mostraba los resultados obtenidos se orientó de forma tal que la luz del mismo no afectara a la toma de medidas.

El espectrorradiómetro trabajó con una apertura de 1° , midiendo los valores triestímulo en el sistema CIE 1931 utilizando para ello el Observador Patrón CIE 1931, recomendado para campos de hasta 4° .

En cuanto al error asociado al espectrorradiómetro empleado, el fabricante indica que, en el caso de medidas fotométricas absolutas, es menor del 4.1% y, si son relativas, del 1 al 2%. Para las coordenadas de cromaticidad x,y tiene un error de ± 0.003 .

Las medidas se realizaron enfocando el espectrorradiómetro en distintos puntos de la muestra y comprobando su homogeneidad dentro de nuestro error instrumental. Antes de la realización de las medidas, el espectrorradiómetro estaba encendido durante el tiempo requerido para su estabilización. Obviamente, durante las sesiones de medidas la habitación donde se hallaba el dispositivo permanecía oscura, siendo las muestras iluminadas únicamente por la lámpara del dispositivo, tal como ocurrirá en las sesiones experimentales realizadas con observadores.

Cuando las muestras se encontraban perfectamente secas, aproximadamente una semana desde su elaboración, se midieron sus coordenadas y luminancia, y la medida se repitió varias veces durante el transcurso de las experiencias, comprobándose su estabilidad pues las diferencias encontradas no eran superiores,

en ningún caso, al error del instrumento.

Cabe recordar, que tanto el equipo de medida como la fuente de iluminación de las muestras, van conectados a un estabilizador de tensión que protege de las variaciones de la misma en la red de suministro eléctrico y nos permite, por una parte, obtener un calibrado fiable y, por otra, controlar que todas los conjuntos de muestras sean medidos en idénticas condiciones.

Otro aspecto a tener en cuenta es el nivel de iluminancia necesario para realizar una buena tarea visual. Como pauta general puede decirse que muestras con una iluminancia de 1000 lux sería el mínimo recomendable, aunque para la observación de muestras oscuras es conveniente duplicar este nivel (Lozano, 1978). Utilizamos también el espectrorradiómetro para la medida de la iluminancia, encontrando valores en torno a 1900 lux para los diferentes conjuntos de muestras que empleamos.

La medida de las coordenadas de cromaticidad y luminancia de todas las muestras realizadas, nos permitió seleccionar aquellas que posteriormente utilizamos en las sesiones experimentales y para el cálculo de umbrales de color con este modo de observación. Esta selección es muy importante puesto que se desea estudiar estímulos en torno a uno dado (en nuestro caso, cada uno de los cinco centros CIE) considerando, en la medida de lo posible, muy diferentes direcciones en el espacio de color, con variaciones tanto de luminancia como de cromaticidad simultáneas.

Por último, señalar que la medida de las coordenadas de cromaticidad de las muestras también se repitió una vez que finalizaron todas las sesiones experimentales correspondientes a cada uno de los estímulos estudiados, no encontrándose diferencias significativas en los valores triestímulo respecto a la medidas realizadas al comienzo de la sesiones.

4.4.- BIBLIOGRAFIA.

CRUZ, A.; Determinación de las funciones de mezcla de colores para observadores españoles. C.S.I.C. Tesis Doctoral. Madrid (1967).

CIE. Colorimetry, 2nd ed., Publ. N° 15-2. Central Bureau of CIE, Vienna, (1986).

LOZANO, R.D. ; El color y su medición. Ed. Americalee. Buenos Aires (1a ed. 1978).

MARTIN, J.; Fundamentos del color. Ed. Elexpuru Hnos., S.A. Bilbao (1973).

NIMEROFF, I.; "Propagation of error in tristimulus colorimetry", J. Opt. Soc. Am., **47**, 697-702 (1957).

WRIGHT, W. D.; "A trichromatic colorimeter with spectral stimuli", Trans. Opt. Soc., **29**, 225-242 (1927-1928)

WYSZECKI, G.; "Propagation of errors in colorimetric transformations", J. Opt. Soc. Am., **49**, 389-393 (1959).

WYSZECKI, G., STILES, W.S.; Color Science. New York. John Wiley. (1a. ed 1967; 2a ed. 1982).

CAPITULO 5.

**METODO GENERAL. DESARROLLO
DE LAS EXPERIENCIAS.**

CAPITULO 5.

METODO GENERAL. DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS.

Es conocido que en los procesos de discriminación cromática influyen muy significativamente las condiciones experimentales bajo las cuales se realizan las observaciones (CIE, 1993; Robertson, 1981; Hita et al., 1981). Por ello, una vez descritos y conocidos los dispositivos experimentales y su calibrado, trataremos en este capítulo sobre la experimentación desarrollada y, por otra parte, del método que conduce a la obtención de los umbrales diferenciales de color, a partir de los datos experimentales.

5.1.- DESCRIPCION Y JUSTIFICACION DE LOS PARAMETROS EXPERIMENTALES.

Previamente, durante la descripción de los dispositivos empleados en la presente Memoria, se han detallado y justificado

algunas de las condiciones experimentales bajo las cuales se desarrollan nuestras medidas. A pesar de ello, y por lo dicho, pretendemos ahora realizar una descripción más pormenorizada de este aspecto, y para sistematizar el análisis distinguiremos 4 tipos de parámetros como característicos de las condiciones experimentales bajo las que se desarrollan nuestras experiencias:

i) Parámetros fotométricos.

- 1) Estímulos estudiados.
- 2) Nivel de luminancia.
- 3) Carácter de la igualación.

ii) Parámetros temporales.

- 1) Tiempo de exposición de estímulos.
- 2) Tiempo intermedio entre presentaciones de estímulos.

iii) Parámetros visuales.

- 1) Modo de aparición del estímulo.
- 2) Tipo de visión.
- 3) Tamaño y forma del campo.
- 4) Adaptación previa.

iv) Observadores: Características y número.

5.1.1.- PARAMETROS FOTOMETRICOS.

Los estímulos elegidos en nuestro trabajo experimental se indican, con sus coordenadas de cromaticidad y luminancia en el sistema CIE-1931, en la tabla 5.1. Así mismo, las figuras 5.1 y 5.2 muestran la situación de dichos estímulos en el diagrama cromático CIE-31 y en el CIE 1976 (a^* , b^*).

Estímulo	x	y	Y
Acromático (A-CIE)	0.314	0.331	30.0
Rojo (R-CIE)	0.484	0.342	14.1
Amarillo (Y-CIE)	0.388	0.428	69.3
Verde (G-CIE)	0.248	0.362	24.0
Azul (B-CIE)	0.219	0.216	8.8

Tabla 5.1.- Coordenadas de los estímulos analizados en el sistema CIE-31.

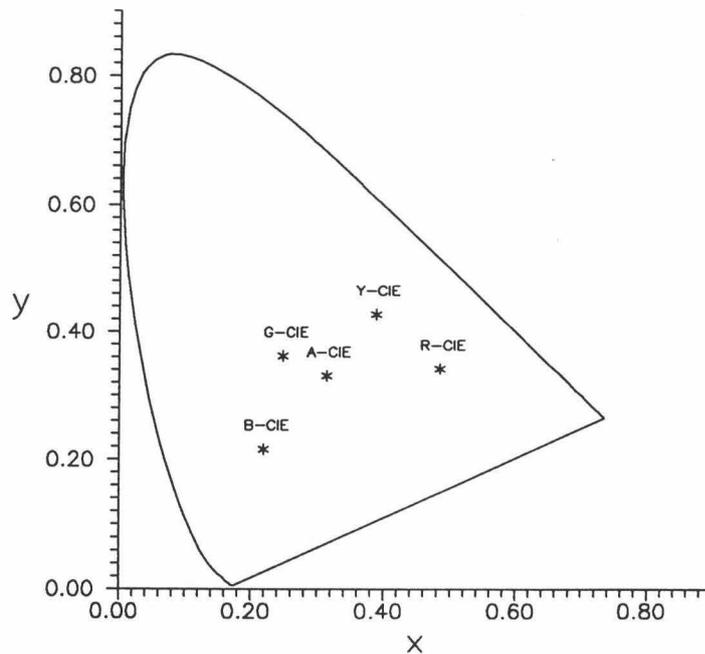


Figura 5.1.- Estímulos estudiados en el diagrama cromático CIE-31

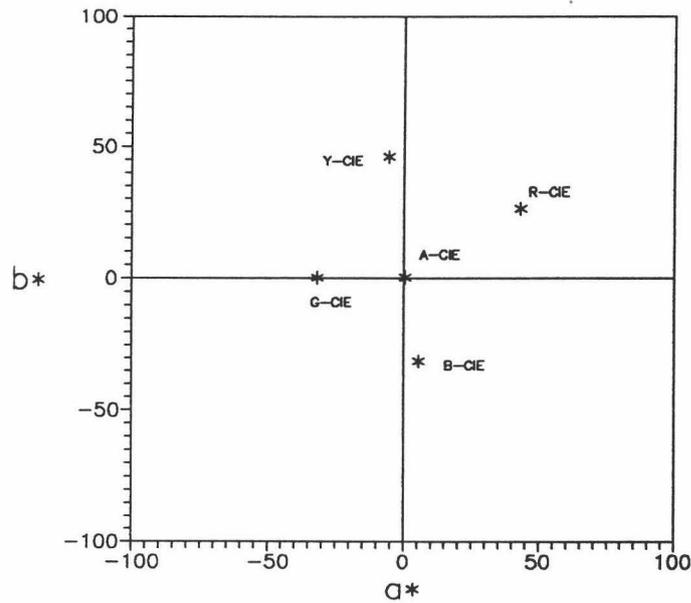


Figura 5.2.- Estímulos estudiados en el diagrama cromático CIE-1976 (L^* , a^* , b^*).

Como puede observarse, la elección de los estímulos a estudiar no ha sido arbitraria sino que son, precisamente, los cinco colores que recomienda analizar la CIE para coordinar las investigaciones sobre diferencias de color (Robertson, 1978). Cuatro estímulos (los no acromáticos), son a su vez los centros de los cuatro tetraedros estudiados por el Comité de la Sociedad Americana de Optica que trabajó sobre escalas de color uniformes (MacAdam, 1974). Estos cinco estímulos han sido objeto de numerosos estudios, tanto para la obtención de umbrales con presentación en modo de objeto (Luo-Rigg, 1986; Witt, 1983; Indow, 1992; Kawakami, 1986) como en modo de apertura (Melgosa, 1989; Indow, 1992), por lo que su estudio en esta Memoria nos permitirá hacer comparaciones de interés.

Hemos de destacar que el nivel de luminancia de los estímulos estudiados se halla dentro del fotópico, siendo como se puede

apreciar en la tabla 5.1, y por distintas razones, diferentes de unos estímulos a otros. Este nivel de luminancia está dentro del rango empleado en otros trabajos clásicos en colorimetría (Brown y MacAdam, 1949: de 1 a 34 cd/m^2 ; MacAdam, 1942: 48 cd/m^2 ; Wyszecki y Fielder 1971: 12 cd/m^2 , Luo-Rigg, 1986: de 1 a 80 cd/m^2). Con el tipo de visión que hemos utilizado, el nivel de iluminación retiniana efectiva correspondiente a nuestros estímulos, está entre los 80 y los 500 Td aproximadamente (Lozano, 1978).

Trabajos como los de Brown, 1951 y Walraven, 1962, parecen indicar que el nivel de luminancia no afecta muy significativamente a los resultados en la discriminación cromática siempre y cuando nos movamos moderadamente dentro de niveles fotópicos, sin llegar al deslumbramiento.

La luminancia de los estímulos se ha medido, tal como indicamos, mediante un espectrorradiómetro Spectra-Scan PR-704 y que tiene una tolerancia del 5% para estas medidas. Respecto a la luminancia del campo circundante en las observaciones realizadas con presentación en modo de objeto, en nuestras experiencias es de 90 cd/m^2 .

Finalmente, conviene destacar que, debido a la limitación de los propios dispositivos y a la generación de muestras, no se trabajó en todas las experiencias con estímulos de referencia totalmente idénticos, aunque ciertamente, los estímulos de referencia empleados en el colorímetro visual y en el de muestras coloreadas, son muy próximos entre sí y cercanos a los centros que indica la CIE.

Con respecto al carácter de las igualaciones, siempre que ha sido posible, se ha trabajado en condiciones de partida cuasi-isómeras, es decir, con sistemas de primarios con

distribuciones espectrales muy similares. De este modo hemos procurado eludir los problemas inherentes al empleo de igualaciones metámeras (Jiménez del Barco, 1984) que, si bien son de gran interés e importancia en numerosas aplicaciones de la colorimetría, no constituyen directamente el objeto de esta Memoria. Sin embargo, concretamente en el modo de apertura (luz-muestra) es inevitable el empleo de igualaciones metámeras, hecho que habrá que tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

5.1.2.- PARAMETROS TEMPORALES.

A continuación pasamos a especificar y justificar los distintos parámetros temporales empleados en nuestras experiencias y que se mantuvieron en todas las observaciones realizadas, tanto en modo de apertura como de objeto.

Con respecto a los tiempos de exposición y entre exposiciones sucesivas, estos fueron fijados en 1.0 y 8.0 segundos, respectivamente. Los valores adoptados en este punto se basan en trabajos anteriores realizados en nuestro laboratorio (Hita et al, 1982), en los que el tiempo de exposición fue analizado con detalle como parámetro que afecta a la discriminación cromática. Los resultados de estos trabajos muestran que los tiempos seleccionados son óptimos, en el sentido de permitir una respuesta consistente del observador y a la vez eludir los efectos derivados de la adaptación cromática. Por otro lado, el tiempo de 8 segundos entre presentaciones sucesivas es suficiente en el colorímetro visual para que el software del dispositivo mande la información necesaria a las partes mecánicas del mismo y que las cuñas se sitúen en las posiciones requeridas. A su vez, ese mismo tiempo permite las presentaciones por parte del experimentador de los pares de muestras a evaluar, en el caso de

las observaciones realizadas en el dispositivo de iluminación/observación. El tiempo seleccionado entre exposiciones es también idóneo para que el observador recupere su adaptación a la oscuridad, no habiéndose detectado efectos de post-imágenes.

Otro aspecto a tener en cuenta, es el tiempo de duración de las sesiones experimentales que, como es lógico, debe controlarse para evitar la fatiga del observador. Este tiempo se fijó en un máximo de 15 minutos, no habiendo realizado ningún observador más de 3 o 4 sesiones a lo largo de un día.

5.1.3.- PARAMETROS VISUALES.

Varios son los parámetros que conviene especificar, desde el punto de vista del tipo de visión y sus características principales. Haremos sobre este aspecto especial hincapié en el modo de apariencia del estímulo, ya que la comparación de los umbrales obtenidos con diferentes modos de presentación, es uno de los propósitos de la presente Memoria.

Como se ha indicado con anterioridad, los estímulos de color pueden ser observados con distintos modos de apariencia siendo de interés la comparación entre ellos. Así Katz, 1935, distingue 11 modos de apariencia diferentes y el Comité de la Sociedad Americana de Óptica (OSA, 1953), considera 5 modos. De entre estos modos de apariencia, posiblemente los más importantes y unánimemente aceptados son los denominados de apertura y objeto. En concreto, nosotros trabajamos empleando estos dos modos y distinguiendo dentro del modo de apertura tres posibilidades. En lo sucesivo seguimos la siguiente nomenclatura:

- a) Modo de apertura (luz-luz): obtenido en el colorímetro

visual, empleando como estímulo de referencia una luz dirigida y como estímulo variable, también una luz dirigida.

b) Modo de apertura (luz-muestra): obtenido también en el colorímetro visual pero empleando como estímulo de referencia una muestra coloreada y como estímulo variable una luz dirigida.

c) Modo de apertura (muestra-muestra): obtenido en el dispositivo de iluminación/observación, utilizando tanto como estímulo de referencia como variable muestras coloreadas.

d) Modo de objeto: obtenido en el dispositivo de iluminación/observación utilizando como estímulos de referencia y variable, dos muestras coloreadas y un campo circundante gris.

Respecto al modo de visión en el colorímetro visual, como indicamos previamente, es maxweliana. En concreto la visión es foveal y con luz dirigida. De esta manera se evita la participación de posibles factores secundarios en los mecanismos de visión introducidos por efectos parafoveales y que pueden acarrear ciertos desvíos en las leyes de aditividad de la colorimetría, según se desprende del análisis de distintos trabajos en este campo (Clarke, 1960).

La visión elegida ha sido monocular, habiéndose fijado un campo que subtiende un ángulo de 2° desde el centro de la pupila del observador. De este modo se pretende eludir los problemas derivados de activar una zona muy amplia de la retina, y es posible utilizar las funciones de mezcla del Observador Patrón CIE-31, recomendadas por la CIE para campos menores de 4° .

Respecto a la forma del campo, según la descripción de este dispositivo experimental, se trata de un campo cuadrado bipartito con una fina línea oscura de separación vertical, que sustiende

aproximadamente un ángulo de 5'. Elegimos esta forma, en primer lugar, porque al tener dos mitades de igual área, se evitan fenómenos en los que intervine la superficie y en segundo lugar, la línea divisoria vertical es preferible a la horizontal, ya que hay cierta evidencia de que la sensibilidad de la retina tiene mayor simetría entre las partes derecha e izquierda que entre la superior y la inferior; por otra parte, se ha demostrado también, que una línea negra de aproximadamente 5', es mejor que la ausencia de la misma en las experiencias de discriminación (Le Grand, 1972).

Al diseñar el dispositivo de iluminación/observación de muestras hemos procurado que en el mismo los parámetros visuales experimentales sean idénticos, en lo posible, a los del colorímetro visual. Ello se ha conseguido, salvo que la luz no es totalmente dirigida por las propias limitaciones del dispositivo.

Respecto a los parámetros visuales de adaptación hemos de especificar que fue a la oscuridad, tanto durante el desarrollo de las experiencias como durante un tiempo de 10 minutos previo al inicio de las mismas. Este tiempo inicial de adaptación a la oscuridad permite situar al ojo del observador en unas condiciones de partida independientes del tipo de iluminación a que pudiera haber estado sometido antes del inicio de la sesión experimental (Cervantes, 1986). Aunque este tiempo no alcanza el valor asintótico de la curva de adaptación para la medida del umbral absoluto, no es necesario por no ser ese nuestro caso y por ser la luminancia de los estímulos que observamos fotópica. Los tiempos de adaptación utilizados en estas experiencias son los que se encuentran usualmente en la literatura, encontrándose que pequeñas variaciones en los mismos no afectan significativamente a los resultados en la discriminación.

5.1.4.- OBSERVADORES.

De acuerdo con el planteamiento de nuestro trabajo todos los observadores que intervienen en las medidas experimentales poseen visión normal del color según los test usuales en la detección de anomalías cromáticas tales como Ishihara, Colegio Médico de Tokio, y Farnsworth-Munsell D-15. En concreto, para la realización de nuestro estudio se han prestado a la experimentación tres observadores designados como FC, MP y MM cuya edad, sexo y grado de familiaridad con este tipo de experiencias son diferentes. En cualquier caso, todos los observadores dispusieron de un tiempo prudencial para familiarizarse con los dispositivos experimentales y método de observación, habiéndose llegado al valor asintótico del tamaño de los umbrales.

El observador MM intervino en la totalidad de las experiencias, excepto en las correspondientes a la presentación en modo de apertura (luz-luz), que este observador ya obtuvo en experiencias previas, (Melgosa, 1989) bajo condiciones experimentales muy similares a las que se usan en la presente Memoria sólo que trabajando con un colorímetro visual tipo Donaldson.

En principio, puede parecer que el número de observadores utilizado en nuestras experiencias es reducido, especialmente en la presentación en modo objeto (donde encontramos otros trabajos con más de 20 observadores). Sin embargo, consideramos que nuestro número es suficiente por varias razones. En primer lugar, en estas investigaciones se realizan un gran número de medidas y a lo largo de un amplio periodo de tiempo, lo cual requiere de personas interesadas y vinculadas a la investigación directamente; en segundo lugar, en nuestro trabajo es notablemente alto el número de puntos utilizados para la

construcción de un umbral, lo cual también da una mayor consistencia a los resultados de cada observador y, por supuesto, a aquellos comportamientos confirmados por tres observadores. De otra parte, importantes trabajos que se han realizado en el campo de la visión utilizan un número similar de observadores al aquí empleado o incluso menor: MacAdam, 1942, 1 observador; Brown-MacAdam, 1949, 3 observadores; Brown, 1951, 2 observadores; Wysecki, 1971, 3 observadores. También, trabajos realizados recientemente en modo de objeto utilizan un número parecido de observadores (Indow, 1992). Por último, como apunta la CIE en sus recomendaciones (Robertson, 1978), con un número reducido de observadores se pueden alcanzar resultados consistentes y fiables si el método de medida de los umbrales es el adecuado.

A pesar de que el tema del número de observadores necesario es controvertido, resultados previos de nuestro laboratorio (García et al., 1993) muestran que el número de observadores que intervienen en esta Memoria es razonable, habida cuenta del método experimental que empleamos y de los resultados obtenidos, aspecto que consideraremos posteriormente.

5.2.- METODO EXPERIMENTAL. GENERALIDADES.

Cuando nos planteamos elegir un método experimental de medida del umbral diferencial de color tuvimos en cuenta una serie de consideraciones entre las que destacamos: a) el método experimental ha de ser idóneo para los diferentes modos de presentación citados con anterioridad ya que su comparación es objeto de la presente Memoria; b) conseguir reproducibilidad en los umbrales obtenidos, es decir, emplear para construir el umbral una metodología tal que el resultado obtenido sea verdaderamente el correspondiente a la capacidad de discriminación de un observador con visión normal del color, bajo

las condiciones experimentales elegidas.

En la línea de estos planteamientos, el método de los "estímulos constantes" parece el más indicado, frente a otros que aparecen en la literatura, como el "método de los límites"; "error medio"; "método de igualación"; "métodos de asignación a categorías"; "asignación sobre escalas de grises"; "ordenación-clasificación y referencia a un par standard" (Luo-Rigg, 1986; Witt, 1983 y Strocka, 1985).

Algunos de éstos métodos, se basan en la realización de igualaciones de color, actuando el observador sobre el dispositivo experimental, por lo que aparecen efectos táctiles (Le Grand, 1972) que pueden afectar a las medidas. Otros, como el de los límites o el de igualación, suponen la variación continua de los estímulos hasta apreciar diferencias respecto de una igualación previa de estímulos o viceversa. En estos métodos pueden influir parámetros, como la velocidad en la variación del estímulo o la adaptación al estímulo en el que se pretende detectar una diferencia, como indica Le Grand, 1972.

Se ha comprobado (Robertson, 1981; Hita et al., 1982) que la intervención del observador en la generación de los estímulos, de alguna manera, acarrea efectos de aprendizaje y hace que sus decisiones no correspondan exclusivamente a la sensación percibida.

Por otra parte, algunos de los métodos citados (e.g. asignación a escalas) son recientes y se utilizan en experiencias realizadas con muestras coloreadas o en simulación de superficies de color, por lo que resultan difícilmente utilizables cuando se trabaja con colorímetros visuales.

A la vista de lo expuesto, el método de los estímulos

constantes parece ser el que, a nuestro criterio, presenta mejores características de objetividad y reproducibilidad de las medidas, así como la posibilidad de utilizarse para los diferentes modos de presentación.

Nuestro modo de operación ha sido concretamente el siguiente: una vez elegido un estímulo de referencia el calibrado del colorímetro visual, mediante programas de cálculo, nos permite obtener las posiciones de las cuñas grises con las que se logra un estímulo muy similar al mismo. El estímulo de referencia en nuestro caso es un estímulo luminoso o una muestra dependiendo de la experiencia realizada. A partir de esa posición cada observador lleva a cabo su igualación mediante el movimiento de las tres cuñas, que se realiza a través del software del dispositivo, como se ha indicado con anterioridad.

En primer lugar, moviendo las cuñas hacia arriba y hacia abajo se realiza una comprobación de que el punto elegido como igual al de referencia no se encuentre en zonas extremas del umbral. Las modificaciones iniciales de cada una de las tres cuñas del colorímetro corroboran que la igualación de partida corresponde a un punto próximo al centro del mismo al obtenerse resultados muy simétricos y centrados en dicha posición.

A partir de esta igualación se comienza la recogida de datos consistentes en las respuestas del observador sobre la igualdad o desigualdad del estímulo de referencia y el estímulo obtenido mediante los movimientos de las cuñas (estímulo variable). Para cada cuña se eligen dos posiciones una por encima y otra por debajo de la central respectivamente, y para cada una de estas posiciones se hacen los barridos de las dos cuñas restantes. La figura 5.3 recoge un esquema ilustrativo de las diferentes direcciones estudiadas según este procedimiento.

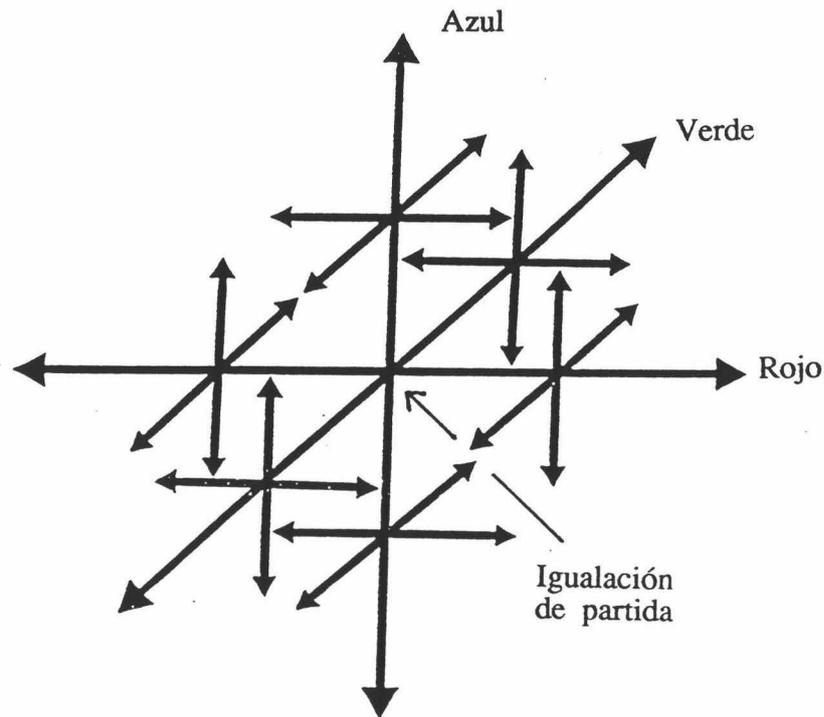


Figura 5.3.- Esquema ilustrativo de las diferentes direcciones en que nos desplazamos para obtener el umbral diferencial de color.

Conviene destacar que de este modo los estímulos analizados están situados en muy distintas direcciones, en el sistema de representación de color, en torno al estímulo de referencia, siendo además estímulos en los que simultáneamente hay modificaciones de luminancia y de cromaticidad, respecto del de referencia. Si bien algunos autores han realizado estudios de discriminación a luminancia constante, (MacAdam, 1942; Crawford, 1970; Wyszecky-Fielder, 1971), pensamos que, en nuestro caso, los resultados obtenidos serán de mayor interés por realizarse la discriminación en condiciones más próximas al funcionamiento de nuestros mecanismos visuales en la vida

ordinaria.

Cada estímulo a comparar con el de referencia es presentado al observador 10 veces, en orden totalmente aleatorio, y es caracterizado por un factor de peso igual al número de veces que es considerado igual al de referencia. Como resultado se obtiene una nube de puntos en el espacio de color, cada uno caracterizado por su peso correspondiente, cuyo ajuste estadístico permitirá la determinación del umbral diferencial de color.

Sin embargo, el proceso de obtención de esta nube de puntos en el espacio de color cambia cuando las experiencias involucran objetos como ocurre en nuestro caso. Así, en los colorímetros visuales, o en experiencias que involucran simulación de superficies, las diferencias de los valores de x e y , así como de luminancia del estímulo de referencia y los estímulos que lo rodean (Δx , Δy e ΔY) pueden variar casi continuamente. Este no es el caso cuando trabajamos con objetos iluminados. En 1978 el Subcomité de diferencias de color de la CIE TC-13 indicó, entre otras sugerencias, que se deben utilizar alrededor de 50 muestras bien distribuidas en todas las direcciones, alrededor de una muestra tomada como standard, para generar un elipsoide con suficiente representatividad del umbral de discriminación del observador.

Para nuestras experiencias con el dispositivo de iluminación/observación de muestras se realizaron conjuntos de muestras coloreadas (más de 100) cerca de los centros de color citados con anterioridad. Las coordenadas de estas muestras forman una nube irregular de puntos en el espacio de color en torno a la elegida como muestra de referencia. Para la selección de las muestras a comparar con la de referencia, tomamos los siguientes criterios utilizados en trabajos precedentes en este campo (Alder, 1982, Strocka, 1985; Witt, 1983) y que indicamos a

continuación:

a) Todas las muestras del conjunto deben ser tales que las diferencias Δx , Δy , ΔY entre la muestra de referencia y las muestras restantes puedan ser elegidas de diferentes tamaños, así como situadas (orientadas) en diferentes direcciones en el espacio de color; es decir, las diferencias entre ellas deben ser tales que nos den una buena cobertura en todas las direcciones.

b) Las experiencias deben involucrar muestras con pequeñas y grandes diferencias respecto a la muestra standard. Un rango de 1 a 7 unidades CIELAB suele ser usual en la literatura.

c) Las diferencias en Y, deben considerarse como Y/100 con la idea de que estas diferencias sean comparables a las de x e y; por tanto, las diferencias con Y de 1 serán equivalentes a diferencias de 0.01 en x o en y. De esta manera se suelen elegir muestras dando sus coordenadas proyectadas en los 3 planos xy, xY e yY.

Los anteriores criterios son especialmente importantes en caso de utilizar un número pequeño de observadores.

Las figuras 5.4 a 5.9 muestran las distribuciones de los conjuntos de muestras (nubes de puntos en el espacio de color), empleadas para nuestras experiencias, en los planos xy, xY e yY del sistema CIE-1931. Vemos en líneas generales, que se ha procurado seguir las condiciones antes expresadas.

Si tenemos en cuenta que para cada uno de los centros de referencia se presentaron entre 50 y 230 estímulos (según la posición en el diagrama cromático del estímulo de referencia por una parte y el tipo de dispositivo empleado por otra) y que cada

estímulo fue presentado 10 veces a cada uno de los observadores, obtenemos un trabajo experimental que ha supuesto, aproximadamente, un año y medio de medidas.

Como hemos dicho, las experiencias se realizaron en sesiones de no más de 15 minutos de duración para evitar la fatiga del observador. A su vez, se realizaron a distintas horas del día y distintos días (nunca más de 4 sesiones diarias por observador), para promediar la posible influencia de las condiciones psicológicas del mismo y eludir así, su efecto (Wyszecki, 1972).

Conviene destacar también, que la influencia del observador en el proceso de medida y cualquier efecto de aprendizaje por parte de éste han sido excluidos. En efecto, el observador no tenía ningún acceso a los mandos del colorímetro, ni a las muestras en el caso del dispositivo de iluminación/observación de éstas y desconocía por completo las evoluciones en la presentación de estímulos. Podríamos decir que el papel del observador se reduce al de un "instrumento de cero" que simplemente afirma o niega la igualdad de las parejas de estímulos que se le presentan.

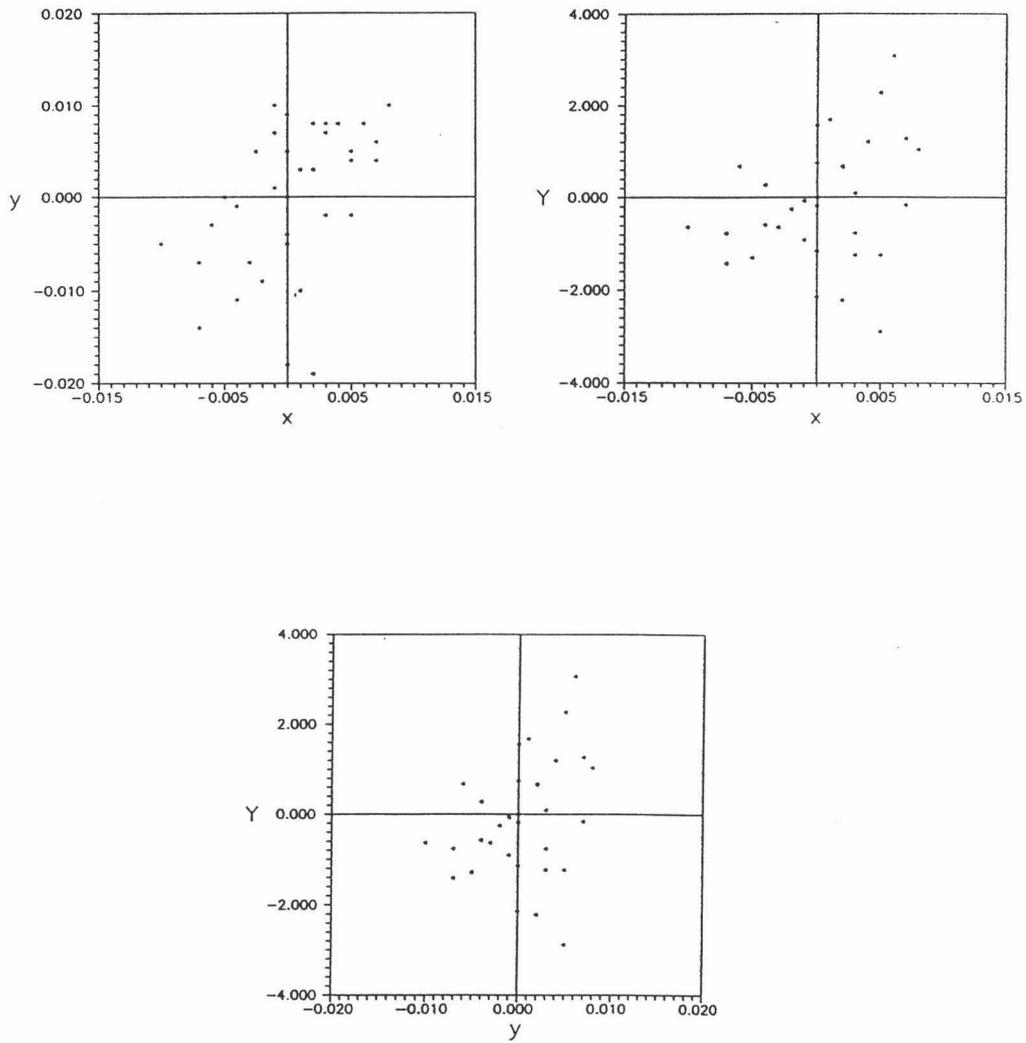


Figura 5.4.- Distribución de muestras seleccionadas para el estímulo acromático en los planos xy, xY e yY.

