

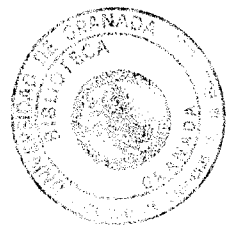
UNIVERSIDAD DE GRANADA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FISICA APLICADA

S. B.
E. 78
N. 14

ADAPTACION CROMATICA EN COMPARACIONES  
SUCESIVAS DE COLOR



AGUSTIN CERVANTES MADRID



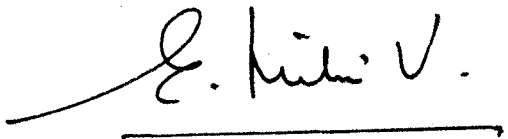
13515275  
2147966

ADAPTACION CROMATICA EN COMPARACIONES

SUCESIVAS DE COLOR


Visado en Granada a dieciocho  
de Noviembre de mil novecien-  
tos ochenta y seis.

El Director de la Memoria



Dr Enrique F Hita Villaverde  
Catedrático de Física Aplica-  
da de la Universidad de Gra-  
nada.

Memoria presentada para  
aspirar al grado de DOC-  
TOR EN CIENCIAS.



Agustín Cervantes Madrid

*Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible la realización del presente trabajo.*

*Una mención especial al profesor Hita Villaverde por su valiosa colaboración en las tareas de dirección y redacción del trabajo. Y al profesor Romero Mora, compañero durante todo el trabajo experimental, por su inestimable apoyo en el desarrollo de la investigación.*

*He de destacar también la valiosa colaboración del profesor Jiménez del Barco a través de las muchas observaciones y sugerencias formuladas.*

*Finalmente, quiero también expresar mi agradecimiento, por su constante estímulo y apoyo, a mis compañeros en el trabajo docente: Correa González, Jiménez Gómez, Perales Palacios, Augustin Vacas y de Manuel Torres.*

*A mis padres*

## INDICE

I.	INTRODUCCION.....p.	1
II.	CONSIDERACIONES PREVIAS.....p.	4
II.1	COLORIMETRIA DIFERENCIAL.....p.	4
II.2.	COMPARACIONES SIMULTANEAS Y SUCESIVAS DE COLOR....p.	19
III.	ADAPTACION CROMATICA.....p.	21
III.1.	CONSIDERACIONES GENERALES.....p.	21
III.2.	TEORIA SOBRE ADAPTACION CROMATICA.....p.	24
III.3.	ECUACIONES DE TRANSFORMACION BAJO ADAPTACION CROMA- TICA.....p.	27
III.3.1.	LEY DE LOS COEFICIENTES DE VON KRIES.....p.	27
III.3.2.	CLASIFICACION DE LAS ECUACIONES DE TRANSFORMACION BAJO ADAPTACION CROMATICA.....p.	32
IV.	PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO.....p.	48
V.	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....p.	52

V.1.	CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....p.	52
V.1.1.	SISTEMA DE PRODUCCION DE ESTIMULOS.....p.	55
V.1.2.	SISTEMA DE PRODUCCION DEL CAMPO ADAPTANTE.....p.	59
V.1.3.	SISTEMA DE OBSERVACION.....p.	61
V.1.4.	SISTEMA DE OBTURACION.....p.	63
V.2.	CALIBRADO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....p.	66
V.2.1.	MEDIDA DEL FACTOR DE REFLEXION ESPECTRAL RELATIVO DEL ESPEJO.....p.	67
V.2.2.	DETERMINACION DE LA EFECTIVIDAD ESPECTRAL DEL MONO- CROMADOR Y MEDIDA DE LA RESPONSIVIDAD ESPECTRAL DE LA FOTOCELULA.....p.	69
V.2.3.	REALIZACION DE CALIBRADOS.....p.	72
V.3.	PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....p.	74
VI.	METODO EXPERIMENTAL.....p.	77
VI.1.	DESCRIPCION GENERAL.....p.	77
VI.2.	PARAMETROS ANALIZADOS.....p.	81
VI.3.	DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS.....p.	89
VI.4.	TRATAMIENTO DE LOS DATOS.....p.	92
VII.	RESULTADOS EXPERIMENTALES: ANALISIS Y DISCUSION...p.	95
VII.1.	DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS.....p.	97
VII.1.1.	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS DISCRIMINACIONES DE COLOR.....p.	97
VII.1.2.	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS IGUALACIONES EN APA- RIENCIA DE COLOR.....p.	138
VII.2.	ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....p.	146
VII.2.1.	DISCRIMINACIONES DE COLOR.....p.	146

VII.2.2.IGUALACIONES EN APARIENCIA DE COLOR.....p. 156  
VIII. CONCLUSIONES.....p. 171  
IX. BIBLIOGRAFIA.....p. 177

## I. INTRODUCCION

El estudio realizado en el presente trabajo se enmarca dentro de la Optica Fisiológica, centrándose en el campo de la Colorimetría y más específicamente en el de la Visión del Color.

Se ha desarrollado en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada dentro de la línea de investigación que la Cátedra de Optica viene desarrollando.

El problema fundamental que subyace en todo trabajo llevado a cabo dentro de la Colorimetría, tanto en la determinación de los umbrales diferenciales de color como en el estudio de las igualaciones en apariencia de color, es el establecimiento de modelos de visión que expliquen las diferencias de color perceptibles por el ojo humano así como las igualaciones que se puedan establecer bajo iguales o diferentes condiciones de observación. Todo ello



tiene su origen en la limitación que presenta el ojo en cuanto a la percepción de diferencias de color entre un conjunto finito de estímulos a comparar.

Del estudio de los umbrales diferenciales de color se derivan dos aspectos fundamentales y a su vez diferentes, uno teórico y otro práctico. De acuerdo al primero, tales umbrales permiten el establecimiento de un elemento de línea asociado a la métrica del espacio de color que prediga aquellas diferencias mínimas perceptibles que el ojo humano es capaz de detectar, referido siempre a un determinado espacio de representación. Respecto al segundo, existe un interés de tipo técnico centrado en el establecimiento de tolerancias de color bajo un punto de vista industrial, determinadas a través de los umbrales diferenciales correspondientes a estímulos prefijados. Así, desde el punto de vista comercial, dos estímulos de color pueden ser vistos iguales bajo unas determinadas condiciones de observación y cambiar su igualdad cuando éstas cambien, por ejemplo bajo distintas condiciones de adaptación. Surge de esta forma la necesidad de poder establecer métodos de predicción del color que evalúen tales igualaciones a la hora de reproducir dichos colores cuando las condiciones de adaptación cambian. Por citar un ejemplo digamos que una fotografía en color es generalmente observada bajo diferentes condiciones de iluminación a las que existían en la exposición. Y a su vez ésta es comparada con los estímulos de color recordados y no con los correspondientes a los objetos observados simultáneamente, factor que también se ha tenido en cuenta en el desarrollo del presente trabajo.

El trabajo que aquí presentamos analiza la influencia de la adaptación cromática sobre las comparaciones de color en presentación sucesiva. Hemos determinado para ello los umbrales diferenciales de color correspondientes a tres estímulos observados bajo cinco adaptaciones diferentes: azul, verde, roja, acromática y oscuridad; utilizándose para ello dos observadores normales en la visión del color. También se han estudiado las igualaciones en apariencia de color, correspondientes a los mismos estímulos seleccionados y bajo las mismas condiciones de observación que en la determinación de

los umbrales. En esta última fase de la investigación se han determinado aquellos estímulos de color que igualan en apariencia a uno dado bajo unas determinadas condiciones de adaptación, y siempre referida la igualación en apariencia al estímulo acromático adaptante.

Se ha seguido en el tratamiento de los resultados experimentales un método basado en el análisis de éstos según la propagación de errores de medidas colorimétricas, que nos permite determinar tanto los umbrales de discriminación como las igualaciones en apariencia. Como podremos observar en los siguientes apartados que vamos a desarrollar, este método difiere no sólo de los que usualmente han desarrollado otros autores sino también en la forma de presentar los estímulos de color a la hora de ser evaluada la influencia de la adaptación cromática.

Podemos finalmente destacar que la influencia de la adaptación cromática se analiza paralelamente desde dos vertientes diferentes: la determinación de umbrales e igualaciones en apariencia de color, aspecto éste que muy pocas veces ha sido emprendido por otros autores, Loomis y Berger (1979).

## II. CONSIDERACIONES PREVIAS

### II.1. COLORIMETRIA DIFERENCIAL

Desde el punto de vista práctico presenta un interés mayor el determinar las diferencias entre estímulos de color que la medida en sí de éstos. Se presenta entonces la necesidad de poder medir el tamaño de tales diferencias de color, bajo un determinado sistema de representación, y el poderlas predecir en base a formulaciones teóricas que representen la métrica asociada al espacio en cuestión.

Para abordar inicialmente el problema se llevaron a cabo medidas sobre la variación de saturación y pureza colorimétrica en función de la longitud de onda. Si bien estos trabajos contribuyeron a evaluar la magnitud del problema, demostraron la complejidad del fenómeno y no se consideran como representativos de todas las

posibles variaciones dentro del espacio cromático.

El primer intento serio en determinar tales diferencias de color fué llevado a cabo por Wright (1941), midiendo las mínimas diferencias perceptibles dentro de una amplia gama de puntos y en distintas direcciones del espacio cromático. Tales resultados aparecen en la Figura II.1, donde podemos observar una característica importante del diagrama de cromaticidad CIE 1931, la no uniformidad de éste, o lo que es lo mismo, las apreciables diferencias en longitud de tales umbrales direccionales en función de la localización de los estímulos.

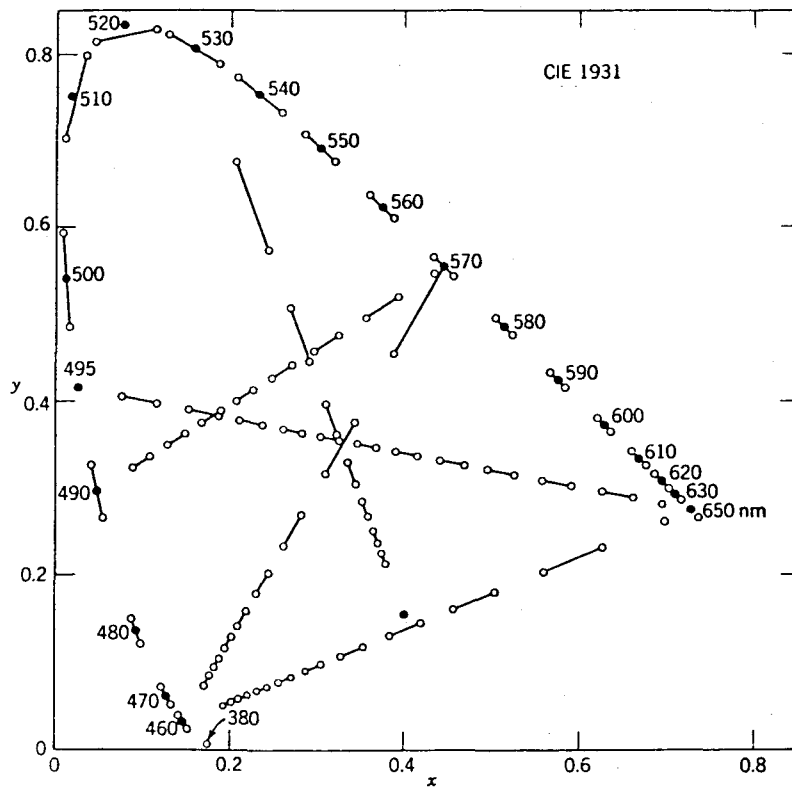


Figura II.1 Mínimos desplazamientos perceptibles para diferentes puntos del diagrama cromático obtenidos por Wright (1941). Cada segmento representa el mismo grado de perceptibilidad.

Más tarde, MacAdam (1942), abordó el problema no restringiéndolo a umbrales de línea sino a la determinación de umbrales diferenciales de cromaticidad para diferentes direcciones del espacio a partir de un estímulo de referencia. Utilizó un sólo observador quien controlando los mandos de un colorímetro diseñado para tal fin establecía inicialmente una igualdad respecto del de referencia. Midió los umbrales para 25 estímulos, obteniendo elipses de discriminación, representativas de los resultados experimentales, a través de la desviación media correspondiente a cuatro o cinco direcciones del espacio, tal y como aparecen en la Figura II.2

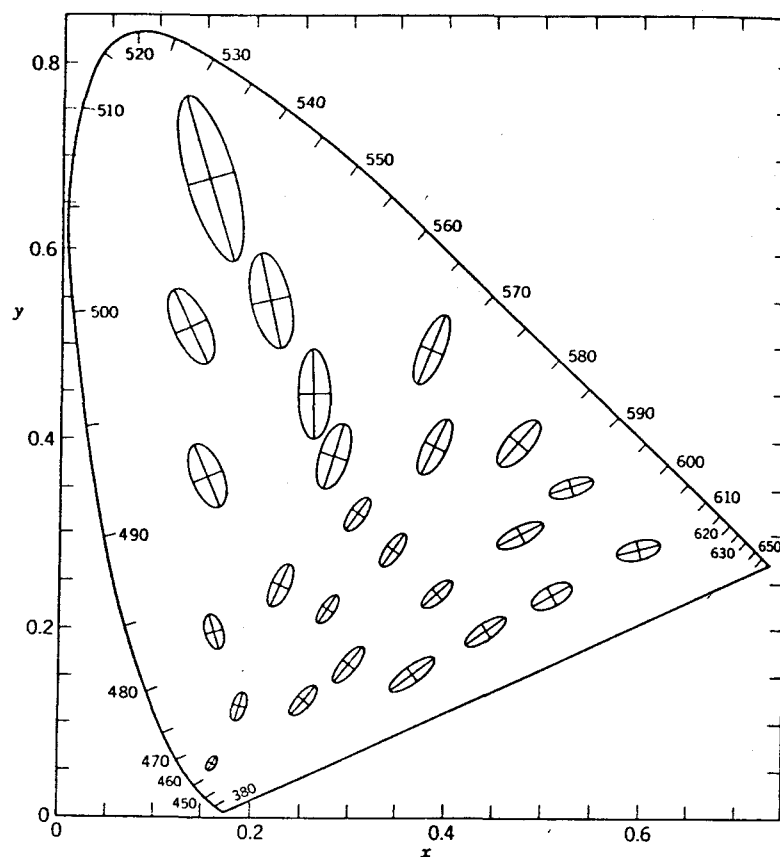


Figura II.2 Resultados obtenidos por MacAdam (1942). Cada elipse (10 veces ampliada de su tamaño real) representa el umbral de discriminación en cromaticidad para estímulos de color correspondientes al centro de éstas.

Posteriormente, Brown y MacAdam (1949), ampliaron el estudio para determinar los umbrales diferenciales de color introduciendo la variable luminancia, pues los resultados iniciales de MacAdam se llevaron a cabo a luminancia constante. Tales resultados condujeron al establecimiento del elipsoide como figura geométrica representativa del umbral de discriminación global.

La adopción de la elipse y el elipsoide, como representaciones geométricas de los umbrales de cromaticidad y color respectivamente, no han dejado de suscitar polémicas, aun no resueltas, acerca del posible establecimiento de una métrica riemanniana o incluso euclídea en el espacio cromático.

Han sido varios los trabajos aportados por diferentes autores que muestran figuras geométricas, distintas a las elipses, como representativas del umbral de cromaticidad, Le Grand (1970), Crawford (1970), Parra (1970) e Hita y otros (1982a). No obstante, también fueron aportados resultados experimentales que postulaban la elipse como figura geométrica representativa del umbral, Wyszeccki y Fielder (1971), al menos dentro de ciertos límites.

En las Figuras II.3, II.4 y II.5 mostramos los resultados de los trabajos de Crawford, Parra e Hita y otros. Si bien la elipse o el elipsoide pueden estar sujetos a ciertas críticas acerca de su aceptación definitiva, también es verdad que representan formas geométricas de gran utilidad a la hora de comparar los distintos resultados experimentales obtenidos en diferentes investigaciones.

Asociado al problema de la métrica del espacio se encuentra el de la uniformidad del mismo, pues el objetivo primordial de la Colorimetría Diferencial es tanto evaluar las diferencias de cromaticidad, como el obtener un espacio de representación en el que las distancias entre estímulos se correspondan con diferencias reales de las sensaciones que éstos producen; es decir, poder obtener umbrales de igual tamaño y forma para puntos cualesquiera del espacio cromático.

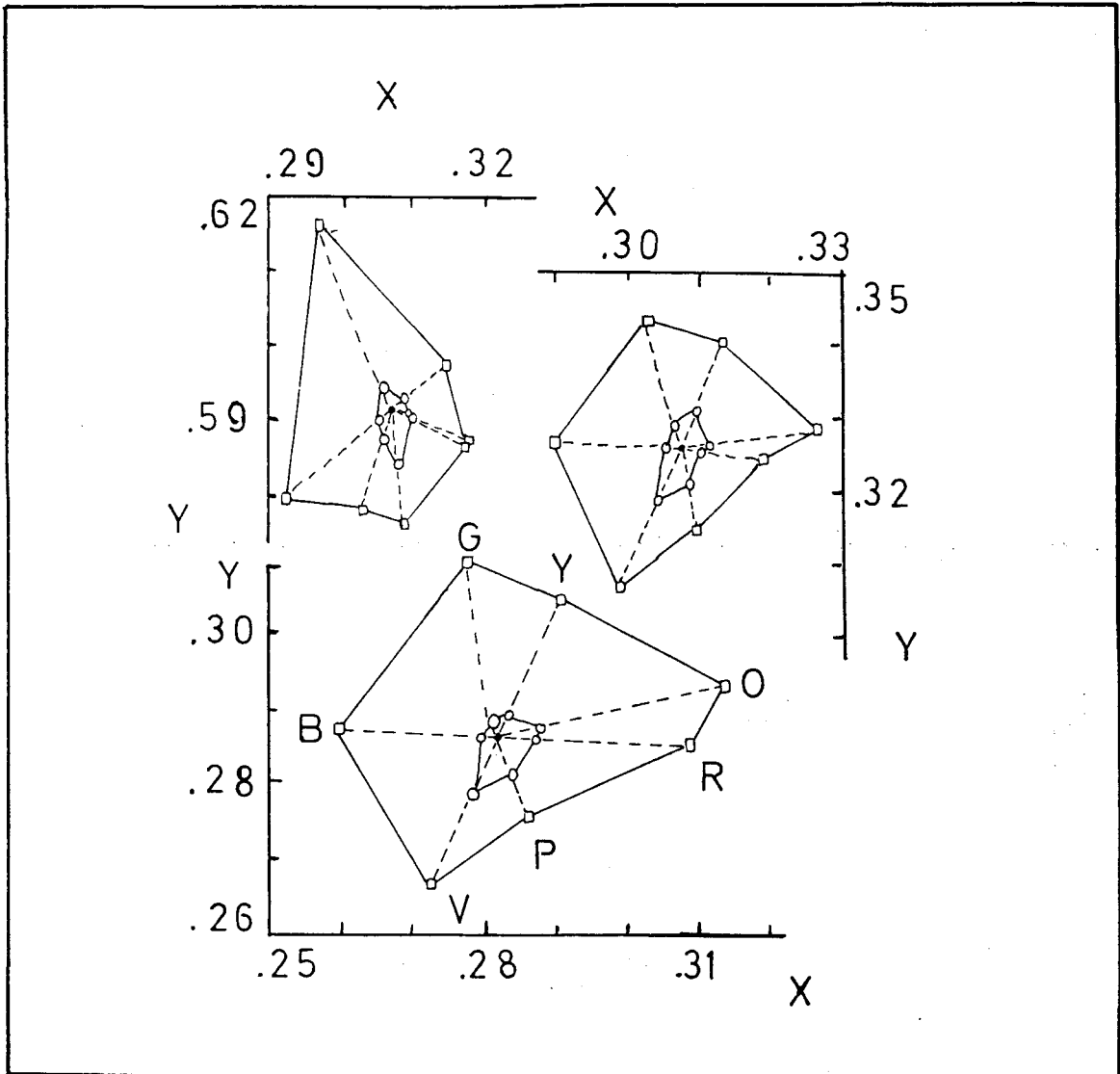


Figura II.3 Umbrales diferenciales de cromaticidad obtenidos por Crawford (1970). Los trazos determinados por círculos y cuadrados representan los umbrales para observadores con visión normal y anómala al color respectivamente.

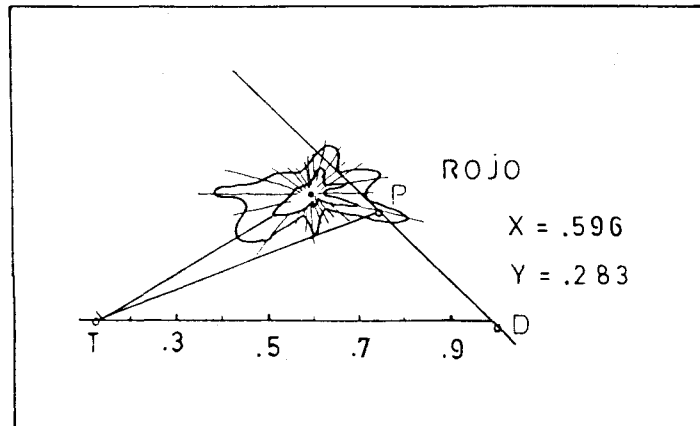


Figura II.4 Umbrales diferenciales de cromaticidad obtenidos por Parra (1970).

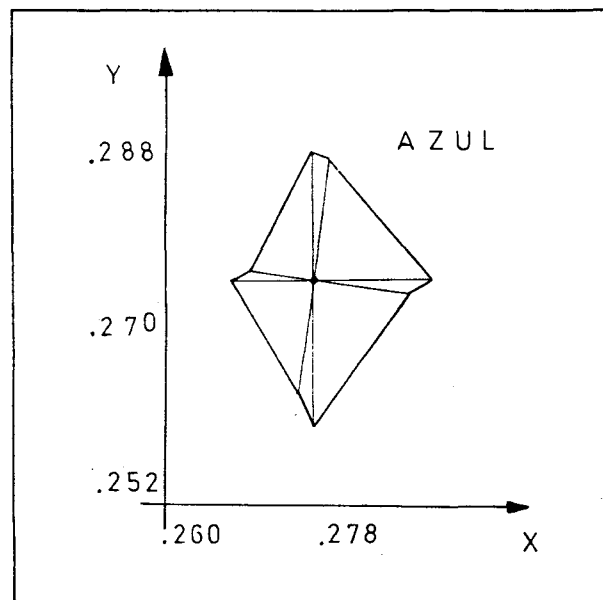


Figura II.5 Umbrales de discriminación en determinadas direcciones del espacio para un estímulo azul obtenidos por Hita y otros (1982a).



Para llevar a cabo tales propósitos, Helmholtz (1896) formuló un elemento de línea basado en la teoría de los tres fotopigmentos de Young y las leyes de la Colorimetría conocidas hasta la fecha, sobre todo la ley de Weber. El elemento de línea viene dado en función de los valores triestímulo como

$$ds^2 = (dR/R)^2 + (dG/G)^2 + (dB/B)^2$$

Schrödinger (1920) propuso un elemento de línea en base a consideraciones puramente teóricas definido como

$$ds^2 = (R+G+B)^{-1} (dR^2/R + dG^2/G + dB^2/B)$$

Stiles (1946) propuso quizá el elemento de línea que mejores resultados ha dado basado en una modificación menos radical del elemento de línea de Helmholtz, viniendo dado como

$$ds^2 = (9 dR/(1+9R) C_r)^2 + (9 dG/(1+9G) C_g)^2 + (9 dB/(1+9B) C_b)^2$$

donde  $C_r$ ,  $C_g$  y  $C_b$  son constantes proporcionales a los valores límites de las fracciones de Weber de los tres tipos de conos. A altas luminancias toman los valores siguientes

$$(C_r)^{-2} = 0.612 \quad (C_g)^{-2} = 0.369 \quad (C_b)^{-2} = 0.019$$

quedando entonces el elemento de línea como

$$ds^2 = (dR/C_r R)^2 + (dG/C_g G)^2 + (dB/C_b B)^2$$

que como podemos observar es muy parecido al elemento de línea propuesto por Helmholtz.

Los resultados predichos por Stiles pueden verse en la Figura II.6, donde se aprecia un buen ajuste respecto a los resultados experimentales de MacAdam cuando los comparamos con los de la Figura II.2.

MacAdam (1943), por otro lado, trató de determinar el elemento de línea correspondiente a las elipses de discriminación, calculando los valores de los coeficientes asociados al tensor métrico  $g_{ij}$ .

$$ds^2 = \sum_{i,j} g_{ij} dx_i dy_j \quad \text{con } g_{ij}=g_{ji}$$

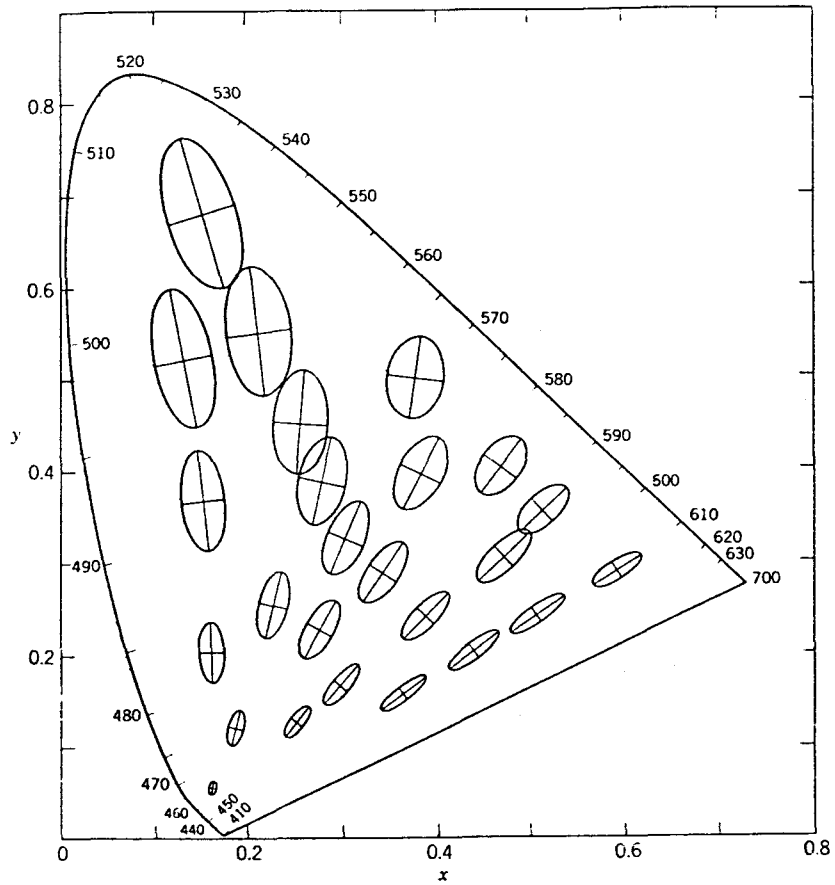


Figura II.6 Elipses de Stiles (1946) predichas según la modificación del elemento de línea de Helmholtz y ampliadas tres veces su tamaño real.

Los valores de tales coeficientes a lo largo del espacio cromático vienen dados según las Figuras II.7, II.8 y II.9.

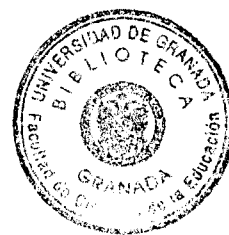
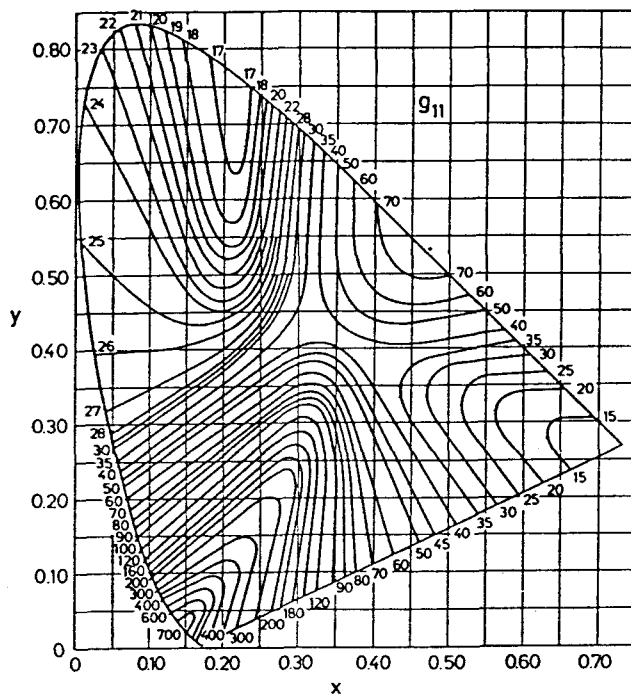


Figura II.7 Contornos correspondientes al coeficiente  $g_{11} * 10^{-4}$  del elemento de línea propuesto por MacAdam (1943).

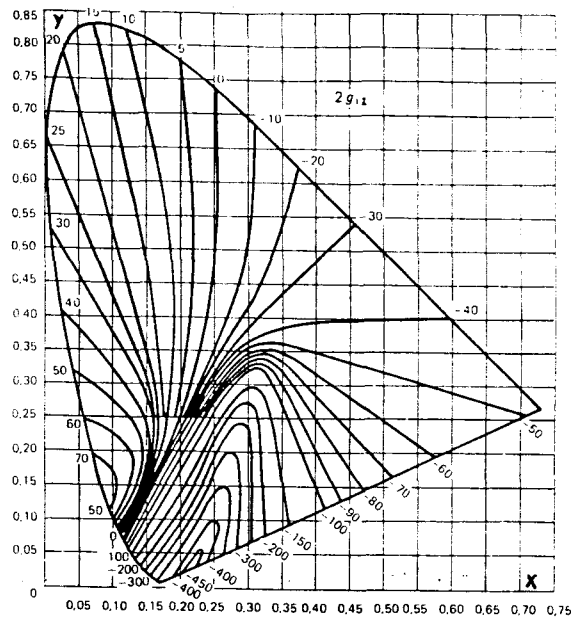


Figura II.8 Contornos del coeficiente  $2g_{12} \cdot 10^{-4}$  del elemento de línea propuesto por MacAdam (1943).

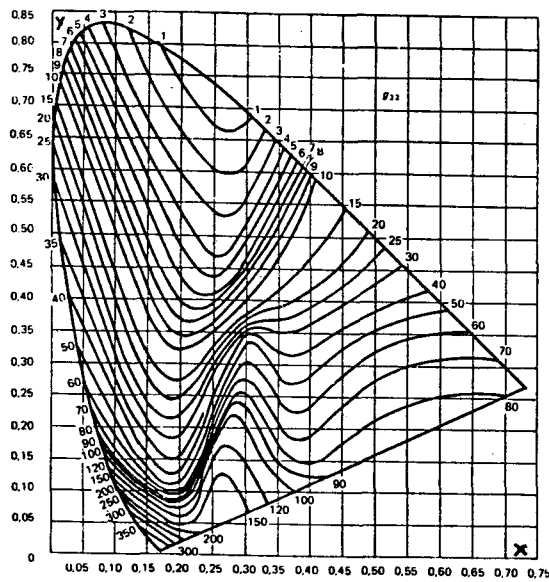


Figura II.9 Contornos del coeficiente  $g_{22} \cdot 10^{-4}$  del elemento de línea propuesto por MacAdam (1943).

En cuanto al establecimiento de sistemas uniformes de representación del color, varios han sido los intentos encaminados a tal fin.

Por un lado la obtención de atlas de color, donde la ordenación de éstos atiende a un sistema de escalones de igual diferencia perceptible. Se ha desarrollado extensamente el atlas Munsell, aunque también es de uso frecuente el de Ostwald; estando ordenados los colores según los atributos de claridad, tono y saturación, con denominaciones específicas según el tipo de atlas.

Respecto al establecimiento de sistemas de representación uniformes, se han desarrollado varios tipos a través de transformaciones del sistema CIE 1931 entre los que merecen especial atención, por su extendido uso, los sistemas CIE-UCS 1960 propuesto inicialmente por MacAdam (1937) y adoptado por la CIE 23 años más tarde, CIELAB 1976 y CIELUV 1976.

Las ecuaciones de transformación de los valores triestímulo X, Y, Z CIE 1931 a los respectivos valores triestímulos y coordenadas de cromaticidad de los sistemas mencionados vienen dadas por:

CIE-UCS 1960 (u,v)

$$U = 2 X / 3$$

$$V = Y$$

$$W = -0.5 X + 1.5 Y + 0.5 Z$$

y las coordenadas de cromaticidad u y v vienen dadas como

$$u = 4 X / (X+15Y+3Z) = 4 x (-2x+12y+3)^{-1}$$

$$v = 6 Y / (X+15Y+3Z) = 6 y (-2x+12y+3)^{-1}$$

CIELAB 1976 (a\*,b\*,L\*)

$$a^* = 500 ( f(X/X_0) - f(Y/Y_0) )$$

$$b^* = 200 ( f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0) )$$

$$L^* = \begin{cases} 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 & \text{para } Y/Y_0 > 0.008856 \\ 903.3 (Y/Y_0) & \text{para } Y/Y_0 \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$\text{siendo } f(X/X_0) = \begin{cases} (X/X_0)^{1/3} & \text{para } X/X_0 > 0.008856 \\ 7.787(X/X_0) + 16/116 & \text{para } X/X_0 \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$\text{y } f(Y/Y_0) = \begin{cases} (Y/Y_0)^{1/3} & \text{para } Y/Y_0 > 0.008856 \\ 7.787(Y/Y_0) + 16/116 & \text{para } Y/Y_0 \leq 0.008856 \end{cases}$$

donde  $X_0$ ,  $Y_0$  y  $Z_0$  representan los valores triestímulo correspondientes al estímulo acromático que se utilice en sistema CIE 1931.

Por otro lado, Richter (1980) ha propuesto ciertas modificaciones a este sistema que mejoran la uniformidad del espacio cromático.

CIELUV 1976 ( $u^*, v^*, L^*$ )

siendo

$$u^* = 13 L^* (u - u_0)$$

$$v^* = 13 L^* (v - v_0)$$

$$L^* = \begin{cases} 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 & \text{para } Y/Y_0 > 0.008856 \\ 903.3 (Y/Y_0) & \text{para } Y/Y_0 \leq 0.008856 \end{cases}$$

donde  $u_0$  y  $v_0$  son los valores de  $u$  y  $v$  correspondientes al estímulo acromático en el sistema CIE-UCS 1960.

En las Figuras II.10, II.11 y II.12 podemos visualizar los distintos sistemas de representación aquí mencionados.