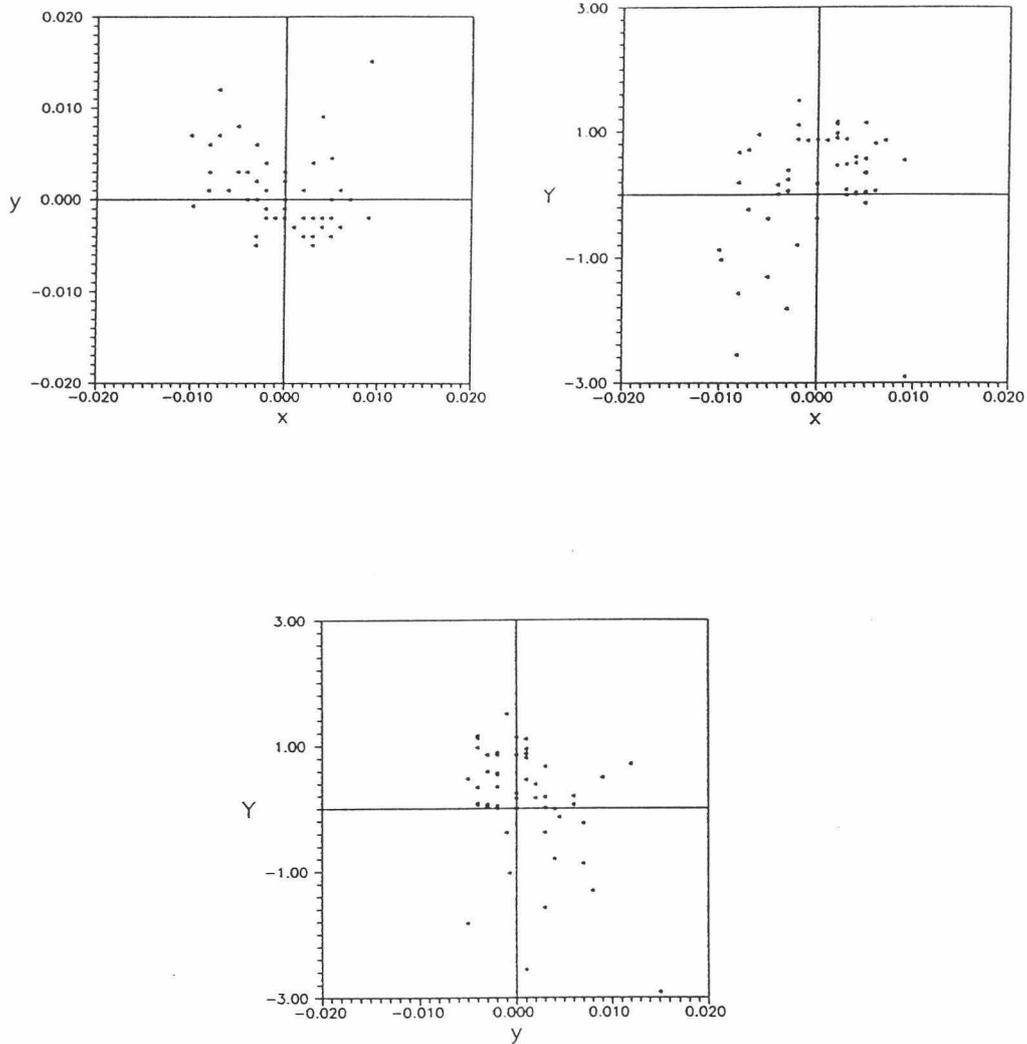


Figura 5.5.- Distribución de muestras seleccionadas para el estímulo rojo en los planos xy , xY e yY .

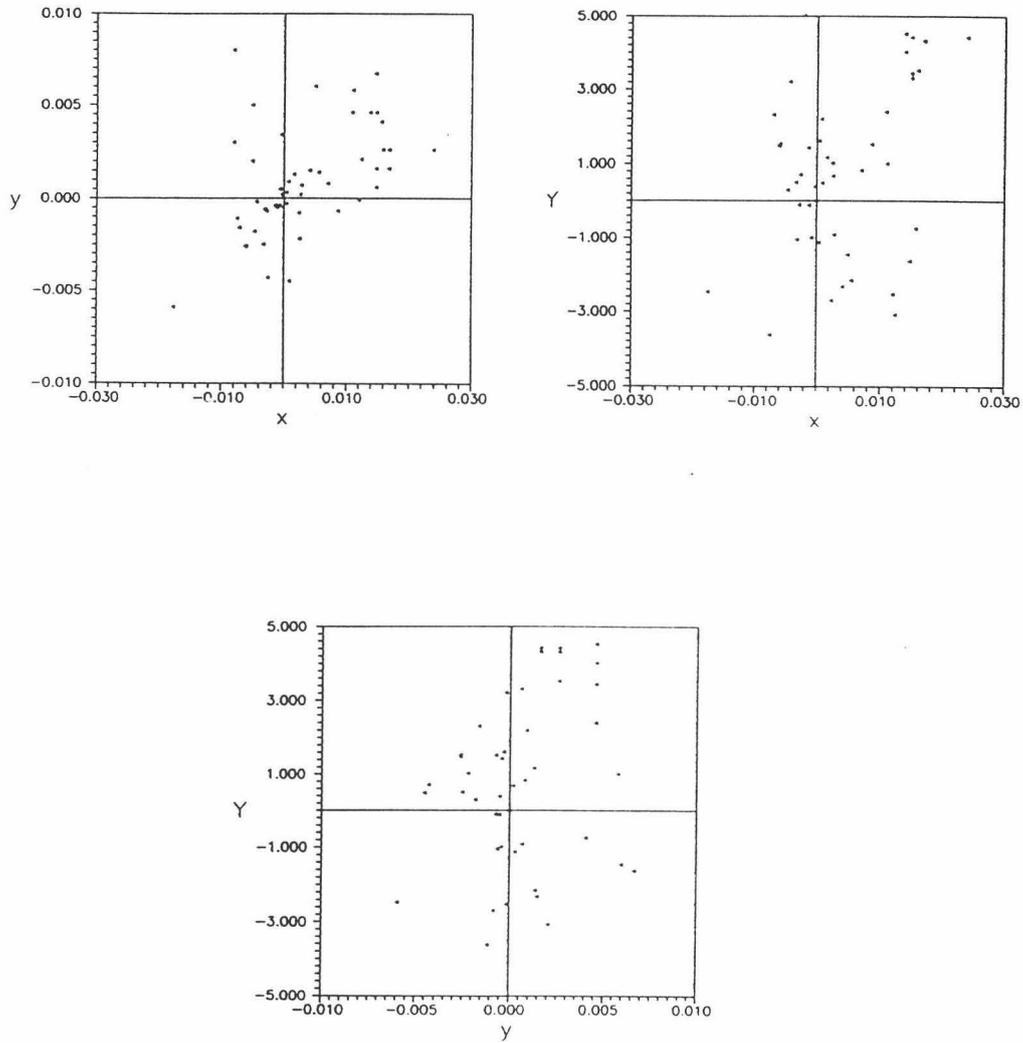


Figura 5.6.- Distribución de muestras seleccionadas para el estímulo amarillo en los planos xy, xY e yY.

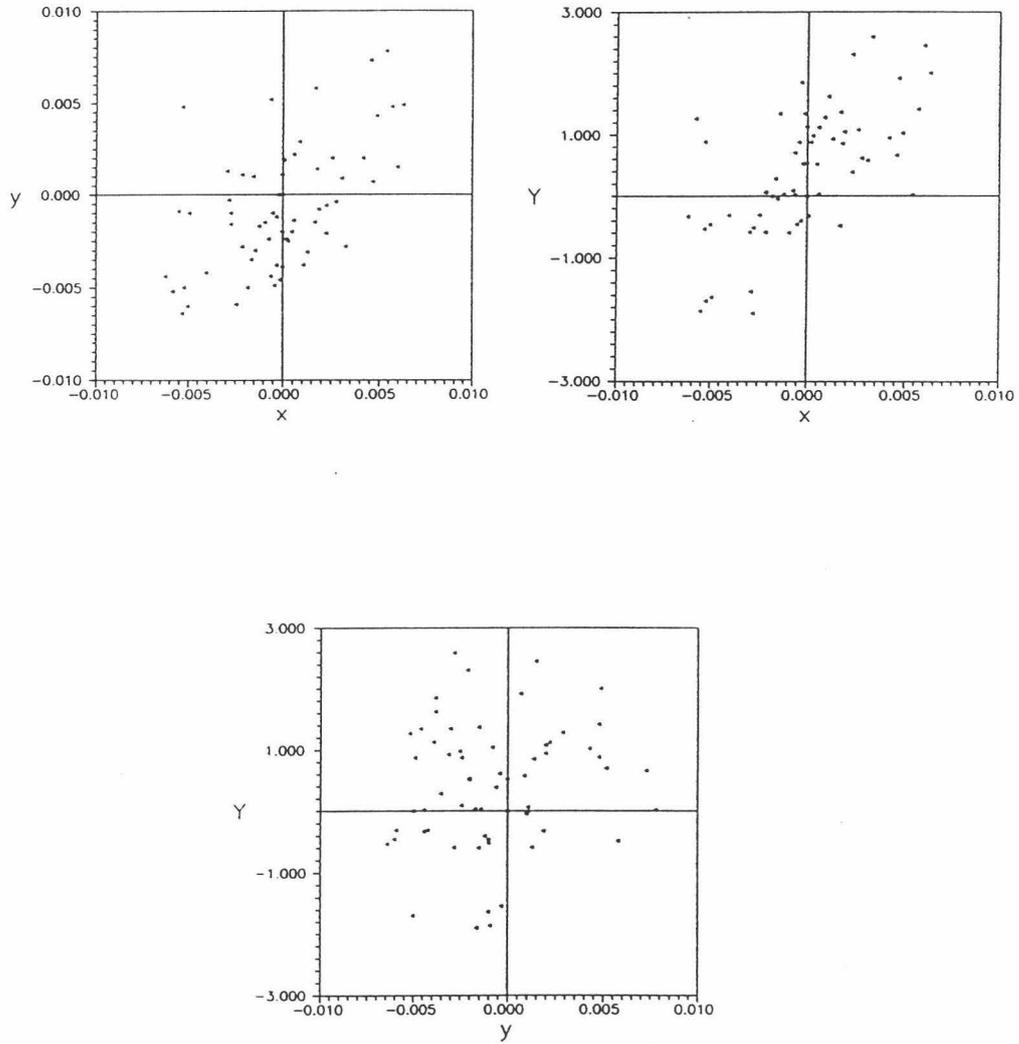


Figura 5.7.- Distribución de muestras seleccionadas para el estímulo verde en los planos xy, xY e yY.

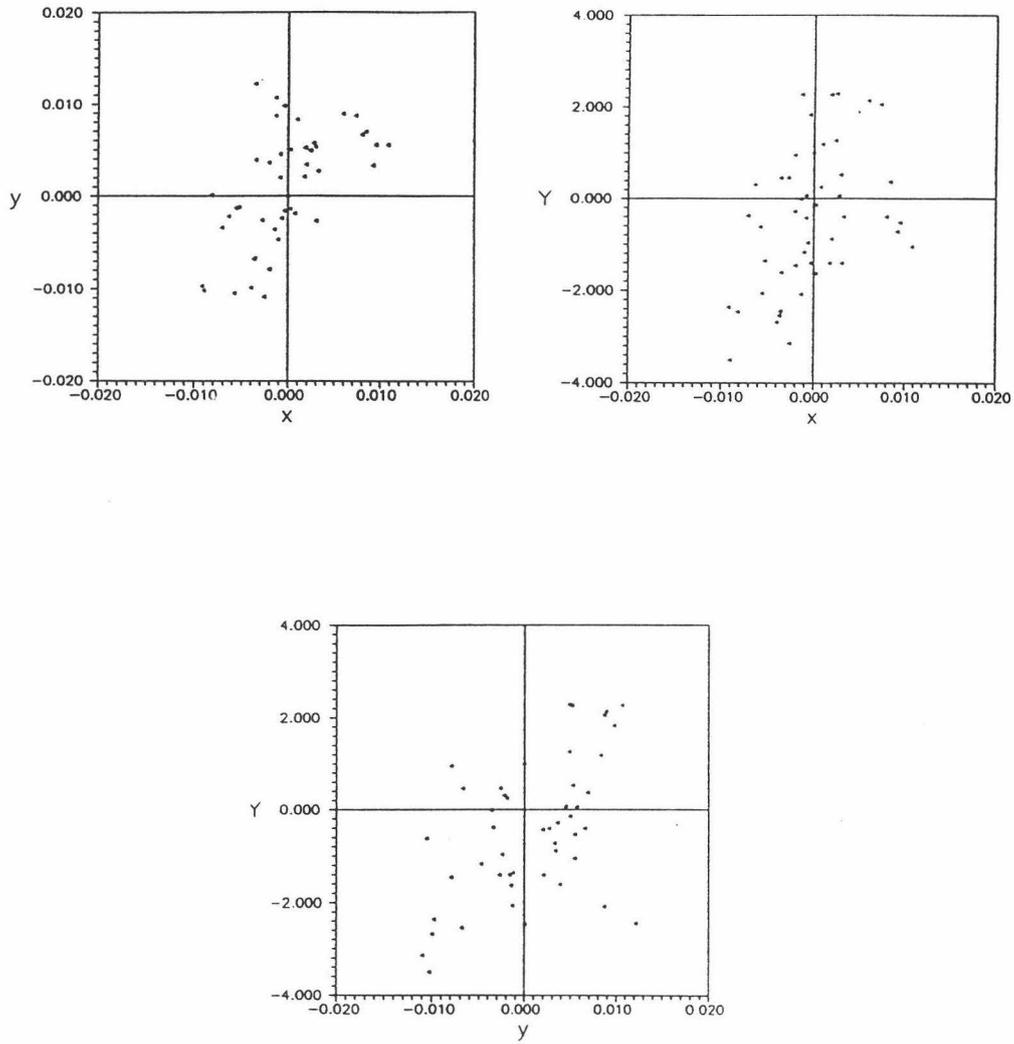


Figura 5.8.- Distribución de muestras seleccionadas para el estímulo azul en los planos xy, xY e yY.

5.3.- TRATAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Con el fin de determinar el umbral diferencial de color a partir de la nube de puntos obtenida en cada caso, se ha utilizado un método estadístico de ajuste basado en los estudios en propagación de errores en colorimetría (Wyszecki, 1959). De acuerdo con esta teoría, se realiza un ajuste estadístico basándose en la varianza de las coordenadas de la nube de puntos y sus factores de peso correspondientes (número de veces que el observador responde afirmativamente). Este ajuste nos lleva a un elipsoide que caracteriza el proceso de discriminación cromática y que contiene en su interior el 95% de las igualaciones.

El objetivo, por tanto, de este método, es la obtención de los coeficientes que definen la ecuación del elipsoide en la forma:

$$A (x-x_0)^2 + B (y-y_0)^2 + C (Y-Y_0)^2 + 2 D (x-x_0) (y-y_0) + 2 E (y-y_0) (Y-Y_0) + 2F (x-x_0) (Y-Y_0) = 7.81$$

en el sistema de representación CIE-31, donde (x_0, y_0, Y_0) son las coordenadas del centro del elipsoide, obtenidas como media ponderada de las coordenadas de los puntos utilizados en la determinación del umbral. El valor 7.81 garantiza que el elipsoide determinado contiene el 95% de las igualaciones.

El cálculo del elipsoide de discriminación fue realizado mediante un programa en Fortran 77, con algunas subrutinas que permiten analizar, si fuese necesario, secciones de éste a distintos valores de la luminancia. Este programa ha sido anteriormente utilizado en nuestro Departamento (Hita, 1975). Al programa original se le han introducido ligeras modificaciones en la lectura de los ficheros de entrada, adaptándolo a nuestros dispositivos experimentales, permitiéndonos obtener los coeficientes de la ecuación del elipsoide y, a partir de ellos,

sus parámetros característicos: puntos extremos del mismo, semiejes, volumen, secciones, etc.

Por otra parte, y a fin de caracterizar el umbral diferencial de cromaticidad, se ha analizado la sección elíptica obtenida al cortar el elipsoide por un plano de luminancia constante que pase por su centro. De esta forma el valor cuantitativo del umbral diferencial de cromaticidad se asocia al área de la sección mencionada, llamada usualmente principal, al igual que el del umbral diferencial de color al volumen del elipsoide.

La elipse resultante tiene por ecuación:

$$A (x-x_0)^2 + B (y-y_0)^2 + 2 D (x-x_0) (y-y_0) = 7.81$$

Los coeficientes A,B,C pueden asimilarse a los coeficientes métricos g_{11} , g_{22} , g_{12} , respectivamente. Su determinación para cada punto del diagrama cromático tiene un enorme interés, ya que, como apuntan las recomendaciones de la CIE (Robertson, 1978), conviene que los resultados de las investigaciones sobre discriminación se den a través de estos coeficientes, lo que permite a su vez proponer, o analizar, fórmulas de diferencias de color.

Los parámetros de esta elipse caracterizan la discriminación cromática del observador, en concreto, son de especial interés sus semiejes, área y orientación principalmente. Estos parámetros, aportan datos interesantes de la discriminación al ser analizados en el diagrama cromático; el área mayor o menor de esta sección principal significa un deterioro o mejora, respectivamente, de la discriminación; igualmente el predominio del tamaño de uno de los semiejes sobre el otro y la orientación del semieje mayor informan sobre direcciones preferentes en la discriminación; la relación de semiejes caracteriza, en parte, el

comportamiento más o menos uniforme del sistema de representación del color.

Usualmente, los resultados experimentales para umbrales de discriminación cromática, como se ha indicado, están dados por elipses o elipsoides en el espacio CIE-31, utilizando una escala adecuada del eje Y. Sin embargo, es de notable interés en la actualidad, en particular para problemas técnicos con observaciones en modo objeto, el cálculo de elipsoides de error en el sistema de representación CIELAB.

Por ello, se han calculado en la presente Memoria las elipses de error en el sistema de representación CIELAB. Respecto a este cálculo, han de tomarse precauciones en la realización de las transformaciones (Pointer, 1981; Hita et al. 1984), ya que no son lineales, dando como resultado de las elipses o elipsoides, óvalos u ovoides; por tanto, han de transformarse los valores triestímulo de cada punto estudiado y proceder a un ajuste de la nube obtenida en el nuevo sistema de representación.

Para resolver este problema, cuando no se dispone de la nube de puntos experimental, se ha sugerido recientemente otro procedimiento consistente en trasladar la elipse o elipsoide de CIE-31 a CIELAB y ajustar corrigiendo las distorsiones que surgen (Melgosa et al., 1994). En el presente trabajo, utilizamos este último procedimiento por simplicidad. Para ello, en primer lugar, se han trasladado un total de 720 puntos, regularmente espaciados a lo largo de la periferia de la elipse (x,y) al sistema CIELAB. El contorno obtenido parece (pero no es) una nueva elipse. El problema de evaluación de la distorsión de este contorno obtenido, implica realizar un ajuste a una elipse adecuada. Pueden emplearse varios métodos de ajuste y nosotros utilizamos el siguiente: una vez trasladados los 720 puntos del contorno de la elipse a CIELAB, se minimiza la suma de los

cuadrados de las diferencias ΔV y ΔE según uno de los métodos propuestos por Luo-Rigg (Luo-Rigg, 1986) y sugerido en las recomendaciones de la CIE (Robertson, 1978). Aplicamos el procedimiento a las diferencias (ΔE) entre los 720 puntos periféricos en (a^*, b^*) y el centro, siempre suponiendo una diferencia visual ΔV , constante e igual a 1.

Por otra parte, es posible conocer la bondad del ajuste y también la distorsión causada por la transformación, mediante un único parámetro designado por e^* definido como la desviación standard normalizada de la suma de distancias entre cada uno de los 720 puntos en (a^*, b^*) y los dos focos de la elipse ajustada. Esta normalización se refiere al eje mayor de la elipse ajustada, resultando la siguiente expresión:

$$e^* = \frac{SD [d(f_1, p_i) + d(f_2, p_i)]}{2a}$$

donde $2a$ es el eje mayor de la elipse con focos f_1 y f_2 y el operador d indica la distancia entre el foco y cada punto p_i de la elipse ajustada; SD es la desviación standard de los valores contenidos en paréntesis. De la propia definición de e^* , se deduce que su valor será cero cuando todos los puntos estén situados exactamente en la periferia de la elipse y su valor aumenta, cuando aumenta la distorsión.

Por último, también resulta de interés el cálculo de los elipsoides de error en el sistema CIELUV, por ser uno de los sistemas de representación actualmente recomendados por la CIE, especialmente para mezclas aditivas. Para el cálculo de éstos utilizamos un procedimiento análogo al empleado en CIELAB, sólo que utilizando las ecuaciones de transformación correspondientes a este sistema.

5.4.- BIBLIOGRAFIA.

ALDER, C., CHAING, K.P., CHONG, T.F., COATES, E., KHALILI, A.A., RIGG, B.; "Uniform chromaticity scales- New experimental data", J. Soc. Dyers Colourists., **98**, 14-20 (1982).

BROWN, W.R.J.; MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences", J. Opt. Soc. Am., **39**, 808-834 (1949).

BROWN, W.R.J.; "The influence of luminance level on visual sensitivities to colour differences", J. Opt. Soc. Am., **41**, 684-688 (1951)

CERVANTES, A.; Adaptación cromática en comparaciones sucesivas de color. Tesis Doctoral. Universidad de Granada (1986)

CIE. Colorimetry, 2nd ed.; Publ N° 15-2, Central Bureau of CIE, Vienna, 1986.

CIE. Technical Report. "Parametric effects in colour-difference evaluation". Publ. N° 101 CIE Vienna, 1993.

CRAWFORD, B.H.; "Just perceptible chromaticity shifts", Proc. Intern. Color Congr. "Color 69" Stockholm (Gottingen: Musterschidt) 302-311 (1970).

CLARKE, F.J.J; "Extrafoveal colour metrics". Opt. Act. **7**, 255-274 (1960)

GARCIA, J. A., ROMERO, J., GARCIA-BELTRAN, A., JIMENEZ, J.R; "Interobserver variability of chromaticity discrimination and color representation space". J. Opt. ,**2**, 65-69 (1993).

HITA, E.; Influencia de las condiciones experimentales en los umbrales diferenciales de color. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (1975).

HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L., MARTINEZ, R.; "Temporal aspects of color spacification systems", J. Opt. Soc. Am., **72**, 578-582 (1982).

HITA, E., ROMERO, J.; "Análisis de la influencia de las condiciones de observación en los procesos de discriminación en color", Opt. Pur. Apl. **14**, 11-17 (1981).

HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L., CARRILLO, A.; "Uniform color spaces. A comparative analysys for color discrimination data". Farbe, **31**, 229-242 (1983/84).

INDOW, T., ROBERTSON, R., VON GRANAU, M., FIELDER, G.H.; "Discrimination ellipsoids of aperture and simulated surface colors by matching and paired comparison", Color Res. Appl. **17**, 6-22 (1992).

JIMENEZ DEL BARCO, L.; Colorimetría diferencial en igualaciones metámeras. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 1984.

KATZ, D.; "The World of color", Kegan Paul, London (1935).

KAWAKAMI, G.; "Experimental studies by making use of color-difference simulator", Acta Chromat., **3**, 54-63, (1977).

KAWAKAMI, G.; "Experimental evaluation of color differences", Die Farbe **32/33**, 404-415 (1986).

LE GRAND, Y.; Optique Physiologique. París: Masson et Cie (1972).

LUO, M.R., RIGG, B.; "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", *Color Res. Appl.*, **11**, 25-42 (1986).

LOZANO, R.D.; *El color y su medición*. Buenos Aires. America Lee (1978).

MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to color differences in daylight", *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 247-274 (1942).

MACADAM, D. L.; "Uniform color scales", *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 1691-1702 (1974).

MELGOSA, M.; *Estudio comparativo de datos colorimétricos obtenidos con presentación en modo de apertura y de objeto*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada (1989).

MELGOSA, M., HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L.; "Color-discrimination thresholds translated from the CIE (x,y,Y) space to the CIE 1976 (L*,a*,b*)", *Color Res. Appl.*, **19**, 1-8 (1994).

OSA. Committee on Colorimetry, *The Science of Color*, New York, (1953).

POINTER, M.R.; "A comparison of the CIE 1976 colour spaces", *Color Res. Appl.*, **6**, 108-118 (1981).

ROBERTSON, A. R.; "CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation", *Color Res. Appl.*, **3**, 149-151 (1978).

ROBERTSON, A. R.; "Colour differences" *Die Farbe*, **29**, 273-296 (1981).

STROCKA, D., BROCKES, A., PAFFHAUSEN, W.; "Influence of experimental parameters on the evaluation of color-difference ellipsoids", Color Res. Appl., **8**, 169-175 (1983).

WALRAVEN, P.L.; On the mechanism of colour vision. Tesis Doctoral. Universidad de Utrech (1962)

WITT, K., DORING, G.; "Parametric variations in a threshold color-difference ellipsoid for green painted samples", Color Res. Appl., **8**, 153-163 (1983).

WYSZECKI, G.; "Propagation of errors in colorimetric transformations", J. Opt. Soc. Am., **49**, 379-383 (1959).

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "New color matching ellipses", J. Opt. Soc. Am., **61**, 1135-1152 (1971).

WYSZECKI, G.; "Color matching and color-difference matching", J. Opt. Soc. Am., **62**, 117-128 (1972).

CAPITULO 6.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

CAPITULO 6.

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

6.1.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Como se ha indicado anteriormente, en el presente trabajo se han medido los umbrales de discriminación cromática correspondientes a 5 estímulos, próximos a los que recomienda estudiar la CIE (Robertson, 1978), para los diferentes modos de presentación citados, en las condiciones experimentales y conforme al método descrito en los capítulos precedentes.

En las tablas 6.1 a 6.12 se recogen los parámetros más característicos de los umbrales obtenidos por los observadores FC, MP y MM para cada una de las experiencias realizadas y cada uno de los modos de presentación antes descritos: apertura (luz-luz), apertura (luz-muestra), apertura (muestra-muestra) y finalmente modo de objeto. En concreto, se detallan las coordenadas de cromaticidad (x_0 , y_0) correspondientes al centro

del elipsoide de discriminación y las características esenciales de la sección principal de dicho elipsoide: su orientación, θ , (ángulo del semieje mayor con la dirección positiva del eje x), la relación de semiejes, b/a , y área A. Se indican también los valores de los coeficientes métricos característicos del elipsoide. Todos los resultados anteriores corresponden al umbral obtenido en el sistema CIE-31.

Conviene destacar la similitud entre los resultados obtenidos por nuestros observadores para un mismo modo de presentación, cualquiera que sea éste. En efecto, las figuras 6.1 a 6.4 muestran para cada estímulo la orientación, relación de semiejes y área de la sección principal para cada uno de los modos de presentación estudiados en esta Memoria. Hacemos esta puntualización porque se ha cuestionado, a veces, el hecho de si realmente presenta interés optimizar fórmulas de diferencia de color cuando las posibles dispersiones inter e intra observador pueden superar las diferencias entre las fórmulas propuestas (Wyszecki, 1971; Witt, 1987). Como podremos ver más adelante, en función de nuestros resultados, esta apreciación no responde a la realidad, aunque existen discrepancias en algunos casos concretos que después analizaremos. A su vez esta circunstancia viene a ratificar lo innecesario de la utilización de un número mayor de observadores.

Por último, con objeto de facilitar la visión de conjunto y además una rápida comparación de los resultados para cada uno de los modos de observación, se han representado las elipses de discriminación cromática de los tres observadores para cada uno de los cinco estímulos, figuras 6.5 a 6.19, en las que, con el número I, indicamos las elipses obtenidas en modo de apertura (luz-luz); II, las obtenidas en modo de apertura utilizando como referencia una muestra; III, las obtenidas en modo de apertura (muestra-muestra) y finalmente con IV, las obtenidas en modo de

objeto con un campo circundante gris.

Por otro lado, y de acuerdo con nuestro planteamiento inicial, estamos interesados también en evaluar la adecuación de los resultados obtenidos a las previsiones de diferentes fórmulas de diferencia de color, principalmente derivadas del sistema CIELAB. Las tablas 6.13 a 6.24 recogen, para los mismos observadores y modos de presentación antes citados, los resultados de los umbrales de discriminación cromática en este sistema.

Por otra parte, también, se han calculado los umbrales de discriminación cromática en el sistema CIELUV. Las tablas 6.25 a 6.36 recogen los resultados correspondientes a este sistema. Recordemos que estos parámetros característicos de la discriminación cromática se obtienen de nuevo mediante la translación de los puntos de la elipse en CIE-31 y ajustando los puntos obtenidos a una nueva elipse en dicho sistema, sin que sea posible una conversión directa de los parámetros obtenidos para el sistema CIE-31.