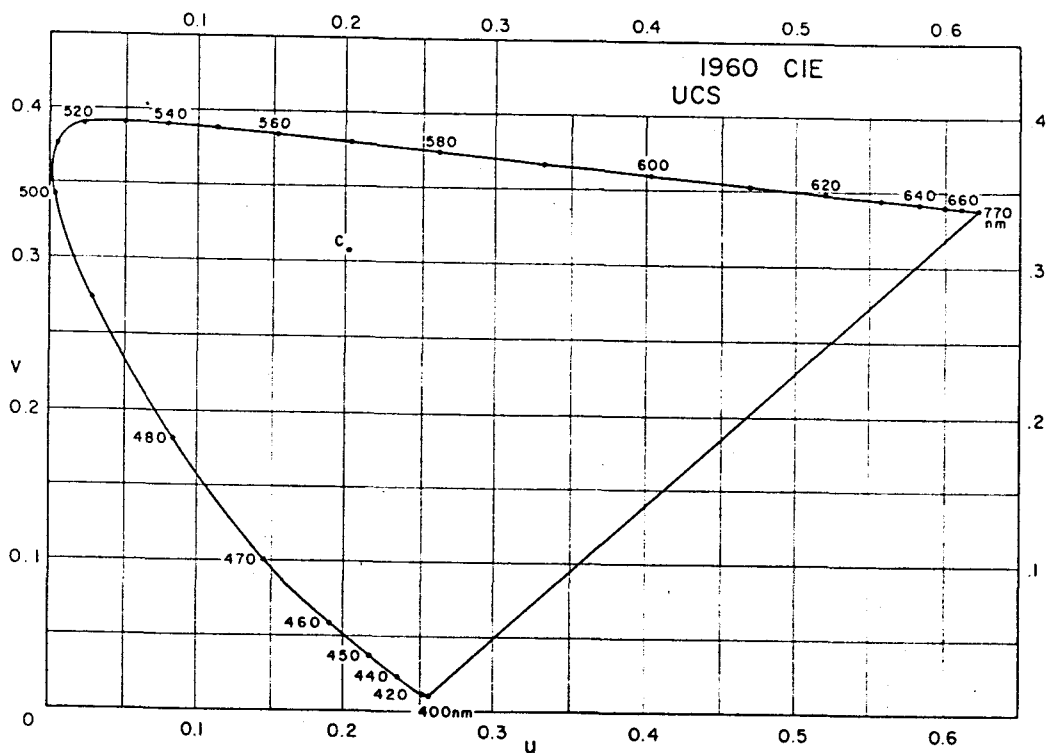


Figura II.10 Diagrama de representación CIE-UCS (1960)

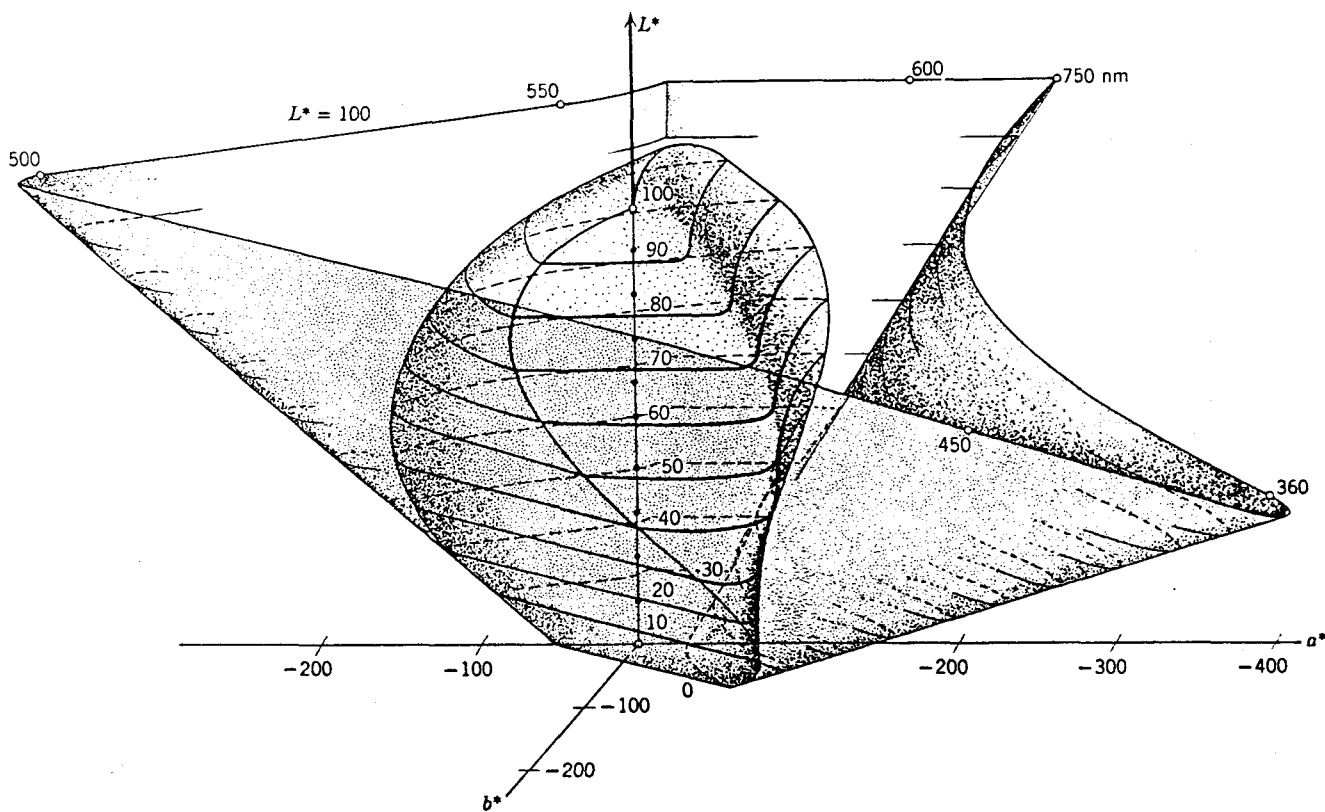


Figura II.11 Diagrama de representación de objetos de color CIELAB (1976) ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$ ).



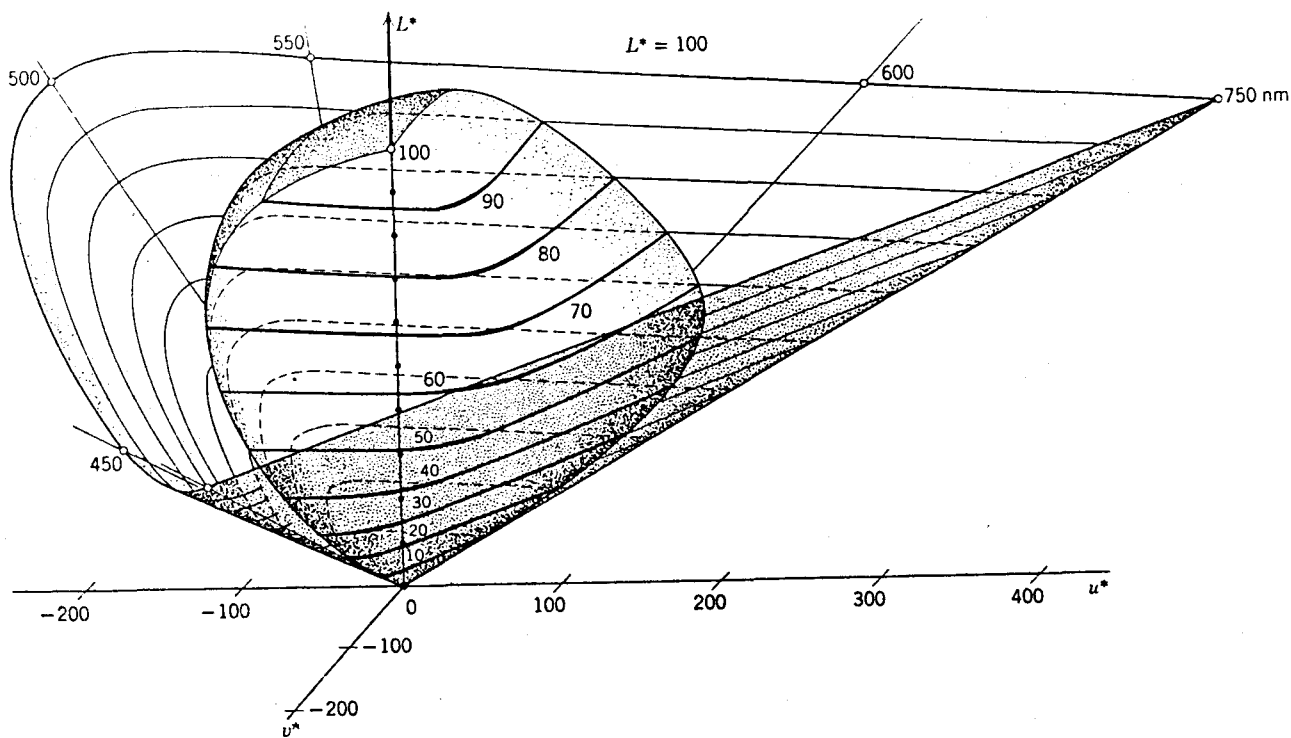


Figura II.12 Diagrama de representación de objetos de color CIELUV (1976) ( $u^*$ ,  $v^*$ ,  $L^*$ ).

## II.2. COMPARACIONES SIMULTANEAS Y SUCESIVAS DE COLOR.

Existen dos formas diferentes de presentar estímulos de color a un determinado observador en el tiempo independientemente del tipo de igualación o discriminación que éste realice. Una forma, y la más comunmente llevada a cabo, es la llamada simultánea en la que se le presentan al observador dos estímulos a comparar; siendo a su vez la más usual la presentación a través de un campo visual bipartido. Si bien el esfuerzo que debe de realizar el observador a la hora de comparar los estímulos es el inherente al proceso de discriminación o igualación en sí, presenta este tipo de comparación la característica de una asimetría retiniana de iluminación cuando se lleva a cabo mediante visión monocular. Otras veces la comparación se hace mediante visión binocular en la que cada ojo observa solamente un estímulo, denominada también visión haploscópica. En este caso aparece una asimetría inherente dada la iluminación de las distintas retinas de ambos ojos, junto con la diferencia de visión correspondiente a cada uno de ellos.

La otra forma, menos usual aunque de no menos importancia, es la comparación sucesiva de estímulos. En este caso se presentan al observador los estímulos alternativamente de manera que, independientemente también de la tarea a desarrollar, hay involucrados procesos de memoria, o recuerdo de las características que definen al estímulo de color, y que el observador es capaz de almacenar.

Los trabajos que se han desarrollado mediante procesos que conllevan memoria de color los podemos clasificar en dos grandes grupos: los relativos a memoria de color asociada a objetos familiares y los que simplemente tratan del proceso de memoria de estímulos de color previamente presentados. Los dos campos de estudio se conocen en la literatura científica a través de los términos ingleses "memory color" y "color memory" respectivamente.

No han sido muchos los trabajos realizados sobre memoria al color de objetos familiares, aunque sí presentan gran importancia dado el carácter técnico o práctico que se les puede dar; por ejemplo, un observador analizando una fotografía raramente la

compara con el paisaje o escena natural. Así pues los problemas técnicos en la reproducción fotográfica van encaminados no a la obtención de las coordenadas de cromaticidad de los objetos, sino de las correspondientes a las asociadas a los colores que el observador recuerda, Bartleson (1961).

En cambio, sí se han llevado a cabo más trabajos sobre memoria al color relativa a la presentación de estímulos en forma sucesiva, aunque no pueden compararse con los realizados en forma simultánea, Romero (1984) y Romero y otros (1986).

Los resultados experimentales sobre igualaciones sucesivas han mostrado un cambio en la saturación y claridad de los colores recordados frente las correspondientes a los estímulos, manteniéndose el mismo tono; tal y como observaron Newhal y otros (1957). Por contraste, se han detectado cambios incluso en el tono, desplazamientos de tonalidad estadísticamente significativos, en experiencias de memoria de color de objetos familiares, Bartleson (1960).

Para finalizar, y sin entrar en más detalles sobre ambos tipos de comparaciones pues en el siguiente apartado y en el planteamiento del trabajo se tratan exhaustivamente, pasemos a analizar los trabajos que sobre adaptación cromática se han realizado y que han sentado las bases del estudio de los mecanismos visuales del color.

### III. ADAPTACION CROMATICA

#### III.1. CONSIDERACIONES GENERALES

En términos generales se entiende por adaptación el conjunto de procesos o ajustes que un determinado organismo realiza para desenvolverse en un determinado medio. Tales procesos de adaptación conllevan ciertos cambios fisiológicos que tratan de "normalizar" su desenvolvimiento en el medio, motivados por condicionamientos tanto externos como internos al propio organismo.

En un sentido más restrictivo, el término adaptación lo utilizaremos para describir todos los procesos sensoriales involucrados dentro de los sistemas receptores cuando las condiciones externas de estimulación se modifican. Restringiendo más aun el tér-

mino, centrándonos en la adaptación cromática, diremos que tal concepto representa el conjunto de actividades y modificaciones de la sensibilidad de respuesta del mecanismo visual como consecuencia de la estimulación, o cambio de ésta, ante la percepción del color.

Aubert en 1865 fue uno de los primeros en estudiar tales cambios en las sensibilidades del mecanismo visual cuando se modificaba la intensidad de luz de determinados estímulos, utilizando el término adaptación como el proceso de ajuste que se llevaba a cabo dentro del mecanismo visual.

Los estudios que sobre adaptación cromática se han desarrollado han sido dirigidos hacia el estudio de dos aspectos claramente diferenciados, Bartleson (1977), : los encaminados a analizar las propiedades fisiológicas del mecanismo visual y los que han tratado de describir las relaciones sicofísicas, o sicosensoriales, entre los atributos de apariencia de color frente a la exposición de diferentes iluminaciones.

El primer campo entra dentro de propósitos claramente teóricos, pues se pretende formular modelos de visión del color que mejoren nuestro conocimiento acerca del mecanismo visual.

El segundo ha sido desarrollado en el sentido fundamentalmente práctico, dirigido al establecimiento de gran número de datos experimentales con el fin de resolver los problemas que se plantean en el comercio y en la industria.

Digamos entonces que la adaptación cromática cae, obviamente, según expresa Wright (1981), dentro del contexto de la adaptación luminosa en general, puesto que cuando algún proceso de adaptación cromática se lleva a cabo, algún grado de adaptación luminosa tiene lugar. Podemos asegurar que el fenómeno de la adaptación cromática tiene lugar dentro de dos procesos de activación, uno fotoquímico y otro neuronal, Bartleson (1981). Existen por otro lado diferentes procesos fisiológicos que contribuyen al control de la sensibilidad de luz del ojo y al de la adaptación cromática, como son el control reflejo de la apertura del iris, el cambio de la ac-

tivación de conos a bastones conforme el nivel de iluminación disminuye, la descomposición y regeneración de los fotorpigmentos de los receptores, etc. Finalmente, existen evidencias en los procesos de adaptación, además de la propia actividad neuronal, de ciertas actividades adaptacionales establecidas a través de las conexiones nerviosas en la corteza cerebral, tal y como sugiere McCollough (1965).

### III.2. TEORIA SOBRE LA ADAPTACION CROMATICA

Ordinariamente las igualaciones de color forman la base de la Colorimetría y suelen ser establecidas como igualaciones simétricas. En tales condiciones, dos estímulos se presentan al ojo iluminando la misma (o próxima) zona de la retina y al mismo (o próximo) tiempo; de manera que todos los factores espaciales, temporales, físicos y sicofísicos involucrados en la igualación permanecen constantes. Una igualación simétrica de este tipo viene caracterizada por las siguientes ecuaciones de igualdad:

$$X = k \int \rho_{1\lambda} I_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda = k \int \rho_{2\lambda} I_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda$$

$$Y = k \int \rho_{1\lambda} I_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda = k \int \rho_{2\lambda} I_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda$$

$$Z = k \int \rho_{1\lambda} I_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda = k \int \rho_{2\lambda} I_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda$$

donde X,Y,Z representan los valores triestímulo, k es un factor de normalización,  $\rho_{\lambda}$  la reflectancia o transmitancia espectral de la muestra,  $I_{\lambda}$  la irradiancia espectral y  $\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$  los valores triestímulo fundamentales referidos a un observador patrón.

Las ecuaciones anteriores se pueden establecer mediante relaciones de identidad de la siguiente forma:

$$g_1 (X,Y,Z;A) \equiv g_1 (X,Y,Z;A)$$

$$g_2 (X,Y,Z;A) \equiv g_2 (X,Y,Z;A)$$

$$g_3 (X,Y,Z;A) \equiv g_3 (X,Y,Z;A)$$

donde A representa a las condiciones de adaptación de iluminación y que en toda igualación simétrica es la misma para ambas muestras o estímulos.

Stiles (1961) describió las diferencias teóricas entre

las igualaciones simétricas y aquellas antisimétricas en donde no es posible mantener una identidad de los términos antes señalados.

Supongamos una igualación de color realizada mediante dos estímulos observados en la misma zona foveal, y libre de la interacción de los bastones, bajo dos condiciones de adaptación A y A'. Las condiciones de igualdad vendrán dadas por las siguientes ecuaciones de transformación:

$$\begin{array}{l}
 g_1 (X,Y,Z;A) \xrightarrow{T} g_1 (X',Y',Z';A') \\
 g_2 (X,Y,Z;A) \xrightarrow{T} g_2 (X',Y',Z';A') \\
 g_3 (X,Y,Z;A) \xrightarrow{T} g_3 (X',Y',Z';A')
 \end{array}$$

donde T representa una transformación o correspondencia en términos del criterio de la igualación en apariencia de color.

Así como toda igualación simétrica obedece la propiedad transitiva en base a las propias leyes de Grassmann, una igualación asimétrica, dependiendo de cuáles sean los factores que la determinan, cumplirá o no la propiedad de la transitividad. Es decir, si un estímulo 1 bajo unas condiciones de adaptación A es igualado a otro 2 bajo otras condiciones de adaptación A', y si además éste último estímulo es igualado por otro 3 bajo otras condiciones de adaptación A'', entonces por las ecuaciones del álgebra de color, y si se cumple la transitividad, el estímulo 1 bajo la adaptación A será igualado por el 3 bajo la adaptación A''; lo cual no siempre tiene porqué ocurrir.

Cuando una igualación asimétrica se realiza iluminando la misma zona de la retina y presentando alternativamente los estímulos, bajo distintas condiciones de adaptación, tal y como ocurre en las igualaciones que conllevan memoria, las condiciones de transitividad son entonces las mismas que en una igualación simétrica, Bartleson (1977). Si por el contrario la asimetría en la igualación viene dada según diferentes partes de iluminación retiniana o diferentes condiciones de iluminación, las condiciones de adaptación conllevan



distintos parámetros y no existe una base a priori para que la transitividad se cumpla.

También se deducen otras dos leyes para las igualaciones de color cuando éstas son simétricas, que en el caso de igualaciones asimétricas habrán de evaluarse empíricamente. Estas son la aditividad y la proporcionalidad.

Toda igualación simétrica cumple la ley de la aditividad, es decir, si un estímulo  $e_1$  iguala a otro  $e_2$  y si un estímulo  $e_3$  es igualado por otro  $e_4$ , entonces la "suma" de los estímulos  $e_1$  y  $e_3$  igualará a la de los estímulos  $e_2$  y  $e_4$ .

$$\begin{array}{l} e_1 = e_2 \\ e_3 = e_4 \end{array} \longrightarrow e_1 + e_3 = e_2 + e_4$$

Un corolario que se deduce de la aditividad es la proporcionalidad en una igualación. Es decir, si  $e_1$  es igualado a  $e_2$ , la igualdad seguirá manteniéndose sin más que multiplicar por un mismo factor positivo  $k$  ambos estímulos (efecto de sumación de  $k$  veces los estímulos).

$$e_1 = e_2 \longrightarrow k e_1 = k e_2$$

Si una igualación asimétrica verifica ambas leyes de aditividad y proporcionalidad, necesariamente existirá una matriz de transformación lineal que relacione los valores triestímulos bajo las adaptaciones  $A$  y  $A'$ ; es decir

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M_{AA'} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

### III.3. ECUACIONES DE TRANSFORMACION BAJO ADAPTACION CROMATICA

En este apartado haremos un especial hincapié en la ecuación de transformación de von Kries, dado el interés histórico que presenta, para proseguir con una clasificación y desarrollo de otras ecuaciones de transformación formuladas por diferentes autores en base a consideraciones teóricas o puramente experimentales.

#### III.3.1. LEY DE LOS COEFICIENTES DE VON KRIES

En 1877 von Kries propuso por primera vez un modelo acerca del funcionamiento del mecanismo visual cuando éste se encuentra bajo dos distintos estados de adaptación, basándose en la acción independiente de tres mecanismos fotorreceptores cuya sensibilidad varía inversamente con la intensidad con que son estimulados. El modelo de adaptación de von Kries puede ser interpretado en base a la teoría fotoquímica de la visión, según la cual los cambios producidos en las sensibilidades de los fotorreceptores son el resultado de los cambios de concentración de los fotopigmentos contenidos en éstos. La teoría fotoquímica de la visión establece entonces que la respuesta visual viene determinada por la cantidad de fotones que son absorbidos por tales pigmentos fotosensibles, de manera que la sensibilidad del mecanismo visual dependerá de la cantidad de fotopigmentos sin estimular.

La ley de von Kries, también denominada ley de los coeficientes, la podemos formular como

$$S_{1\lambda}' = k_1 S_{1\lambda}$$

$$S_{2\lambda}' = k_2 S_{2\lambda}$$

$$S_{3\lambda}' = k_3 S_{3\lambda}$$

donde  $S_{i\lambda}$  son las sensibilidades respectivas de los tres mecanismos de conos bajo un estado de adaptación y  $S_{i\lambda}'$  las sensibilidades modificadas cuando la adaptación varía; los coeficientes  $k_i$  representan las intensidades relativas inversas de activación de  $S_{i\lambda}$  según la distribución espectral de la iluminancia.

Según lo establecido, se deduce inmediatamente que la ley de von Kries implica el cumplimiento, dadas las leyes de la Colorimetría, de la transitividad y la persistencia, Bartleson (1981).

- i) Estímulos metámeros deben tener siempre el mismo efecto adaptante.
- ii) Estímulos metámeros deben ser intercambiables bajo variaciones de adaptación.
- iii) Las igualaciones de color deben de persistir sobre cambios en la adaptación.

Básicamente la ley de los coeficientes de von Kries postula la existencia de tres sensibilidades diferentes e independientes dentro del mecanismo visual y, como consecuencia, el cumplimiento de la ley de la proporcionalidad y aditividad junto con la ley de la persistencia para estímulos metámeros.

Se han realizado multitud de trabajos con el fin de probar la validez de la ley de los coeficientes de von Kries. Dentro del campo sicofísico se han desarrollado mediante dos técnicas experimentales diferentes, Jameson y Hurvich (1972),: las medidas de umbrales por un lado y los datos obtenidos en igualaciones por otro. En las medidas de umbrales se pretenden suprimir uno o dos de los mecanismos básicos visuales mediante la adaptación a luces de determinada composición espectral; de forma que si tales mecanismos no actuasen independientemente modificarían claramente su distribución espectral revelada a través de los umbrales así obtenidos.

Wald (1964) trabajó con la técnica denominada de incremento de umbral. Utilizando luces adaptantes de composición espectral conocida como campo circundante y superponiendo estímulos tests sobre dichos campos, medía los umbrales característicos en función de la saturación de los fotopigmentos, cuyas sensibilidades máximas se sitúan entre 440-450 nm, 530-540 nm y 550-570 nm. Bajo tales condiciones, y a tan altas intensidades de iluminancia, Wald pudo comprobar mediante la técnica de incremento de umbral que la ley de la persistencia para igualaciones metámeras no se cumplía; debiéndose entonces atribuir un cambio en la distribución efectiva espectral

de los mecanismos responsables en la visión del color; es decir, si la sensibilidad espectral de uno de los tres mecanismos se altera por la interacción de alguno de los otros dos, el resultado de la activación total será diferente según los diferentes niveles de adaptación (activación) que se impongan, haciéndose más complejo el estudio de tales procesos que el de la simple interpretación de las variaciones lineales en las sensibilidades de los tres mecanismos, independientes por demás, formulada por von Kries.

También Stiles (1949 y 1959) demostró, mediante la técnica de incremento de umbral, la no independencia de los mecanismos visuales postulados por von Kries; describiendo al menos cinco, e incluso siete, mecanismos visuales (los denominados mecanismos  $\pi$  de Stiles): tres para el azul, uno o dos para el verde y uno o dos para el rojo. Walraven (1981), entre otros, sugiere también la acción de mecanismos en los fotorreceptores distintos a los postulados por von Kries, con las mismas características de activación espectral que los postulados por Stiles.

Si la formulación de von Kries es correcta cabría entonces esperar que la ley de la proporcionalidad se cumpla bajo aquellas condiciones en las que persisten las igualaciones metámeras. Para muy bajas o muy altas luminancias la ley de la persistencia no se cumple, pues en tales condiciones o los bastones entran en juego o los conos son inhibidos, modificando su función de distribución espectral. A niveles moderados de iluminancia, dentro del fotópico, la persistencia de las igualaciones se cumple, con lo que, según la ley de los coeficientes de von Kries, deberá de verificarse también la ley de la proporcionalidad.

Supongamos que bajo unas determinadas condiciones de adaptación, nivel fotópico y luz acromática, dos estímulos son iguales ( $e_{1A} = e_{2A}$ ). Supongamos también que la misma igualdad metámera se mantiene bajo otras condiciones de adaptación, nivel fotópico y luz roja por ejemplo ( $e_{1A'} = e_{2A'}$ ). Si bien los dos campos de igualación se percibirán como idénticos, se observarán muy diferentes en cuanto a su cromaticidad respecto de la primera adaptación. Para deter-

minar la apariencia de color con la nueva adaptación se suele hacer de dos formas: una adaptar el mismo ojo, y en diferentes partes de la retina, a un campo yuxtapuesto de luz acromática y roja hasta conseguir la igualación de los estímulos a comparar y otra, quizá más usual, presentando un estímulo a cada ojo previamente adaptados a la luz acromática uno y a la luz roja el otro; esta última técnica de igualación suele denominarse igualación haploscópica.

Pues bien, si como hemos dicho la ley de la persistencia se cumple, una forma de comprobar la validez de la ley de la proporcionalidad, mediante la técnica de visión haploscópica, es determinar los desplazamientos en apariencia de color de un determinado estímulo test bajo dos niveles distintos de iluminancia, tal y como trabajaron Hurvich y Jameson (1958). Si la ley de la proporcionalidad es válida, y por tanto confirmada la validez de la ley de los coeficientes de von Kries, los desplazamientos en cromaticidad para ambos niveles de luminancia deberían de ser idénticos bajo distintas adaptaciones de un mismo estímulo de color. La Figura III.1 muestra que éste no es el caso para el estímulo de coordenadas de cromaticidad  $x=0.23$  e  $y=0.20$ , con niveles de luminancia de 10mL y 1mL y tres pares de adaptación distintas; siendo por tanto inadecuada la formulación lineal de los coeficientes de von Kries.

Si bien no hay buena base experimental que demuestre la estricta validez de la ley de von Kries, su uso, dado el carácter simple del modelo postulado, es generalizado aun con ciertas modificaciones bajo otras transformaciones también lineales. En el siguiente apartado analizaremos las distintas ecuaciones de transformación que han ido postulándose basadas en las experiencias que sobre adaptación cromática se han llevado a cabo.

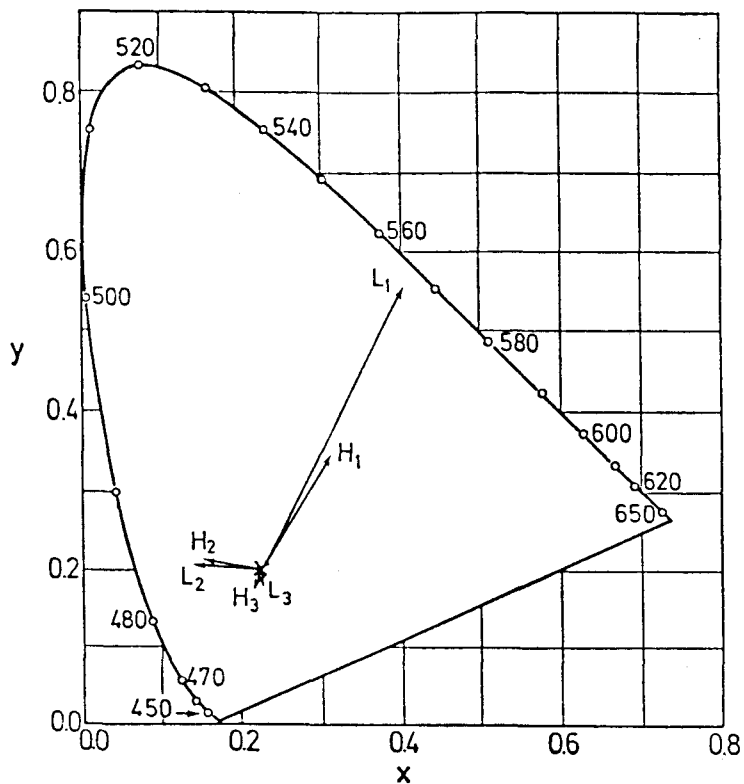


Figura III.1 Desplazamientos en cromaticidad para el estímulo de coordenadas  $x=0.23, y=0.20$  bajo dos niveles de luminancia (10mL y 1mL) y tres pares de condiciones de visión haploscópica: 1) un ojo adaptado al estímulo de 450nm y el otro a un campo neutro, 2) igual que el anterior pero para el estímulo de 650nm y 3) idem pero para el estímulo de 580nm. Los niveles de luminancia están referidos a L(1mL) y H (10mL) .Resultados obtenidos por Hurvich y Jameson (1958).

### III.3.2. CLASIFICACION DE LAS ECUACIONES DE TRANSFORMACION BAJO ADAPTACION CROMATICA

Las distintas ecuaciones de transformación de valores triestímulo postuladas según diferentes estados de adaptación se pueden englobar en cinco grandes grupos: lineales bajo consideraciones teóricas, lineales bajo consideraciones empíricas, no lineales bajo consideraciones teóricas, no lineales bajo consideraciones empíricas y las basadas teóricamente en modelos multiestado, Bartleson (1977). Todas las ecuaciones de transformación utilizan unos primarios fundamentales, que representan las sensibilidades de los tres (o más) mecanismos visuales, de manera que la relación entre los valores triestímulo (R,G,B) y los correspondientes al observador patrón CIE 1931 (X,Y,Z) viene dada mediante una transformación lineal de la forma

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Según la transformación que se obtenga tendremos un conjunto diferente de primarios fundamentales. Han sido varios los primarios fundamentales propuestos, destacándose los siguientes:

A) Los de Judd (1945).

Obtenidos a partir del estudio de los puntos de confusión para protanopes y deuteranopes, con la siguiente ecuación de transformación

$$\begin{aligned} R &= Y \\ G &= -0.46 X + 1.36 Y + 0.10 Z \\ B &= Z \end{aligned}$$

B) Los de König (en Wyszecki y Stiles (1967), p.414).

Con ecuación de transformación de los valores triestímulo del observador patrón CIE 1931 a los correspondientes al conjunto de fundamentales dada por

$$\begin{aligned}
 R &= 0.0713 X + 0.9625 Y - 0.0147 Z \\
 G &= -0.3952 X + 1.1668 Y + 0.0815 Z \\
 B &= 0.5610 Z
 \end{aligned}$$

C) Los de Fick ( en Wyszecki y Stiles (1967), p.414).

Los fundamentales de Fick son iguales a los de König salvo para el valor triestímulo R.

$$\begin{aligned}
 R &= 0.5960 X + 0.5151 Y - 0.1229 Z \\
 G &= -0.3952 X + 1.1668 Y + 0.0815 Z \\
 B &= 0.5610 Z
 \end{aligned}$$

D) Los de Pitt (1935).

Siendo la ecuación de transformación

$$\begin{aligned}
 R &= 0.0711 X + 0.9494 Y - 0.0156 Z \\
 G &= -0.4462 X + 1.3173 Y + 0.0979 Z \\
 B &= 0.9188 Z
 \end{aligned}$$

E) Los de Vos y Walraven (1971).

Aquí los valores triestímulos X,Y,Z vienen referidos a las funciones modificadas por Judd

$$\begin{aligned}
 R &= 0.15516 X + 0.54307 Y - 0.03596 Z \\
 G &= -0.15516 X + 0.45693 Y + 0.03060 Z \\
 B &= 0.00536 Z
 \end{aligned}$$

F) Los de Smith y Pokorny (1972).

Donde aquí también los valores triestímulos vienen referidos a las funciones modificadas por Judd

$$\begin{aligned}
 R &= 0.15514 X + 0.54312 Y - 0.03286 Z \\
 G &= -0.15514 X + 0.45684 Y + 0.03286 Z \\
 B &= 0.00801 Z
 \end{aligned}$$

En la Figura III.2 ponemos a modo de ejemplo las sensibilidades espectrales de los fundamentales de König y Fick.



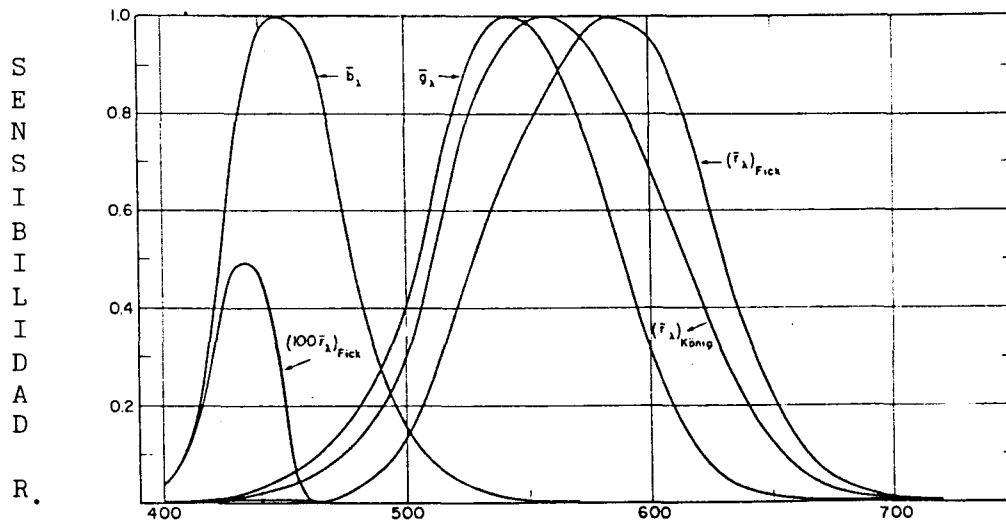


Figura III.2 Curvas de sensibilidad espectral correspondientes a los fundamentales de König y Fick.

Pasemos ahora a describir las distintas ecuaciones de transformación que sobre adaptación cromática se han venido formulando.

### III.3.2.1. LINEALES BAJO CONSIDERACIONES TEORICAS

Dentro de este grupo se encuentra la propia ecuación de transformación de von Kries (1905), la de Helson, Judd y Warren (1952) y la de Wassef (1959).

Helson y otros trabajaron con 60 muestras Munsell y campos circundantes blanco (reflectancia 78%), gris (21%) y negro (3%). Seis observadores realizaron las experiencias de igualación en apariencia de las muestras Munsell bajo las adaptaciones a los iluminantes C y A, utilizando un método de igualación por memoria tras previo entrenamiento de unas 8h para la denominación de los tres atributos tono, claridad y saturación. Los primarios fundamentales utilizados fueron los de Judd, prescribiendo las transformaciones de los valores triestímulo bajo adaptación al iluminante A (R',G', B') respecto a la adaptación al iluminante C (R,G,B) como

$$\begin{aligned} R' &= 1.000 R \\ G' &= 1.154 G \\ B' &= 3.327 B \end{aligned}$$

Wassef trabajó también bajo los estados de adaptación a los iluminantes A y C haciendo igualaciones haploscópicas. Obtuvo de esta manera una transformación tipo von Kries de los valores triestímulo que, referidos al sistema CIE 1931, toma la forma

$$\begin{aligned} X' &= 0.926 X + 0.441 Y + 0.141 Z \\ Y' &= -0.619 X + 2.341 Y - 0.303 Z \\ Z' &= -0.553 X + 0.923 Y + 3.269 Z \end{aligned}$$

Estos tipos de transformaciones obedecen a la expresión general

$$\begin{aligned} R' &= a_r R \\ G' &= a_g G \\ B' &= a_b B \end{aligned}$$

cuando se cambia de un estado de adaptación caracterizado por valores triestímulo en la igualación  $(R,G,B)$  a otro  $(R',G',B')$ . Los coeficientes  $a_r$ ,  $a_g$  y  $a_b$  son inversamente proporcionales a la intensidad de activación de las tres sensibilidades fundamentales que intervienen en el mecanismo visual.