También, se recogen en las mismas tablas el valor encontrado para el parámetro e^* (en %) que indica la distorsión causada por la transformación (Melgosa et al., 1994) antes citada.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.310	0.473	0.385	0.250	0.214
y_0	0.327	0.337	0.426	0.365	0.212
θ	58.37	4.11	110.31	76.16	72.30
b/a	0.580	0.664	0.778	0.361	0.239
$A \times 10^4$	9.135	7.227	6.115	7.486	2.834
$g_{11} \times 10^4$	3.7858	2.2627	4.9100	8.6170	33.0283
$g_{22} \times 10^4$	2.4003	5.0964	3.3681	1.6361	5.2230
$g_{33} \times 10^4$	2.5492	8.3620	0.2740	4.6059	34.6492
$g_{12} \times 10^4$	-1.3725	-0.2042	0.6615	-1.8316	-9.8800
$g_{13} \times 10^4$	-1.1482	-0.4321	-0.5762	-1.1315	-8.3988
$g_{23} \times 10^4$	0.7514	0.0920	-0.0353	3.0060	25.4711

*Tabla 6.1.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIE-31. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.309	0.474	0.398	0.252	0.217
y_0	0.324	0.335	0.419	0.363	0.219
θ	64.88	21.56	51.43	71.45	72.34
b/a	0.525	0.677	0.917	0.230	0.225
$A \times 10^4$	8.522	9.981	8.325	6.961	3.737
$g_{11} \times 10^4$	4.7666	1.9303	3.0154	13.8683	26.5865
$g_{22} \times 10^4$	2.2276	3.3640	2.9012	2.2796	4.0260
$g_{33} \times 10^4$	2.2248	2.6749	0.3462	4.5348	38.4477
$g_{12} \times 10^4$	-1.5262	-0.6713	-0.2502	-4.3808	-7.9952
$g_{13} \times 10^4$	-1.3119	-0.3690	-0.4358	-2.4280	-6.5777
$g_{23} \times 10^4$	1.1515	-1.1913	-0.0508	5.6041	16.5730

Tabla 6.2.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIE-31. Observador MP.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.313	0.463	0.383	0.244	0.215
y_0	0.334	0.333	0.446	0.370	0.224
θ	68.70	37.50	70.50	80.40	66.10
b/a	0.544	0.310	0.810	0.340	0.430
$A \times 10^4$	4.990	5.850	4.820	6.700	3.390
$g_{11} \times 10^4$	10.506	7.5548	7.7590	13.3380	16.2090
$g_{22} \times 10^4$	4.5030	11.6630	5.5700	1.9440	5.9280
$g_{33} \times 10^4$	0.7998	6.8140	2.0236	1.3121	5.5978
$g_{12} \times 10^4$	-2.7620	-7.6960	-0.8855	-1.9900	-5.6850
$g_{13} \times 10^4$	-11.1175	1.0248	0.0050	0.7206	-1.2821
$g_{23} \times 10^4$	1.3618	-0.4573	-0.6050	1.0193	2.3589

*Tabla 6.3.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIE-31. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.321	0.489	0.396	0.252	0.224
y_0	0.324	0.345	0.424	0.365	0.224
θ	58.07	-1.27	50.49	76.26	70.81
b/a	0.520	0.704	0.743	0.288	0.403
$A \times 10^4$	7.160	7.149	4.762	6.620	2.732
$g_{11} \times 10^{-4}$	5.2422	1.9754	5.6781	9.3596	20.2841
$g_{22} \times 10^{-4}$	3.1267	4.8732	5.0857	1.3313	5.6368
$g_{33} \times 10^{-4}$	10.4799	7.4532	0.5616	3.3297	97.1912
$g_{12} \times 10^{-4}$	-2.1558	-0.0708	-1.5257	-2.0878	-5.8019
$g_{13} \times 10^{-4}$	-3.3601	-0.2497	-0.7982	-1.0953	-3.0123
$g_{23} \times 10^{-4}$	3.0024	0.0847	-0.4737	3.4360	0.9862

*Tabla 6.4.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIE-31. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.320	0.485	0.398	0.253	0.223
y_0	0.325	0.342	0.423	0.364	0.223
θ	61.73	19.87	48.59	76.19	67.85
b/a	0.533	0.741	0.845	0.364	0.347
$A \times 10^4$	7.213	8.425	6.962	8.758	2.261
$g_{11} \times 10^{-4}$	6.8593	2.0379	3.6485	7.3084	27.4009
$g_{22} \times 10^{-4}$	3.6338	3.2974	3.4999	1.4007	7.6757
$g_{33} \times 10^{-4}$	10.9732	2.3572	0.3645	3.5199	93.7870
$g_{12} \times 10^{-4}$	-2.4403	-0.7210	-0.5903	-1.5453	-9.6220
$g_{13} \times 10^{-4}$	-3.4942	-0.4257	-0.4601	-1.0537	-5.6968
$g_{23} \times 10^{-4}$	3.1547	-1.0093	-0.1394	1.1965	5.3176

*Tabla 6.5.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIE-31. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.322	0.477	0.390	0.249	0.220
y_0	0.324	0.348	0.434	0.370	227
θ	62.10	35.58	81.54	74.02	72.25
b/a	0.540	0.530	0.814	0.399	0.304
$A \times 10^4$	8.025	9.508	6.438	6.177	3.464
$g_{11} \times 10^4$	6.1251	2.5529	4.6496	9.3142	21.3172
$g_{22} \times 10^4$	3.2385	3.6850	3.1356	2.2200	4.1112
$g_{33} \times 10^4$	10.8654	15.2674	0.6871	5.6270	47.4961
$g_{12} \times 10^4$	-2.1237	-1.6579	-0.2303	-2.2214	-6.1331
$g_{13} \times 10^4$	-3.9960	2.1433	-0.6223	-1.9250	-7.8062
$g_{23} \times 10^4$	3.2000	-2.7947	0.2835	2.7497	11.9850

*Tabla 6.6.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIE-31. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.306	0.477	0.388	0.245	0.229
y_0	0.334	0.353	0.411	0.357	0.233
θ	55.31	-32.04	22.12	60.72	44.37
b/a	0.567	0.369	0.383	0.357	0.454
$A \times 10^4$	4.501	2.365	1.151	1.214	3.021
$g_{11} \times 10^{-4}$	7.5019	10.6673	14.8952	44.8400	10.6327
$g_{22} \times 10^{-4}$	5.2037	21.2912	48.9419	19.0357	10.9437
$g_{33} \times 10^{-4}$	0.0357	0.0106	0.0045	0.0024	0.0953
$g_{12} \times 10^{-4}$	-3.0543	10.9304	-16.5800	-21.1113	-7.0991
$g_{13} \times 10^{-4}$	-0.1359	0.0721	0.0146	0.0999	-0.5741
$g_{23} \times 10^{-4}$	-0.1324	0.0538	0.0891	-0.2670	0.0931

*Tabla 6.7.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIE-31. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.305	0.477	0.389	0.246	0.229
y_0	0.333	0.352	0.411	0.357	0.233
θ	53.01	-32.08	14.99	60.484	55.113
b/a	0.508	0.547	0.298	0.388	0.518
$A \times 10^4$	5.196	2.243	1.678	1.467	3.252
$g_{11} \times 10^4$	6.8009	9.9371	7.3552	34.2315	11.0021
$g_{22} \times 10^4$	4.8956	16.0452	46.0491	15.7101	7.3427
$g_{33} \times 10^4$	0.0270	0.0040	0.0015	0.0022	0.0896
$g_{12} \times 10^4$	-3.3161	6.3077	-11.1700	-15.7100	-4.9662
$g_{13} \times 10^4$	-0.1830	-0.0710	0.0401	0.0557	-0.3484
$g_{23} \times 10^4$	0.0022	-0.0517	-0.5888	-0.1875	-0.1694

Tabla 6.8.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIE-31. Observador MP.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.307	0.478	0.391	0.247	0.228
y_0	0.334	0.352	0.412	0.358	0.234
θ	63.04	-35.75	20.54	62.32	53.13
b/a	0.539	0.397	0.337	0.337	0.496
$A \times 10^4$	4.501	2.687	2.925	2.843	3.496
$g_{11} \times 10^{-4}$	8.6447	10.2380	5.5433	29.5364	13.2615
$g_{22} \times 10^{-4}$	4.4132	16.3850	22.2050	10.8298	9.3964
$g_{33} \times 10^{-4}$	0.0225	0.0058	0.0010	0.0019	0.1002
$g_{12} \times 10^{-4}$	-2.9036	9.1858	-7.2611	-13.5430	-6.6225
$g_{13} \times 10^{-4}$	-0.1332	0.0425	0.0217	0.0335	-0.6943
$g_{23} \times 10^{-4}$	-0.1626	-0.0204	-0.0391	-0.3143	-0.1973

*Tabla 6.9.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIE-31. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.305	0.487	0.387	0.246	0.229
y_0	0.334	0.352	0.411	0.358	0.233
θ	58.10	-29.68	16.45	57.26	64.29
b/a	0.420	0.518	0.479	0.408	0.756
$A \times 10^4$	3.432	2.047	1.180	0.942	4.610
$g_{11} \times 10^{-4}$	13.2114	10.3601	12.6360	48.3019	6.4732
$g_{22} \times 10^{-4}$	6.9525	18.9848	40.7234	26.1971	4.5919
$g_{33} \times 10^{-4}$	0.0274	0.0067	0.0041	0.0030	0.0995
$g_{12} \times 10^{-4}$	-6.3611	7.2774	-9.0851	24.2358	-1.1793
$g_{13} \times 10^{-4}$	-0.0255	-0.0368	0.0851	0.1059	-0.2770
$g_{23} \times 10^{-4}$	-0.2237	-0.0598	0.0685	-0.2890	-0.2104

Tabla 6.10.- Modo de objeto. Sistema CIE-31. Observador FC.

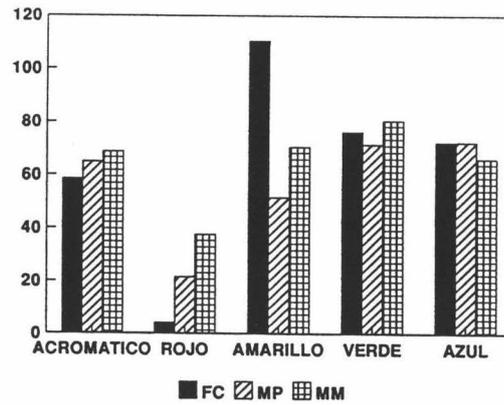
Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.306	0.478	0.388	0.245	0.228
y_0	0.336	0.352	0.411	0.357	0.233
θ	51.07	-37.13	15.43	57.60	49.62
b/a	0.448	0.452	0.446	0.432	0.606
$A \times 10^4$	3.664	1.945	1.391	1.236	2.843
$g_{11} \times 10^{-4}$	10.2383	13.8007	10.1096	35.8316	10.4567
$g_{22} \times 10^{-4}$	7.7214	19.8342	37.3188	19.4449	9.0111
$g_{33} \times 10^{-4}$	0.0260	0.0051	0.0036	0.0021	0.1141
$g_{12} \times 10^{-4}$	-5.8499	10.7023	-8.1280	-17.404	-4.4450
$g_{13} \times 10^{-4}$	-0.1172	0.0057	0.0138	0.0807	-0.3090
$g_{23} \times 10^{-4}$	-0.0813	0.0035	0.0672	-0.2063	-0.2074

Tabla 6.11.- Modo de objeto. Sistema CIE-31. Observador MP.

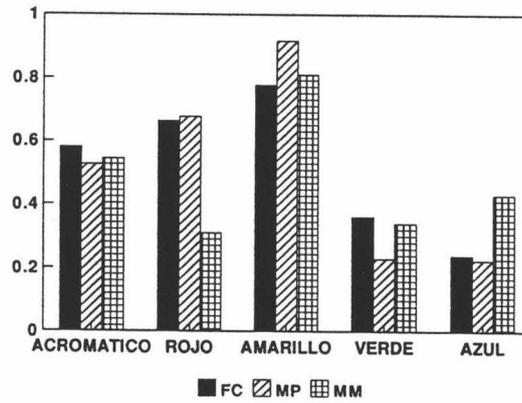
Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
x_0	0.305	0.479	0.388	0.245	0.228
y_0	0.337	0.352	0.411	0.356	0.232
θ	56.01	-36.27	19.0	58.49	52.21
b/a	0.476	0.494	0.392	0.425	0.597
$A \times 10^4$	5.088	2.286	1.782	2.128	3.245
$g_{11} \times 10^{-4}$	7.6880	11.0522	8.5460	26.9786	9.6782
$g_{22} \times 10^{-4}$	4.7454	15.9831	32.0014	14.0295	12.2639
$g_{33} \times 10^{-4}$	0.0260	0.0064	0.0032	0.0011	0.1210
$g_{12} \times 10^{-4}$	-3.6371	7.8368	-9.1342	-14.9760	-2.4347
$g_{13} \times 10^{-4}$	-0.0773	0.0482	0.0282	0.0648	-0.3297
$g_{23} \times 10^{-4}$	-0.0649	0.0205	0.0324	-0.1745	-0.2045

Tabla 6.12.- Modo de objeto.Sistema CIE-31. Observador MM.

ORIENTACION (Grados)



RELACION DE SEMEJES



AREA (x E+4)

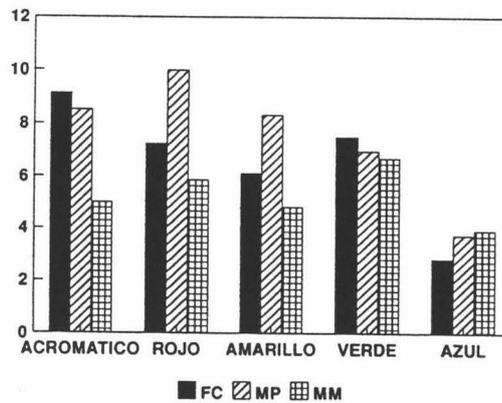
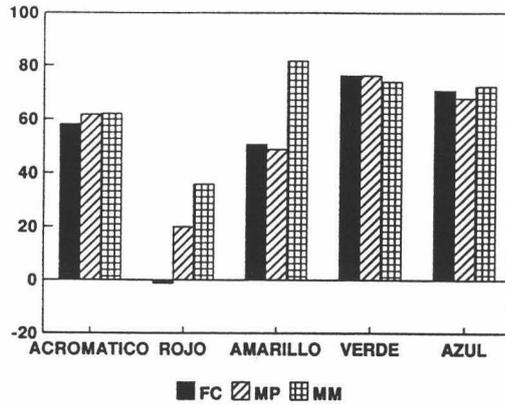
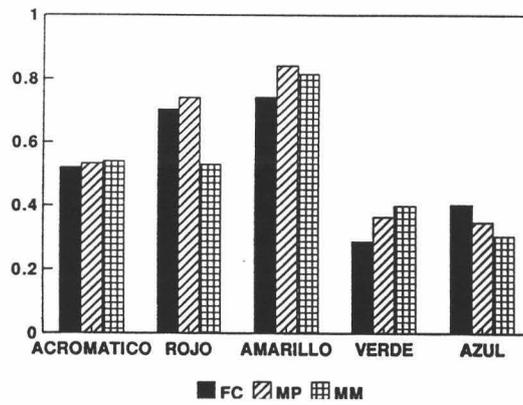


Figura 6.1.- Resultados experimentales para los 3 observadores. Modo de apertura (luz-luz).

ORIENTACION (Grados)



RELACION DE SEMEJES



AREA (x E+4)

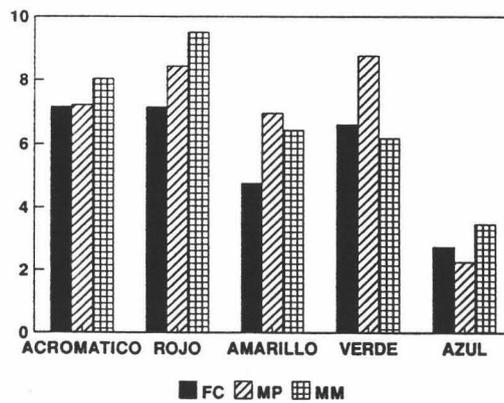
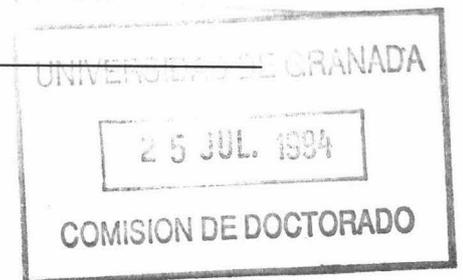
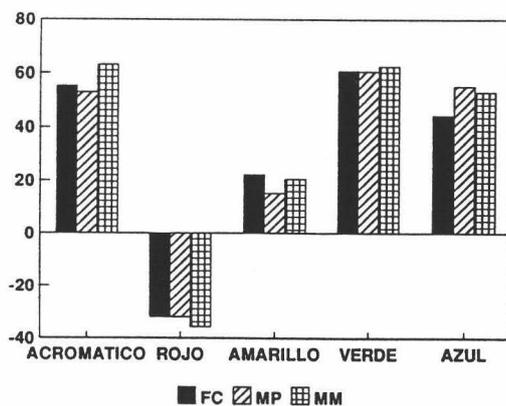


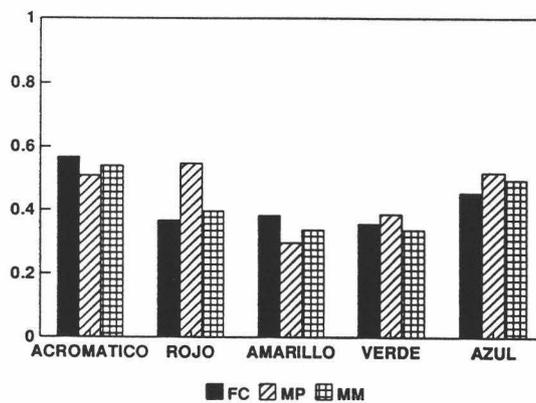
Figura 6.2.- Resultados experimentales para los 3 observadores.
Modo de apertura (luz-muestra).



ORIENTACION (Grados)



RELACION DE SEMIEJES



AREA (x E+4)

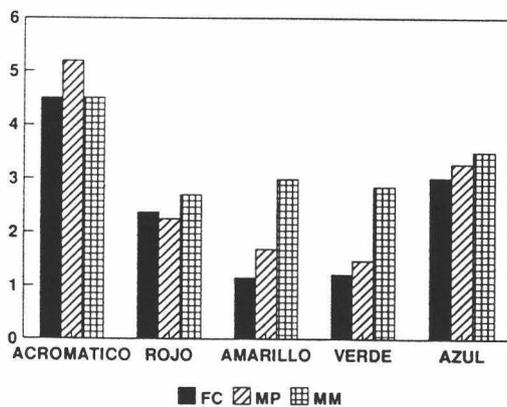
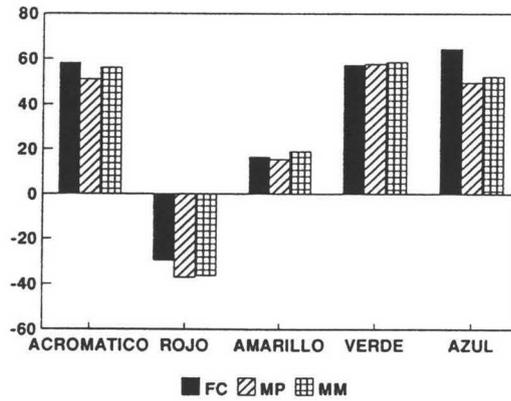
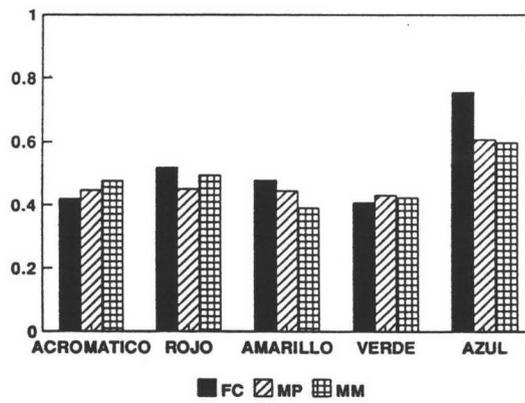


Figura 6.3.- Resultados experimentales para los 3 observadores. Modo de apertura (muestra-muestra).

ORIENTACION (Grados)



RELACION DE SEMIEJES



AREA (x E+4)

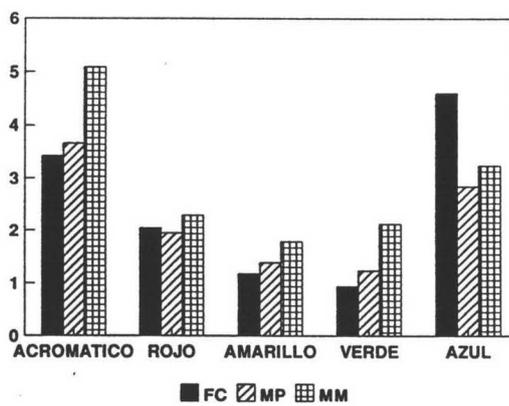


Figura 6.4.- Resultados experimentales para los 3 observadores.
Modo de objeto.

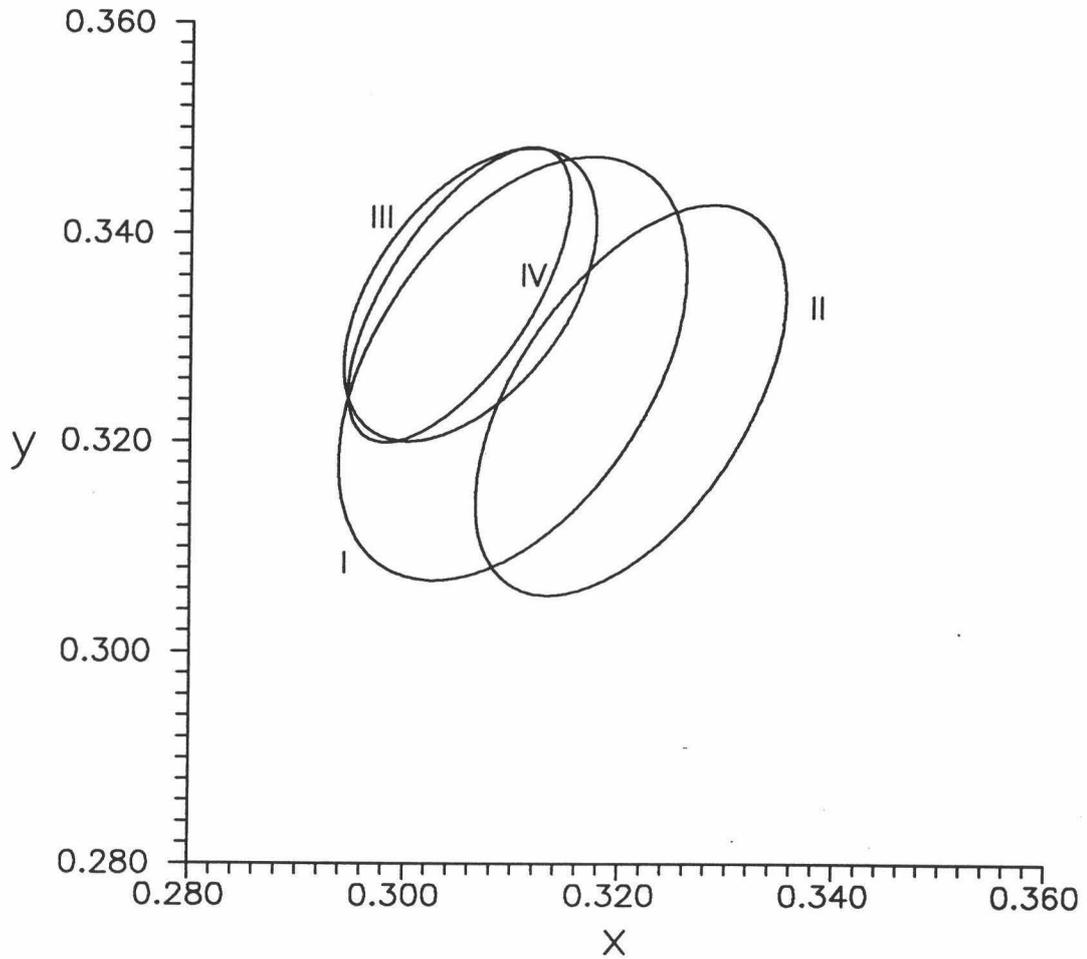


Figura 6.5.- Estímulo acromático. Observador FC.

- I: apertura (luz-luz)*
- II: apertura (luz-muestra)*
- III: apertura (muestra-muestra)*
- IV: objeto*

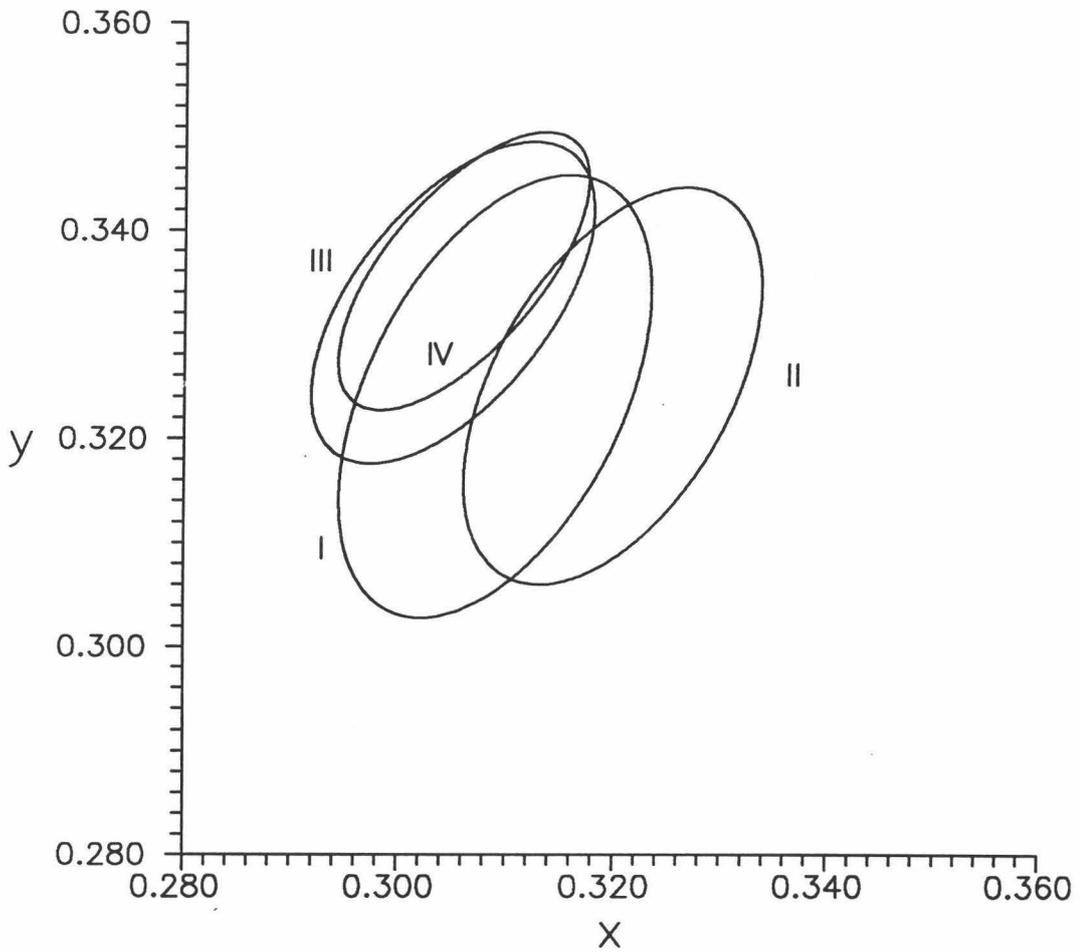


Figura 6.6.- Estímulo acromático. Observador MP.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

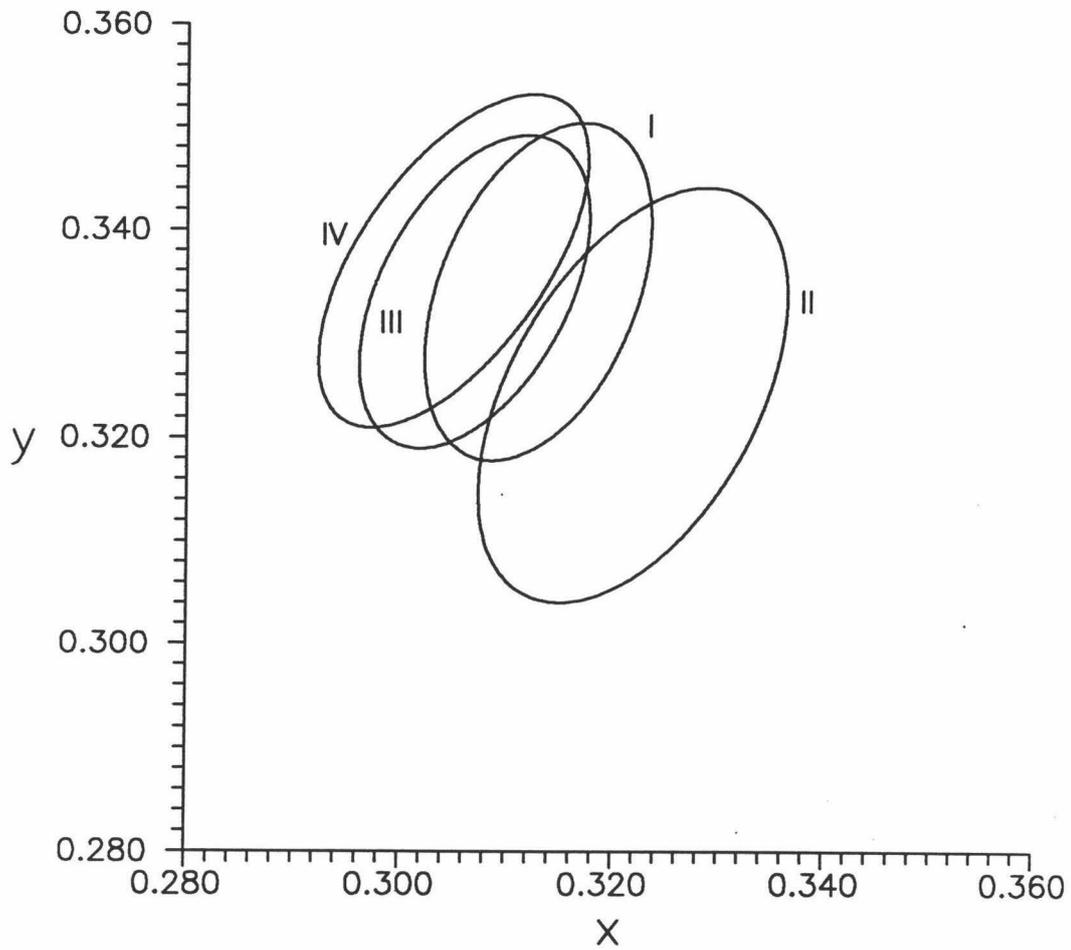


Figura 6.7.- Estímulo acromático. Observador MM.

I: apertura (luz-luz)

II: apertura (luz-muestra)

III: apertura (muestra-muestra)

IV: objeto

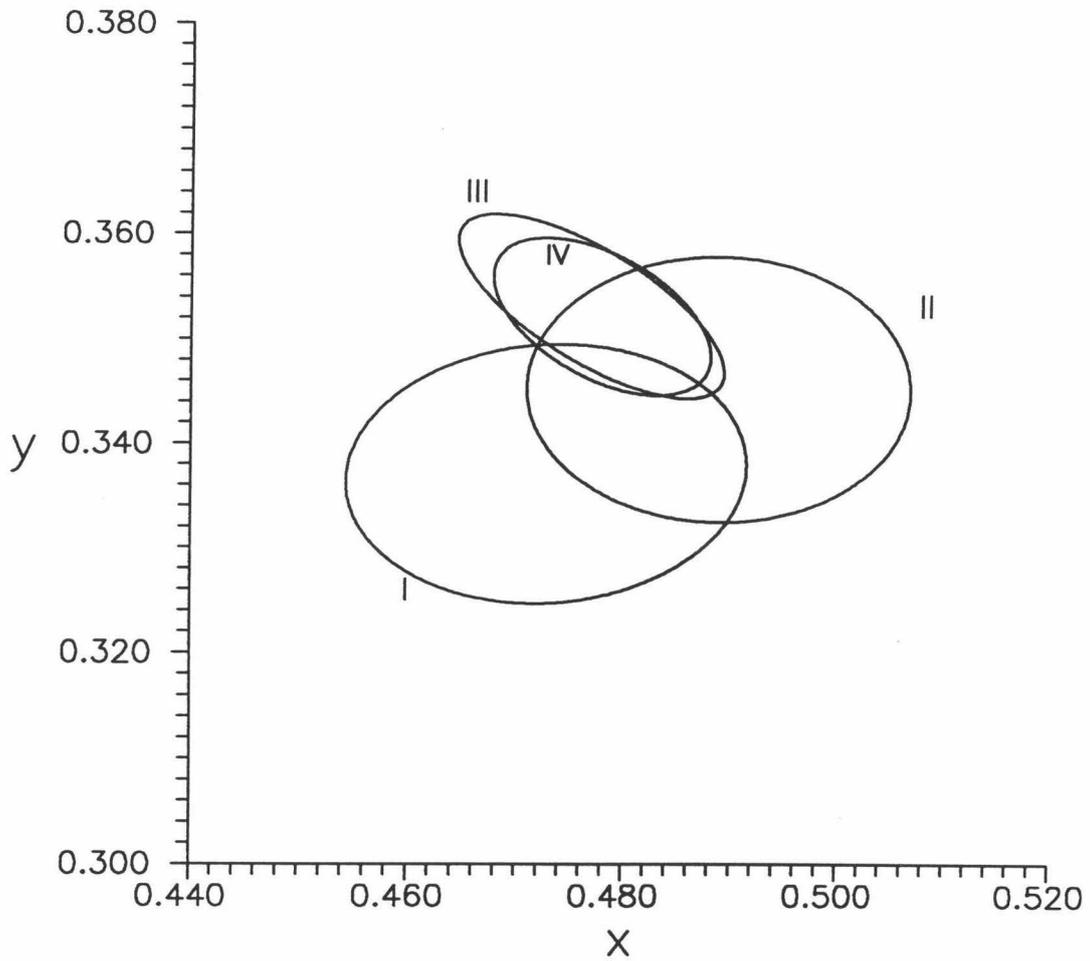


Figura 6.8.- Estímulo rojo. Observador FC.

- I: apertura (luz-luz)*
- II: apertura (luz-muestra)*
- III: apertura (muestra-muestra)*
- IV: objeto*

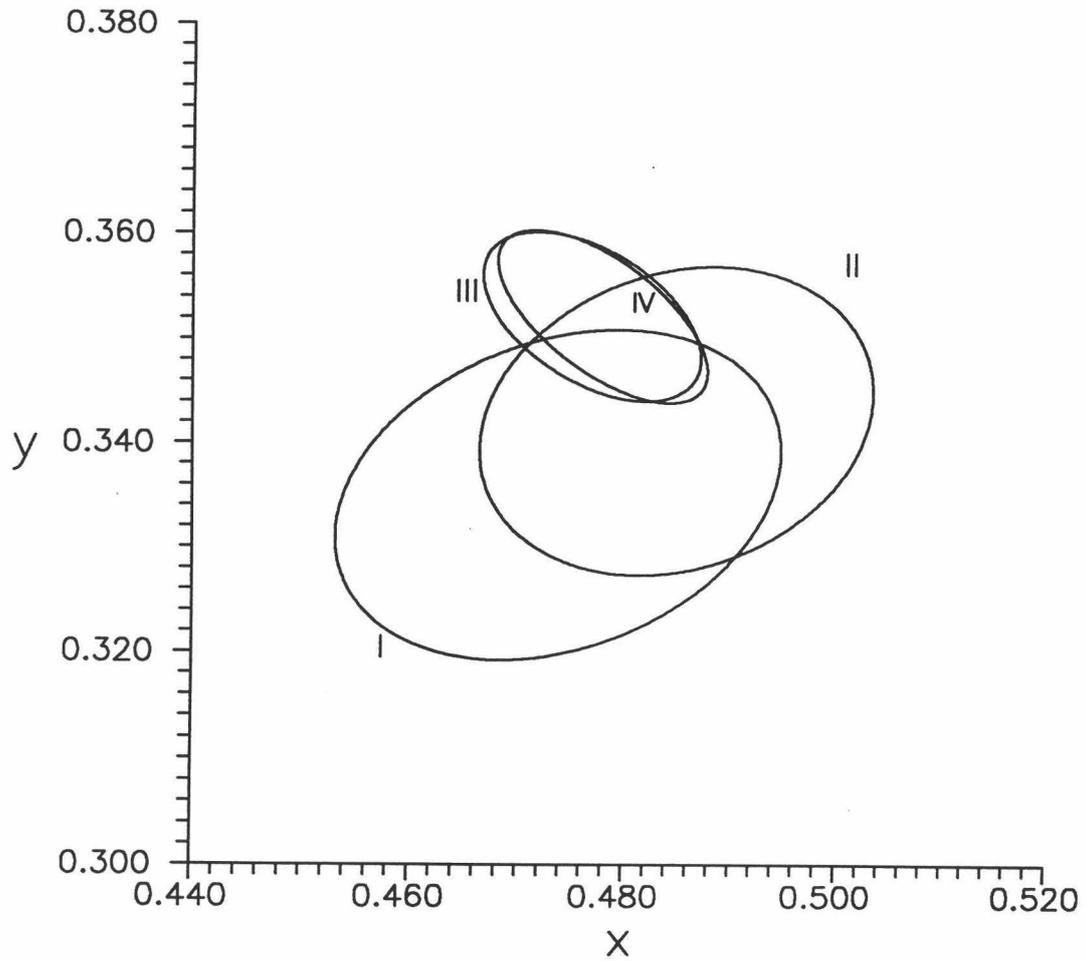


Figura 6.9.- Estímulo rojo. Observador MP.

- I: apertura (luz-luz)*
- II: apertura (luz-muestra)*
- III: apertura (muestra-muestra)*
- IV: objeto*

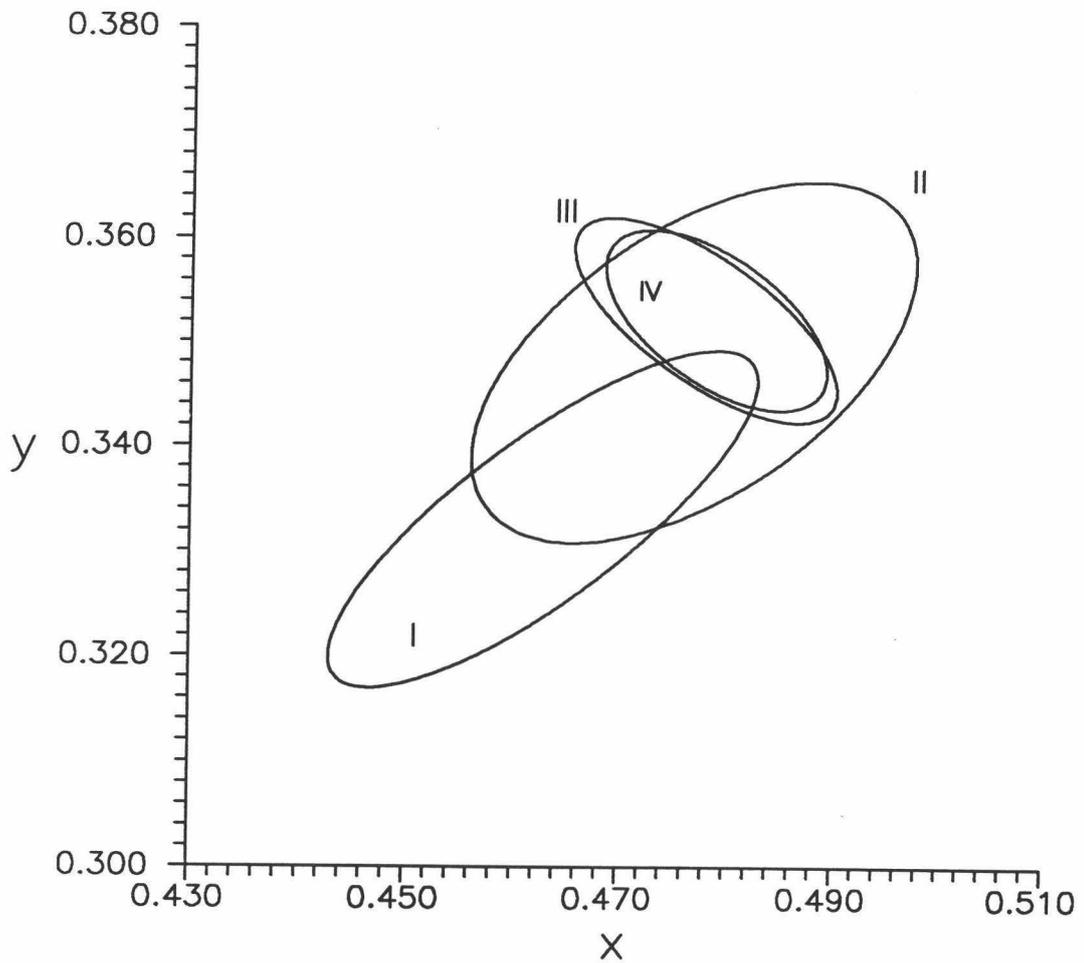


Figura 6.10.- Estímulo rojo. Observador MM.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

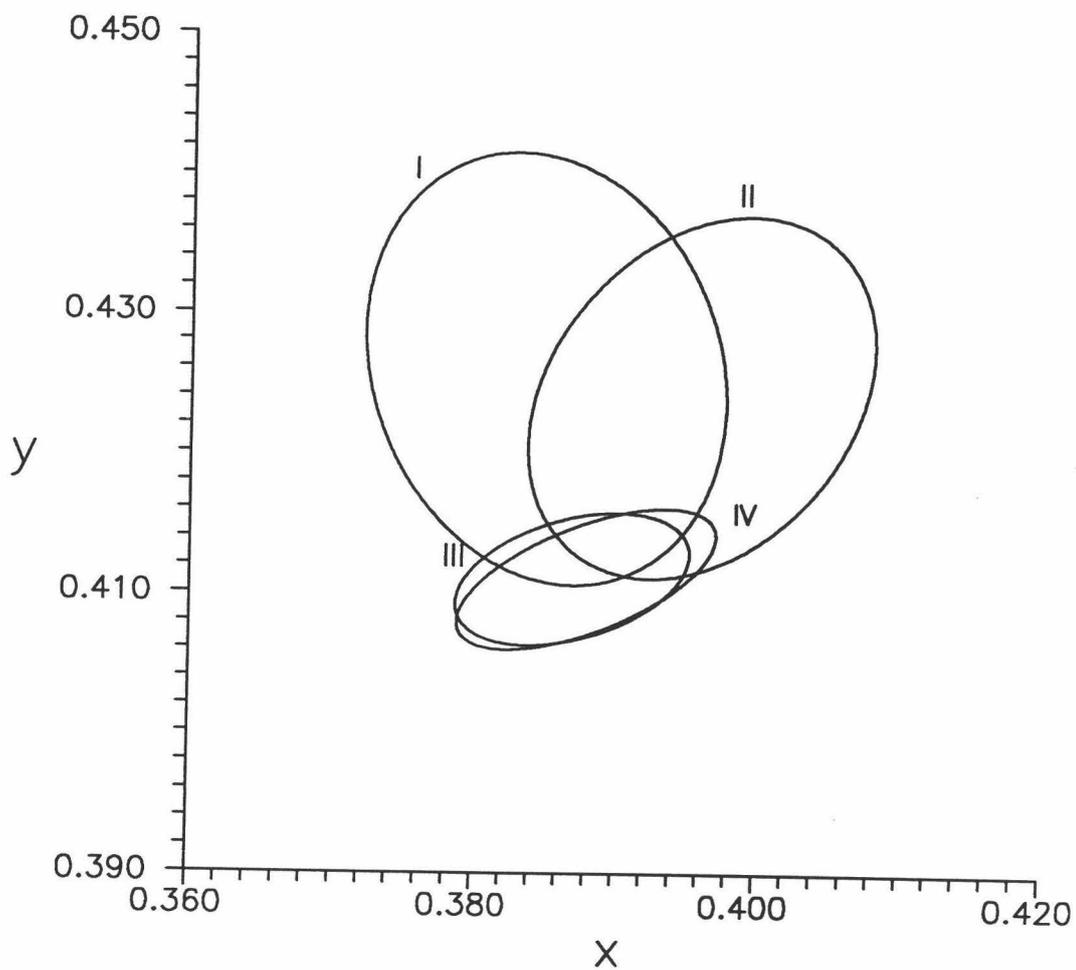


Figura 6.11.- Estímulo amarillo. Observador FC.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

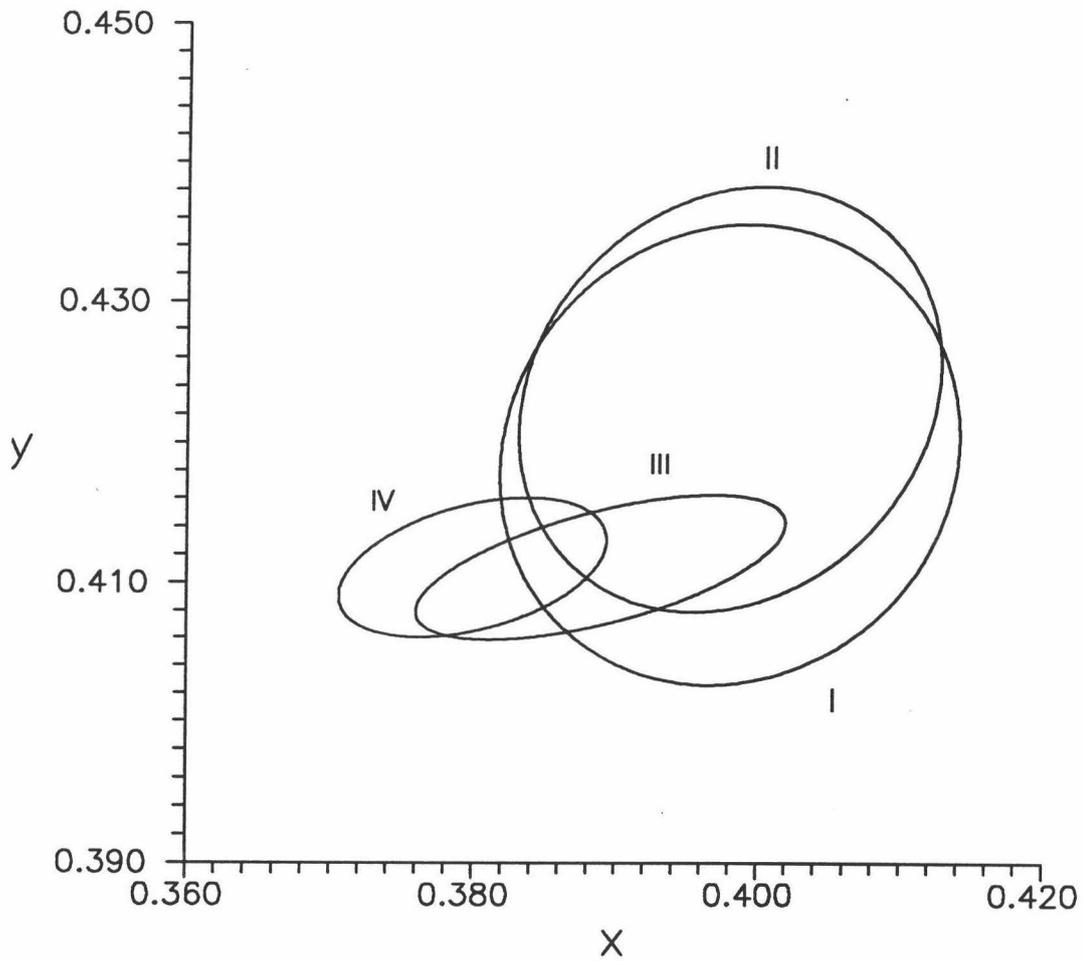


Figura 6.12.- Estímulo amarillo. Observador MP.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

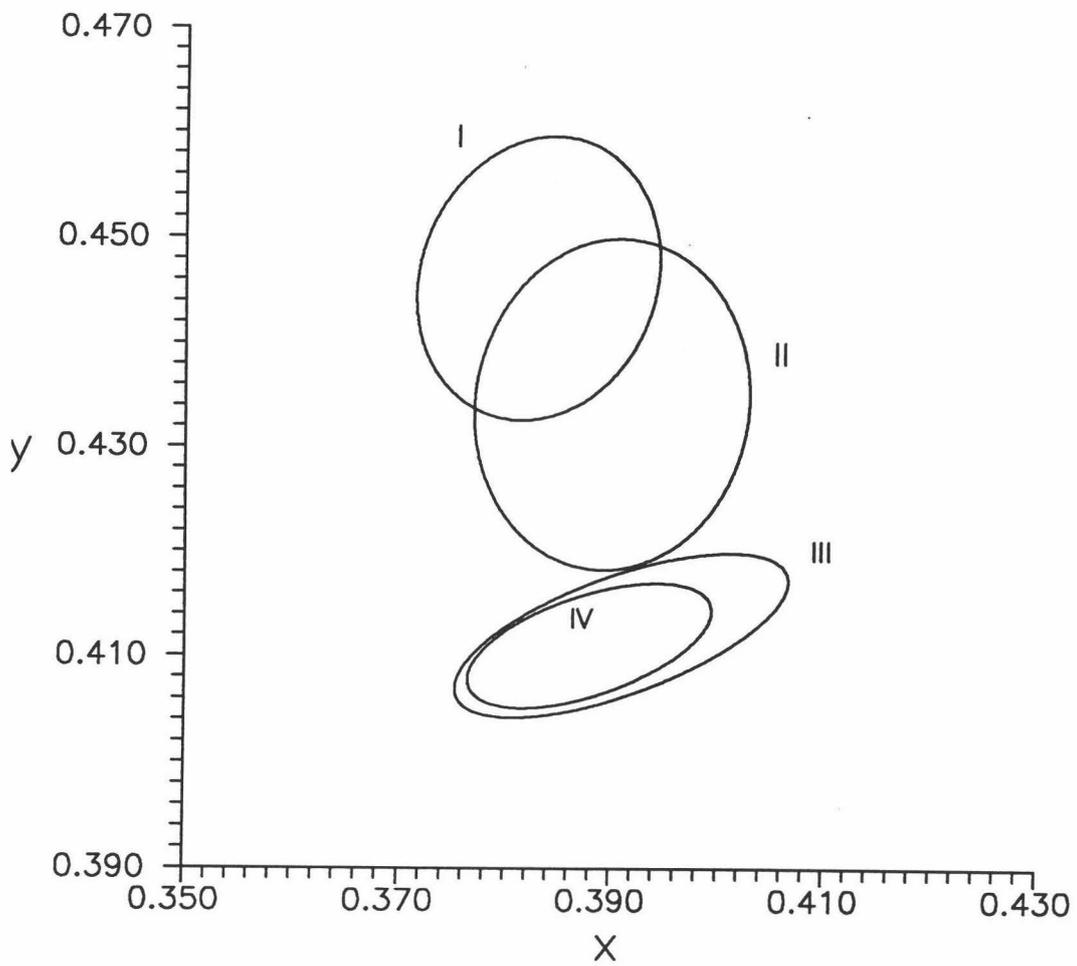


Figura 6.13.- Estímulo amarillo. Observador MM.

- I: apertura (luz-luz)*
- II: apertura (luz-muestra)*
- III: apertura (muestra-muestra)*
- IV: objeto*

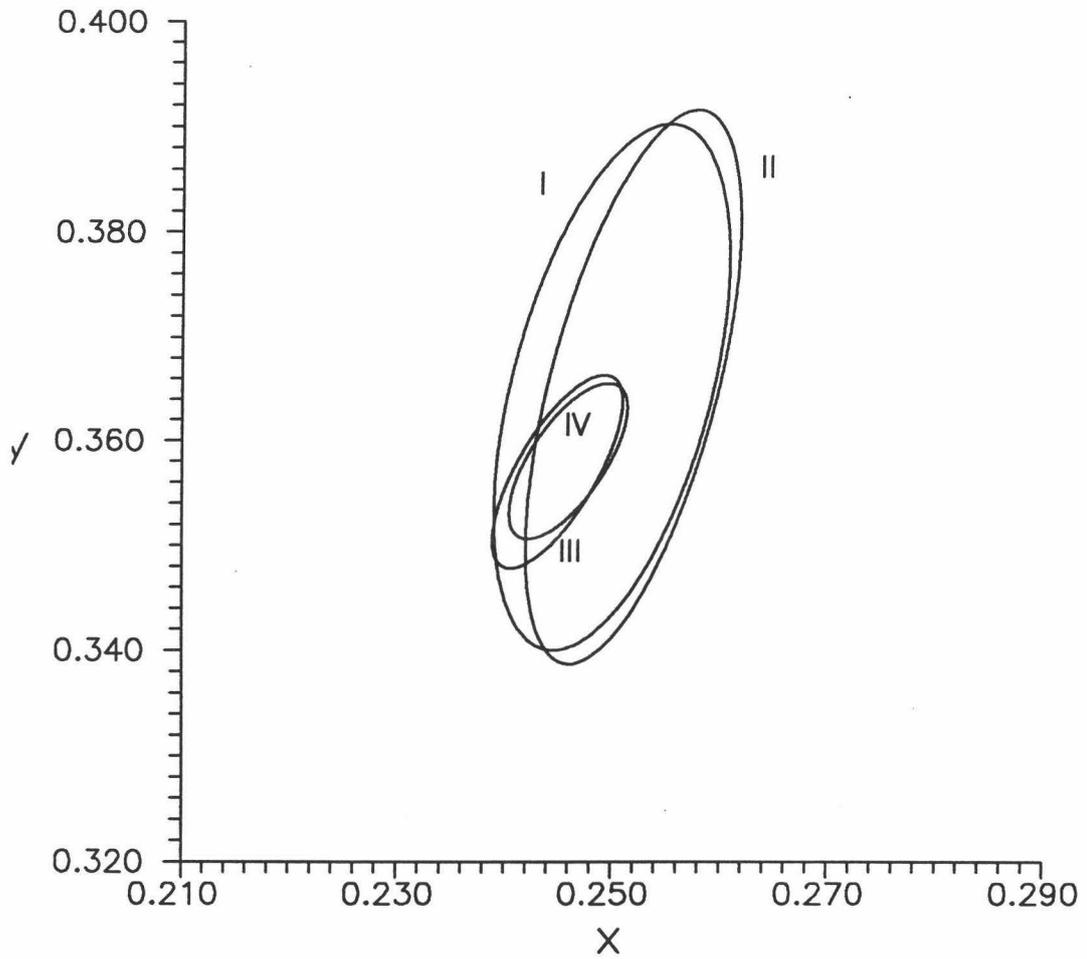


Figura 6.14.- Estímulo verde. Observador FC.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

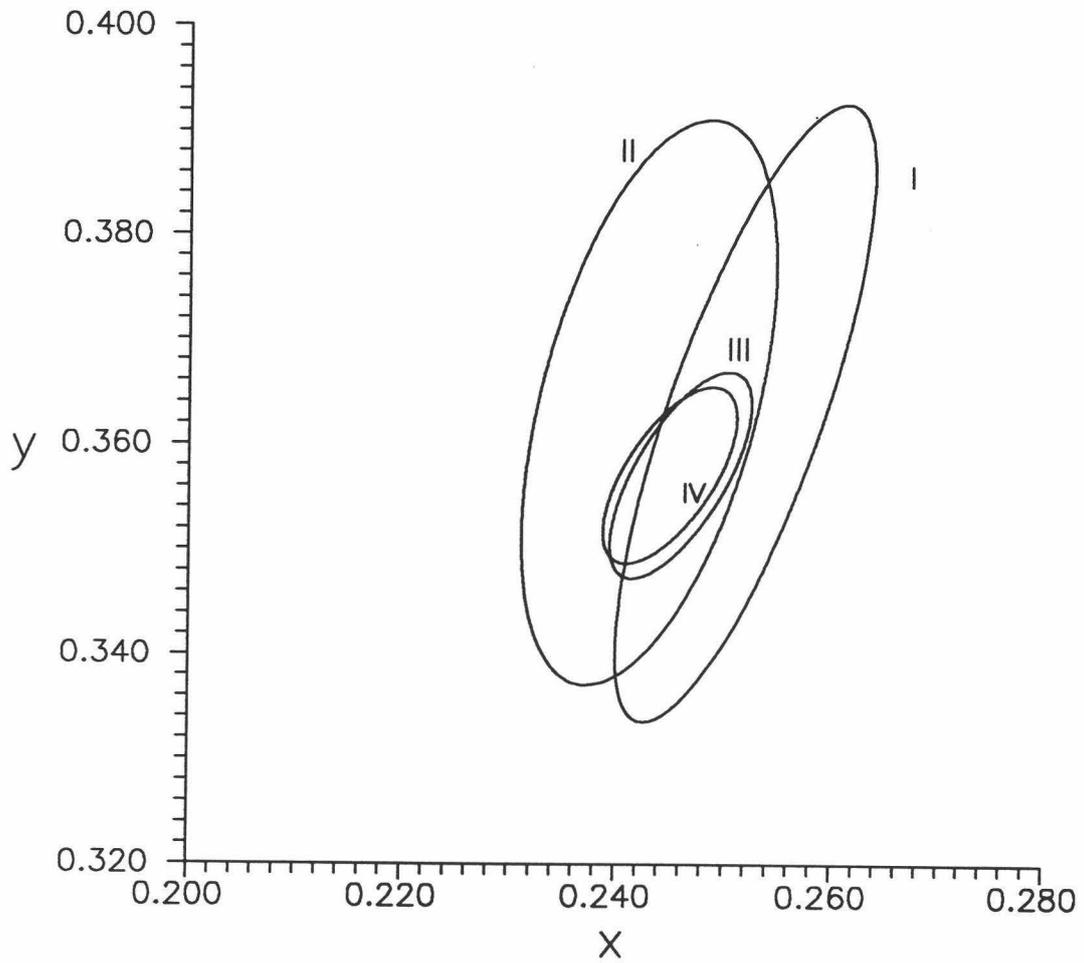


Figura 6.15.- Estímulo verde. Observador MP.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

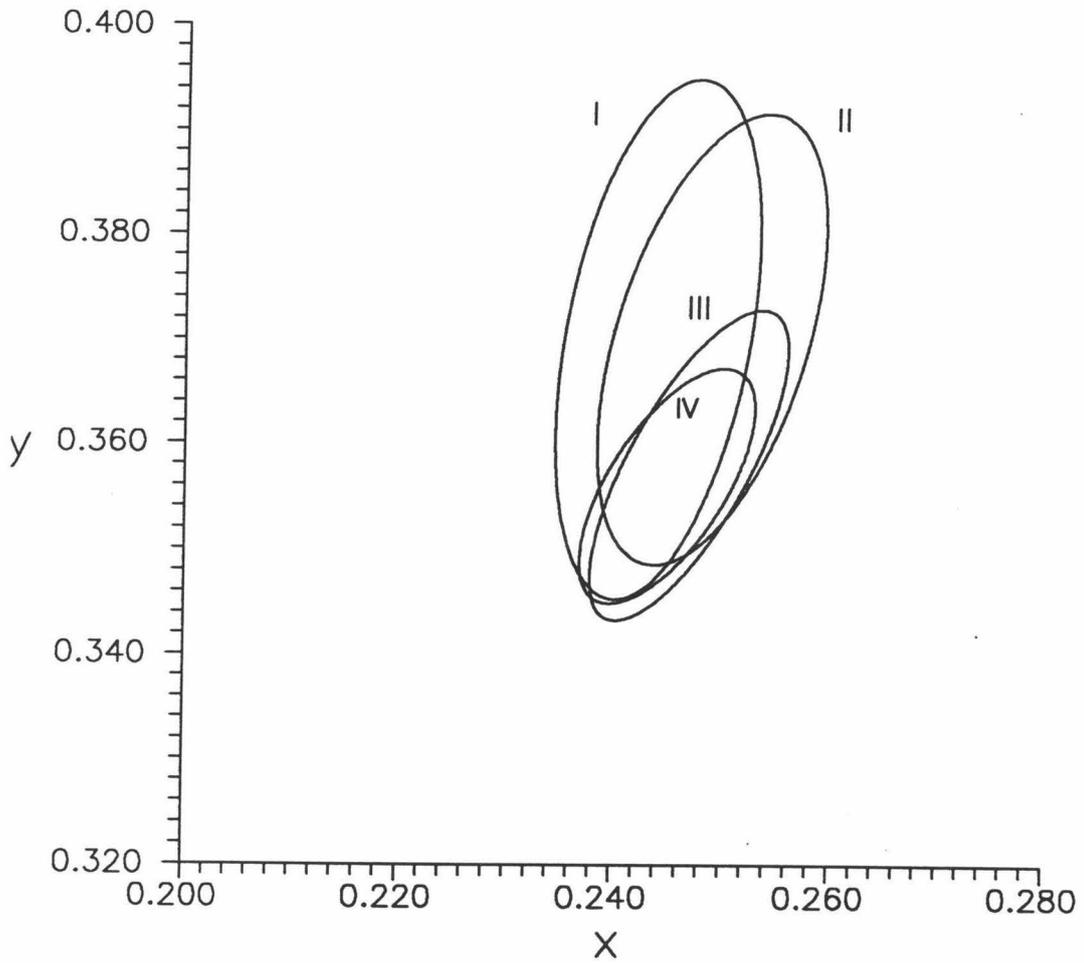


Figura 6.16.- Estímulo verde. Observador MM.

I: apertura (luz-luz)

II: apertura (luz-muestra)

III: apertura (muestra-muestra)

IV: objeto

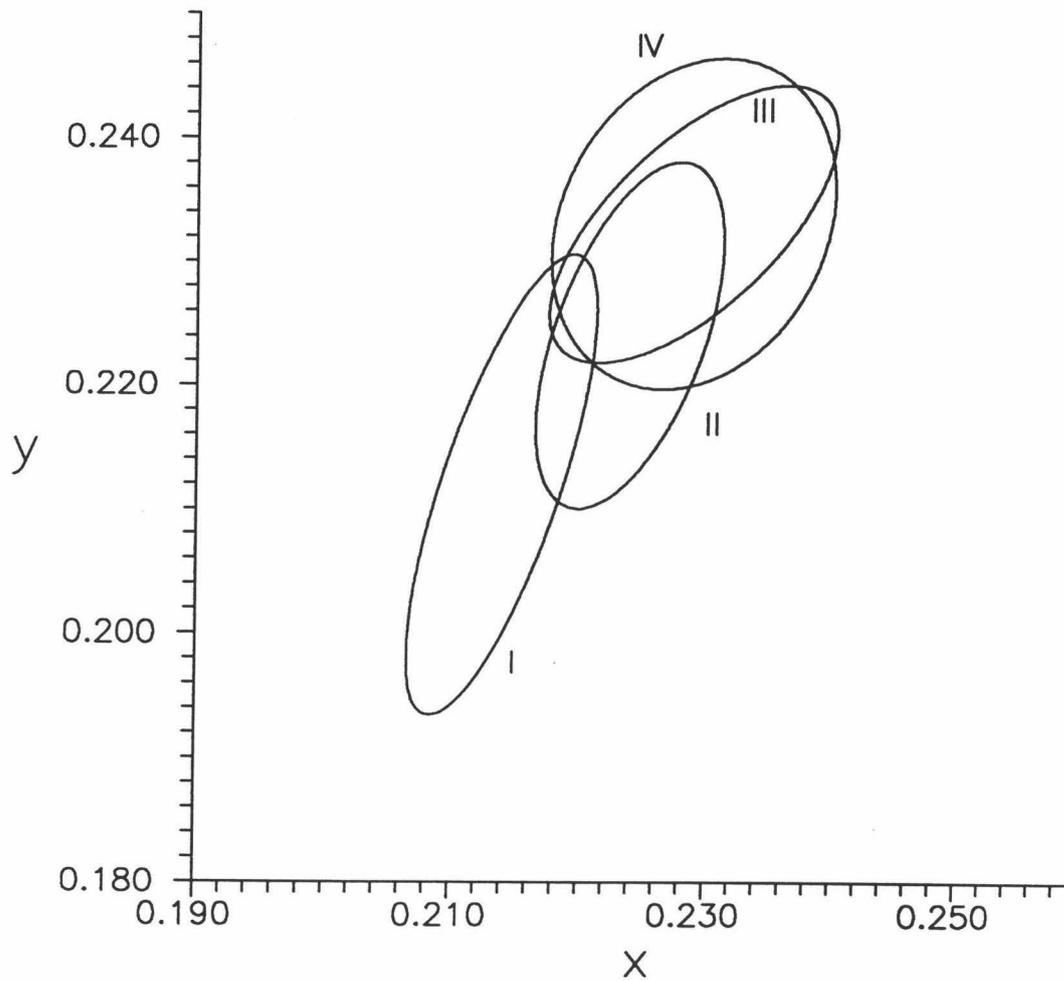


Figura 6.17.- Estímulo azul. Observador FC.

I: apertura (luz-luz)

II: apertura (luz-muestra)

III: apertura (muestra-muestra)

IV: objeto

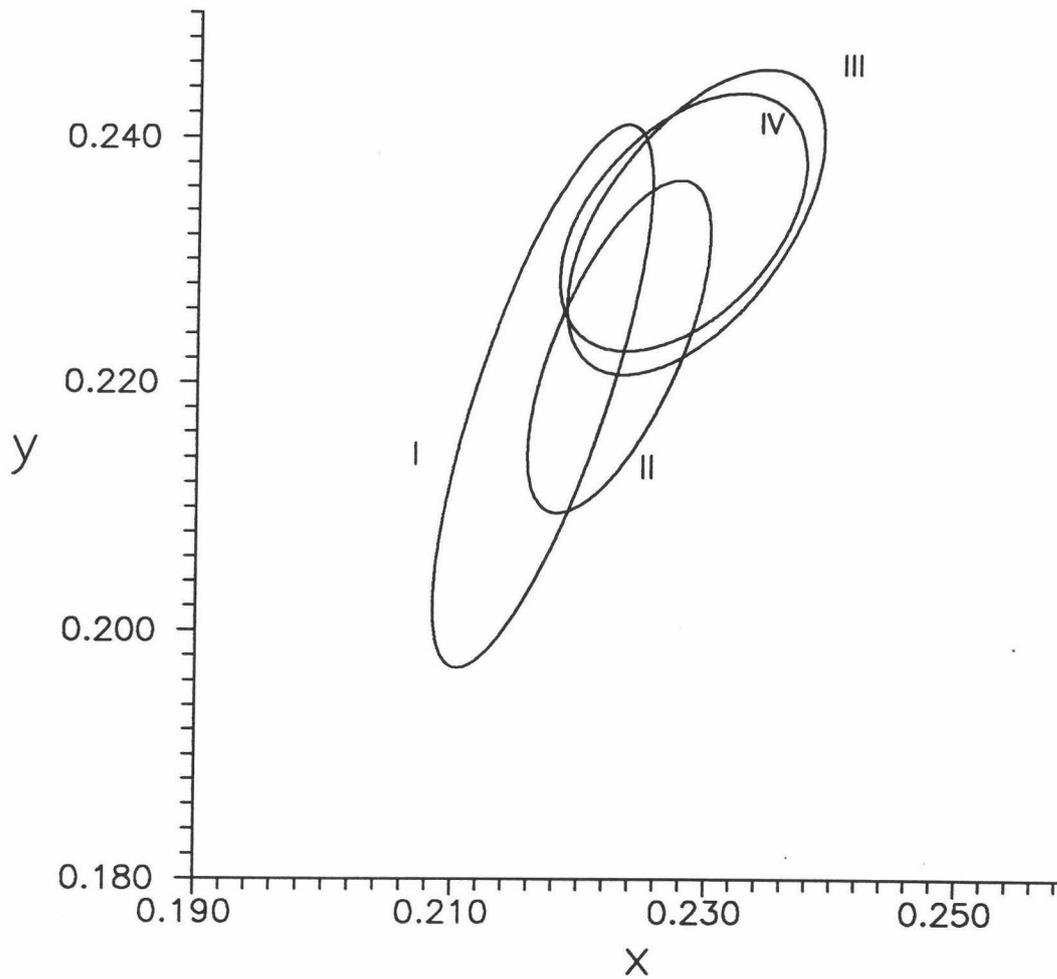


Figura 6.18.- Estímulo azul. Observador MP.