### III.3.2.2. LINEALES BAJO CONSIDERACIONES EMPIRICAS

La ecuación general de transformación bajo dos estados distintos de adaptación en este tipo de trabajos, basados en resultados experimentales, Burham, Evans y Newhall (1957) y Sobagaki, Yamana, Takahama y Nayatani (1974), viene dada por

$$R' = k_{10} + k_{11} R + k_{12} G + k_{13} B$$

$$G' = k_{20} + k_{21} R + k_{22} G + k_{23} B$$

$$B' = k_{30} + k_{31} R + k_{32} G + k_{33} B$$

Burham y otros trabajaron bajo adaptaciones a los iluminantes A y C mediante el método de visión haploscópica. La transformación propuesta entre los valores triestímulo bajo la adaptación al iluminante A ( $X', Y', Z'$ ) y los correspondientes al iluminante C ( $X, Y, Z$ ) viene dada como

$$X' = 1.0972 X - 0.4054 Y + 0.3725 Z - 0.0005$$

$$Y' = -0.0296 X + 0.9994 Y + 0.2144 Z - 0.0016$$

$$Z' = -0.0776 X + 0.3666 Y + 2.1114 Z + 0.0036$$

Sobagaki y otros trabajaron con varios observadores y 95 muestras de color Munsell que, bajo las adaptaciones a una lámpara fluorescente de temperatura de color 6500K (equivalente al iluminante  $D_{65}$ ) y al iluminante A, especificaban el tono, claridad y saturación según el método de estimación subjetiva. Obtuvieron matrices de transformación, una para cada observador, a partir de los coeficientes de correlación múltiple obtenidos de los valores triestímulo de aquellas muestras que bajo adaptación al iluminante A igualaban en apariencia a las observadas bajo adaptación al iluminante  $D_{65}$ . La ecuación de transformación promediada a los observadores bajo ambas adaptaciones viene dada por

$$X_D = 0.8354 X_A - 0.1389 Y_A + 0.5292 Z_A$$

$$Y_D = 0.0401 X_A + 0.9028 Y_A + 0.1752 Z_A$$

$$Z_D = -0.1467 X_A + 0.2132 Y_A + 2.4976 Z_A$$

### III.3.2.3 NO LINEALES BAJO CONSIDERACIONES TEORICAS

En este subapartado consideraremos los trabajos inicialmente realizados por Hunt (1950,1953), los de Takahama, Sobagaki y Nayatani (1977,1984) y los de Nayatani, Takahama y Sobagaki (1981, 1986).

Hunt propuso una ecuación de transformación puramente teórica, que más tarde fue desarrollada cuantitativamente por Takahama y otros, basada en la hipótesis de una interacción variable entre las señales neuronales cromáticas en función del nivel de estimulación; comprobando de esta forma una dependencia significativa entre las igualaciones haploscópicas asimétricas y los iluminantes con los que se trabaja. Esto le llevó a suponer que tales resultados no podrían ser esperados en base a una formulación lineal cuando se cambia de estado de adaptación, estableciendo entonces que, si bien los conos puede que contengan sólo un fotopigmento, deben darse interacciones entre estos receptores y sus más próximos de alrededor; de manera que tales interacciones serán más activas cuando los niveles de estimulación sean bajos, anulándose casi a muy altos niveles.

Takahama y otros desarrollaron un modelo no lineal basado en los resultados experimentales de otros autores sobre la constancia de los atributos subjetivos de claridad, tono y saturación de estímulos observados bajo distintos estados de adaptación. Es de destacar que no derivaron su modelo de los resultados aportados por distintos miembros del Subcomité que sobre Adaptación Cromática se organizó en la 17ª Sesión de la CIE, celebrada en Barcelona en el 1971, para dilucidar cuáles de las distintas formulaciones (las que están en parte o por completo de acuerdo con la formulada por von Kries y las que discrepan por completo de ella) representan mejor los resultados experimentales que sobre adaptación cromática se han obtenido. La razón primordial de la exclusión de tales trabajos fue la gran variedad de resultados, significativamente distintos unos de otros, según diferentes autores cuando se ha estudiado la influencia de la adaptación bajo el iluminante  $D_{65}$  y el iluminante A,

como pudo constatar Bartleson (1978). El modelo de Takahama, Sobagaki y Nayatani es no lineal basado en dos estados, en el que en una primera etapa tiene lugar una transformación modificada tipo von Kries y en otra segunda una transformación exponencial; tal y como aparece en la Figura III.3.

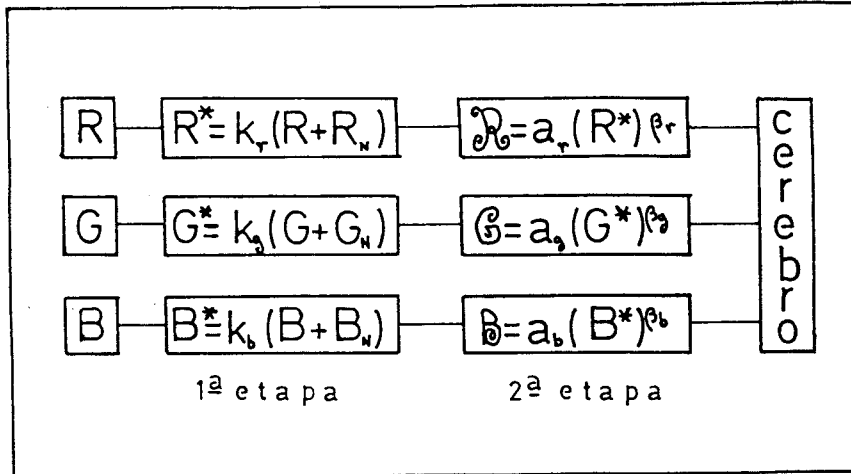


Figura III.3 Modelo de transformación bajo adaptación cromática de Takahama y otros.

Donde  $R_n$ ,  $G_n$  y  $B_n$  son las componentes de "ruido" de los receptores;  $k_r$ ,  $k_g$  y  $k_b$  son coeficientes tipo von Kries;  $a_r$ ,  $a_g$  y  $a_b$  son parámetros elegidos de manera que satisfagan el corolario de constancia de color para muestras grises cuando su reflectancia es igual a la del campo circundante;  $R^* = (R + R_n) / (R_0 + R_n)$ ,  $G^* = (G + G_n) / (G_0 + G_n)$  y  $B^* = (B + B_n) / (B_0 + B_n)$  siendo  $R, G, B$  y  $R_0, G_0, B_0$  los valores triestímulo de la muestra y el campo adaptante respectivamente; y finalmente,  $\beta_r$ ,  $\beta_g$  y  $\beta_b$  son funciones de los niveles del campo adaptante a través de sus valores triestímulos respectivos.

### III.3.2.4. NO LINEALES BAJO CONSIDERACIONES EMPIRICAS

Uno de los primeros trabajos que postulaba una transformación no lineal basada en datos experimentales fue la propuesta por MacAdam (1961), al rechazar el establecimiento de cinco o seis primarios fundamentales o postular una teoría poco ortodoxa de la visión del color que negaría la existencia de estímulos metámeros incluso en igualaciones simétricas, Bartleson (1977). MacAdam utilizó dos observadores bajo adaptaciones a los iluminantes A y C, empleando la técnica experimental de iluminación retiniana de dos mitades distintas del mismo ojo. Postuló bajo estas condiciones de adaptación la siguiente ecuación de transformación

$$\begin{aligned} R' &= ( a_1 + b_1 R^{p1} - a_4 )^{1/p4} b_4^{-1} \\ G' &= ( a_2 + b_2 G^{p2} - a_5 )^{1/p5} b_5^{-1} \\ B' &= ( a_3 + b_3 B^{p3} - a_6 )^{1/p6} b_6^{-1} \end{aligned}$$

donde los exponentes  $p$  dependen de las cromaticidades de las adaptaciones y los coeficientes  $a$  y  $b$  son funciones de los exponentes asociados.

Otra transformación no lineal, alternativa a la de von Kries, fue la propuesta por Steffen (1955). Podemos decir que tal transformación es lineal pero en base a las funciones logarítmicas de los valores triestímulo ; es decir,

$$\log R' = a_r \log R$$

$$\log G' = a_g \log G$$

$$\log B' = a_b \log B$$

Bartleson (1979a y 1979b) propuso otra ecuación de transformación entre valores triestímulos al cambiar de adaptación, basada también en resultados experimentales, utilizando los primarios fundamentales de König. Su transformación es parecida a la de von Kries salvo para el mecanismo azul, donde aparece una transformación no lineal, pues como él mismo dice, y Wright apunta, parece ser que el mecanismo de visión referente al azul es muy diferente al del rojo y al verde. La transformación propuesta es la siguiente

$$R' = a_r R$$

$$G' = a_g G$$

$$B' = k (a_b B)^p$$

los coeficientes  $a_r, a_g, a_b$  se calculan a partir de los valores tris-tímulo referidos a los iluminantes  $n$  de la siguiente forma

$$a_r = R_n/R_{n'}, a_g = G_n/G_{n'}, \text{ y } a_b = B_n/B_{n'}$$

$p$  se calcula a través de los coeficientes  $a$  como

$$p = 0.326 (a_r)^{27.45} + 0.325 (a_g)^{-3.91} + 0.340 (a_b)^{-0.45}$$

y  $k$  viene dada como  $k = a_b B_n / (a_b B_n)^p$  donde  $B_n$  es el valor de  $B$  para el iluminante de la adaptación inicial.

En la Figura III.4 podemos ver las predicciones correspondientes, según las distintas ecuaciones de transformación, para contornos de "value" (5) y "chroma" (2,6,10) de muestras Munsell cuando son observadas bajo adaptación al iluminante A en el diagrama CIE 1976.



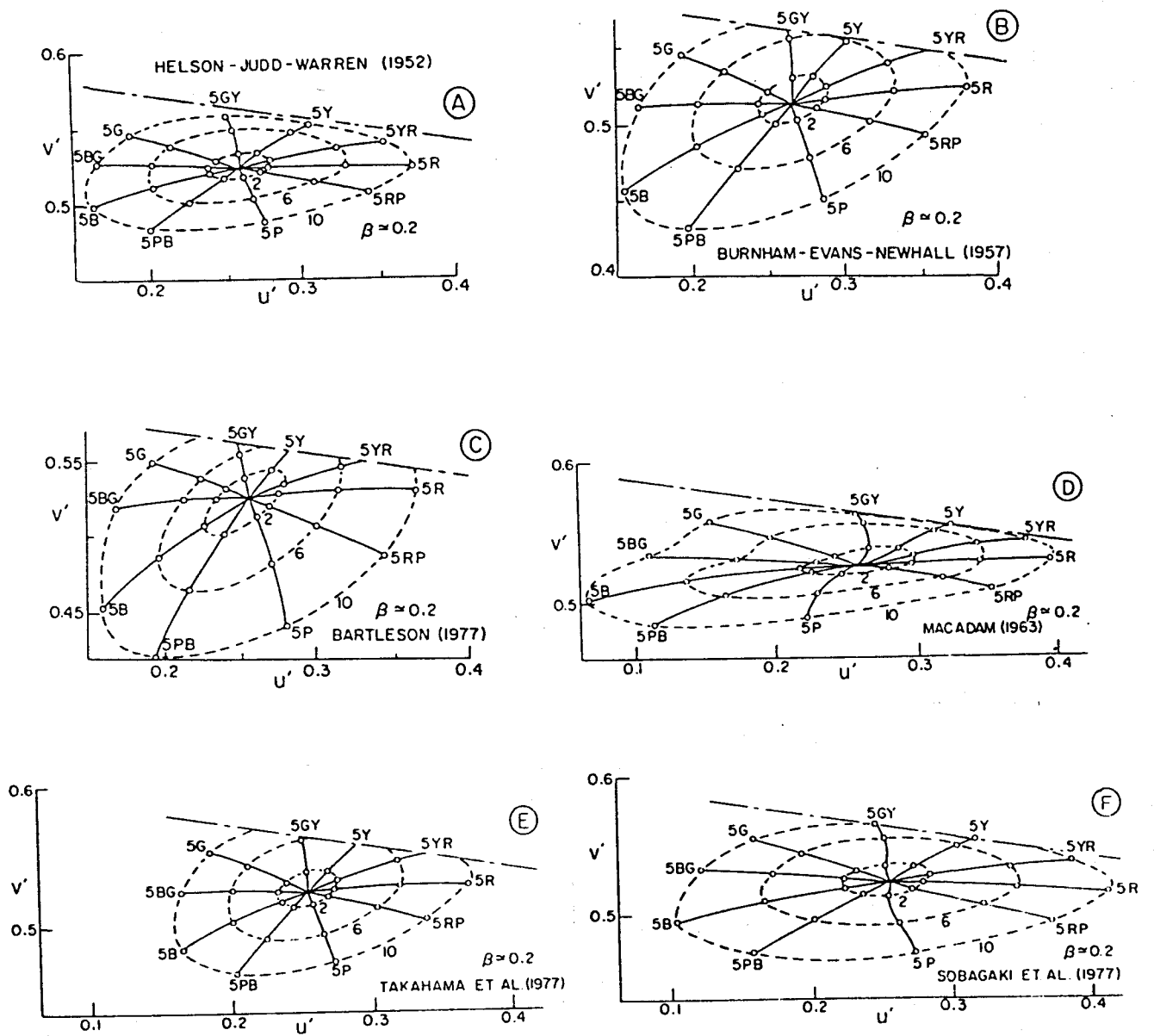


Figura III.4 Predicciones de contornos de cromaticidad y saturación para muestras Munsell bajo adaptación al iluminante A de acuerdo a las distintas ecuaciones de transformación.

### III.3.2.5. ECUACIONES DE TRANSFORMACION BASADAS EN MODELOS MULTIESTADO

A finales de los años cincuenta Jameson y Hurvich postularon un modelo de visión del color basado en la interpretación de los colores oponentes. Tal modelo ofreció una explicación plausible de los resultados experimentales que sobre adaptación cromática habían obtenido también otros autores como Hunt, Takahama, MacAdam y Burham, y que venían a poner en tela de juicio la validez de la ley de los coeficientes de von Kries.

Jameson y Hurvich (1972) sugieren que los fenómenos relacionados con la adaptación cromática requieren de una interpretación basada en dos procesos: uno multiplicativo, al modo de la ley de los coeficientes, y otro incremental sujeto a las respuestas cromáticas oponentes. El primero de ellos es interpretado dentro del nivel de los receptores visuales (conos) y el segundo en el nivel post-receptoral, que tiene lugar presumiblemente a través de codificaciones de color como consecuencia de las respuestas neuronales.

En las Figuras III.5 y III.6 se ilustran tales procesos. En la Figura III.5.a aparecen las tres curvas de respuesta correspondientes a los tres mecanismos de visión del color, bajo adaptación acromática,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Si ahora conseguimos adaptar a un observador, dotado de visión normal al color y que venga representado por las tres curvas anteriores, a una luz de 650nm y moderado nivel de iluminación, las curvas de respuesta cambian según se puede apreciar en la Figura III.5b. Al ser la estimulación por la luz de 650nm diez veces más efectiva para la correspondiente  $\gamma$  que para la  $\beta$ , tal y como se puede observar, la acción continuada de su estimulación hará que la componente  $\gamma$  se inhiba en un factor diez frente a la  $\beta$ . Tales cambios corresponderían precisamente a lo previsto por la ley de von Kries.

En la Figura III.6 se muestran las diferencias correspondientes a los niveles post-receptores de respuestas neuronales opuestas. Las tres funciones correspondientes vendrán dadas según esta adaptación por las siguientes ecuaciones de transformación

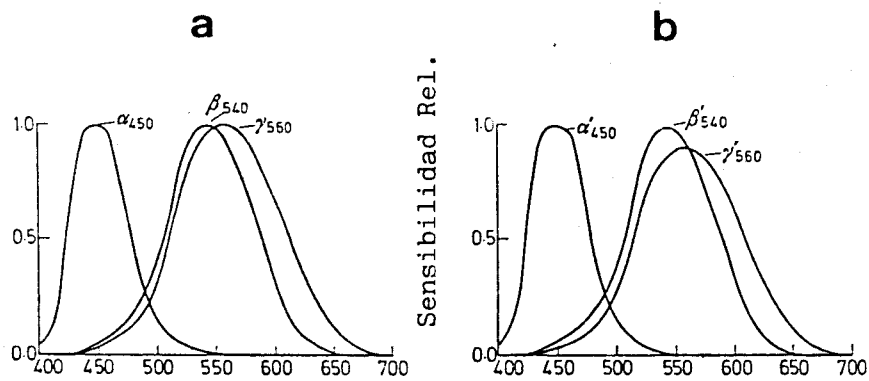


Figura III.5 Curvas de sensibilidad espectral correspondientes a la adaptación acromática (a) y la luz de 650nm (b), según Jameson y Hurvich (1972).

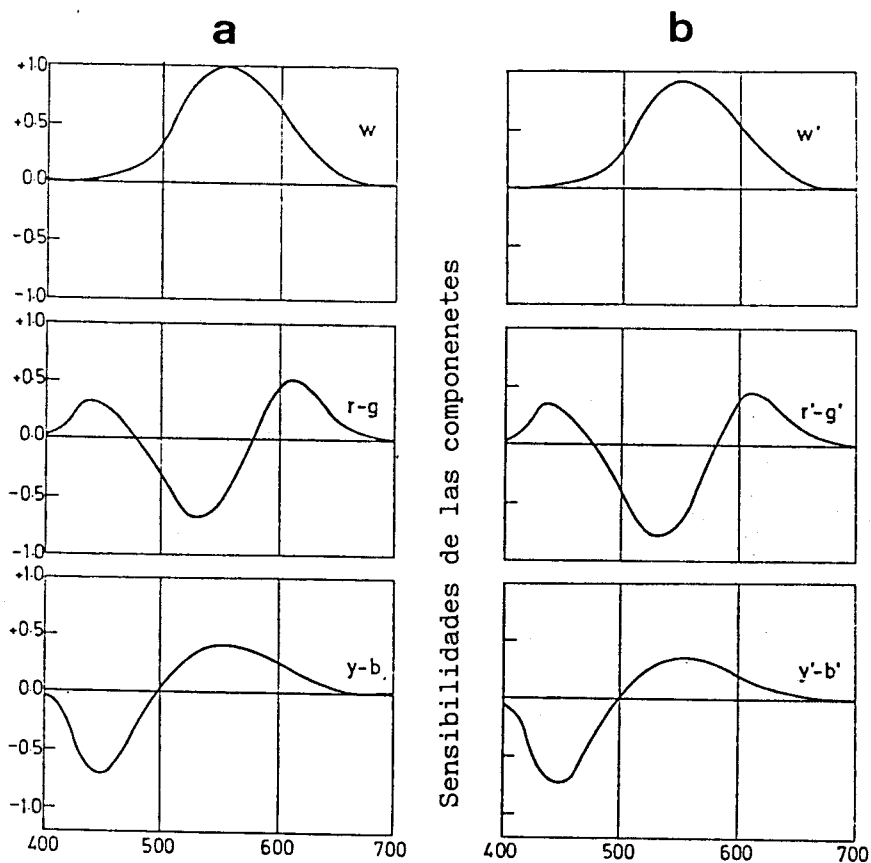


Figura III.6 Sensibilidades de las componentes de respuesta-opuesta según la adaptación acromática (a) y luz roja de 650nm (b), Jameson y Hurvich (1972).

$$w - b_k = 0.1538 \beta + 0.8524 \gamma$$

$$r - g = 0.3676 \alpha - 2.2299 \beta + 1.6643 \gamma$$

$$y - b = -0.7130 \alpha + 0.0615 \beta + 0.3410 \gamma$$

El principal efecto multiplicativo en el cambio de sensibilidad tiene lugar en la función de respuesta r-g, según se ve en la Figura III.6, donde después de la adaptación a la luz roja disminuye la componente r y aumenta la correspondiente opuesta g; dándose un desplazamiento de 6nm hacia las longitudes de onda más largas. Los cambios en las curvas y-b y w-b<sub>k</sub> son apenas detectables. Es de destacar que las respuestas ante tales incrementos no son iguales para cada una de las funciones de respuesta opuestas, tal y como pudieron comprobar Jameson y Hurvich (1961).