- I: apertura (luz-luz)
- II: apertura (luz-muestra)
- III: apertura (muestra-muestra)
- IV: objeto

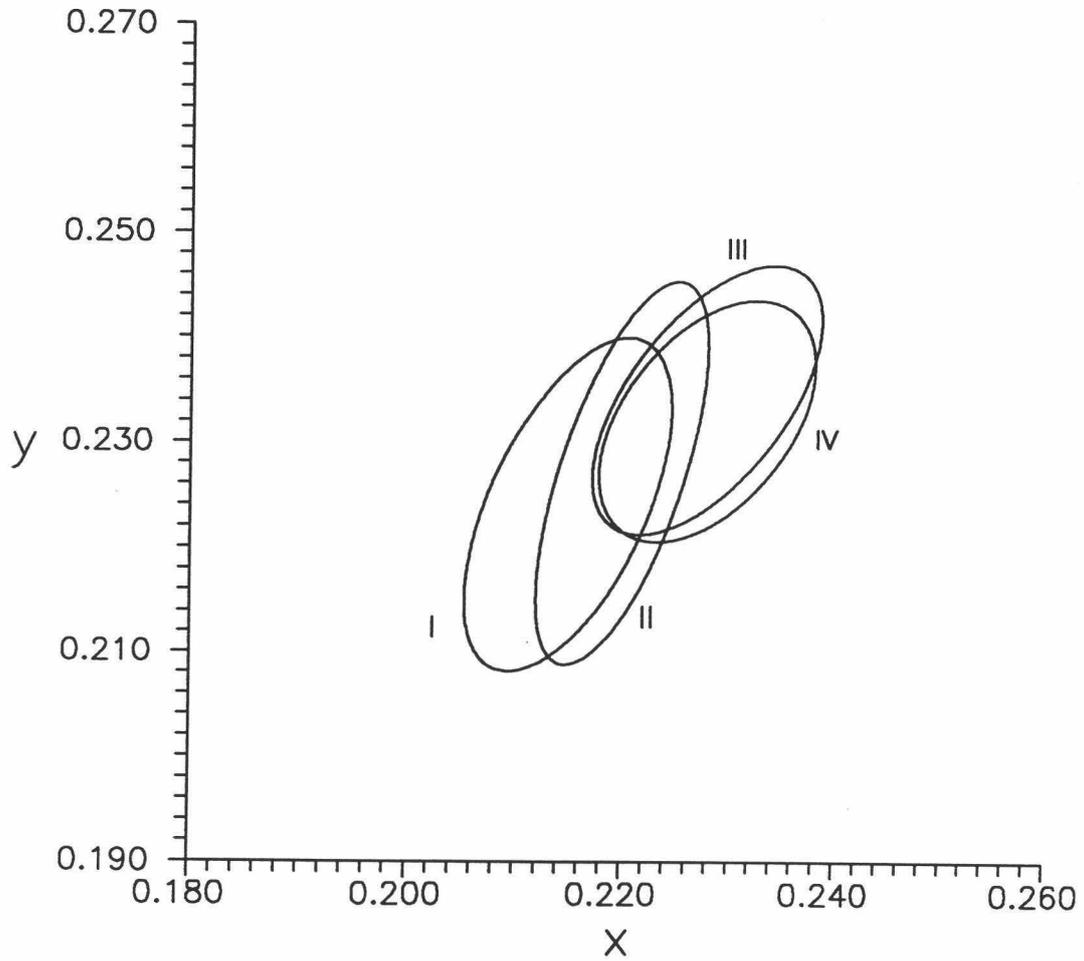


Figura 6.19.- Estímulo azul. Observador MM.

I: apertura (luz-luz)

II: apertura (luz-muestra)

III: apertura (muestra-muestra)

IV: objeto

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-3.689	31.879	-11.553	-33.552	2.157
b^*	2.707	21.927	48.063	4.404	-28.124
L^*	60.840	42.220	84.110	53.080	35.200
C_{ab}^*	4.576	38.692	49.432	33.840	28.207
h_{ab}	143.725	34.520	103.515	172.521	274.385
θ	138.898	1.713	158.110	132.136	134.026
b/a	0.651	0.775	0.606	0.445	0.210
A	117.640	59.007	114.857	72.058	31.663
e^* (%)	1.408	1.015	0.668	0.995	0.730

*Tabla 6.13.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELAB. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-3.114	33.057	-4.606	-32.394	0.786
b^*	1.880	21.909	49.57	49.571	-26.329
L^*	62.84	42.96	85.88	53.15	35.46
C_{ab}^*	3.638	39.660	49.785	32.665	26.340
h_{ab}	148.888	33.535	95.309	172.616	271.710
θ	136.746	145.430	154.518	121.092	133.425
b/a	0.545	0.889	0.815	0.328	0.203
A	116.790	84.150	166.630	67.542	40.170
$e^*(\%)$	1.320	1.484	1.050	0.730	0.762

*Tabla 6.14.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELAB. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-3.034	20.447	-8.481	-23.152	-1.021
b^*	2.952	13.014	24.553	3.030	-16.495
L^*	31.11	22.56	29.54	27.38	17.60
C_{ab}^*	4.233	24.237	25.976	23.350	16.527
h_{ab}	135.785	32.476	109.056	172.544	266.458
θ	139.194	97.010	137.150	135.218	135.862
b/a	0.529	0.442	0.807	0.396	0.426
A	23.578	20.556	18.625	25.207	17.397
$e^*(\%)$	0.964	0.633	0.873	0.896	1.377

*Tabla 6.15.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELAB. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	1.510	34.326	-7.041	-32.978	1.403
b^*	3.248	27.167	51.890	4.614	-23.569
L^*	60.29	44.91	88.15	53.35	33.20
C_{ab}^*	3.447	43.775	52.388	33.301	23.610
h_{ab}	65.064	38.360	97.724	172.023	273.610
θ	132.346	177.754	119.437	129.172	137.804
b/a	0.610	0.780	0.848	0.362	0.347
A	91.500	65.812	98.968	64.149	25.479
$e^*(\%)$	1.215	1.136	0.925	0.832	1.041

*Tabla 6.16.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELAB. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	0.463	33.952	-6.113	-32.378	1.404
b^*	3.335	25.538	52.027	4.508	-23.882
L^*	59.27	44.16	88.15	53.23	33.24
C_{ab}^*	3.337	42.485	52.384	32.641	23.92
h_{ab}	82.092	36.949	96.702	172.072	273.366
θ	135.411	146.324	143.381	132.470	133.624
b/a	0.573	0.852	0.872	0.442	0.336
A	89.455	75.73	145.43	84.742	21.283
$e^*(\%)$	1.211	1.414	1.089	1.072	0.928

*Tabla 6.17.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELAB. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	1.492	31.135	-12.845	-35.623	-0.829
b^*	3.365	26.102	53.814	5.400	-23.581
L^*	60.21	45.12	88.13	54.11	34.11
C_{ab}^*	3.681	40.629	55.326	36.029	23.596
h_{ab}	66.094	399.975	103.425	171.381	267.986
θ	136.216	103.523	144.490	131.574	134.918
b/a	0.567	0.675	0.733	0.517	0.276
A	102.364	85.554	131.996	60.377	33.222
$e^*(\%)$	1.279	1.318	0.888	0.937	0.923

*Tabla 6.18.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELAB. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-7.775	30.702	-5.020	-31.384	0.184
b^*	4.179	28.120	40.833	2.132	-22.358
L^*	64.76	47.10	77.00	48.95	35.78
C^*_{ab}	8.827	41.633	41.140	31.456	22.358
h_{ab}	151.742	42.487	97.009	176.115	270.471
θ	137.484	178.999	53.822	108.317	128.981
b/a	0.717	0.313	0.500	0.634	0.737
A	63.391	22.445	18.895	10.588	29.242
$e^*(\%)$	0.983	0.241	0.352	0.400	1.462

*Tabla 6.19.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELAB. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-8.239	30.854	-4.716	-31.010	0.182
b^*	4.127	27.765	41.349	2.222	-22.257
L^*	64.67	46.83	77.72	48.88	35.55
C_{ab}^*	9.215	41.507	41.609	31.089	22.258
h_{ab}	153.390	41.984	96.507	175.903	270.471
θ	125.806	175.034	45.785	110.678	138.648
b/a	0.737	0.448	0.367	0.682	0.601
A	72.053	21.114	28.027	12.726	31.430
$e^*(\%)$	1.029	0.375	0.325	0.498	1.371

*Tabla 6.20.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELAB. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-7.409	31.078	-4.365	-31.026	-0.469
b^*	4.307	27.934	42.125	2.518	-22.627
L^*	64.80	46.86	77.891	49.13	36.783
C_{ab}^*	8.570	41.788	42.350	31.113	22.6316
h_{ab}	149.833	41.957	95.916	175.365	268.812
θ	136.100	175.710	53.100	110.567	136.036
b/a	0.598	0.321	0.434	0.580	0.636
A	62.63	25.449	49.248	24.826	35.032
$e^*(\%)$	0.944	0.281	0.517	0.593	1.440

*Tabla 6.21.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELAB. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-4.593	34.351	-1.245	-28.591	2.547
b^*	0.326	25.793	38.439	-0.602	-25.625
L^*	65.00	47.05	79.76	48.76	36.16
C_{ab}^*	34.604	42.957	38.459	28.598	25.751
h_{ab}	175.939	36.902	91.856	181.206	275.676
θ	120.25	177.38	43.10	102.84	153.88
b/a	0.578	0.448	0.609	0.747	0.494
A	49.751	20.193	20.556	8.449	47.063
$e^*(\%)$	0.738	0.337	0.323	0.400	1.296

Tabla 6.22.- Modo de Objeto. Sistema CIELAB. Observador FC.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-4.967	34.184	-0.893	-28.791	2.183
b^*	1.003	25.668	38.712	-0.898	-25.325
L^*	66.06	46.74	79.92	48.99	35.42
C^*_{ab}	5.062	42.749	38.722	28.805	25.419
h_{ab}	168.588	36.902	179.511	181.787	274.927
θ	112.139	173.723	43.248	106.960	148.485
b/a	0.713	0.364	0.564	0.783	0.652
A	54.265	19.004	24.390	11.204	28.117
$e^*(\%)$	0.781	0.269	0.354	0.497	1.242

Tabla 6.23.- Modo de objeto. Sistema CIELAB. Observador MP.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
a^*	-5.598	34.562	-0.893	-28.309	2.575
b^*	1.123	25.956	38.744	-1.089	-26.277
L^*	64.71	47.05	80.00	48.42	36.85
C_{ab}^*	5.710	43.223	38.754	28.330	26.403
h_{ab}	168.658	36.906	91.321	183.825	275.600
θ	122.604	173.494	49.981	108.958	146.164
b/a	0.667	0.400	0.497	0.758	0.626
A	72.803	22.612	32.379	19.022	34.240
$e^*(\%)$	0.957	0.322	0.406	0.650	1.326

Tabla 6.24.- Modo de objeto. Sistema CIELAB. Observador MM.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-3.296	60.038	9.715	-38.311	-15.353
v^*	4.637	19.973	66.939	11.377	-40.288
L^*	60.835	42.216	84.113	53.081	35.202
C_{uv}^*	5.687	63.276	67.640	39.964	43.114
h_{uv}	25.401	18.401	81.742	163.459	249.139
θ	100.932	179.893	163.327	103.749	98.450
b/a	0.832	0.451	0.496	0.465	0.238
A	247.454	103.882	199.941	118.953	48.155
e^* (%)	2.092	0.853	1.043	1.302	0.628

Tabla 6.25.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELUV. Observador FC.



Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-3.054	63.204	21.507	-37.141	-15.558
v^*	3.341	19.858	67.485	10.925	-37.572
L^*	62.844	42.958	85.876	53.146	35.459
C_{uv}^*	4.526	65.297	70.830	38.714	40.666
h_{uv}	132.437	17.705	80.359	161.789	255.006
θ	106.975	0.329	172.342	95.903	98.475
b/a	0.701	0.5778	0.601	0.306	0.228
A	250.519	150.650	297.029	112.491	61.705
e^* (%)	1.882	1.274	1.221	0.878	0.658

*Tabla 6.26.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELUV. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-1.897	30.366	0.416	-21.526	-8.535
v^*	4.057	9.542	26.169	6.413	-17.746
L^*	31.114	22.408	29.538	27.380	17.599
C_{uv}^*	4.478	31.830	26.173	22.380	19.692
h_{uv}	107.825	19.384	62.911	161.568	251.556
θ	114.621	55.909	167.749	108.156	94.370
b/a	0.696	0.595	0.669	0.426	0.461
A	24.023	24.033	17.610	27.439	15.346
e^* (%)	1.450	0.851	1.033	1.173	1.149

*Tabla 6.27.- Modo de apertura (luz-luz).
Sistema CIELUV. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	3.687	68.057	18.607	-37.641	-12.894
v^*	4.606	25.055	71.0958	11.628	-32.910
L^*	60.293	44.914	88.146	53.352	33.200
C_{uv}^*	5.899	72.523	73.490	39.396	35.346
h_{uv}	57.001	22.457	83.704	160.925	256.227
θ	96.843	177.487	176.916	103.050	99.980
b/a	0.763	0.424	0.738	0.371	0.417
A	195.737	112.752	174.139	106.524	0.417
e^* (%)	1.742	0.864	1.054	1.049	0.937

*Tabla 6.28.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELUV. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	2.778	66.252	20.413	-36.946	-13.100
v^*	4.831	23.429	70.996	11.369	-33.378
L^*	59.269	44.161	88.146	53.233	33.243
C_{uv}^*	5.572	70.273	73.873	38.656	35.857
h_{uv}	60.099	19.475	73.959	162.895	248.571
θ	105.184	176.653	174.550	104.348	95.825
b/a	0.744	0.544	0.649	0.467	0.370
A	189.310	130.302	256.438	141.216	31.974
e^* (%)	1.776	1.197	1.155	1.409	0.777

*Tabla 6.29.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELUV. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	4.235	62.054	10.481	-40.373	-15.221
v^*	4.716	24.867	74.311	13.159	-32.964
L^*	62.213	45.123	88.128	54.112	34.108
C_{uv}^*	6.338	66.852	75.049	42.462	36.308
h_{uv}	48.079	21.838	81.971	161.948	245.216
θ	107.260	14.486	163.844	101.084	99.237
b/a	0.746	0.772	0.616	0.526	0.313
A	219.158	147.165	223.182	99.120	50.126
e^* (%)	1.890	1.525	1.201	1.252	0.861

*Tabla 6.30.- Modo de apertura (luz-muestra).
Sistema CIELUV. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-7.996	62.986	16.030	-36.037	-13.615
v^*	7.575	27.402	55.986	7.595	-31.697
L^*	64.757	47.105	77.005	48.951	35.783
C_{uv}^*	11.014	68.682	58.235	36.824	34.497
h_{uv}	49.140	26.124	82.247	166.771	254.172
θ	86.650	172.499	26.546	80.102	67.238
b/a	0.875	0.183	0.393	0.487	0.593
A	131.948	38.686	34.001	16.944	46.501
e^* (%)	1.407	0.315	0.177	0.470	0.888

*Tabla 6.31.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELUV. Observador FC.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-8.250	62.729	16.729	-35.576	-13.526
v^*	6.998	26.958	56.395	7.671	-31.490
L^*	64.665	46.831	77.368	48.875	35.549
C_{uv}^*	10.825	68.501	58.602	36.394	34.280
h_{uv}	135.215	46.618	73.478	167.832	246.754
θ	77.387	171.570	22.658	79.851	85.200
b/a	0.763	0.269	0.273	0.529	0.627
A	152.659	36.464	50.034	20.390	49.785
e^* (%)	1.336	0.464	0.130	0.553	1.151

*Tabla 6.32.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELUV. Observador MP.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-7.424	63.460	17.727	-35.519	-14.567
v^*	7.704	27.027	57.464	8.111	-32.269
L^*	64.802	46.859	77.891	49.127	36.783
C_{uv}^*	10.699	68.993	60.136	36.434	35.405
h_{uv}	133.689	23.068	72.856	167.137	245.704
θ	103.689	170.785	26.550	82.736	82.374
b/a	0.749	0.193	0.340	0.460	0.645
A	132.304	43.913	88.200	39.874	59.670
e^* (%)	1.387	0.397	0.195	0.703	1.215

*Tabla 6.33.- Modo de apertura (muestra-muestra).
Sistema CIELUV. Observador MM.*

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-6.008	65.596	19.149	-33.716	-12.315
v^*	1.236	22.663	50.179	3.281	-35.508
L^*	65.002	47.049	79.761	48.776	36.165
C_{uv}^*	6.134	69.400	53.708	33.876	37.583
h_{uv}	168.365	19.060	69.113	174.442	250.878
θ	86.812	172.668	17.973	74.428	114.667
b/a	0.620	0.258	0.437	0.555	0.769
A	101.048	33.609	36.087	12.993	72.570
e^* (%)	0.982	0.399	0.027	0.439	1.732

Tabla 6.34.- Modo de Objeto. Sistema CIELUV. Observador FC.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-6.132	65.170	19.830	-34.101	-12.433
v^*	2.282	22.516	50.427	2.895	-34.837
L^*	66.060	46.743	79.918	48.985	35.412
C_{uv}^*	6.542	68.950	54.186	34.223	36.989
h_{uv}	159.591	19.060	68.533	175.147	250.359
θ	72.213	170.062	18.576	74.819	81.504
b/a	0.674	0.218	0.405	0.588	0.758
A	110.490	31.532	42.808	17.213	42.677
e^* (%)	0.968	0.363	0.172	0.507	1.196

Tabla 6.35.- Modo de Objeto. Sistema CIELUV. Observador MP.

Estímulo	Acromático	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
u^*	-6.878	66.041	19.850	-33.549	-12.755
v^*	2.549	22.760	50.478	2.553	-36.643
L^*	64.709	47.045	79.817	48.423	36.855
C_{uv}^*	7.336	69.853	54.241	33.646	38.799
h_{uv}	159.66	19.016	68.534	175.648	250.816
θ	83.426	170.285	23.578	76.482	85.192
b/a	0.711	0.239	0.377	0.578	0.731
A	146.520	37.582	56.817	48.423	53.300
e^* (%)	1.285	0.417	0.080	0.680	1.273

Tabla 6.36.- Modo de Objeto. Sistema CIELUV. Observador MM.

6.2.- BIBLIOGRAFIA.

MELGOSA, M., HITTA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L.;
"Color discrimination thresholds translated from the CIE (x,y,Y)
space to the CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)", Color Res. Appl., **19**, 1-8
(1994).

ROBERTSON, A.R.; "CIE guidelines for coordinated research on
colour-difference evaluation", Color Res. Appl., **3**, 149-151
(1978).

WITT, K.; "Three-dimensional thresholds of color-difference
perceptibility in painted samples: Variability of observer in
four CIE color regions". Color Res. Appl., **12**, 128-134 (1987).

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "New color matching ellipses", J.
Opt. Soc. Am., **61**, 1135-1152 (1971).

CAPITULO 7.

**ANALISIS Y DISCUSION DE LOS
RESULTADOS.**

CAPITULO VII.

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

7.1. INTRODUCCION.

Una vez expuestos los resultados obtenidos en nuestras experiencias, pretendemos ahora realizar su análisis y discusión para, posteriormente, obtener las conclusiones que se desprendan de ellos. Empezaremos este análisis estudiando las variaciones obtenidas en los resultados de nuestros 3 observadores para posteriormente comparar los resultados de umbrales de discriminación cromática obtenidos en cada una de las experiencias realizadas.

Tal y como hemos dicho anteriormente, una parte importante de nuestro trabajo consiste en comparar los resultados obtenidos en discriminación cromática para las observaciones realizadas en modo de apertura y de objeto. Aunque son numerosos los trabajos que emplean estos 2 tipos de presentación, son muy pocos los que

han realizado un estudio comparativo detallado entre los resultados que se obtienen, debido, posiblemente, a que las condiciones experimentales bajo las que se realizan estos trabajos son diferentes.

Finalmente, estamos interesados en evaluar la adecuación de nuestros resultados experimentales (y los de otros trabajos clásicos en Colorimetría Diferencial) a algunas de las fórmulas más recientes de diferencia de color. En concreto nuestro estudio se centrará en las actuales fórmulas derivadas del sistema CIELAB: CMC ($l:c$), BFD ($l:c$) y TC1-29.

En resumen, en el presente capítulo se tratarán los siguientes apartados:

- 1.- Estudio de la variabilidad interobservador, en la capacidad de discriminación cromática bajo diferentes parámetros.
- 2.- Comparación de los umbrales de discriminación obtenidos en las diferentes experiencias desarrolladas bajo presentaciones en modo de apertura y de objeto.
- 3.- Estudio de los umbrales de discriminación cromática predichos por fórmulas derivadas del sistema CIELAB y análisis de su posible adecuación a nuestros resultados experimentales así como a los de otros autores.

7.2.- ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD INTEROBSERVADOR.

Como hemos venido apuntando, un aspecto de gran interés en relación a la valoración de los resultados experimentales en colorimetría diferencial, consiste en el análisis de la posible variabilidad existente entre los diferentes observadores, con visión normal de color, utilizados en las experiencias.

En este aspecto se han realizado algunos estudios sobre la variabilidad de los umbrales de discriminación cromática correspondientes a distintos observadores, o a un sólo observador, en diferentes sesiones experimentales (Wyszecki, 1971). Incluso, en algunos trabajos (Witt, 1987), se ha llegado a cuestionar la validez del ajuste a unos determinados resultados experimentales de nuevas fórmulas de diferencias de color, habida cuenta de la dispersión de los resultados obtenidos por los diferentes observadores de una misma experiencia. Por otra parte, hemos de decir que, si bien las capacidades de discriminación de distintos observadores normales no tienen por qué ser análogas, ni lo son de hecho, cuando se calculan umbrales de discriminación cromática utilizando un elevado número de puntos y un método experimental adecuado las discrepancias entre los observadores en la mayoría de los casos, no suelen ser tan altas como a veces se ha indicado (García J.A., 1991), lo que justifica, a nuestro juicio, la búsqueda de fórmulas de diferencia de color que se ajusten con más precisión a tales umbrales.

Con el fin de analizar la posible variabilidad de resultados entre observadores una primera observación de las figuras 6.3 a 6.6 del capítulo anterior nos indica que para nuestros 3 observadores los resultados son, en general, muy parecidos en todas y cada una de las experiencias desarrolladas. No obstante y para hacer este análisis más rigurosamente, hemos calculado los valores medios y las desviaciones típicas del valor absoluto de

la diferencia de orientación y de relación de semiejes para una pareja de observadores (FC y MP), igualmente, se ha hallado, para esta pareja, el valor medio y desviación típica de la diferencia de las áreas de los umbrales, normalizada al valor medio de las mismas, a fin de tener en cuenta los diferentes tamaños de los umbrales en las distintas zonas del diagrama cromático.

Los resultados obtenidos para cada una de las experiencias citadas se dan en la tabla 7.1 donde designamos por $\Delta\theta$ (en grados), $\Delta(b/a)$ y $\Delta A/A_0$ las diferencias en orientaciones, relación de semiejes y áreas normalizadas, respectivamente.

Modo de Presentación		$\Delta\theta^\circ$	$\Delta(b/a)$	$\Delta A/A_0$
Apertura (luz-luz)	\bar{x}	17.5180	0.0704	0.2086
	σ	21.4550	0.0549	0.1133
Apertura (luz-muestra)	\bar{x}	5.4380	0.0568	0.2028
	σ	6.6900	0.0307	0.1225
Apertura(muestra-muestra)	\bar{x}	4.0680	0.0834	0.1680
	σ	4.2120	0.0503	0.1126
Objeto	\bar{x}	6.1030	0.0602	0.2054
	σ	5.1986	0.0473	0.1555

Tabla 7.1.- Variabilidad de resultados de discriminación de la pareja de observadores FC-MP en el espacio CIE-31.

Cabe observar que sólo se presentan divergencias importantes en las orientaciones correspondientes a las experiencias desarrolladas con el colorímetro de estímulos espectrales en el modo de apertura (luz-luz) con $\bar{x} = 17.5$ y $\sigma = 21.5$. Sin embargo, estas diferencias (en algún caso superiores a 50°) se deben a los valores obtenidos en los estímulos rojo y amarillo y no son tan significativas como pudiera parecer debido al alto valor de la relación de semiejes que se obtiene para estos estímulos (como es lógico, un alto valor en la relación de semiejes indica que la elipse se aproxima a una circunferencia para la cual la orientación es indeterminada). Este resultado está también de acuerdo con Brown y MacAdam, 1949, quienes señalan que las mayores diferencias se dan en orientaciones en aquellos estímulos en los que la proporción de rojo y verde es muy alta con respecto a la del azul. Podemos hacer un comentario análogo, pero no tan significativo, acerca de la orientación del umbral del estímulo azul, pero sólo para el observador FC en modo de objeto.

Por lo que respecta a la relación de semiejes la variabilidad entre nuestros observadores es muy pequeña (inferior al 0.09 en todos los casos), siendo también relativamente aceptable la variabilidad en áreas (inferior al 0.21%).

A este respecto conviene citar que aunque la capacidad de discriminación de distintos observadores normales sea diferente (mayor o menor tamaño de las elipses), debido a distintas habilidades, la potencialidad en la discriminación debe seguir unas mismas tendencias correspondientes a mecanismos muy similares lo que debe reflejarse, concretamente, en un buen acuerdo en la orientación y relación de semiejes de los umbrales obtenidos, tal como sucede en nuestras experiencias.

En el caso de las elipses aportadas por el observador MM en el modo de apertura (luz-luz), el área es inferior a las de los

otros observadores, excepto para el estímulo de tonalidad azul. Esto se debe, probablemente, a que estas elipses fueron obtenidas con estímulos de referencia que, aunque tenían coordenadas de cromaticidad muy próximas a los centros CIE, presentaban luminancia mucho menor que la de los empleados en nuestras experiencias (excepto, precisamente, para el estímulo de tonalidad azul).

En general, como se puede comprobar, las variaciones entre observadores son pequeñas en nuestro trabajo y muy parecidas o incluso menores que las que se encuentran cuando analizamos parejas de observadores de trabajos clásicos en este campo, (Brown-MacAdam, 1949; Wyszecki-Fielder, 1971). Por ejemplo, para la pareja GF-GW del trabajo de Wyszecki-Fielder, obtenemos los siguientes valores; $\Delta\theta$: $\bar{x} = 12.7^\circ$ y $\sigma = 12.2^\circ$; $\Delta(b/a)$: $\bar{x} = 0.12$ y $\sigma = 0.09$; $\Delta A/A_0$: $\bar{x} = 0.32$ y $\sigma = 0.24$.

Por último, y como se desprende del análisis de las figuras y tablas podemos señalar que no encontramos diferencias significativas en cuanto a los resultados obtenidos para la variabilidad interobservador cuando empleamos diferentes modos de presentación como se desprende de las figuras y tablas antes citadas; la única variabilidad significativa es la orientación correspondiente a las experiencias (luz-luz), como ya hemos mencionado.

En nuestra opinión, también se hace necesario estudiar la variabilidad entre observadores en el sistema CIELAB, puesto que después emplearemos métricas derivadas de este espacio. La tabla 7.2 presenta los mismos parámetros que la 7.1 pero en CIELAB.

Modo de Presentación		$\Delta\theta^\circ$	$\Delta(b/a)$	$\Delta Area/A_0$
Apertura (luz-luz)	\bar{x}	10.7346	0.1015	0.2086
	σ	13.2681	0.0517	0.1471
Apertura (luz-muestra)	\bar{x}	13.1833	0.0444	0.1745
	σ	12.0082	0.0268	0.1427
Apertura(muestra-muestra)	\bar{x}	7.1416	0.0944	0.1668
	σ	3.4843	0.0501	0.1195
Objeto	\bar{x}	4.2847	0.0942	0.1891
	σ	2.2587	0.0506	0.1810

Tabla 7.2.- Variabilidad de resultados de discriminación de la pareja de observadores FC-MP en el espacio CIELAB.

Debido a la no linealidad de las transformaciones involucradas en el paso de CIE-31 a CIELAB aparecen diferencias en los valores encontrados en ambos sistemas, (e.g las diferencias en áreas son ahora ligeramente inferiores). En general, de la tabla 7.2 cabe también concluir una baja variabilidad entre observadores, similar o incluso inferior a la aportada por otros autores.

Pensamos que los resultados anteriores deben ser bastante orientadores con vistas a valorar la significación de las posibles diferencias entre los umbrales que se obtengan con presentación en distintos modos, o las posibles entre unos resultados experimentales y los previstos por las fórmulas de diferencia de color, tal y como analizaremos en próximos apartados de este capítulo.

7.3.- COMPARACION DE RESULTADOS PARA DIFERENTES MODOS DE PRESENTACION.

7.3.1.- COMPARACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Nuestro interés se centra ahora en analizar los umbrales de discriminación cromática en dos modos de presentación: apertura y objeto. Dentro del modo de apertura hemos desarrollado tres tipos diferentes de experiencias que, como ya hemos indicado, designamos por apertura (luz-luz), apertura (luz-muestra) y apertura (muestra-muestra). En las experiencias apertura (luz-luz) y apertura (luz-muestra) empleamos un colorímetro visual utilizando como estímulo de referencia una luz dirigida producida por mezcla aditiva de luces o bien, la luz reflejada por una muestra iluminada. En la experiencia de apertura (muestra-muestra) se emplea el mismo dispositivo de iluminación/observación y los mismos conjuntos de muestras que se utilizarán para las experiencias en modo de objeto, pero empleando un campo circundante oscuro.

En primer lugar, abordaremos el análisis de los resultados de las tres experiencias en modo de apertura, para posteriormente comparar estos resultados con los obtenidos en modo de objeto. Las figuras con las elipses de discriminación cromática correspondientes a estas tres experiencias aparecen en el capítulo anterior con la notación I, II y III, respectivamente.

Empezaremos por la comparación de los umbrales de discriminación cromática correspondientes a las experiencias de apertura (luz-luz) y apertura (luz-muestra). La figura 7.1 muestra, para el observador MP, los valores de la orientación, relación de semiejes y área de las elipses de discriminación obtenidas para cada una de estas dos experiencias. Resultados muy

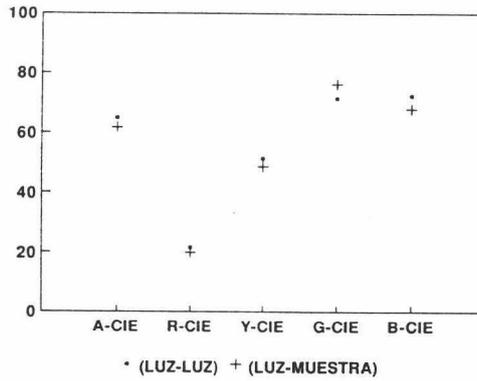
similares a los indicados en esta figura podemos encontrar para el resto de los observadores.

En general, lo más destacable de la figura 7.1 es que no se observan variaciones significativas en los parámetros que caracterizan a los umbrales de discriminación cromática, especialmente en las orientaciones.

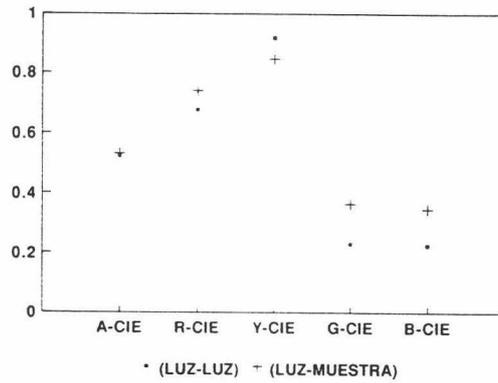
Conviene recordar, que en el primer caso (luz-luz) las igualaciones de partida son isómeras mientras que en el caso (luz-muestra) son igualaciones metámeras. Si bien en algunos trabajos se han encontrado variaciones significativas en las elipses de discriminación cromática según el tipo de igualación de partida (Jiménez de Barco, 1984), en nuestros resultados no encontramos diferencias mayores a las existentes entre observadores. Sobre todo la incidencia del grado de metamerismo sobre los umbrales de discriminación de color parece ser importante, pues se producen desplazamientos significativos de los centros de las elipses de discriminación cromática. Este punto resulta, sin embargo, difícil de analizar en nuestras experiencias ya que los estímulos de referencia en las experiencias (luz-luz) y (luz-muestra) son, ya de partida, ligeramente distintos. Inicialmente no era el objetivo de esta Memoria entrar en los problemas derivados del metamerismo y cronológicamente se realizaron antes las experiencias (luz-luz), por lo que al empezar las experiencias (luz-muestra) fue inevitable seleccionar algunas muestras de referencia ligeramente desplazadas respecto a las luces que eran estímulos de referencia anteriormente.

Un pequeño comentario adicional merecen los resultados obtenidos por el observador MM (Tablas 6.3. y 6.6). Los umbrales de discriminación cromática correspondientes a este observador en modo de apertura (luz-luz), fueron obtenidos en experiencias

ORIENTACION



b/a



AREA (x E+4)

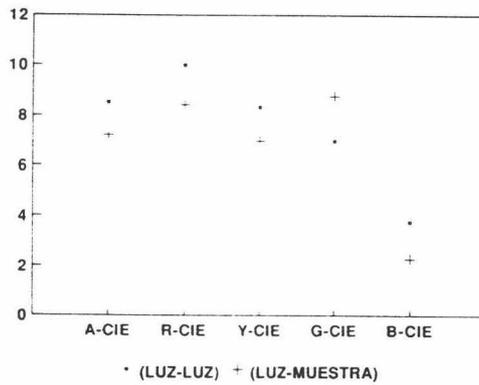


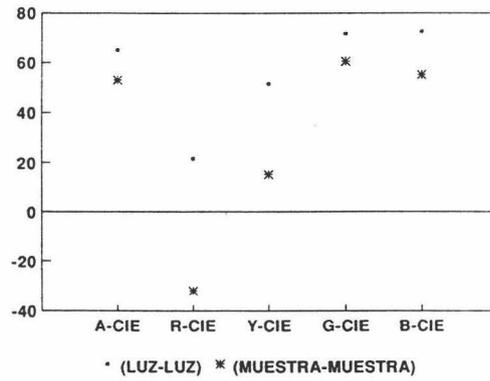
Figura 7.1.- Orientación, relación de semiejes y área de las cinco elipses de discriminación cromática obtenidas en las experiencias de apertura (luz-luz) y (luz-muestra), para el observador MP.

previas a la realización de este trabajo (Melgosa, 1989) en condiciones experimentales semejantes a las empleadas aquí pero empleando un colorímetro visual tipo Donaldson modificado. Al comparar estos resultados con los que se obtienen ahora en apertura (luz-muestra), encontramos que son muy semejantes en relación de semiejes y orientaciones pero difieren en cuanto a las áreas, que antes eran siempre menores. Pensamos que estas diferencias en áreas no tienen excesiva importancia pues pueden deberse sencillamente a diferentes habilidades en distintos dispositivos. En cualquier caso, la luminancia de los estímulos de referencia era inferior en el colorímetro tipo Donaldson, donde también los pasos obtenidos al modificar los diafragmas que controlan la radiancia de los primarios producen cambios en las coordenadas de los estímulos menores que los que se obtienen en el colorímetro tipo Wright.