La expresión general correspondiente a los procesos oponentes viene dada como

$$w_\lambda - b_{k\lambda} = f_1 ( e_\lambda ( a_{11} \alpha_\lambda + a_{12} \beta_\lambda + a_{13} \gamma_\lambda ) ) i_{w-b_k}$$

$$r_\lambda - g_\lambda = f_2 ( e_\lambda ( a_{21} \alpha_\lambda + a_{22} \beta_\lambda + a_{23} \gamma_\lambda ) ) i_{r-g}$$

$$y_\lambda - b_\lambda = f_3 ( e_\lambda ( a_{31} \alpha_\lambda + a_{32} \beta_\lambda + a_{33} \gamma_\lambda ) ) i_{y-b}$$

donde un cambio en la adaptación que altere  $\alpha, \beta, \gamma$  a  $\alpha', \beta', \gamma'$  a través de un coeficiente, altera también a  $i_{w-b_k}, i_{r-g}$  e  $i_{y-b}$  a sus respectivas con notación '. El incremento inducido,  $i$ , puede ser considerado como un desplazamiento en la línea de equilibrio de cada variable hacia la misma dirección de respuesta del sistema a la luz adaptante.

Otro modelo basado también en los procesos oponentes es el inicialmente propuesto por Walraven (1962) y después ampliado por Vos y Walraven (1971). Una representación esquemática de este modelo zonal aparece en la Figura III.7.

Según el modelo, los tres receptores tipo Helmholtz (R, G, B) son convertidos a señales opuestas rojo-verde (R/G) y amarillo-azul (Y/B) tipo Hering, más la señal acromática de luminancia como consecuencia de la sumación de las luminancias sobre los tres receptores. La necesidad de asumir dos canales cromáticos separados,

rojo-verde y amarillo-azul, del canal de luminancia fué introducida antes por otros autores como consecuencia de los cambios en las curvas de luminosidad por sólo pequeños cambios de adaptación cromática; a parte de las evidencias puestas de manifiesto en el análisis electrofisiológico llevadas a cabo en células neuronales de monos.

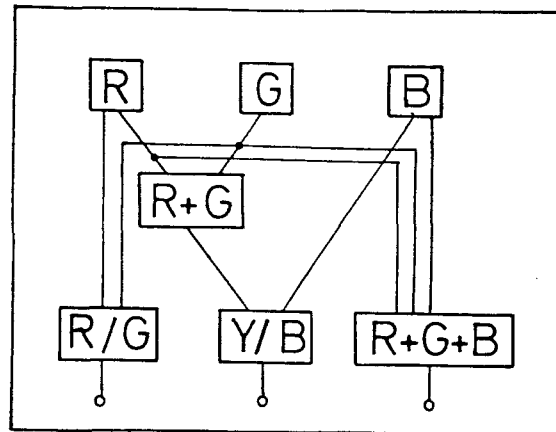


Figura III.7 Modelo zonal propuesto por Vos y Walraven.

A su vez, en la Figura III.8 mostramos las curvas obtenidas por Walraven de las sensibilidades de los tres tipos de conos, correspondientes a máximas absorciones en cortas (B), medias (G) y largas longitudes de onda (R). Es de destacar que la densidad de población, y como consecuencia la sensibilidad relativa, de los B-receptores es menor que las correspondientes a los mecanismos de cono verde y rojo. Se asume en promedio, dependiendo claro está de la zona de la retina que se trate, que la proporción de R-receptores y G-receptores está en razón doble de rojo a verde. Una proporción entre los tres R:G:B viene dada como 40:20:1, Walraven (1973).

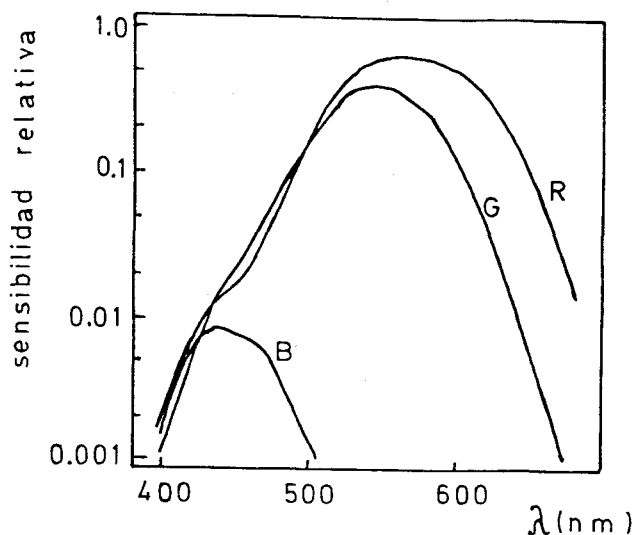


Figura III.8 Sensibilidades de los tres mecanismos de cono según los trabajos de Walraven.

Mediante este modelo se explican los dos tipos de deficiencias principales en la visión del color: las de rojo-verde como consecuencia de una inadecuada función del canal R/G y las de amarillo-azul como consecuencia de una disfunción del canal Y/B. Tales deficiencias pueden ser atribuidas a la ausencia de algún sistema receptor. Así, la protanopía es asumida en base a la pérdida de los R-receptores, la duteranopía como la pérdida de los G-receptores y la tritanopía como la ausencia de los B-receptores. Los puntos de confusión dicromática para tales deficiencias se encuentran respectivamente en  $x_p=0.7465$   $y_p=0.2535$ ,  $x_d=1.40$   $y_d=0.40$ ,  $x_t=0.1748$   $y_t=0.0044$ .

#### IV. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Como hemos podido examinar, gran parte de los trabajos que tienen como objeto de estudio la adaptación cromática se pueden enmarcar dentro de la determinación de las igualaciones en apariencia de color. No son muchos los trabajos que han tratado de estudiar tal influencia sobre los umbrales diferenciales de color, Cruz y Alvarez-Claro (1973), Pointer (1974), Loomis y Berger (1979), obteniéndose como conclusión más general la elongación de las elipses de discriminación en la dirección que determina el estímulo analizado y el adaptante, o el acortamiento de las mínimas diferencias perceptibles cuando la adaptación es de similar cromaticidad al estímulo estudiado. Tales trabajos han sido realizados por comparación simultánea de estímulos.

En cuanto al estudio de la influencia de la adaptación sobre la discriminación en color por comparación sucesiva, podemos decir que poco existe en la bibliografía revisada. Algunos trabajos han sido dirigidos hacia el estudio de la discriminación por comparación sucesiva, Uchikawa (1983), Uchikawa e Ikeda (1981), Romero y otros (1985), pero en cambio no se ha analizado la influencia de la adaptación cromática en tales comparaciones aunque sí para campo adaptante acromático, Romero y otros (1986).

Por otro lado, el estudio de las igualaciones en apariencia de color bajo distintas condiciones de adaptación, generalmente a los iluminantes A, C o  $D_{65}$ , dado el carácter técnico y comercial que presentan, tampoco se ha realizado mediante comparaciones sucesivas. Existe pues la necesidad de trabajos que aporten resultados experimentales cuando la influencia de la adaptación cromática es analizada en comparaciones sucesivas, tanto en términos de la determinación de umbrales como de la determinación de la apariencia de color.

El interés que puede presentar el estudio de las comparaciones sucesivas de color viene dado por las características usuales de observación del ojo humano, puesto que indudablemente intervienen en éstos procesos de memoria cuando se comparan dos estímulos de color. Con el estudio de la influencia de la adaptación cromática en tales comparaciones sucesivas nos adentramos en un nuevo campo de la Colorimetría, en donde quedarían por establecer, o comprobar, la validez de ciertos resultados experimentales obtenidos a partir de comparaciones simultáneas. No tendríamos porqué, a priori, admitir la validez de tales resultados cuando intervienen procesos de integración por memoria y deberemos por tanto entresacar conclusiones derivadas sólo de la experimentación que se realice.

Existen también diferentes técnicas experimentales cuando se trata de estudiar las igualaciones en apariencia de color. Se han utilizado métodos tan diversos como la visión haploscópica, la visión monocular con distinta adaptación sobre un campo bipartido, técnicas de denominación de color o aprendizaje de muestras en atlas



de color para identificar estímulos por memoria. Si bien tales técnicas resultan ser muy diferentes, sí hay un denominador común a la hora de determinar el estímulo que iguala a uno dado bajo una determinada adaptación, éste es la ausencia del establecimiento del error en dicha determinación. El observador generalmente maneja los mandos de un colorímetro hasta establecer, según la técnica experimental en cuestión, la igualdad en sendos campos de observación vistos bajo distintas adaptaciones. Nosotros por el contrario utilizaremos una técnica experimental por comparación sucesiva que nos permita determinar las igualaciones en apariencia basándonos en la propagación de errores de medidas colorimétricas, y que tengan en cuenta a su vez los condicionamientos psicológicos del observador, promediados a lo largo del tiempo.

Nos proponemos en el presente trabajo estudiar la influencia de la adaptación cromática tanto sobre los umbrales diferenciales de color como en la determinación de las igualaciones en apariencia, siempre referido tal estudio a comparaciones sucesivas de color. Elegiremos cinco condiciones de adaptación para cada uno de los tres estímulos de color analizados, tal y como se describe en el apartado VI, donde tres de éstas son de cromaticidades azul, verde y roja. Estas adaptaciones cromáticas se obtienen con filtros interferenciales idénticos a los utilizados como estímulos primarios de manera que podamos analizar las influencias que sobre los fotorreceptores puedan conllevar, medidas éstas a través de los parámetros característicos en los elipsoides de discriminación así como también sobre los umbrales en las direcciones que determinan los estímulos seleccionados y los adaptantes.

Nos hemos interesado, como hemos dicho, y respecto a la presentación de estímulos, en el análisis de tales influencias sobre comparaciones sucesivas de color. La importancia que las comparaciones sucesivas puedan tener se debe, tal y como indican Newhall y otros (1957), a que son las que reflejan más las comparaciones que se realizan en la vida ordinaria, con la única excepción de la comparación entre estímulos muy cercanos, yuxtapuestos y pequeños. En términos generales toda comparación de color implica procesos de su-

cesión y memoria.

El interés de este tipo de trabajos queda reflejado cuando se trata de establecer una métrica "aceptable" basada en datos obtenidos por comparaciones sucesivas. En tal sentido, Ikeda y Shimozono (1979), se ha calculado la curva de eficiencia luminosa para distintos observadores mediante un método basado en la comparación sucesiva de estímulos. Tales resultados así obtenidos pueden considerarse como el límite de la fotometría de parpadeo para frecuencias bajas.

El trabajo que aquí planteamos introduce el estudio de la influencia de la adaptación cromática bajo los aspectos que menos han sido tratados por los investigadores dedicados al estudio de la Colorimetría, haciendo un especial hincapié en el desarrollo paralelo llevado a cabo tanto en la determinación de los umbrales diferenciales de color como en el estudio de las igualaciones en apariencia.

## V. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

### V.1. CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental utilizado para la realización del presente trabajo responde en términos generales a las características que usualmente poseen los instrumentos dedicados al estudio de la Colorimetría. Centrándose éstas en la utilización de colorímetros visuales que permitan una amplia gama de obtención de estímulos de color y una alta reproducibilidad de los mismos, junto con un sistema de observación adecuado al tipo de visión requerida y amplia versatilidad para la realización de un gran número de medidas. Además, y tal es el caso que nos ocupa, disponer de la posibilidad de un adecuado calibrado espectrorradiométrico de todo el sistema.

Acompañando a estas series de características generales de los dispositivos, aparecen las propias asociadas a la materia particular objeto de estudio que, en nuestro caso, van encaminadas a la realización de experiencias de discriminación así como al estudio de la apariencia de color por comparación sucesiva de estímulos bajo distintas adaptaciones. Es necesario por tanto compaginar todas estas exigencias en el propio dispositivo experimental con el fin de poder hacer comparables los resultados que se vayan a obtener.

Para ello, hemos exigido una serie de características al dispositivo que nos permitan llevar a cabo nuestro estudio, éstas son de una parte disponer de un sistema de obturación que posibilite controlar los tiempos de exposición de los estímulos a comparar, así como los tiempos intermedios entre dos comparaciones sucesivas, y, por otra parte, la posibilidad de excitar siempre la misma zona de la retina cuando son presentados los estímulos; exigencia primordial pues en ella radica la evaluación de los resultados que se obtengan teniendo en cuenta las sensibilidades de los mecanismos fotorreceptores.

El dispositivo experimental permite además la posibilidad de adaptaciones espaciales y temporales, así como también la espacio-temporal objeto de nuestro estudio. La Figura V.1 muestra un esquema general del dispositivo utilizado.

Pasemos entonces a describir las partes fundamentales que componen el dispositivo experimental.

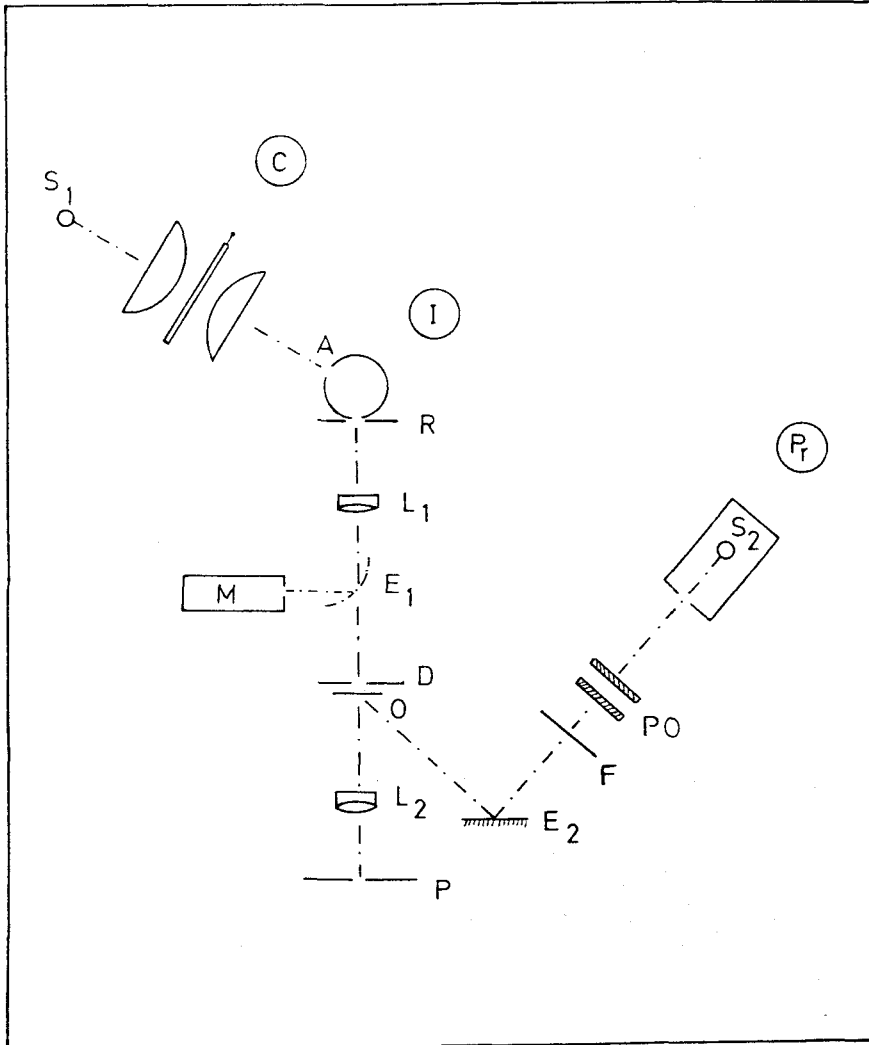


Figura V.1 Esquema del dispositivo experimental utilizado en el presente trabajo.

### V.1.1. SISTEMA DE PRODUCCION DE ESTIMULOS

La obtención de estímulos, tanto de los de referencia como de los variables, se ha realizado mediante un colorímetro, C, y la esfera integrante, I, tal y como muestra la Figura V.1 .

El colorímetro utilizado es del tipo Donaldson provisto de una lámpara halógena SILVANIA FFX de 500W a la tensión de 220V, alimentada por una fuente estabilizada BOAR-2000ST con 0.3% de precisión en su regulación, margen de tensión de entrada entre 190V y 260V y margen de frecuencia entre 45Hz y 50Hz. La curva de emisión espectral relativa de este tipo de lámparas se muestra en la Figura V.2, según el calibrado llevado a cabo en el Instituto de Optica "Daza Valdés" del C.S.I.C. .

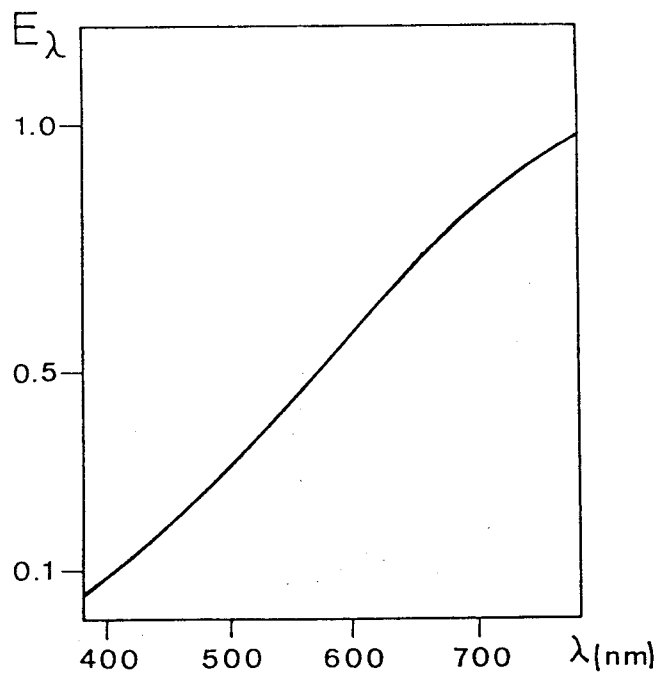
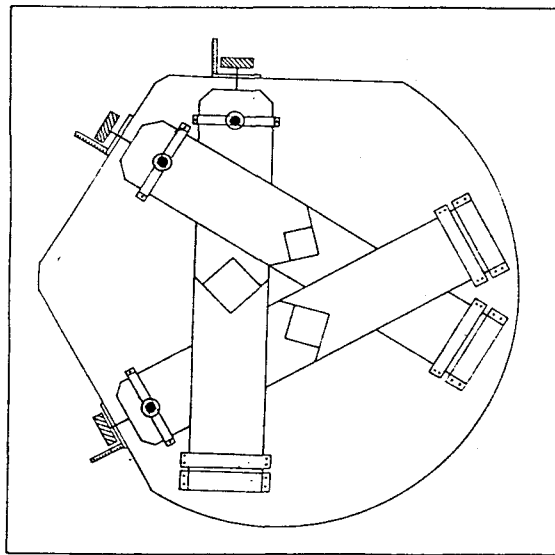


Figura V.2 Curva de emisión espectral relativa correspondiente a una de las lámparas utilizadas en el colorímetro.

El colorímetro utilizado consiste básicamente en un sistema portador de filtros, diseñado y construido en nuestros talleres, que permite dejar pasar más o menos flujo luminoso a través de tres diafragmas y un sistema óptico de lentes asociado al mismo. El sistema óptico consta de una pareja de lentes condensadoras de 30cm de focal cada una y un diámetro de 15cm. La fuente luminosa se coloca en el foco objeto de la primera de las lentes condensadoras de manera que los filtros, que se colocan entre ambas, reciben luz colimada, condición a tener en cuenta a la hora de utilizar filtros interferenciales como es este nuestro caso.

Entre ambas lentes condensadoras se sitúa una placa mecanizada en bronce donde se alojan los tres filtros en sendos orificios circulares, actuando como estímulos primarios. Sobre cada uno de los orificios se coloca un diafragma de apertura variable que nos permite controlar la cantidad de flujo luminoso, consiguiendo así una amplia gama de estímulos cuando tales cantidades se combinan en la esfera integradora. La Figura V.3 muestra un corte transversal de la placa metálica junto con el sistema de diafragmas de apertura variable.

Figura V.3 Corte transversal de la placa portadora de filtros.



Mediante la segunda lente condensadora del colorímetro se hace incidir la luz proveniente de los tres diafragmas sobre el orificio de entrada de la esfera integrante, donde tiene lugar la mezcla espacial una vez atravesados los filtros. Con el fin de aprovechar al máximo la luz emitida por la lámpara del colorímetro, se ha situado éste respecto de la esfera integrante de manera que la imagen del filamento se forme sobre la apertura de entrada, A. En este orificio de 3cm de diámetro se ha montado un vidrio difusor con el fin de que la luz penetre en la esfera parcialmente difundida, aparte de protegerla de agentes externos no deseables para su funcionamiento.

La esfera integrante, I, donde se realiza la fusión de los tres primarios está realizada en hierro y mecanizada en dos mitades que ajustan perfectamente, de 15cm de diámetro cada una, estando recubierto su interior de MgO depositado por la combustión de finas cintas de Mg metálico según las instrucciones convencionales, Keitz (1955).

Los filtros utilizados son filtros interferenciales de la marca SCHOTT modelo AL con ancho de banda de 20nm, cuyas curvas de transmitancia se muestran en la Figura V.4, y con longitudes de onda de pico de transmisión en 454nm, 526nm y 655nm.

Al disponer de un sólo colorímetro para la obtención de los estímulos, tanto de referencia como variables, las comparaciones que realiza el observador son perfectamente isómeras, objetivo que nos hemos marcado a fin de evitar otros problemas adicionales, Hita y otros (1977 y 1986).

El colorímetro ha sido convenientemente refrigerado por un turboventilador acoplado a una carcasa metálica que encierra a su vez a la lámpara y primera esfera condensadora, con el fin de evitar un excesivo calentamiento tanto de los componentes internos como de los filtros alojados en el exterior, lo que podría acarrear cambios en las curvas de transmisión de éstos, Juan J. (1974). No obstante, nuestras condiciones de trabajo no exceden de los márgenes de utilización marcados por los fabricantes de estos tipos de



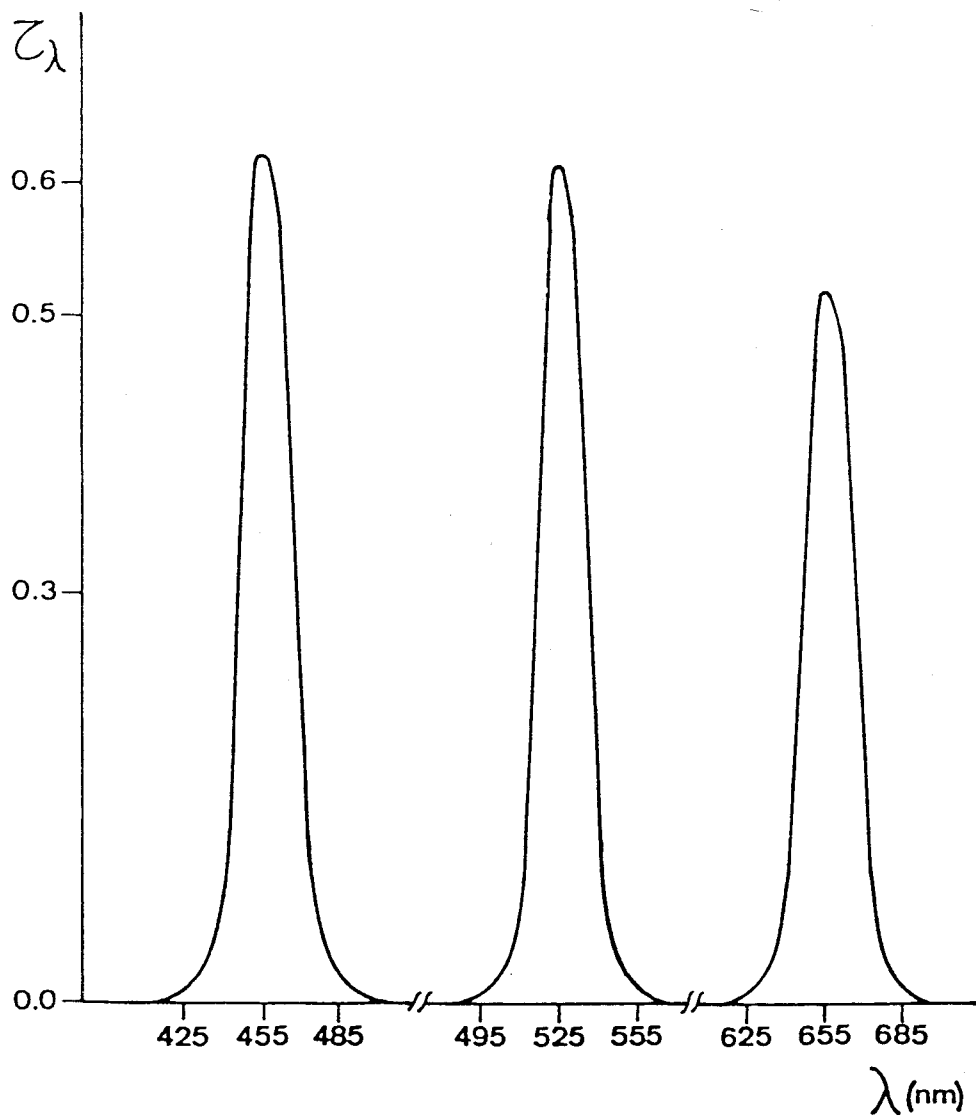


Figura V.4 Transmitancia de los tres filtros interferenciales utilizados, con picos centrados en 454nm, 526nm y 655nm.

filtros, pues si bien están diseñados para operar a la temperatura de unos 25°C, el rango de fiabilidad en sus características está comprendido entre -60°C y +60°C, con una variación de 0.001nm y del 0.013% en el ancho de banda y pico de máxima transmisión respectivamente por cada grado centígrado de incremento de temperatura.

#### V.1.2. SISTEMA DE PRODUCCION DEL CAMPO ADAPTANTE

Para estudiar las posibles variaciones en los umbrales de discriminación bajo distintas adaptaciones cromáticas, así como la determinación del color que iguala en apariencia a uno dado bajo una determinada adaptación, se ha diseñado un sistema formado por un proyector compacto de la casa Leitz, Pr, dos polarizadores, P0, que regulan la cantidad de luz, una placa porta filtros, F, un campo de adaptación recubierto de MgO, O y D, y un espejo plano E<sub>2</sub>.

El proyector utilizado lleva una lámpara SYLVANIA SYL-7 de 500W a la tensión de 220V, conectada a la misma fuente estabilizada anterior y refrigerada por una corriente continua de aire proveniente del ventilador. Dispone también de un filtro que absorbe gran parte de la radiación infrarroja, suministrado por la casa ENOSA, que impide un excesivo calentamiento de los elementos ópticos a la salida del proyector.

Una vez conseguido un haz colimado de luz se intercalan dos polarizadores que nos permiten regular la cantidad de flujo luminoso y, por tanto, la luminancia del campo adaptante. En nuestro caso hemos siempre trabajado con luminancias del campo adaptante de 1/5 de la luminancia de los estímulos de referencia estudiados. Por otro lado, hemos también medido la curva de transmitancia de ambos polarizadores y, como se puede ver en la Figura V.5, no actúan prácticamente de forma selectiva frente a los tres filtros interferenciales utilizados.

Para suministrar las cromaticidades del campo adaptante hemos utilizado tres filtros interferenciales idénticos a los utilizados como primarios en el colorímetro, de esta forma podemos es-

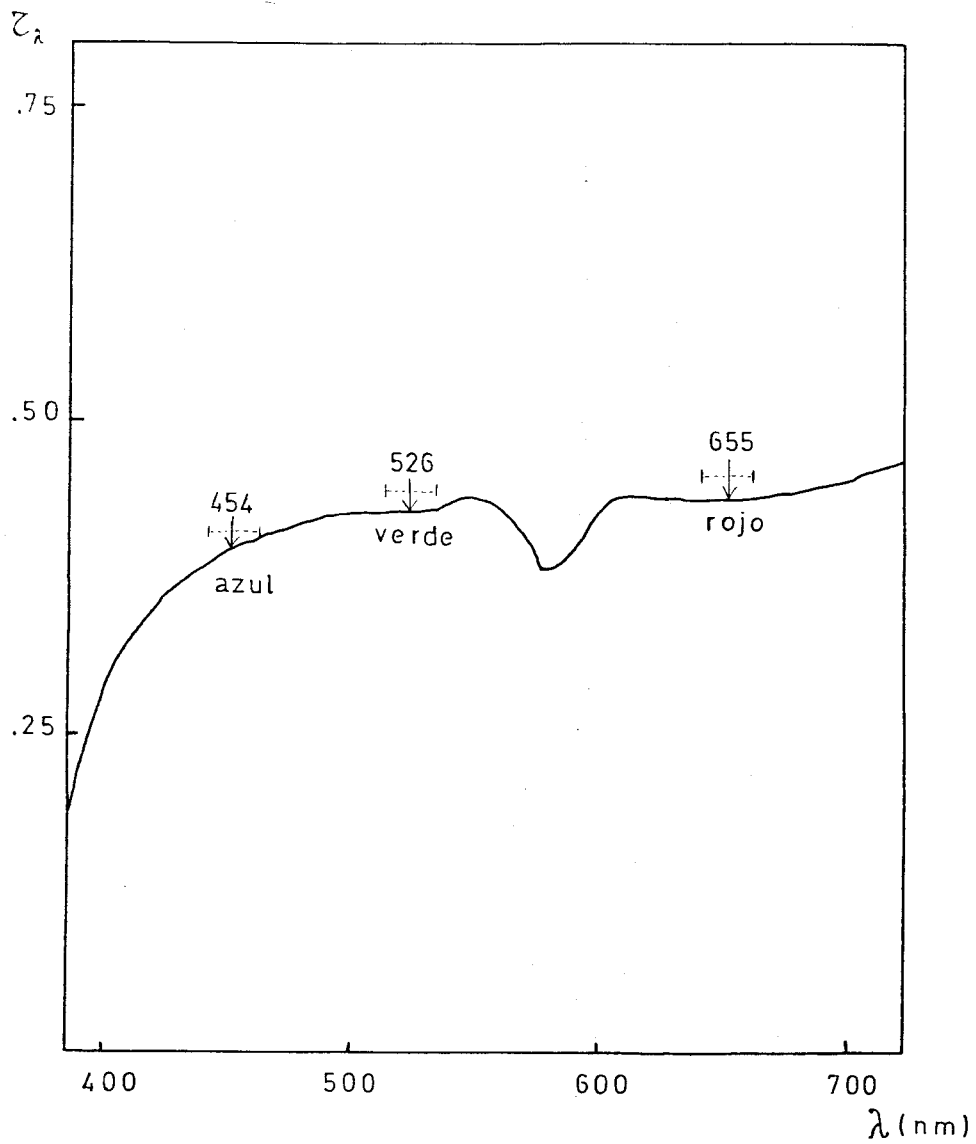


Figura V.5 Transmitancia espectral de los polarizadores y longitudes de onda de pico correspondientes a los tres filtros interferenciales, junto con el ancho de banda para cada uno de ellos de 20nm.

tudiar la influencia de la adaptación sobre determinados estímulos de referencia en las direcciones que éstos determinan con los propios primarios. Para obtener la adaptación acromática hemos utilizado un filtro neutro para desaturar la luz a la salida del proyector, una vez intercalados los dos polarizadores. Aun cuando los polarizadores tienen una respuesta casi lineal dentro del ancho de banda de cada filtro, hemos querido determinar las cromaticidades que nos proporcionan en el campo adaptante, independientemente de las calculadas según el sistema de producción de estímulos, intercalando todo el sistema de producción del campo adaptante de manera que incida el flujo luminoso sobre la esfera integrante, y proceder tal y como se especifica en el apartado V.2 referente al calibrado del dispositivo.

El campo adaptante consiste en una fina placa metálica recubierta de MgO y accionada por un electroimán. Cuando la placa está en situación de descanso, es decir, no está accionada por el electroimán, aparece un campo circular homogéneo de  $10^\circ$  y cuando está accionada aparece el campo de observación de  $1.7^\circ$  rodeado del campo circundante de  $10^\circ$ .

### V.1.3. SISTEMA DE OBSERVACION

El tipo de observación llevada a cabo ha sido el de visión maxwelliana, consiguiendo iluminar de manera uniforme una determinada área, y siempre la misma, de la retina; condición necesaria a la hora de trabajar en problemas asociados a los mecanismos de la visión del color. Para conseguir este tipo de visión es necesario disponer de un sistema óptico que permita tal iluminación uniforme, que en nuestro caso es foveal, unido a un sistema mecánico de fijación de la cabeza con el fin de que los estímulos exciten siempre la misma zona de la retina.

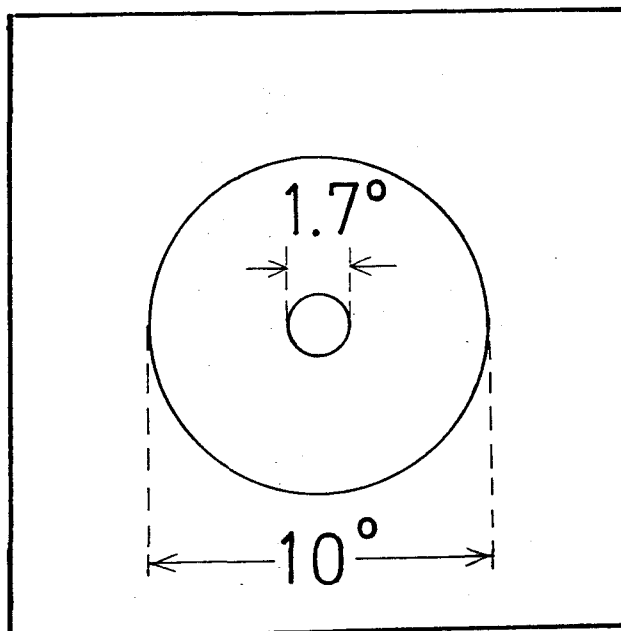
Disponemos para ello de un sistema de lentes acromáticas  $L_1$  y  $L_2$ , según la Figura V.1, de 127mm y 180mm de focal respectivamente, colocadas de manera que la rendija de salida de la esfera in-

tegrante, R, se sitúa en el foco objeto de la lente  $L_1$ , obteniéndose un haz colimado de luz. Dicho haz se recoge, una vez atravesado el diafragma circular, D, que regula el tamaño y forma del campo de observación, sobre la lente  $L_2$  con foco imagen en la pupila artificial de salida, P, donde se coloca el ojo del observador y que tiene un tamaño de 3mm de diámetro.

Para conseguir la fijación de la cabeza durante el tiempo que dura una sesión de observación se ha utilizado una dentonera que a su vez se ha fijado a la mesa de trabajo, pudiéndose ésta mover en sendos planos perpendiculares al eje óptico del sistema. Una vez que el observador regula los desplazamientos en ambas direcciones se fija mecánicamente la dentonera, estando ya el sistema de observación en condiciones de realizar las experimentaciones.

El tamaño del campo de observación de estímulos se fijó en  $1.7^\circ$ , siendo éste de forma circular, y el del campo adaptante, también circular, de  $10^\circ$ ; de manera que el observador ve un estímulo de color de cromaticidad uniforme rodeado de un campo circular con una determinada cromaticidad según la adaptación elegida, tal y como muestra la Figura V.6 .

Figura V.6 Los tamaños de los campos adaptante y test corresponden a los reales cuando son vistos a una distancia de 25cm.



#### V.1.4. SISTEMA DE OBTURACION

Con el objeto de obtener el modo de presentación de estímulos deseado se ha diseñado un sistema de obturación que permita la presentación sucesiva de los mismos, con una cierta versatilidad a la hora de la regulación de tiempos y acoplamientos de otros posibles obturadores.