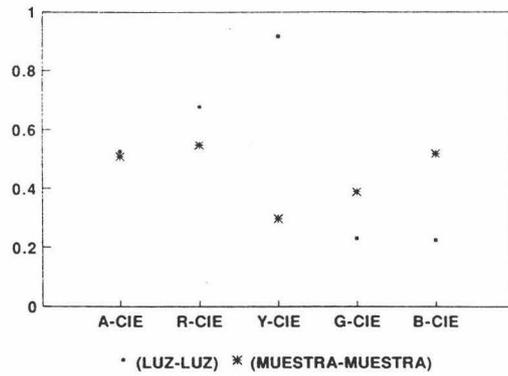
Si comparamos ahora los resultados obtenidos para cualquiera de los tres observadores en estas dos experiencias y la realizada en modo de apertura (muestra-muestra), observamos que ahora sí aparecen algunas diferencias más significativas, especialmente en cuanto al tamaño de las elipses, y en particular, para algunos estímulos. A modo de ejemplo, la figura 7.2 muestra para el observador MP esta comparación en orientaciones, relación de semiejes y áreas, respectivamente.

En esta gráfica observamos, por ejemplo, que en los valores correspondientes a la relación de semiejes aparecen diferencias significativas fundamentalmente para el estímulo amarillo. Así, la relación de semiejes para este estímulo cuando empleamos el colorímetro visual es alta (de 0.75 a 0.9 según el observador) mientras que el valor que obtenemos en la experiencia apertura (muestra-muestra) es aproximadamente de 0.3. Es posible que esta diferencia en relación de semiejes, concretamente en este punto de tonalidad amarilla, se deba a la distribución de muestras

ORIENTACION



b/a



AREA (x E+4)

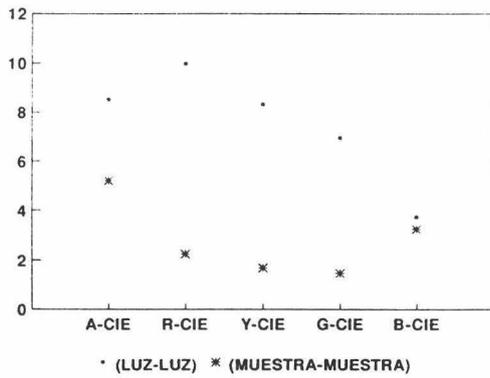


Figura 7.2 .- Orientaciones, relación de semiejes y área de las elipses de discriminación cromática del observador MP para los cinco estímulos en las experiencias de apertura (luz-luz) y apertura (muestra-muestra).

empleada. Si observamos la figura 5.6 del capítulo 5 donde se muestra la distribución puntual correspondiente al estímulo amarillo en el plano xy del espacio CIE-1931, comprobaremos que en esta distribución el rango en los valores de la coordenada "x" es superior al rango en la coordenada "y", lo cual puede haber influido en la baja relación de semiejes obtenida para este estímulo. Si representamos la distribución puntual que se puede obtener con el colorímetro visual en este mismo estímulo amarillo, figura 7.3, podemos observar una distribución diferente a la anterior.

En cuanto a las orientaciones, según la figura 7.2 las diferencias más notables aparecen para los estímulos rojo y amarillo. Como hemos comentado con anterioridad, para estos estímulos se obtienen valores muy elevados en la relación de semiejes cuando empleamos el colorímetro visual, lo cual da lugar a orientaciones bastante indeterminadas.

Por último, en la figura 7.2 observamos que los tamaños de las elipses para los cinco estímulos son siempre inferiores en apertura (muestra-muestra) excepto para el estímulo azul, donde los valores son muy parecidos. Entre las posibles causas de este hecho pensamos que tiene interés considerar, principalmente, la mayor comodidad en las observaciones realizadas en el dispositivo de iluminación/observación, la textura de las muestras o quizá la diferente habilidad del observador ante tareas distintas. También pueden influir en el tamaño de las elipses las diferentes distancias entre los puntos de la distribución de estímulos que encontramos correspondientes a cada uno de los dispositivos. Recordamos que en el caso del colorímetro visual estas distancias vienen dadas por las posiciones de las cuñas, mientras que para las muestras están sujetas a la elaboración de las mismas y a los criterios de elección citados con anterioridad.

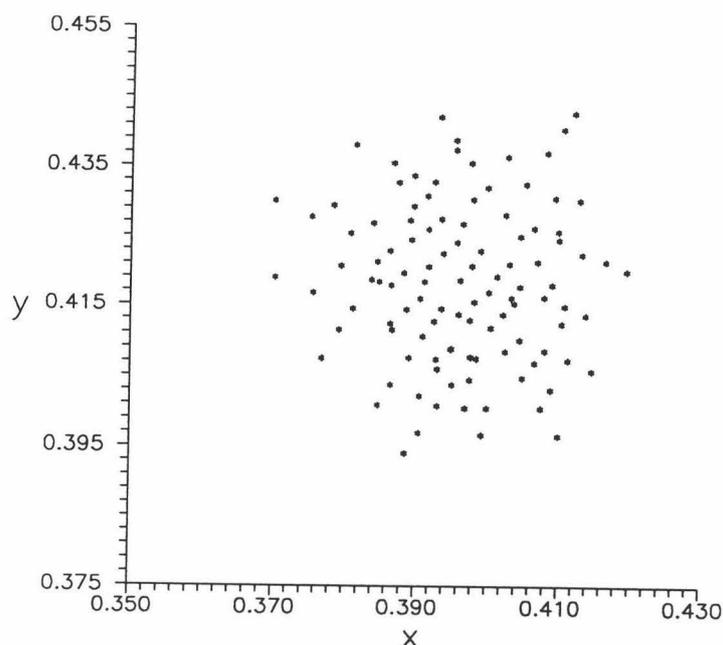


Figura 7.3.- Distribución puntual obtenida en el colorímetro visual para el estímulo amarillo en el plano xy.

Las figuras 7.4 y 7.5 muestran, a modo de ejemplo, la distribución puntual para el estímulo verde. Como se observa, en general, las distancias entre estímulos son mayores para el colorímetro visual.

Una vez realizado el análisis correspondiente a las experiencias en modo de apertura, comparamos las experiencias (muestra-muestra) de apertura y de objeto. Como se recordará, la diferencia esencial estriba en la presencia, o no, de campo circundante oscuro en el dispositivo de iluminación/observación de muestras en modo de objeto. Las elipses correspondientes a este modo aparecen para los cinco estímulos y los tres observadores en las figuras 6.5 a 6.19 del capítulo anterior y son denotadas por IV. A modo de ejemplo la figura 7.6 muestra una comparación entre orientaciones, relación de semiejes y áreas de

las elipses obtenidas en modo apertura (muestra-muestra) y en modo de objeto, por el observador MP. Resultados muy similares se obtienen para el resto de los observadores.

Si observamos la figura 7.6 puede apreciarse una gran semejanza entre los resultados obtenidos en orientaciones y también bastante similitud en relación de semiejes. Sin embargo, podemos destacar que el tamaño de las elipses es ligeramente inferior en modo de objeto que en modo de apertura (muestra-muestra). Este resultado está de acuerdo con el recientemente publicado por Indow, 1992, donde señala, que cuando se realizan experiencias en modos de apertura y objeto (bajo unas mismas condiciones experimentales e idénticos métodos de ajuste), se obtienen umbrales con valores similares en cuanto a relación de semiejes y orientaciones, pero en modo de objeto las áreas son ligeramente inferiores a las que se obtienen en modo de apertura.

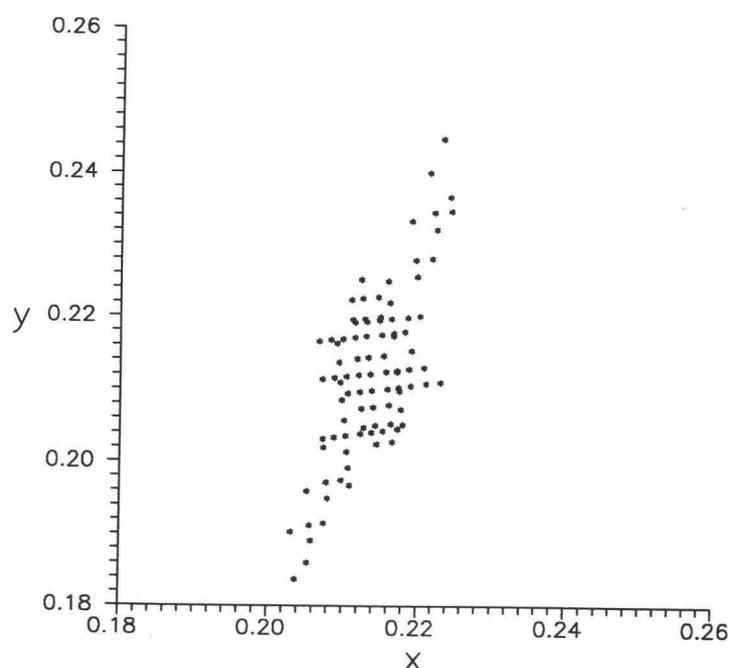


Figura 7.4.- Distribución puntual obtenida en el colorímetro visual para el estímulo verde en el plano xy.

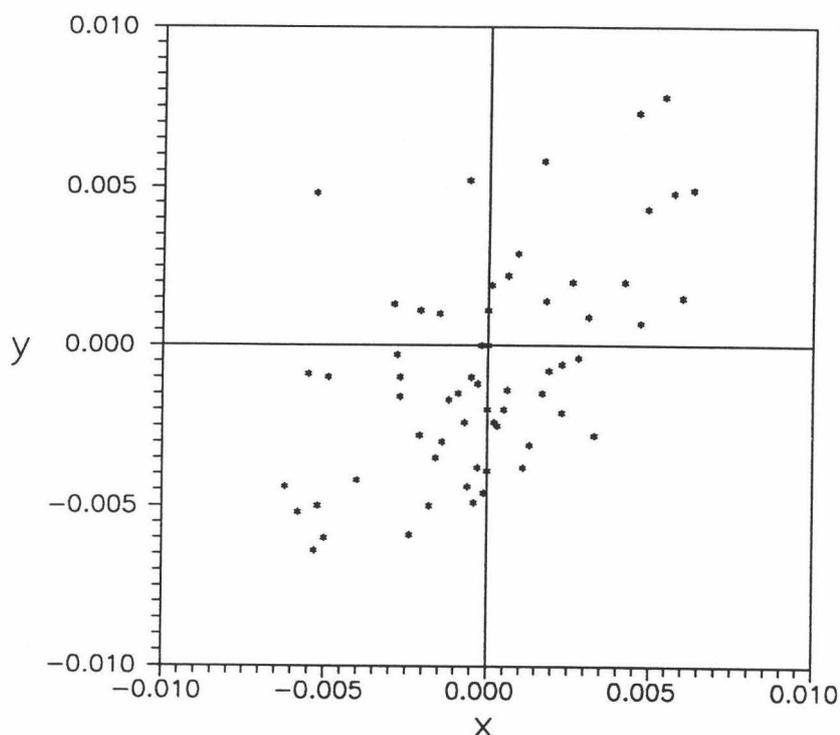


Figura 7.5.- Distribución puntual de las muestras coloreadas para el estímulo verde en el plano xy.

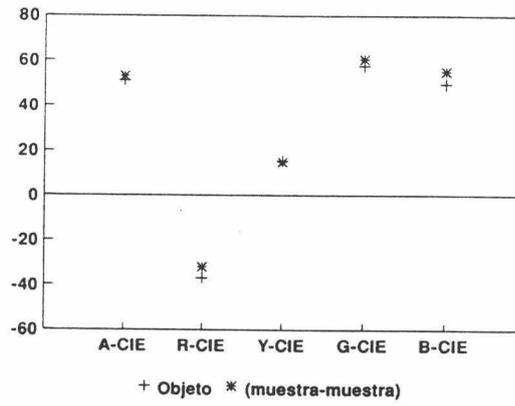
La última cuestión a discutir en este apartado será la comparación entre los resultados obtenidos en modo de apertura (luz-luz) (o apertura (luz-muestra) muy similares entre sí) y los obtenidos en modo de objeto, como se muestra en la figura 7.7. Prácticamente los comentarios respecto a esta figura serán análogos a los que se hicieron cuando comparamos los umbrales obtenidos con apertura (luz-luz) y apertura (muestra-muestra), figura 7.2 sólo que ahora las diferencias en áreas son ligeramente superiores.

En resumen, puede decirse que en líneas generales hay una gran similitud entre los umbrales obtenidos en apertura (luz-luz) y apertura (muestra-muestra), figura 7.1, así como también entre las experiencias apertura (muestra-muestra) y objeto, figura 7.6. Las diferencias entre umbrales se acentúan, sin embargo, al analizar las experiencias de apertura (luz-luz) y apertura (muestra-muestra), figura 7.2, o las experiencias apertura (luz-luz) y objeto, figura 7.7, si bien, en varias ocasiones, no son muy acusadas.

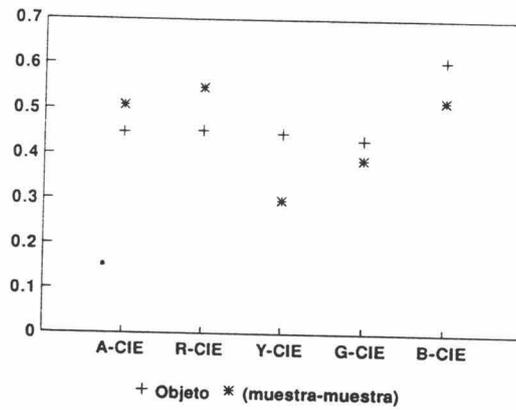
El hecho de que las principales discrepancias entre los conjuntos de elipses obtenidos en cada una de las cuatro experiencias realizadas aparezcan al cambiar el tipo de dispositivo (colorímetro visual tipo Wright frente a dispositivo de iluminación/observación de muestras), nos hace pensar que además del modo de presentación, existe una clara influencia de las variables inherentes a estos dispositivos (e.g. visión maxweliana o diferente distribución de muestras), frente a otras como la textura o el grado de metamerismo.

Estas discrepancias entre umbrales, obtenidos con diferente modo de presentación, no son, en cualquier caso, un resultado excepcional en la literatura, tal y como podremos ver en el siguiente apartado donde se muestran, junto a los nuestros, algunos resultados experimentales de otros trabajos.

ORIENTACION



b/a



AREA (x E+4)

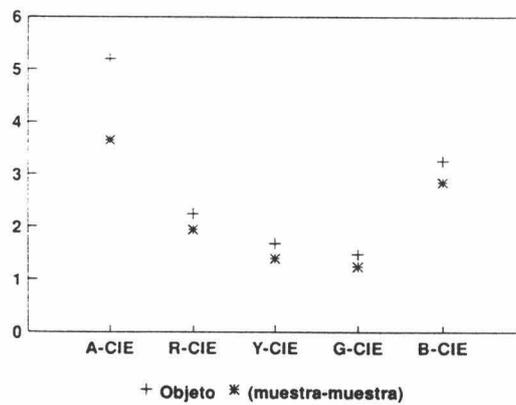
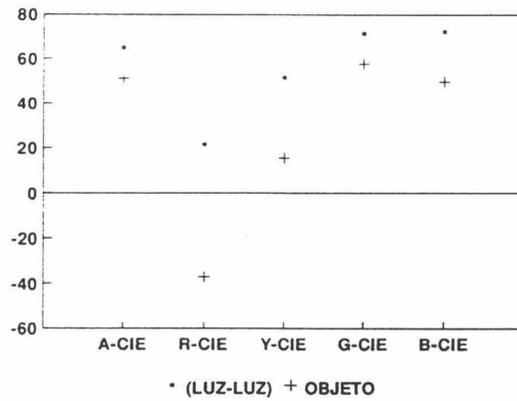
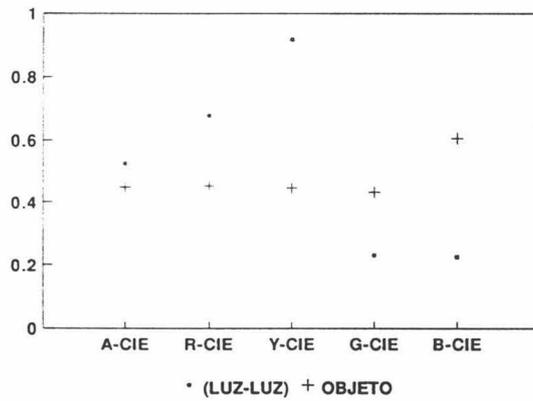


Figura 7.6 .- Orientaciones, relación de semiejes y área para las elipses obtenidas de los cinco estímulos en las experiencias apertura (muestra-muestra) y objeto por el observador MP.

ORIENTACION.



b/a



AREA (x E+4)

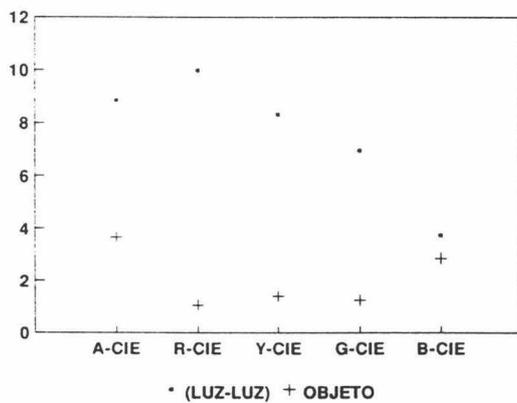


Figura 7.7 .- Orientaciones, relación de semiejes y área para las elipses obtenidas de los cinco estímulos en las experiencias apertura (luz-luz) y objeto para el observador MP.

7.3.2.- COMPARACION CON OTROS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Después de centrarnos en comparar nuestros resultados en las 4 experiencias, nos parece también de interés analizar los acuerdos o desacuerdos que presentan los mismos con los de otros autores, sin olvidar que globalmente las condiciones experimentales pueden ahora variar de forma más significativa.

Las figuras 7.8 y 7.9 muestran nuestros resultados experimentales (en concreto para el observador MP) junto a los obtenidos en otros trabajos previos realizados en modo de apertura y en modo de objeto. En concreto, se han considerado los resultados de: MacAdam, 1942 (modo de apertura); Luo-Rigg, 1986 (modo de objeto) y Indow, 1992 (ambos). La elección de estos trabajos se debe a su importancia en la literatura y a que estudian los mismos estímulos empleados en esta Memoria (salvo en el caso de MacAdam, 1942, en cuyo caso podemos acudir al procedimiento de interpolación que sugirió este mismo autor sobre sus resultados iniciales).

Empezaremos por los resultados correspondientes a las observaciones realizadas en modo de apertura. Si observamos la figura 7.8, puede apreciarse una semejanza global (especialmente en cuanto a la orientación, salvo el estímulo verde en el trabajo Indow) entre los distintos conjuntos de elipses que analizamos, si bien también se observan diferencias, cuya justificación puede hacerse en función de las distintas condiciones experimentales y principalmente del método de ajuste de los resultados experimentales de los diferentes autores. De todos modos, las variaciones observadas en estos trabajos son comparables, en muchos casos, a las que se obtienen entre los observadores de una misma experiencia.

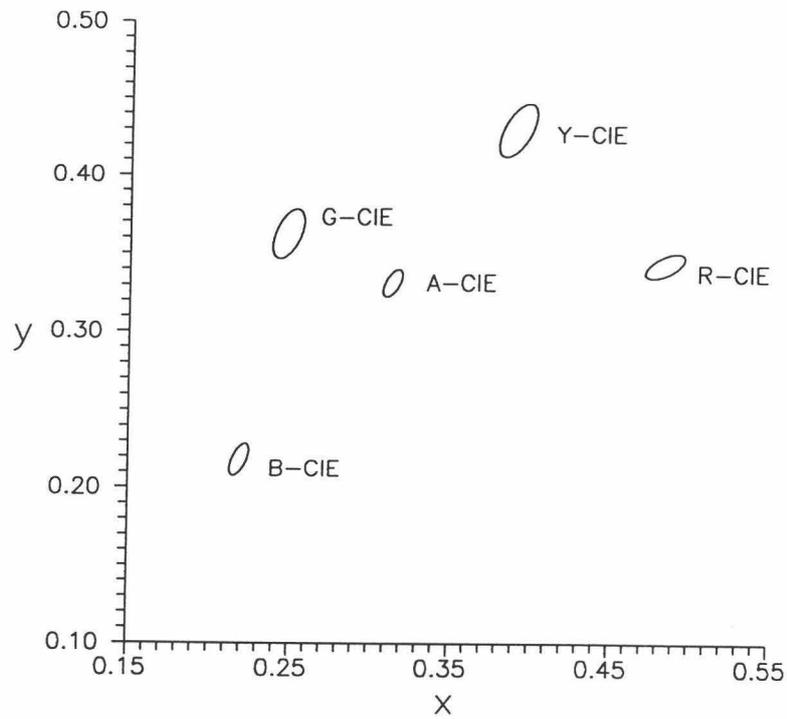


Figura 7.8a .- Elipses de MacAdam para los 5 centros CIE aumentadas 5 veces.

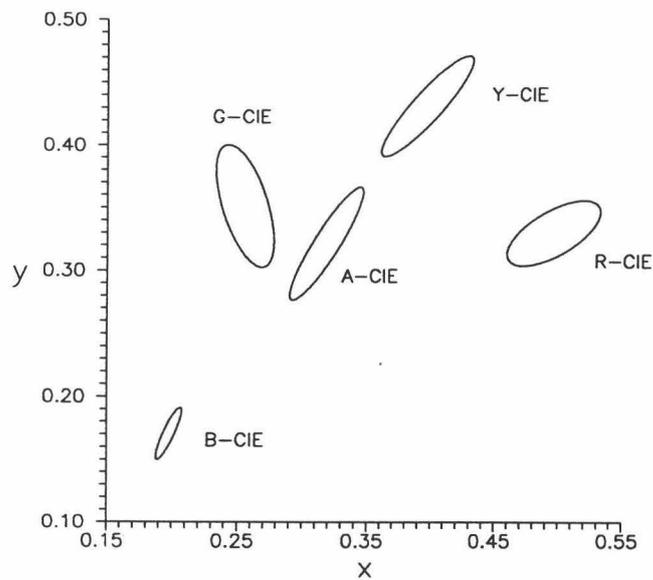


Figura 7.8b .- Elipses de Indow para los 5 centros CIE aumentadas 5 veces. Observador TI.

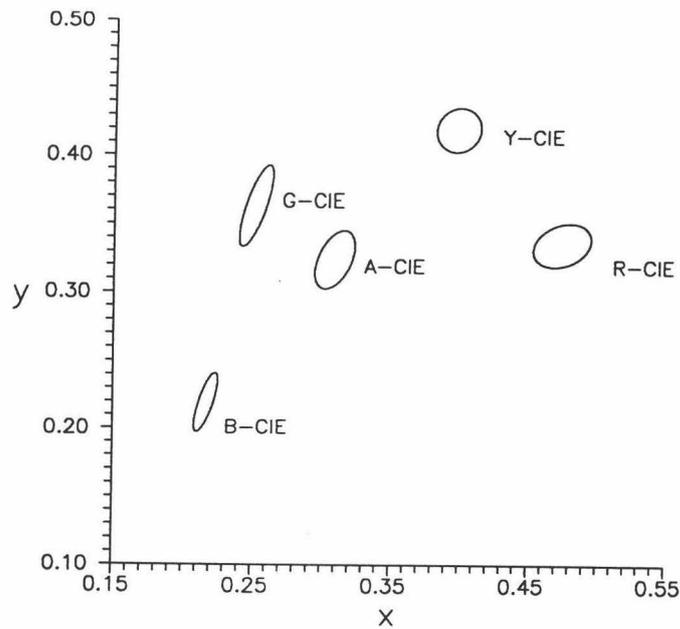


Figura 7.8c .- Resultados experimentales para los 5 centros CIE, observador MP.

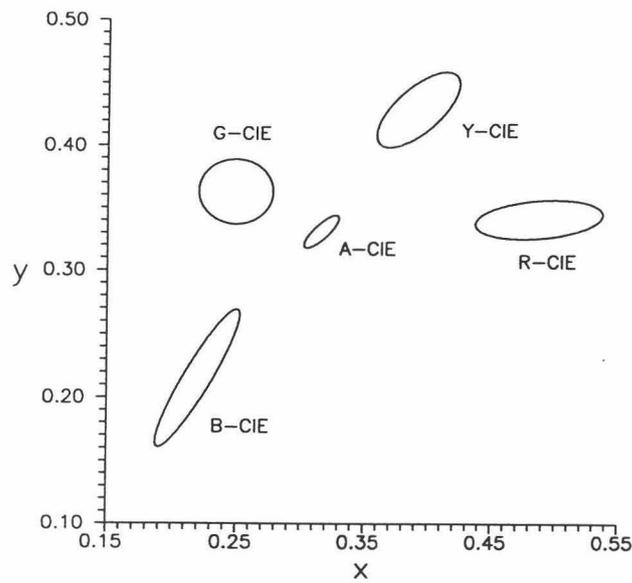


Figura 7.9a .- Elipses de Luo-Rigg para los 5 centros CIE aumentadas 5 veces.

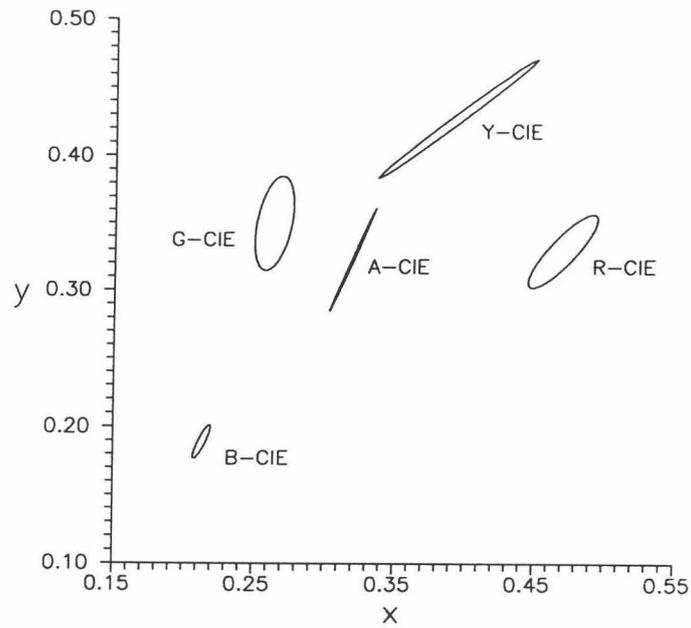


Figura 7.9b .- Elipses de Indow para los 5 centros CIE aumentadas 5 veces. Observador TI.

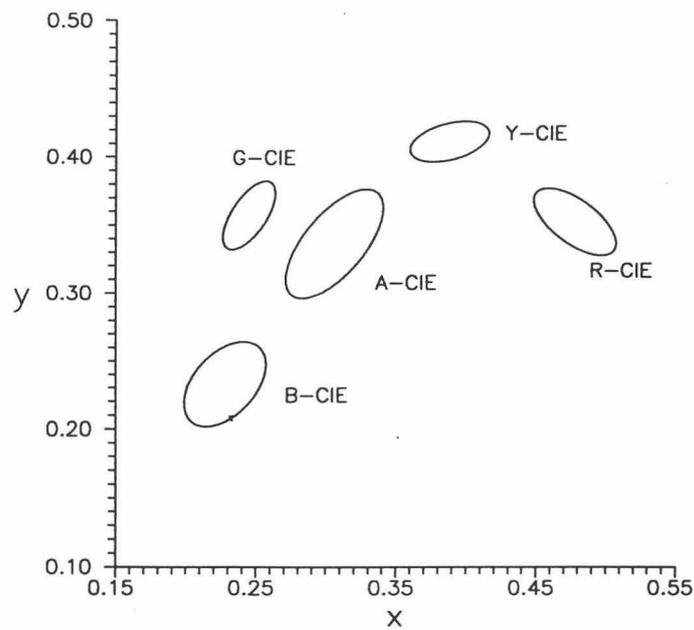


Figura 7.9c .- Resultados experimentales para los 5 centros CIE, aumentadas 3 veces. Observador MP.

Las relaciones de semejez de nuestras elipses son también semejantes a las que se obtienen en el resto de los trabajos. Tan sólo, quizá, hay valores más elevados en la zona de los rojos y amarillos que no se dan en éstos, pero que sí se presentan en otros trabajos de la literatura (Wyszecki-Fielder, 1971).

Hay que destacar, respecto a nuestro trabajo, las discrepancias en los tamaños de las elipses, en relación a los demás autores, siendo nuestras elipses en todos los casos mayores. Estas discrepancias de tamaño o áreas tienen su origen sobre todo en los diferentes métodos de ajuste, así por ejemplo, MacAdam analiza las desviaciones típicas de las igualaciones mientras que en nuestro caso procedemos a un ajuste que engloba el 95% de las veces en que se consideró que había igualación, dando lugar evidentemente a umbrales de mayor tamaño.

También estamos interesados en analizar nuestros resultados obtenidos en modo de objeto respecto a otros resultados obtenidos para este modo de presentación. La figura 7.9 muestra los conjuntos de elipses para el observador MP y los obtenidos por Luo-Rigg e Indow para los cinco estímulos CIE.

Un primer estudio comparativo entre los resultados de Luo-Rigg y nuestro conjunto de elipses muestra que aunque existen algunas diferencias, en conjunto, hay acuerdos en cuanto a orientaciones. Las diferencias aparecen fundamentalmente para el estímulo verde, aunque éstas no son tan significativas si tenemos en cuenta el alto valor de relación de semejez correspondiente a este estímulo en el trabajo de Luo-Rigg.

En cuanto a la relación de semejez nuestros resultados presentan algunas similitudes con los de Luo-Rigg y difieren más con los Indow. En concreto, las elipses obtenidas por este último son más alargadas que las de Luo-Rigg y que las de nuestros

propios resultados.

En las gráficas de la figura 7.9 el área de las elipses correspondientes a los trabajos de Luo-Rigg e Indow se han multiplicado por un factor de 5 mientras que nuestras elipses sólo por un factor 3. Al igual que ocurría con las elipses correspondientes al modo de apertura, estas discrepancias creemos que se deben fundamentalmente a los diferentes métodos de ajuste empleados en el tratamiento de los datos.

Por último, si observamos conjuntamente las gráficas 7.8 y 7.9 encontramos, en primer lugar, que las diferencias entre los resultados de los trabajos citados, son superiores en las experiencias en modo de objeto que en modo de apertura. No es de extrañar que aparezcan estas diferencias, ya que como es sabido, las elipses de Luo-Rigg se han obtenido bajo unas condiciones (recopilación de 13 trabajos y normalización) claramente diferentes a las que existen en nuestro trabajo y con muy diferentes métodos de ajuste.

7.4.- UMBRALES DE DISCRIMINACION CROMATICA PREDICHOS POR FORMULAS DERIVADAS DEL SISTEMA CIE 1976 (L^*, a^*, b^*).

De acuerdo con nuestro planteamiento inicial, estamos también interesados en evaluar la adecuación de nuestros resultados experimentales y los de otros autores en este campo con las previsiones de algunas fórmulas de diferencia de color. Este punto es importante, pues uno de los objetivos finales de la Colorimetría consiste en encontrar fórmulas o modelos de visión que predigan los resultados experimentales. En concreto, nosotros estamos interesados en tres recientes fórmulas derivadas de CIELAB: CMC($l:c$), BFD($l:c$) y TC1-29.

Para el desarrollo de este apartado seguiremos los siguientes puntos: a) Cálculo de los coeficientes métricos y umbrales asociados a las fórmulas CMC, BFD y TC1-29; b) Comparación con nuestros resultados experimentales; c) Comparación con los resultados clásicos en modo de apertura y en modo de objeto; d) Significación estadística de los diferencias obtenidas.

En el caso de la fórmula CIELAB la diferencia de color se calcula simplemente como una distancia euclídea en el espacio definido o, si se prefiere, como el resultado de la contribución de las diferencias en luminancia (ΔL^*), croma (ΔC^*) y tono (ΔH^*). La expresión de la diferencia de color según CIELAB es:

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2]$$

Sin embargo, según CMC, BFD y TC1-29 las diferencias de color se calculan respectivamente como:

$$\Delta E_{CMC} = \left[(\Delta L^* / l S_l)^2 + (\Delta C^* / c S_c)^2 + (\Delta H^* / S_h)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta E_{\text{BFD}} = \left[(\Delta L_{\text{BFD}}/\ell)^2 + (\Delta C^*/c D_c)^2 + (\Delta H^*/D_h)^2 + (R_t \Delta C^* \Delta H^*/D_c D_h) \right]^{1/2}$$

$$\Delta E_{\text{TC1-29}} = \left[(\Delta L^*/K_1 T_1)^2 + (\Delta C^*/K_c T_c)^2 + (\Delta H^*/K_h T_h)^2 \right]$$

donde los parámetros involucrados en cada una de estas fórmulas tienen expresiones muy concretas, ya citadas en el Capítulo 2.

Desde un punto de vista formal las cuatro expresiones anteriores responden a una misma ecuación genérica del tipo:

$$\Delta E = \left[b_{11} (\Delta a^*)^2 + b_{22} (\Delta b^*)^2 + 2 b_{12} (\Delta a^*) (\Delta b^*) + \right. \\ \left. + 2 b_{13} (\Delta a^*) (\Delta L^*) + 2 b_{23} (\Delta b^*) (\Delta L^*) + b_{33} (\Delta L^*)^2 \right]^{1/2}$$

donde b_{ij} son los llamados coeficientes métricos en el espacio (a^*, b^*, L^*) y pueden calcularse mediante el método propuesto por MacAdam, 1985, obteniéndose los siguientes resultados:

CIELAB

$$b_{11} = b_{22} = b_{33} = 1$$

$$b_{12} = b_{13} = b_{23} = 0$$

CMC (l:c)

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{a^{*2}}{S_c^2} + \frac{b^{*2}}{S_h^2} \right] & b_{33} &= \frac{1}{\ell^2 S_1^2} \\
 b_{22} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{b^{*2}}{S_c^2} + \frac{a^{*2}}{S_h^2} \right] & b_{13} &= 0 \\
 b_{12} &= \frac{a^* b^*}{C^{*2}} \left[\frac{1}{S_c^2} - \frac{1}{S_h^2} \right] & b_{23} &= 0
 \end{aligned}$$

BFD (l:c)

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{a^{*2}}{D_c^2} + \frac{b^{*2}}{D_h^2} - \frac{R_t a^* b^*}{C^* D_c D_h} \right] \\
 b_{22} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{b^{*2}}{D_c^2} + \frac{a^{*2}}{D_h^2} + \frac{R_t a^* b^*}{C^* D_c D_h} \right] \\
 b_{12} &= \frac{1}{C^{*2}} \left\{ a^* b^* \left[\frac{1}{D_c^2} - \frac{1}{D_h^2} \right] + \frac{R_t (a^{*2} - b^{*2})}{2 C^* D_c D_h} \right\} \\
 b_{33} &= \left[\left[0.613 Y_o \left((L^* + 16) / 116 \right)^2 \right] / \left[1.5 + Y_o \left((L^* + 16) / 116 \right)^3 \right] \right]^2 \\
 b_{13} &= 0 & b_{23} &= 0
 \end{aligned}$$

TC1-29

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{a^{*2}}{T_c^2} + \frac{b^{*2}}{T_h^2} \right] & b_{33} &= \frac{1}{K_1^2 T_1^2} \\
 b_{22} &= \frac{1}{C^{*2}} \left[\frac{b^{*2}}{T_c^2} + \frac{a^{*2}}{T_h^2} \right] & b_{13} &= 0 \\
 b_{12} &= \frac{a^* b^*}{C^{*2}} \left[\frac{1}{T_c^2} - \frac{1}{T_h^2} \right] & b_{23} &= 0
 \end{aligned}$$

En un primer análisis de estas expresiones cabe señalar la similitud de los coeficientes métricos, no sólo entre CMC y TC1-29, como era de esperar debido a la similitud de sus expresiones finales, sino también respecto a BFD donde aparece un término $(R_T / C^* D_c D_h)$, multiplicado por una función sencilla de las coordenadas a^* y b^* . Un estudio cuantitativo de este término muestra que su valor es prácticamente despreciable frente a los otros términos que aparecen en la expresión de los coeficientes (Melgosa et al, 1991). Por otra parte, aunque la expresión del coeficiente b_{33} correspondiente a la fórmula BFD, presenta una notable complejidad respecto al que aparece en las fórmulas CMC y TC1-29, su valor tampoco difiere demasiado de los que se obtienen en el caso las dos fórmulas restantes para coordenadas con valores usuales.

Es posible, teniendo en cuenta las expresiones anteriores, conocer para cada punto del espacio de coordenadas (a^*, b^*, L^*) los valores de los coeficientes métricos b_{ij} . A partir de dichos coeficientes podemos saber los parámetros característicos del umbral (elipsoide) de discriminación de color correspondiente a ese punto, según una expresión bien definida. A la vista de la

similitud en las expresiones de los b_{ij} , para cada una de estas fórmulas, la diferencia entre los umbrales previstos por cada una de ellas vendrá dada por los valores que se obtienen para la tolerancia en croma (S_c , D_c y T_c) y la tolerancia en tono (S_h , D_h y T_h).

La figura 7.10 muestra, a título de ejemplo, los umbrales de discriminación cromática previstos por la fórmula TC1-29 en el espacio CIELAB, deducidos a partir de los coeficientes métricos anteriores, para un plano de $L^* = 50$ y para algunos puntos (a^*, b^*) regularmente espaciados. Tanto para TC1-29 como para CMC y BFD los umbrales previstos son elipsoides con uno de sus ejes propios paralelo a L^* , por ser $b_{13} = b_{23} = 0$. Sin embargo, en el caso de la fórmula CIELAB los umbrales previstos serían simplemente esferas de igual tamaño. Tanto para CMC como para BFD y TC1-29 las tolerancias o semiejes de las elipses crecen con el croma C^* y con ello, aumenta también el área.

Un análisis más detallado de las elipses de discriminación propuestas por las fórmulas consideradas, muestra que las orientaciones previstas por BFD respecto a CMC difieren muy poco (menos de un grado), estando las elipses calculadas por CMC y TC1-29 orientadas en idénticas direcciones radiales. Las diferencias más significativas que aparecen en estos conjuntos de elipses están en el tamaño de las mismas (sobre todo en la zona de los acromáticos), dándose en todos los casos que las áreas previstas por TC1-29 son superiores a las de CMC y éstas a su vez superiores a las de BFD. En cuanto a la relación de semiejes observamos, la gran similitud de los valores previstos por CMC y BFD estando los valores calculados comprendidos entre 0.65 y 0.70, excepto para los estímulos acromáticos para los cuales es superior. Sin embargo, TC1-29 predice un rango más amplio de valores de la relación de semiejes (de 0.4 a la unidad).

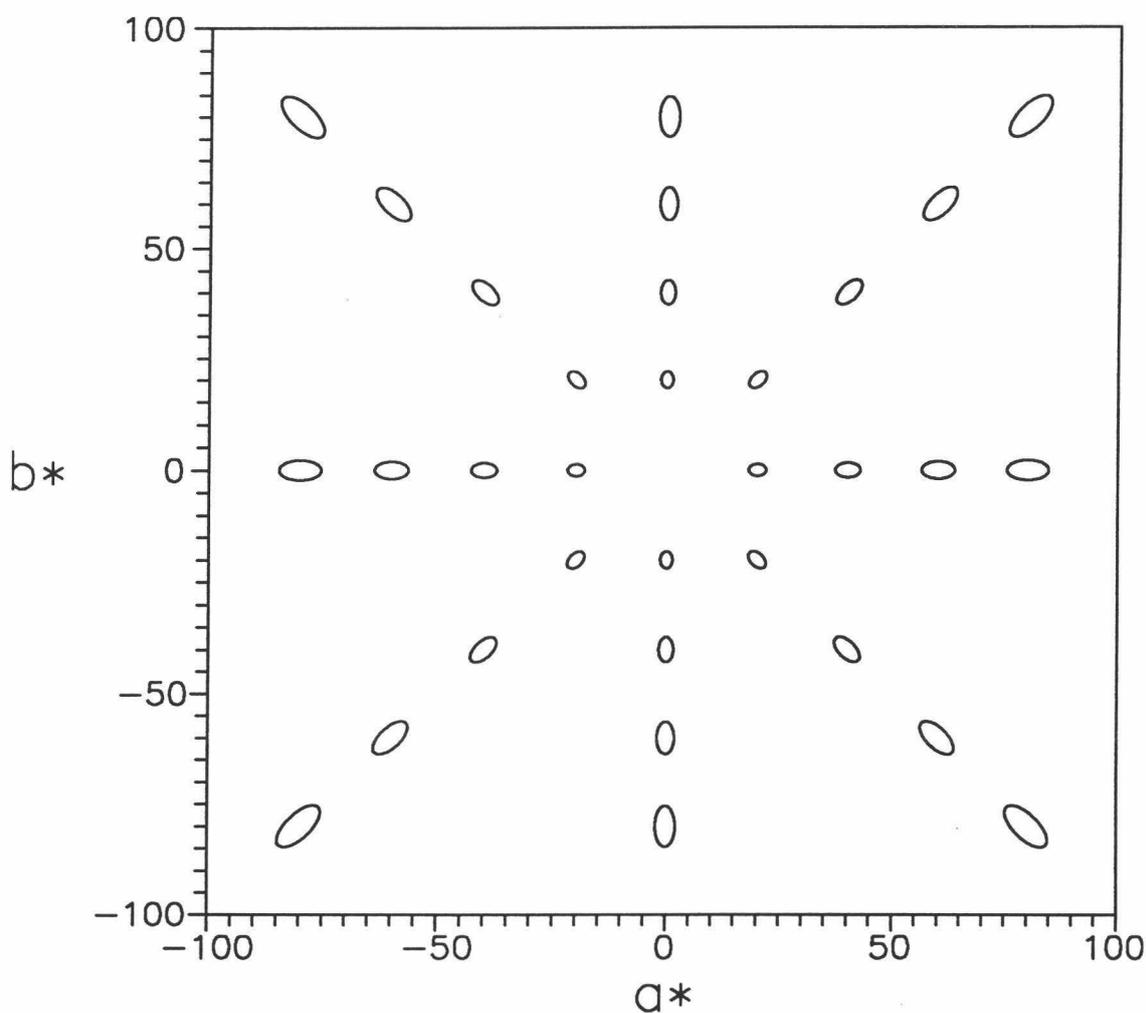


Figura 7.10.- Umbrales de discriminación cromática previstos por la fórmula TC1-29 en un plano con $L^*=50$ para algunos estímulos espaciados regularmente.

Volviendo de nuevo al planteamiento inicial sobre nuestro análisis de resultados, estamos interesados en evaluar la adecuación a estas fórmulas a algunos resultados experimentales clásicos y especialmente de los obtenidos en esta Memoria. Por lo que respecta a nuestros resultados experimentales, la tabla 7.3 muestra el valor medio de la diferencia de orientaciones

(experimental-teórica) en valor absoluto, $\Delta\theta^\circ$ y de la diferencia de relación de semiejes, $\Delta(b/a)$. También se ha calculado la media de las diferencias en áreas, normalizada al valor medio ($\Delta A/A_0$). En la tabla 7.3 se dan por separado estos tres parámetros para cada uno de los 4 tipos de experiencias realizadas y en ellos los resultados de todos nuestros observadores.

EXPERIENCIA	FÓRMULA	$\Delta\theta^\circ$	$\Delta(b/a)$	$\Delta A_{\text{Area}}/A_0$
Apertura (luz-luz)	CMC	39.18	0.270	1.42
	BFD	39.197	0.277	1.77
	TC1-29	39.18	0.259	1.29
Apertura (luz-muestra)	CMC	48.18	0.234	1.71
	BFD	48.61	0.244	1.90
	TC1-29	48.18	0.220	1.40
Apertura (muestra-muestra)	CMC	51.28	0.167	0.94
	BFD	51.31	0.202	1.55
	TC1-29	51.28	0.134	0.82
Objeto	CMC	49.26	0.157	0.87
	BFD	49.27	0.167	1.34
	TC1-29	49.26	0.123	0.81

Tabla 7.3.- Resultados de la comparación numérica entre nuestros resultados experimentales y los previstos por las fórmulas CMC (1:1), BFD (1:1) y TC1-29.

Puede observarse (tabla 7.3) que en todas las experiencias

realizadas aparecen notables diferencias (más de 40° en promedio de las cuatro experiencias) entre las orientaciones previstas y las experimentales. Los valores obtenidos para orientaciones con cada una de las fórmulas son muy similares (difieren en menos de un grado), como ya hemos indicado. No es de extrañar que aparezcan estos grandes desacuerdos ya que nuestras elipses experimentales no se orientan radialmente como prácticamente predicen estas fórmulas.

En cuanto a la relación de semiejes, puede observarse en la tabla 7.3 que, aunque aparezcan diferencias entre los resultados experimentales y teóricos, TC1-29 presenta siempre los mejores acuerdos, especialmente en las experiencias realizadas con muestras coloreadas.

Respecto a las áreas de las elipses de discriminación cromática, hay que hacer notar que en todos los casos los valores experimentales son superiores a los previstos teóricamente por las fórmulas. Como se desprende de los resultados de la tabla 7.3, nuevamente en todas las experiencias TC1-29 es la que presenta los mejores acuerdos en nuestros resultados experimentales. Si observamos, en particular, los resultados obtenidos para cada una de las experiencias realizadas encontramos que en modo de objeto, para el que esta fórmula ha sido deducida, es donde aparecen las diferencias menores. El hecho de que el tamaño de nuestras elipses sea superior al previsto, era de esperar sobre todo como consecuencia del método experimental que hemos seguido para obtener el umbral, considerando el 95% de los casos en el que diferentes estímulos presentados aleatoriamente, son iguales al considerado como referencia. Este método como ya hemos comentado da lugar a elipses de mayor tamaño que las obtenidas por otros procedimientos.

En términos generales, aunque ninguna de las tres fórmulas presente excelentes acuerdos con nuestros resultados experimentales, puede decirse que con la fórmula TC1-29 se obtienen resultados ligeramente superiores a los de las dos fórmulas restantes y por supuesto superiores a los previstos por CIELAB. Por otra parte, los resultados obtenidos son claramente mejores en las experiencias desarrolladas con muestras que las realizadas con el colorímetro visual (salvo en orientaciones). Este resultado, era en parte, de esperar, pues estas ecuaciones han sido desarrolladas basándose en experiencias que involucran muestras coloreadas.

Por último, como se ha indicado y teniendo en cuenta que nuestros resultados experimentales se refieren sólo a los cinco centros CIE, es también de gran interés un análisis de los umbrales previstos por estas fórmulas de diferencia de color pero considerando ahora los resultados experimentales obtenidos por otros autores para un elevado número de estímulos. A partir de este análisis podremos, quizá, confirmar algunas de las conclusiones obtenidas a partir de nuestros resultados, así como corroborar las de trabajos previos (Melgosa et al., 1993).

Como se ha comentado con anterioridad las fórmulas CMC, BFD y TC1-29 están basadas en resultados obtenidos con presentaciones en modo de objeto, por lo que consideramos de interés su análisis en particular respecto a resultados en modo de apertura. Algunos de los principales trabajos realizados con colorímetros visuales han sido citados en el Capítulo 2 de esta Memoria, y nosotros emplearemos aquí, concretamente, los siguientes: MacAdam, 1942; Brown-MacAdam, 1949; Brown, 1957 y Wyszecki-Fielder, 1971.

Para poder proceder a este estudio, en primer lugar, hemos realizado la transformación de las elipses experimentales de cada uno de estos trabajos del sistema CIE-31 (en el que están dados)

al sistema CIELAB. Esta transformación no se puede realizar de forma inmediata pues, en principio, da lugar a óvalos u ovoides como indican algunos autores (Pointer, 1981; Hita et al., 1983) y tampoco es posible el traslado de la nube de puntos a CIELAB para posteriormente ajustar ahí el elipsoide, ya que estas nubes no están publicadas.

Para resolver estos problemas hemos empleado el método que utilizamos también al trasladar nuestros resultados experimentales del sistema de representación CIE-31 a los sistemas CIELAB y CIELUV (Melgosa et al., 1994), y que consiste, esencialmente, en la traslación de los puntos de la periferia de la elipse en CIE-31 y posteriormente realizar un ajuste adecuado (empleando para esta traslación como blanco de referencia el correspondiente al iluminante C).

En las figuras 7.11 a 7.14 aparecen en el plano a^*, b^* ($L^* = \text{cte}$) los resultados experimentales para cada uno de estos trabajos en modo de apertura (incluidos los correspondientes a MacAdam, que, como puede comprobarse, coinciden con los publicados por Robertson, 1977).

Tiene interés resaltar que, excepto para las elipses MacAdam, que han sido publicadas en CIELAB y CIELUV (Robertson, 1977), no han sido publicados los resultados correspondientes a cada uno de estos trabajos referidos a los sistemas recomendados por la CIE (CIELAB y CIELUV).

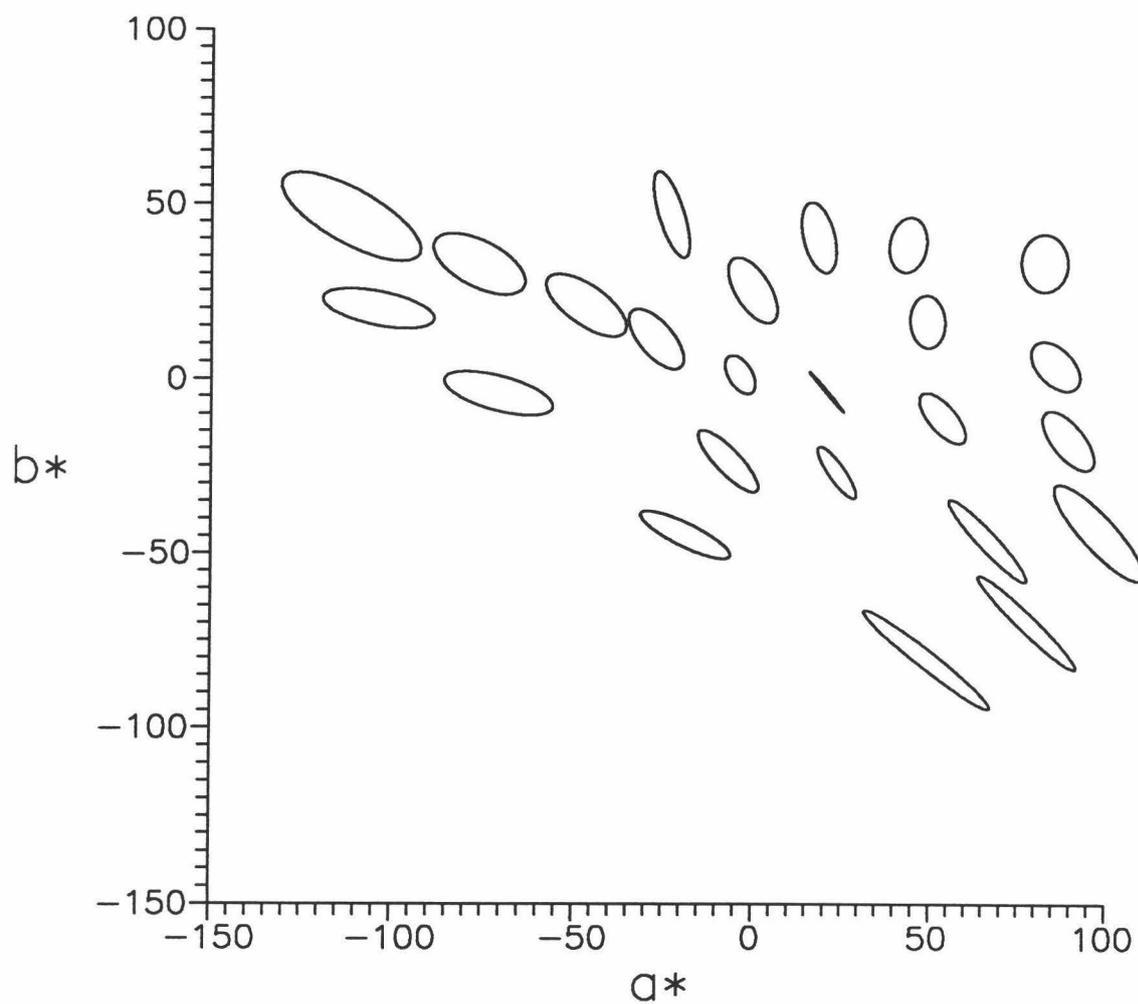


Figura 7.11.- Elipses de discriminación cromática del trabajo de MacAdam, 1942 en el sistema CIELAB, 10 veces aumentadas.

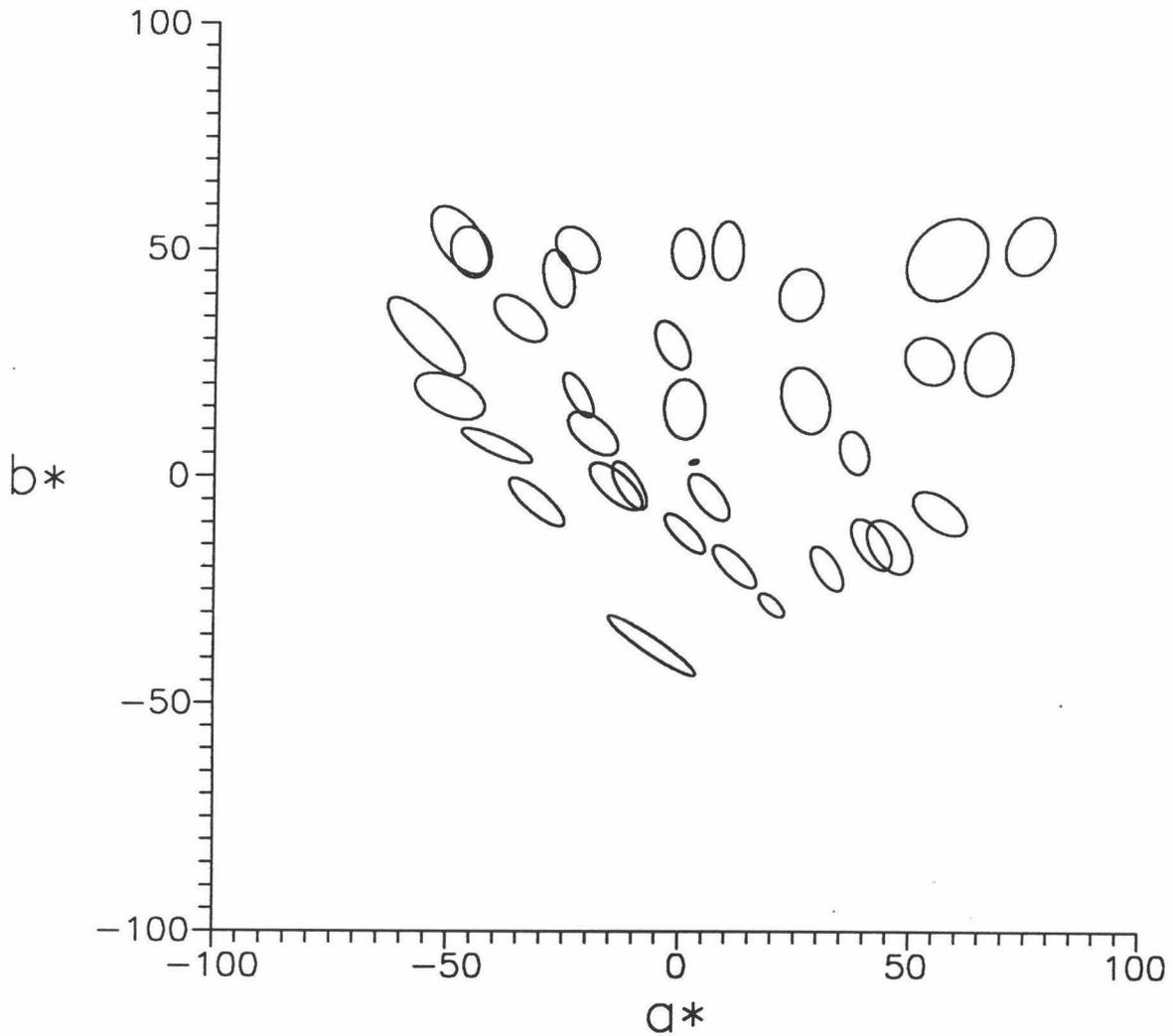


Figura 7.12.- Elipses de discriminación cromática del trabajo de Brown-MacAdam, 1949 en el sistema CIELAB, 10 veces aumentadas. Observador WRJB.

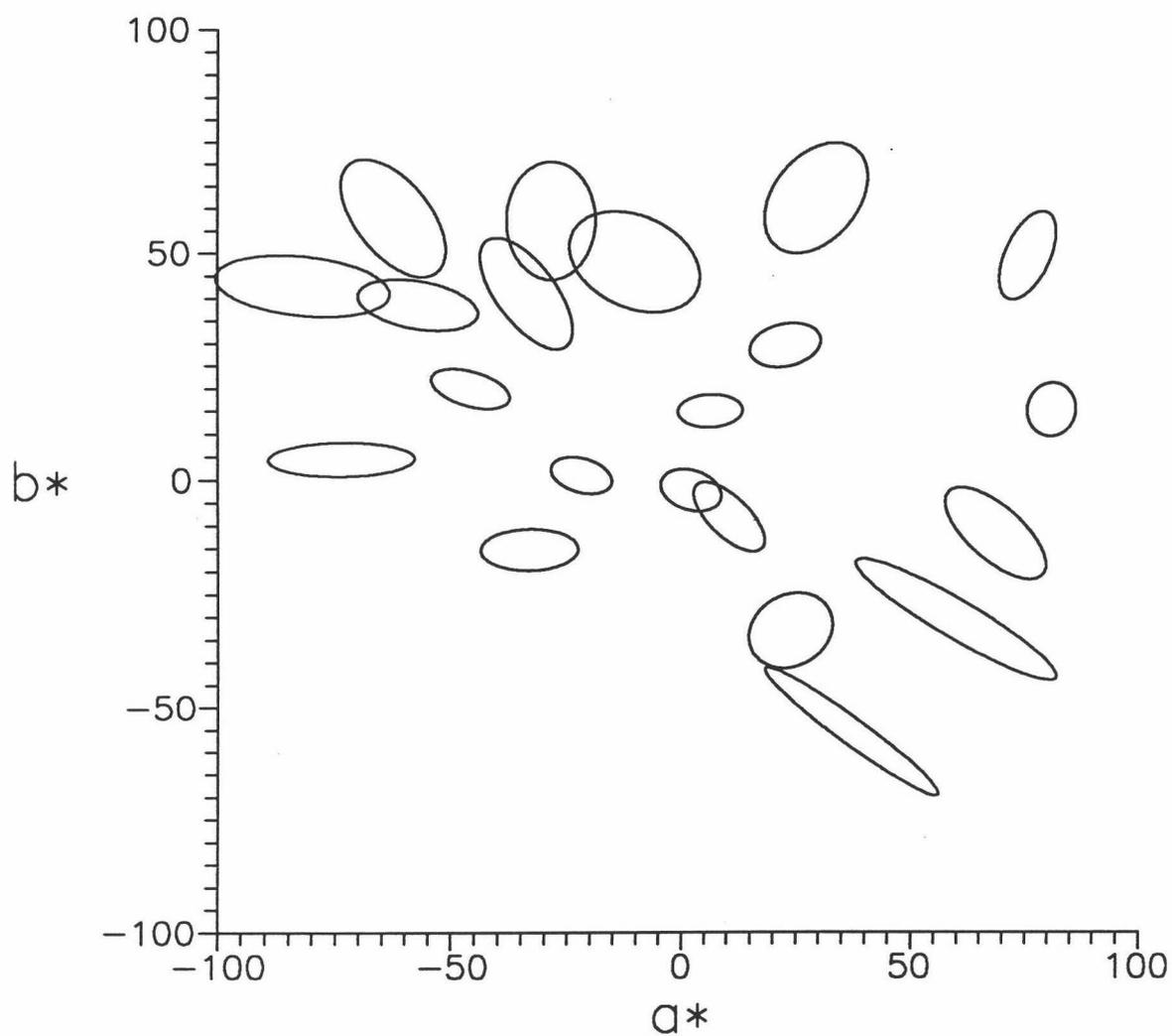


Figura 7.13.- Elipses de discriminación cromática del trabajo de Brown, 1957 en el sistema CIELAB, 10 veces aumentadas.

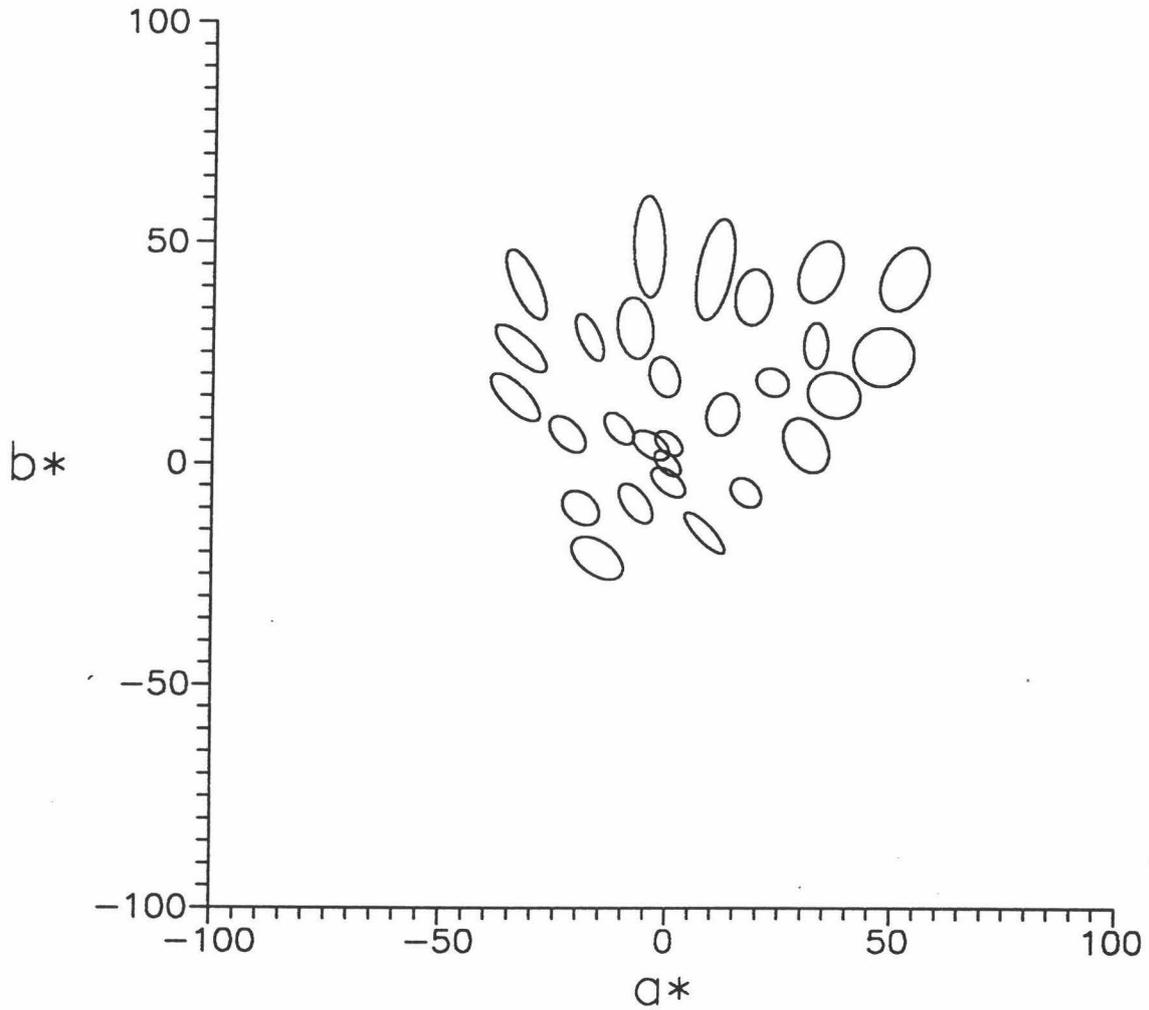


Figura 7.14.- Elipses de discriminación cromática del trabajo de Wyszecki-Fielder, 1971 en el sistema CIELAB, 5 veces aumentadas. Observador AR.

El conocimiento de las elipses de discriminación de estos trabajos en CIELAB nos va a permitir su comparación con las previsiones de las fórmulas derivadas de CIELAB. Así, la tabla 7.4 muestra el valor medio de la diferencia de orientaciones (experimental-teórica) en valor absoluto, $\Delta\theta^\circ$ y de la diferencia de relación de semiejes, $\Delta(b/a)$. También se ha calculado la media de las diferencias en áreas, normalizada al valor medio ($\Delta A/A_0$), para cada uno de los trabajos mencionados.

TRABAJOS	FÓRMULA	$\Delta\theta^\circ$	$\Delta(b/a)$	$\Delta A/A_0$
MACADAM	CMC	28.86	0.315	1.59
	BFD	28.83	0.315	1.41
	TC1-29	28.86	0.205	1.71
BROWN-MACDAM	CMC	23.76	0.242	1.51
	BFD	23.75	0.244	1.28
	TC1-29	23.76	0.180	1.66
BROWN	CMC	30.72	0.183	1.74
	BFD	30.73	0.191	1.57
	TC1-29	30.72	0.176	1.81
WYSZECKI-FIELDER	CMC	25.62	0.216	0.95
	BFD	25.48	0.227	0.49
	TC1-29	25.62	0.181	1.17

Tabla 7.4.- Resultados de la comparación numérica entre los resultados experimentales de MacAdam, 1942; Brown-MacAdam, 1949; Brown, 1957 y Wyszecki-Fielder, 1971 y los previstos por las fórmulas CMC (1:1), BFD (1:1) y TC1-29.

La tabla 7.4 muestra, en lo que se refiere a las orientaciones, que los resultados son muy similares para las tres fórmulas y en todos los casos alejados de los experimentales, no detectándose mejoras significativas al emplear BFD, como cabría esperar en función al término corrector para las orientaciones que aparece en esta última fórmula. Nuevamente este resultado no es extraño si tenemos en cuenta que las elipses previstas por las fórmulas son radiales (o prácticamente) y sin embargo, las elipses experimentales, como se puede observar en las figuras 7.11 a 7.14, no presentan siempre esta característica. La diferencia de orientaciones en este trabajo es ligeramente inferior a la obtenida con nuestros resultados experimentales (tabla 7.3), aunque del mismo orden de magnitud.

Respecto a la relación de semiejes, aunque el resultado obtenido difiera de unos trabajos a otros, TC1-29 presenta los mejores acuerdos con los resultados experimentales (desviación de 0.19 en promedio de los cuatro trabajos), como ocurre con nuestros resultados experimentales. Finalmente, las áreas previstas son siempre ahora superiores a las experimentales como se puede observar en la figura 7.15, donde se representa las áreas experimentales correspondientes a estos 4 trabajos frente a las previsiones de la fórmula BFD (recordar que esta fórmula predice umbrales de menor área respecto a CMC y TC1-29). El tamaño de las elipses difieren de unos trabajos a otros siendo las experimentales de Wyszeccki-Fielder las que presentan menos discrepancias.

Cabe pensar, que este último hecho es debido a que estas fórmulas se han deducido con resultados experimentales de tamaño bastante superior a las llamadas diferencias justamente perceptibles o umbrales. La fórmula BFD es la que presenta los mejores acuerdos, este hecho es de esperar, pues, como se ha comentado con anterioridad, las elipses previstas por BFD son las

de menor tamaño.

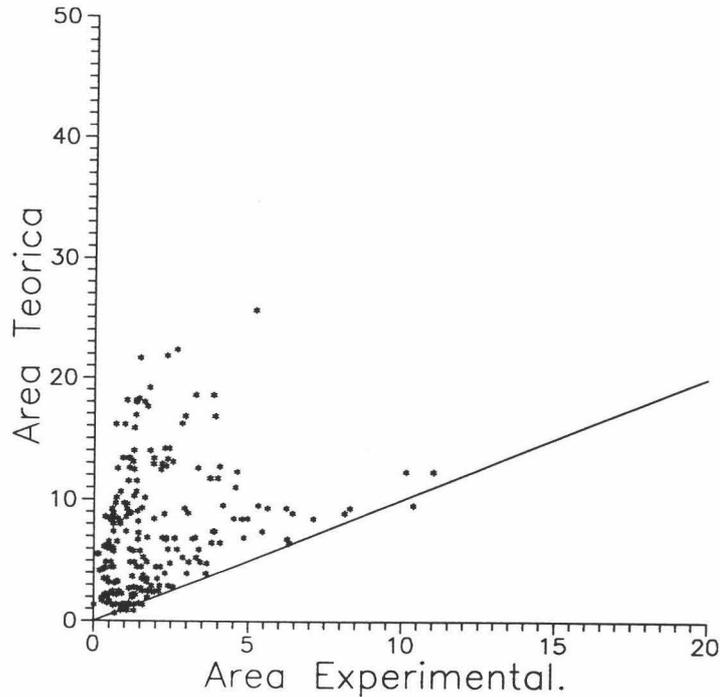


Figura 7.15.- Comparación de los resultados experimentales en áreas de los trabajos MacAdam, 1942; Brown-MacAdam, 1949; Brown, 1957 y Wyszecki-Fielder, 1971 y las previstas por la fórmula BFD (1:1).

A fin de analizar resultados de discriminación cromática con objetos de color hemos escogido, como base de datos, 132 elipses correspondientes a muy diferentes zonas del diagrama cromático extraídas de Luo-Rigg, 1986, que a su vez es, como hemos indicado recopilación de otros 13 trabajos previos en esta materia. También se han analizado los resultados correspondientes al trabajo de Indow, 1992, realizado en modo de objeto, pero empleando en lugar de objetos de color, monitores en color que simulan superficies mediante tarjetas gráficas e interface

adecuados. Empleamos ahora el mismo procedimiento empleado con anterioridad para trasladar estas elipses del sistema CIE-31 al sistema de representación CIELAB.

El conocimiento de las elipses de discriminación de estos trabajos en CIELAB nos va a permitir su comparación con las previsiones de las fórmulas derivadas de CIELAB. En la tabla 7.5 aparecen los mismos datos que en la tabla 7.4, pero ahora referidos a estos dos trabajos.

TRABAJO	FÓRMULA	$\Delta\theta^\circ$	$\Delta(b/a)$	$\Delta Area/A_0$
LUO-RIGG	CMC	18.50	0.199	0.26
	BFD	18.57	0.203	0.63
	TC1-29	18.50	0.148	0.29
INDOW	CMC	38.27	0.435	1.05
	BFD	38.28	0.443	0.71
	TC1-29	38.27	0.368	1.22

Tabla 7.5.- Resultados de la comparación numérica entre los resultados experimentales en modo de objeto de Luo-Rigg, 1986; e Indow, 1992 y los previstos por las fórmulas CMC (1:1), BFD (1:1) y TC1-29.

Según la tabla 7.5, encontramos que para el trabajo de Luo-Rigg aparecen los mejores acuerdos entre elipses experimentales y teóricas. En concreto, las mejoras con respecto a nuestros resultados (tabla 7.3) y los de otros trabajos en modo de apertura (tabla 7.4) son muy significativas en cuanto a la

diferencia de orientaciones $\Delta\theta$ y al tamaño de los umbrales (área normalizada). Este hecho era de esperar, pues como hemos indicado con anterioridad, BFD y también en parte TC1-29 han sido deducidas partiendo de este conjunto de elipses. Nótese, sin embargo, que los tamaños de las elipses experimentales son siempre superiores a los previstos por la fórmula BFD, que da, en este punto, resultados inferiores a CMC y TC1-29.

Si comparamos estos valores con los que obteníamos para la variabilidad interobservador en el sistema CIELAB en este trabajo (tabla 7.2), comprobamos que son ligeramente superiores a los obtenidos allí e incluso menores a los que se obtienen en otros trabajos experimentales.

En cuanto a la relación de semiejes, las figuras 7.16 a 7.18, recogen los resultados experimentales de Luo-Rigg frente a los previstos por la fórmulas CMC(1:1), BFD(1:1) y TC1-29, respectivamente (figuras con tendencias similares podemos encontrar para el conjunto de resultados obtenidos con colorímetros visuales en modo de apertura). En primer lugar, observamos la gran similitud de los valores previstos por CMC y BFD para la relación de semiejes, como hemos indicado con anterioridad. En segundo lugar, estos valores están comprendidos casi siempre entre 0.65 y 0.7 excepto, para los estímulos acromáticos en los cuales es superior. Si observamos la figura 7.16, encontramos, en cambio que la fórmula TC1-29 predice un rango más amplio de valores de relación de semiejes dando lugar a que las discrepancias con los resultados experimentales sean menores que las que aparecen para las fórmulas CMC y BFD.

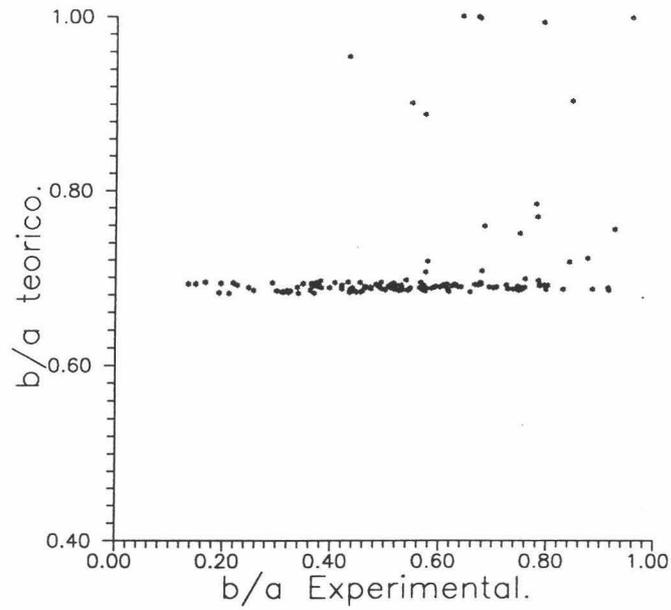


Figura 7.16.- Comparación de los resultados experimentales en relación de semiejes de Luo-Rigg con las previsiones de CMC.

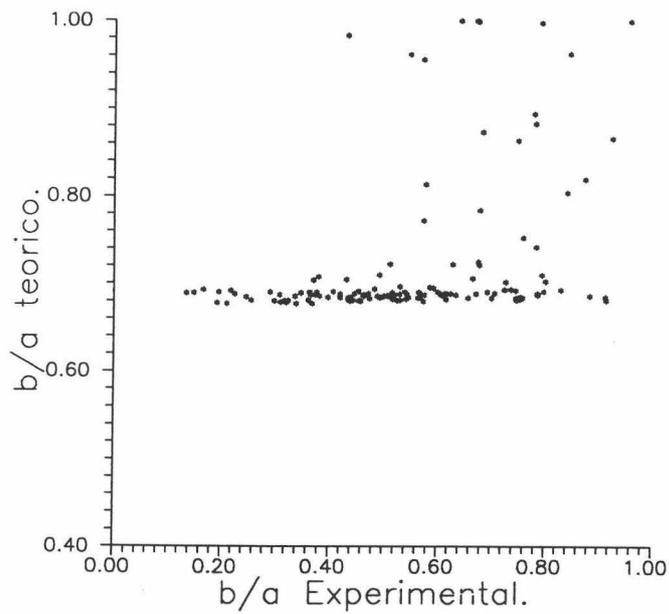


Figura 7.17.- Comparación de los resultados experimentales en relación de semiejes de Luo-Rigg con las previsiones de BFD.

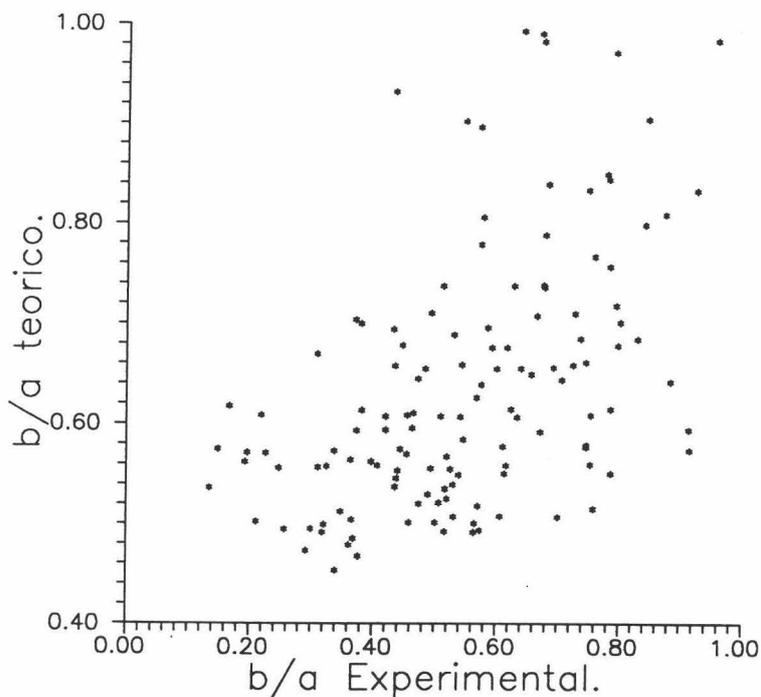


Figura 7.18.- Comparación de los resultados experimentales en relación de semiejes de Luo-Rigg con las previsiones de TC1-29.

Finalmente, si analizamos los valores obtenidos para el trabajo de Indow (tabla 7.5), observamos que ahora las discrepancias que aparecen son superiores a las que encontramos para el trabajo de Luo-Rigg. Estos desacuerdos aparecen principalmente para los valores medios correspondientes a la relación de semiejes; esto se debe a que las elipses son muy alargadas (valores bajos de relación de semiejes), mientras que las elipses previstas no presentan esta característica. Las diferencias encontradas en áreas y orientaciones para este trabajo son prácticamente del mismo orden de magnitud que para nuestros resultados o los obtenidos en modo de apertura (tablas 7.3 y 7.4).

En resumen, a la vista de estos resultados (tabla 7.3, 7.4 y

7.5), podemos concluir indicando, que las fórmulas CMC, BFD y TC1-29 dan, en general, peores previsiones de los umbrales obtenidos en modo de apertura (empleando colorímetros visuales) que en modo de objeto, como por otro lado era de esperar. Si comparamos los resultados para cada una de estas tres fórmulas, encontramos que, sobre todo, en lo que se refiere a la predicción en los valores de relación de semiejes, TC1-29 presenta una mejora respecto a sus predecesoras. A la vista de nuestros resultados y si tenemos en cuenta la sencillez y versatilidad de esta fórmula, pensamos que es claramente superior a las otras fórmulas estudiadas.

Conviene recordar, además, que el principal mérito de las fórmulas de diferencia de color estriba más bien en un aspecto diferente, la medida de diferencias entre objetos de color, donde esta fórmula ha dado resultados superiores a las fórmulas recomendadas actualmente por la CIE (Melgosa et al., 1993).

Para finalizar este capítulo y en base a las conclusiones que vamos obteniendo, cabe plantearse si existen diferencias estadísticamente significativas entre las previsiones de cada una de estas fórmulas. Es decir, sería de gran interés saber si en algún aspecto las mejoras logradas, por ejemplo, por TC1-29 como acabamos de decir, son significativas desde el punto de vista estadístico y por tanto, para toda la población o sólo cosa de una muestra.

Los procedimientos de inferencia estadística permiten determinar, en términos de probabilidad, si la diferencia observada entre 2 muestras está dentro del rango propio del azar, o si es lo suficientemente grande como para indicar que las muestras son provenientes de dos poblaciones diferentes a un cierto nivel de confianza. En el desarrollo de los métodos estadísticos las técnicas de inferencia conocidas exigen realizar

un buen número de suposiciones acerca de la naturaleza de la población. Puesto que los valores de la población pueden ser caracterizados por parámetros, estas técnicas estadísticas son llamadas paramétricas. Para evitar estas suposiciones se han desarrollado también distintas técnicas estadísticas no paramétricas como consecuencia de que en numerosas ocasiones los resultados experimentales no permiten conocer, ni es posible suponer a priori, características tales como el tipo de distribución estadística que siguen los datos de un experimento, etc. Estas técnicas no paramétricas se conocen también en la literatura como "pruebas de rango" o "pruebas de orden". Dentro de las pruebas no paramétricas, una de las más eficientes, la constituye el test de U Mann-Whitney (Mann-Whitney, 1947).

Aplicamos este test (Sachs, 1975) para analizar hasta qué punto las diferencias encontradas entre estas fórmulas son o no significativas en lo que se refiere a la previsión de umbrales de discriminación cromática. Se han calculado, para ello, las diferencias (experimentales - teóricas) entre orientaciones, relación de semiejes y áreas normalizadas al valor medio de los resultados experimentales de cada uno de los trabajos citados con anterioridad y las previsiones que ofrecen cada una de las fórmulas que son objeto de estudio en esta Memoria.

En los U-test se obtiene, como resultado final, un valor numérico que se compara con un valor tabulado dependiente del nivel de confianza elegido. Si el valor obtenido en el U-test es mayor la diferencia a ese nivel no es significativa, en caso contrario podemos asegurar que existen diferencias entre las poblaciones.

Las tablas 7.6a, 7.6b y 7.6c muestran los resultados correspondientes a los U-test realizados para los trabajos de Luo-Rigg en modo de objeto y los de MacAdam, 1942, Brown-MacAdam,

1949, Brown, 1957, Wysecki-Fielder, 1971 en modo de apertura. No incluimos en este apartado nuestros resultados experimentales o los correspondientes a Indow, 1992, pues son pocos los estímulos estudiados.

TRABAJOS	U-TEST	ORIENTACION		
		CMC	BFD	TC1
MACADAM	CMC	288.5		
	BFD	283.5	288.5	
	TC1	288.5	283.5	288.5
BROWN-MACADAM	CMC	2244.5		
	BFD	2238.0	2244.5	
	TC1	2244.5	2238.5	2244.5
BROWN	CMC	882.0		
	BFD	877.0	882.0	
	TC1	882.0	877.0	882.0
WYSZECKI-FIELDER	CMC	3582.5		
	BFD	3515.0	3582.5	
	TC1	3582.5	3515.0	3582.5
LUO-RIGG	CMC	8712.0		
	BFD	8708.0	8712.0	
	TC1	8712.0	8708.0	8712.0

Tabla 7.6a .- Resultados de los U-test en los trabajos de MacAdam, Brown-MacAdam, Brown, Wysecki-Fielder y Luo-Rigg para orientaciones.

TRABAJOS	U-TEST	b/a		
		CMC	BFD	TC1
MACADAM	CMC	288.5		
	BFD	283.0	288.5	
	TC1	163.0	165.0	288.5
BROWN-MACADAM	CMC	2244.5		
	BFD	2129.0	2244.5	
	TC1	2037.0	2172.0	2244.5
BROWN	CMC	882.0		
	BFD	879.0	882.0	
	TC1	681.0	685.0	882.0
WYSZECKI-FIELDER	CMC	3582.5		
	BFD	3394.0	3582.5	
	TC1	3024.0	2884.0	3582.5
LUO-RIGG	CMC	8712.0		
	BFD	8459.0	8712.0	
	TC1	6844.0	6545.0	8712.0

Tabla 7.6b .- Resultados de los U-test en los trabajos de MacAdam, Brown-MacAdam, Brown, Wyszecski-Fielder y Luo-Rigg para relación de semiejes (b/a).

De los resultados de los U-test inferimos que a un nivel de confianza del 95% no existen nunca diferencias significativas en las orientaciones previstas por las tres fórmulas (como era de esperar habida cuenta de los resultados obtenidos con anterioridad). En cuanto a la previsión en los valores de relación de semiejes no encontramos tampoco diferencias significativas entre los resultados obtenidos por CMC y BFD pero

sí entre estas dos y TC1-29. Por ejemplo para el trabajo de Luo-Rigg, valores en los U-test inferiores a 7114 y 7496 indican diferencias significativas, a un nivel del 95% y 90% respectivamente; si observamos la tabla 7.6b obtenemos valores de los U-test de 6844 con CMC y 6545 con BFD, mientras que entre CMC y BFD es de 8459.

TRABAJOS	U-TEST	AREAS		
		CMC	BFD	TC1
MACADAM	CMC	288.5		
	BFD	166.0	288.5	
	TC1	168.0	86.0	288.5
BROWN-MACADAM	CMC	2244.5		
	BFD	1078.0	2244.5	
	TC1	1848.0	598	2244.5
BROWN	CMC	882.0		
	BFD	539.0	882.0	
	TC1	611.0	340.0	882.0
WYSZECKI-FIELDER	CMC	3582.5		
	BFD	1045.0	3582.5	
	TC1	1984.0	268.5	3582.5
LUO-RIGG	CMC	8712.0		
	BFD	5221.0	8712.0	
	TC1	7386.0	5983.0	8712.5

Tabla 7.6c .- Resultados de los U-test en los trabajos de MacAdam, Brown-MacAdam, Brown, Wyszecski-Fielder y Luo-Rigg para áreas.

Como se puede observar de la tabla 7.6c, en la predicción del área de los umbrales de discriminación cromática es donde las tres métricas presentan las diferencias más significativas. Sin embargo, las diferencias en áreas previstas es mayor entre BFD con TC1-29 y CMC que entre ellas dos. Por ejemplo, vemos que para el trabajo Brown-MacAdam, valores de 1666 y 1804 indican diferencias significativas, a un nivel de confianza del 95% y 90% respectivamente. De los valores de los U-test obtenidos cuando comparamos las diferencias en las áreas previstas por BFD con CMC y TC1-29 son notablemente inferiores a los valores de los U-críticos indicando que estos conjuntos son claramente diferentes.

A la vista de estos resultados podemos concluir, en lo que se refiere a la predicción de umbrales diferenciales de color, que la fórmula TC1-29 presenta diferencias estadísticamente significativas con CMC y BFD en lo que respecta a las predicciones en relación de semiejes y área, especialmente con BFD.

El hecho de que existan diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la previsión de área entre CMC y BFD es destacable, pues los valores obtenidos para orientaciones y relación de semiejes entre CMC y BFD, podría inducir a considerar equivalentes estas fórmulas (en lo que se refiere a la previsión de umbrales) cuando en realidad, según nuestros resultados, no lo son.

7.5.- BIBLIOGRAFIA.

BROWN, W.R.J., MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences", J. Opt. Soc. Am., **39**, 808-834 (1949).

BROWN, W.R.J.; "Color discrimination of twelve observers", J. Opt. Soc. Am., **47**, 137-143 (1957).

GARCIA, J.A.; Determinación experimental de diferencias de color: Normalización colorimétrica y modelos de visión. Tesis Doctoral. Universidad de Granada (1991).

HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L., CERVANTES, A.; "Uniform color scales. A comparative analysis for color discrimination data", Die Farbe, **31**, 229-242 (1983/84).

INDOW, T., ROBERTSON, A.R., VON GRANAU, M., FIELDER, G.H.; "Discrimination ellipsoids of aperture and simulated surface colors by matching and paired comparison", Color Res. Appl., **17**, 6-22 (1992).

JIMENEZ DEL BARCO, L.; Colorimetría Diferencial en igualaciones metámeras. Tesis Doctoral. Universidad de Granada (1984).

LUO, M. R, RIGG, B.; "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", Color Res. Appl., **11**, 25-42 (1986).

MACADAM, D.L.; "Visual sensitivities to color differences in daylight", J. Opt. Soc. Am., **32**, 247-274 (1942).

MACADAM, D.L.; "Metric coefficients for CIE color-difference formulas", Color Res. Appl., **10**, 45-49 (1985).



MANN, H.B., WHITNEY, D.R.; "On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other", Ann. Math. Statist., **18**, 50-60 (1947).

MELGOSA, M.; "Estudio comparativo de datos colorimétricos obtenidos con presentación en modo de apertura y de objeto" Tesis Doctoral. Universidad de Granada (1989).

MELGOSA, M., PEREZ, M.M., MARTINEZ, J.A., GARCIA-BELTRAN, A.; "Coeficientes métricos asociados a las fórmulas de diferencia de color CMC y BFD", Actas 2º Congreso Nacional de Color, 166-170 Valencia (1991).

MELGOSA, M., PEREZ, M.M., JIMENEZ DEL BARCO, L., HITA, E.; "A test of TC1-29 color-difference formula using some classical data sets (preliminary report)". EOS Annual Meeting, 37-38 Zaragoza (1993).

MELGOSA, M., HITA, E., ROMERO, J., JIMENEZ DEL BARCO, L.; "Color discrimination thresholds translated from the CIE (x,y,Y) space to the CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)", Color Res. Appl., **19**, 1-8 (1994).

POINTER, M.R.; "A comparison of the CIE 1976 colour spaces". Color Res. Appl., **6**, 108-118 (1981).

ROBERTSON, A.R.; "The CIE 1976 color-difference formula" Color Res. Appl., **2**, 7-11, (1977).

ROBERTSON, A.R.; "CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation", Color Res. Appl., **3**, 149-151 (1978).

SACHS, L.; Applied Statistics, Springer Series in Statistics, Springer-Verlag, New York (1982).

WITT, K.; "Three-dimensional thresholds of color-difference perceptibility in painted samples: Variability of observer in four CIE color regions". Color Res. Appl., **12**, 128-134 (1987).

WYSZECKI, G., FIELDER, G.M.; "New color matching ellipses", J. Opt. Soc. Am., **61**, 1135-1152 (1971).

CAPITULO 8.

APORTACIONES Y CONCLUSIONES.

CAPITULO 8.

APORTACIONES Y CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones y aportaciones de la investigación realizada en esta Memoria están resumidas en los siguientes apartados:

1.- Se procedió al diseño y puesta a punto de dos dispositivos experimentales suficientemente sensibles y versátiles, que permiten la obtención de estímulos de color, con suficientes garantías de reproducibilidad, así como la medida de umbrales de color. En concreto, los dispositivos son: a) Un colorímetro visual tipo Wright al que se le han incorporado componentes informáticos de control y soportes para muestras que permiten utilizar este dispositivo como colorímetro industrial; b) Dispositivo de iluminación/observación de muestras con diferentes campos circundantes y muestras coloreadas elaboradas a tal efecto. Las características de ambos

dispositivos permiten comparar nuestros resultados experimentales con otros clásicos en este campo.

2.- Teniendo en cuenta las recomendaciones de la CIE y las de distintos autores, se han obtenido nuevos resultados experimentales sobre discriminación cromática con observaciones en modo de apertura y de objeto. Estos resultados se comparan con otros clásicos en Colorimetría Diferencial. En concreto, se han medido los umbrales diferenciales de cromaticidad de 5 estímulos por 3 observadores con visión normal del color. Los estímulos seleccionados son los 5 estímulos que aconseja estudiar la CIE en sus recomendaciones para coordinar las investigaciones sobre diferencias de color. Estos estímulos fueron observados bajo 2 modos de presentación, apertura y objeto, realizando para ello 4 tipos de experiencias: apertura (luz-luz), apertura (luz-muestra), apertura (muestra-muestra) y por último, modo de objeto.

3.- Para la determinación de cada umbral, se usaron una media de 120 puntos experimentales en las experiencias realizadas con el colorímetro visual y de 50 puntos en el dispositivo de iluminación/observación. Estos puntos experimentales se distribuyen procurando realizar un amplio barrido en diversas direcciones del espacio respecto del estímulo de referencia. El método seguido en la realización de las cuatro experiencias fue siempre el mismo (método de los estímulos constantes), lo cual nos permite la comparación entre los resultados experimentales. Este método, junto al tipo de ajuste estadístico que conduce a los umbrales, garantiza suficientemente la reproducibilidad y objetividad de los resultados.

4.- Se considera de interés señalar que, independientemente del dispositivo, tipo de experiencia y modo de presentación empleado, nuestros resultados entre observadores presentan una notable

concordancia, tanto en el sistema de representación CIE-31 como en el sistema CIELAB. Este resultado confirma que el método experimental empleado es adecuado para la obtención de umbrales diferenciales de color. Tal circunstancia justifica el esfuerzo involucrado en la medida de los umbrales y el asociado a la búsqueda de nuevas fórmulas de diferencia de color que los predigan adecuadamente.

5.- Puede observarse una semejanza global entre nuestros resultados experimentales y los de otros trabajos clásicos que emplean colorímetros visuales, en las zonas del diagrama cromático donde se sitúan los 5 estímulos estudiados. Tan sólo, y debido al método estadístico de ajuste de nuestros resultados, se obtienen umbrales de mayor tamaño que los demás autores, como era de esperar. Sin embargo, cuando comparamos nuestros resultados en modo objeto con los de otros autores encontramos que ahora, aunque existen acuerdos, éstos son menos significativos que en el caso de las experiencias desarrolladas con el colorímetro visual. Este hecho se debe a que las condiciones experimentales en nuestras experiencias en modo de objeto difieren de algunas de las empleadas en importantes trabajos en este campo, tal como el trabajo de Luo y Rigg. No obstante, ante la similitud de resultados de nuestros 3 observadores, consideramos que nuestros resultados experimentales refuerzan y complementan los de otros autores previos como base para los cálculos de tolerancias cromáticas bajo presentación en modo de apertura y de objeto.

6.- Al analizar los umbrales obtenidos en las 4 experiencias realizadas, encontramos que hay una gran similitud, diferencias del orden de magnitud de las encontradas entre observadores, entre los umbrales en apertura (luz-luz) y apertura (luz-muestra), así como también entre las experiencias apertura (muestra-muestra) y objeto. Las diferencias entre umbrales se acentúan, sin embargo, al comparar las experiencias de apertura

(luz-luz) y apertura (muestra-muestra) o las experiencias apertura (luz-luz) y objeto. El hecho de que las principales discrepancias entre los conjuntos de elipses obtenidos en cada una de las cuatro experiencias realizadas aparezcan al cambiar el tipo de dispositivo, nos hace pensar, que además del modo de presentación, existe una clara influencia de las variables inherentes a estos dispositivos, tales como el tipo de visión o la diferente forma de obtener la distribución de los estímulos, frente a otras variables que en principio podrían parecer importantes, como pueden ser la textura de la muestras o el grado de metamerismo.

7.- Los umbrales de discriminación cromática obtenidos en modo de apertura y de objeto con un mismo dispositivo experimental (es decir, apertura (muestra-muestra) y objeto) y empleando un mismo método experimental, como es nuestro caso, coinciden sobre todo en cuanto a la orientación y también en la relación de semiejes, pero el tamaño de las elipses de discriminación cromática obtenidas es ligeramente superior en apertura. Estos resultados coinciden con los obtenidos recientemente por Indow y colaboradores utilizando un método experimental distinto y con estímulos generados en monitores de color mediante software e interface apropiados. Según esto, parece ser que las diferencias encontradas al comparar resultados clásicos en modo de objeto y de apertura pueden deberse, más que al modo de presentación, a las diferencias entre las condiciones experimentales de los dispositivos y a los métodos de obtención de los umbrales empleados en uno u otro tipo de experiencias.

8.- Se han determinado los coeficientes métricos asociados a las recientes fórmulas derivadas del sistema CIELAB: $CMC(l:c)$, $BFD(l:c)$ y TC1-29. Tomando como base estos coeficientes métricos se han calculado los umbrales de discriminación cromática predichos por estas fórmulas en el sistema CIELAB. La similitud

entre las expresiones de los coeficientes métricos asociados a cada una de estas fórmulas indica que las diferencias entre los umbrales que prevén vendrán dadas por los distintos valores que cada una de estas fórmulas dan a las tolerancias en croma (S_c , D_c , T_c) y en tono (S_h , D_h , T_h). Un análisis de los valores de los parámetros característicos de las elipses previstas por cada una de estas 3 fórmulas muestra que las orientaciones difieren en menos de un grado, siendo radiales e idénticas para CMC y TC1-29. Sin embargo, TC1-29 difiere notablemente en la previsión de los valores en relación de semiejes con sus predecesoras. Por último, las principales discrepancias aparecen en las áreas, siendo las áreas previstas por BFD siempre inferiores a las de CMC y éstas, a las de TC1-29.

9.- Con respecto a nuestros resultados experimentales, aunque ninguna de las 3 fórmulas citadas presenten excelentes acuerdos con ellos, la fórmula TC1-29 da, en cuanto a la predicción de umbrales, resultados ligeramente superiores a los de las demás y, por supuesto, superiores a los previstos por CIELAB. Por otra parte, los resultados experimentales con muestras coloreadas se aproximan a las previsiones de las fórmulas analizadas, mejor que los resultados obtenidos con colorímetros visuales.

10.- Se han trasladado al sistema de representación CIELAB, mediante un método apropiado, los conjuntos de elipses de algunos de los principales trabajos realizados en Colorimetría Diferencial, tanto en modo de apertura como de objeto. Este amplio conjunto de elipses, junto a nuestros propios resultados experimentales, constituye una buena base de datos para futuros trabajos sobre estudio y desarrollo de fórmulas de diferencia de color, según indica Robertson como última etapa de las recomendaciones CIE.

11.- Mediante procedimientos de inferencia estadística y

empleando los resultados experimentales de trabajos clásicos en Colorimetría Diferencial, observamos que las diferencias encontradas en la previsión de umbrales son estadísticamente significativas entre TC1-29 y CMC o BFD en lo que se refiere a la previsión de relación de semiejes y áreas. El hecho de que existan diferencias significativas en cuanto a la previsión de área entre CMC y BFD es también destacable, pues la similitud de los valores obtenidos para la orientación y relación de semiejes por estas 2 fórmulas, podrían inducir a considerarlas equivalentes cuando en realidad, según nuestros resultados, no lo son.

12.- Mediante el empleo de la base de datos citada en el punto 10, podemos concluir, que las fórmulas CMC, BFD y TC1-29 dan, en general, peores previsiones de los umbrales obtenidos en modo de apertura (empleando colorímetros visuales) que en modo de objeto. En concreto, por ejemplo, TC1-29 presenta diferencias del orden de la variabilidad entre observadores para el trabajo de Luo y Rigg. Si comparamos los resultados para cada una de estas fórmulas encontramos también, que sobre todo, en lo que se refiere a la predicción de los valores de relación de semiejes, TC1-29 presenta una notable mejoría respecto a sus predecesoras. A la vista de este resultado, teniendo en cuenta también otros trabajos realizados en nuestro laboratorio, nos parece de gran interés la propuesta que el TC1-29 ha realizado a la CIE sobre evaluación industrial de diferencias de color.

Los resultados alcanzados en esta Memoria nos impulsan a continuar la investigación en esta materia, según algunas de las directrices que proponía ya la CIE en 1978 y que, en buena parte ha retomado el Comité Técnico 1-29 de la misma.