En nuestro trabajo sólo ha sido necesario disponer de un obturador, O, tal y como se ve en la Figura V.1, de forma que cuando no está alimentado permite la adaptación temporal y cuando está accionado permite observar los estímulos y el campo circundante bajo adaptación espacial. El funcionamiento de subida y bajada del obturador hace que nuestras comparaciones de color por memoria se lleven a cabo por tanto bajo adaptación espacio-temporal.

El obturador aquí empleado es de tipo electromagnético, con una bobina de inducción que al ser alimentada por un generador de pulsos actúa como electroimán, atrayendo a una barra de hierro sobre la que va unida una delgada chapa metálica recubierta de MgO que hace las veces de campo adaptante.

El generador de pulsos está diseñado de tal forma que dé secuencias de los mismos en dos salidas alternativamente. Tanto la duración de los pulsos como el intervalo de tiempo entre ellos son regulables de forma continua en el rango de 0 a 15s y de 0 a 40s respectivamente, la Figura V.7 muestra un esquema de dicho generador y la secuencia de pulsos.

Una puerta OR fue diseñada con el fin de poder trabajar con campo adaptante y hacer independiente de la duración de los estímulos expuestos y el tiempo entre ellos, tal y como aparece en la Figura V.8. Las dos salidas del generador de pulsos se colocaron en las entradas de la puerta OR, utilizándose sólo en nuestro caso una de las dos salidas de la puerta OR.

El calibrado del sistema de obturación, es decir, la duración de los pulsos así como el intervalo entre ellos, se llevó a cabo mediante una célula fotoeléctrica acoplada a un reloj de alta

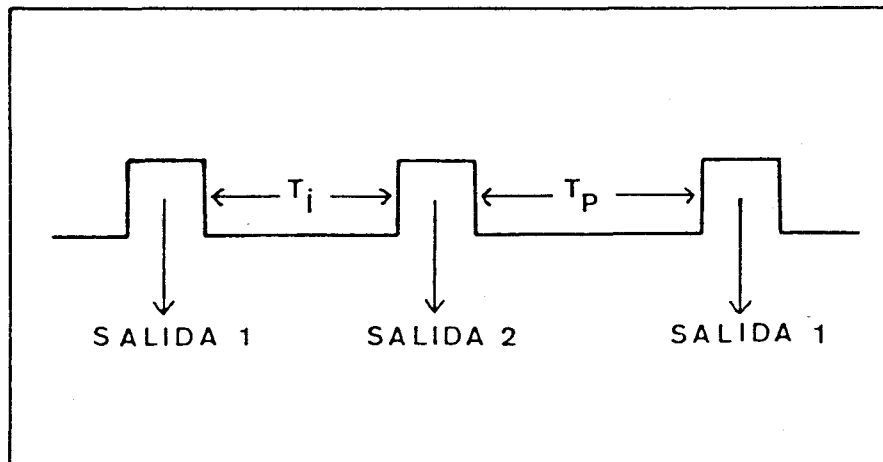
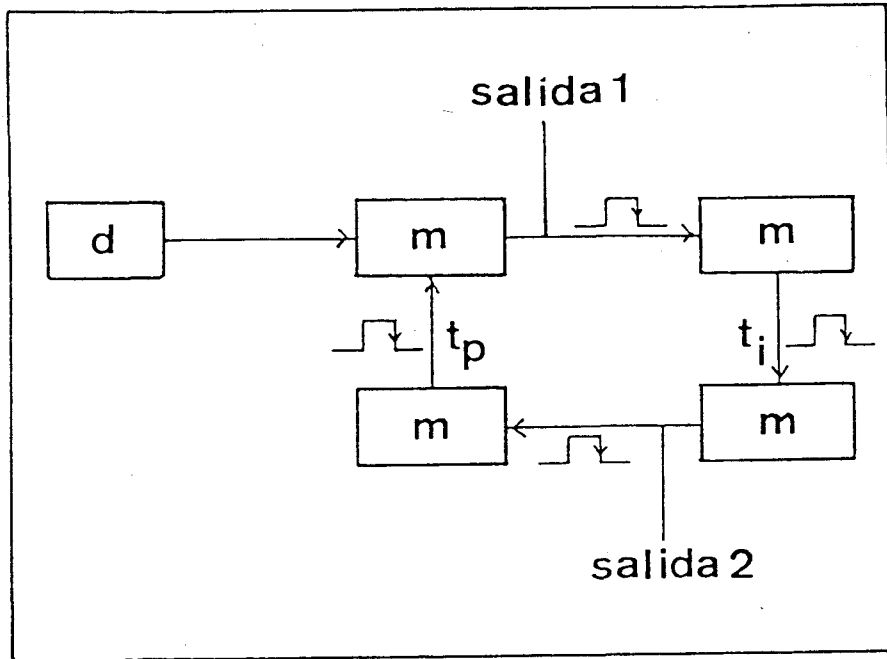


Figura V.7 Esquema del generador de pulsos, así como de la secuencia de éstos; m: monoestable,  $t_i$ : tiempo intermedio,  $t_p$ : tiempo entre comparaciones.

sensibilidad ( $\pm 0.0001s$ ) de la marca GRIFFIN-GEORGE TKL-900V. De esta forma, y en pruebas preliminares antes del diseño definitivo del montaje experimental, pudimos determinar las inercias mecánicas del obturador tanto en la subida como en la bajada, siendo los tiempos correspondientes a estas inercias de 20 y 10ms respectivamente.

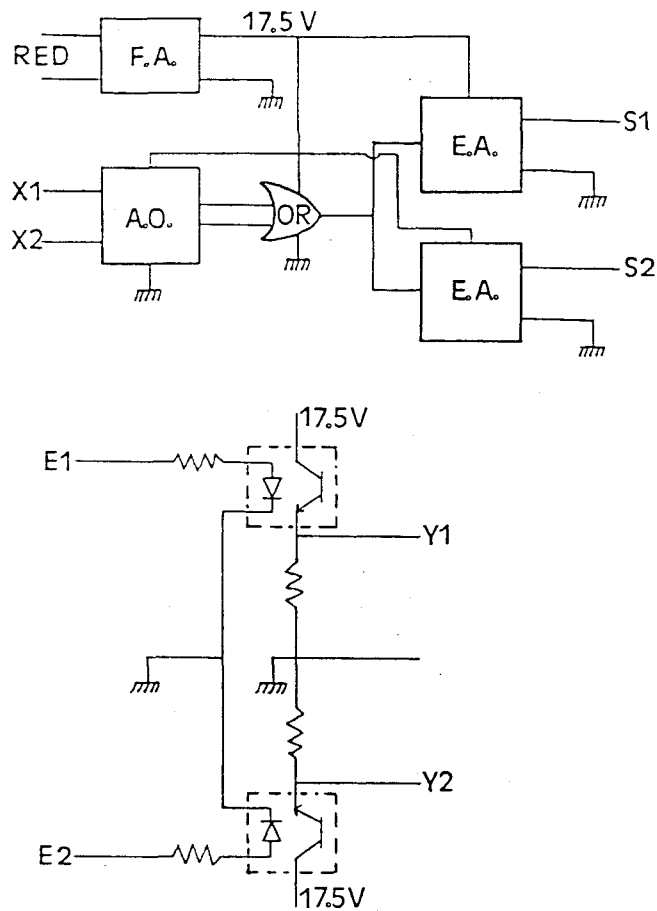


Figura V.8 Esquema de la puerta OR. F.A: fuente de alimentación, A.O: acoplo óptico, E.A: etapa de amplificación. Se incluye también detalle del acoplo óptico.



## V.2. CALIBRADO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El sistema de calibrado podemos dividirlo en dos partes diferenciadas, una de medida sobre el propio dispositivo y otra de proceso de cálculo mediante ordenador de las coordenadas de cromaticidad y luminancia relativa de los estímulos.

Para la primera se ha dispuesto de un sistema formado por el espejo cóncavo,  $E_1$ , de 8cm de focal y un espectrorradiómetro, M, según la Figura V.1 . Consiste éste último en un monocromador JOBIN-YVON HV-20, con red de difracción de 1200 líneas/mm, que separa espectralmente el haz de luz incidente sobre su rendija de entrada con una resolución de 2, 4 u 8nm, según el tipo de rendija que se utilice tanto a la entrada como a la salida. Acoplado al monocromador, y en la rendija de salida, se intercala un fotodiodo de Si (EGG modelo 400-B de  $1\text{cm}^2$ , responsividad de  $10^7\text{V/W}$ ,  $R_f=200\text{M}\Omega$  a 230nm, corriente de oscuridad de 5pA e impedancia de salida de  $500\Omega$ ) que incluye una etapa de amplificación. La señal del fotodiodo es amplificada mediante un amplificador operacional y conectada a la entrada de un dispositivo indicador digital RACAL-DANA 4003, con resolución de  $1\mu\text{V}$ , precisión del 0.04% e impedancia de entrada en continua de  $10\text{M}\Omega$ , sobre el que se realizan las lecturas.

La elección del monocromador y fotodiodo se basa en las necesidades que se plantean a la hora de realizar la experimentación que nos ocupa. El monocromador, tal y como hemos indicado, permite resoluciones en el espectro visible de 2, 4 y 8nm, según rendijas de 0.5, 1 y 2mm; resoluciones que se ajustan perfectamente a las necesidades planteadas en Colorimetría. En este sentido, hemos realizado periódicamente calibrados de 5 en 5nm para poder determinar las coordenadas de cromaticidad de los estímulos estudiados, siendo estos intervalos de longitud de onda aceptables según Seve (1982) y tal como nosotros hemos podido comprobar también.

Por otro lado, se ha elegido el fotodiodo de Si como elemento fotosensible frente a otro dispositivo de alta respuesta, como pudiera ser un fotomultiplicador, debido a que si bien éstos

últimos suelen tener sensibilidades más altas y menores ruidos, los fotodiodos presentan las ventajas de mayor estabilidad, menores dimensiones, mejor estabilidad antichoque, gran resistencia frente a vibraciones y prácticamente carecer de efecto micrófono, Zaidel y otros (1979).

La respuesta registrada sobre el elemento de lectura no es evidentemente la medida directa de la radiancia espectral de los estímulos a estudiar. Los distintos elementos del sistema presentan respuestas selectivas a lo largo del espectro que habrán de tenerse en cuenta a la hora de obtener una medida correcta, es decir: la absorción espectral del espejo,  $E_1$ , la efectividad del monocromador y la respuesta espectral del fotodiodo. Pasemos entonces a describir las características de estos tres elementos que intervienen en el sistema de calibrado.

#### V.2.1. MEDIDA DEL FACTOR DE REFLEXION ESPECTRAL RELATIVO DEL ESPEJO

El montaje experimental utilizado para medir la absorción espectral del espejo se muestra en la Figura V.9 .

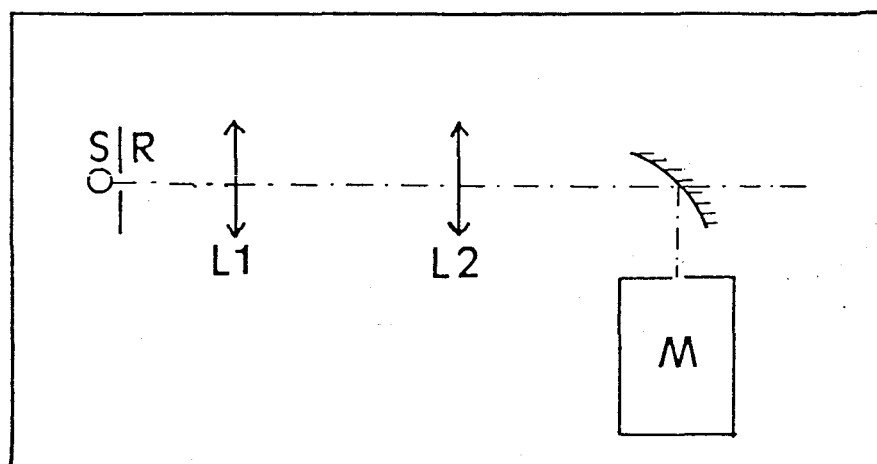


Figura V.9 Dispositivo utilizado para la medida del factor de reflexión espectral del espejo  $E_1$  utilizado.

Consta de una lámpara de incandescencia estabilizada, S, que ilumina tras un difusor una rendija, R, de anchura variable. A continuación se disponen dos lentes acromáticas  $L_1$  y  $L_2$  de focales 127mm. El espejo se sitúa posteriormente en el banco óptico a  $45^\circ$  respecto de éste, el monocromador con el fotodiodo y los instrumentos ópticos en otro banco a  $90^\circ$  con el anterior, tal y como puede verse en la Figura V.9 . De esta forma se consigue formar la imagen final de la rendija, R, sobre la rendija de entrada del monocromador. La disposición de las dos lentes y el espejo es tal que la imagen dada por  $L_2$  sea del mismo tamaño que la que da el espejo.

En tales condiciones se barre el espectro visible, registrando las medidas en el espectrorradiómetro. A continuación se repiten las mismas pero situando el monocromador sobre el banco óptico en el que se ubican las lentes y la rendija, retirando entonces el espejo. Ahora se coloca sobre la entrada del monocromador la imagen dada por la lente  $L_2$  de la rendija R, viniendo dado el factor de reflexión espectral del espejo como el cociente entre las medidas dadas por el espectrorradiómetro con espejo y sin espejo. Este calibrado se realizó con una resolución del monocromador de 4nm tomando intervalos de 10 en 10nm. La Figura V.10 muestra los resultados así obtenidos cuando éstos se han normalizado a la unidad.

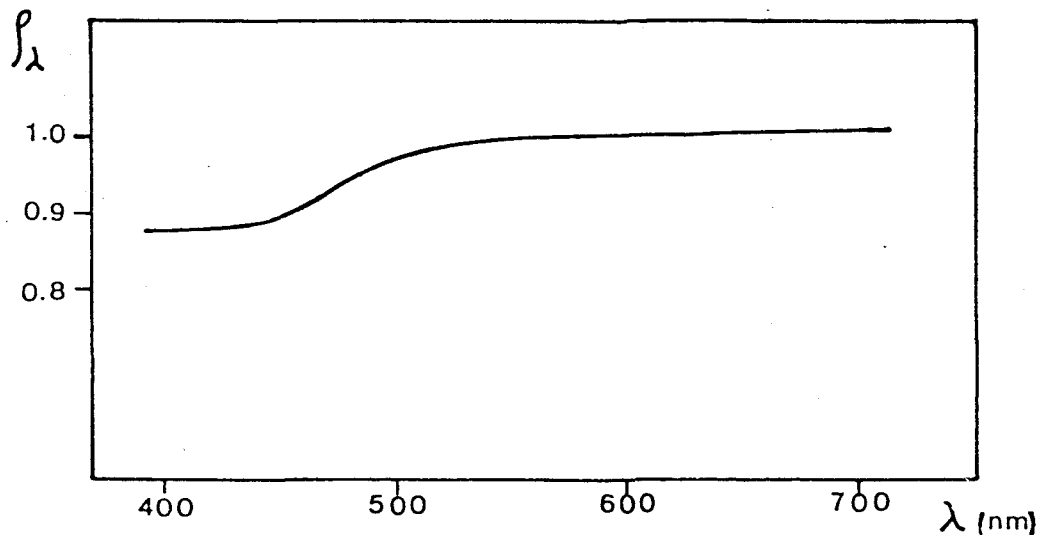


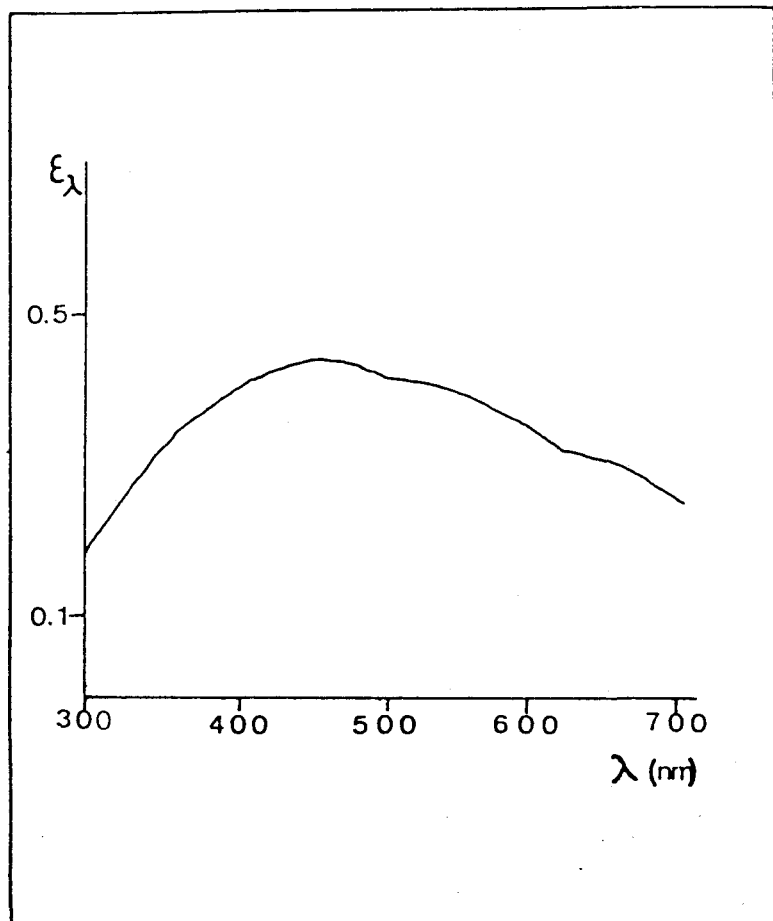
Figura V.10 Curva de reflexión espectral relativa del espejo  $E_1$  empleado en el dispositivo.

### V.2.2. DETERMINACION DE LA EFECTIVIDAD ESPECTRAL DEL MONOCROMADOR Y MEDIDA DE LA RESPONSIVIDAD ESPECTRAL DE LA FOTOCELULA

Para determinar la efectividad espectral del monocromador hemos tomado la curva que el fabricante suministra, según se aprecia en la Figura V.11; cayendo tal comportamiento dentro del que normalmente presenta una red de difracción por reflexión.

Figura V.11

Curva de efectividad espectral del monocromador utilizado.



La medida de respuesta espectral del fotodiodo de Si se llevó a cabo en el Instituto de Optica "Daza Valdés". Presentamos los resultados obtenidos dentro del espectro visible en la Figura V.12 .

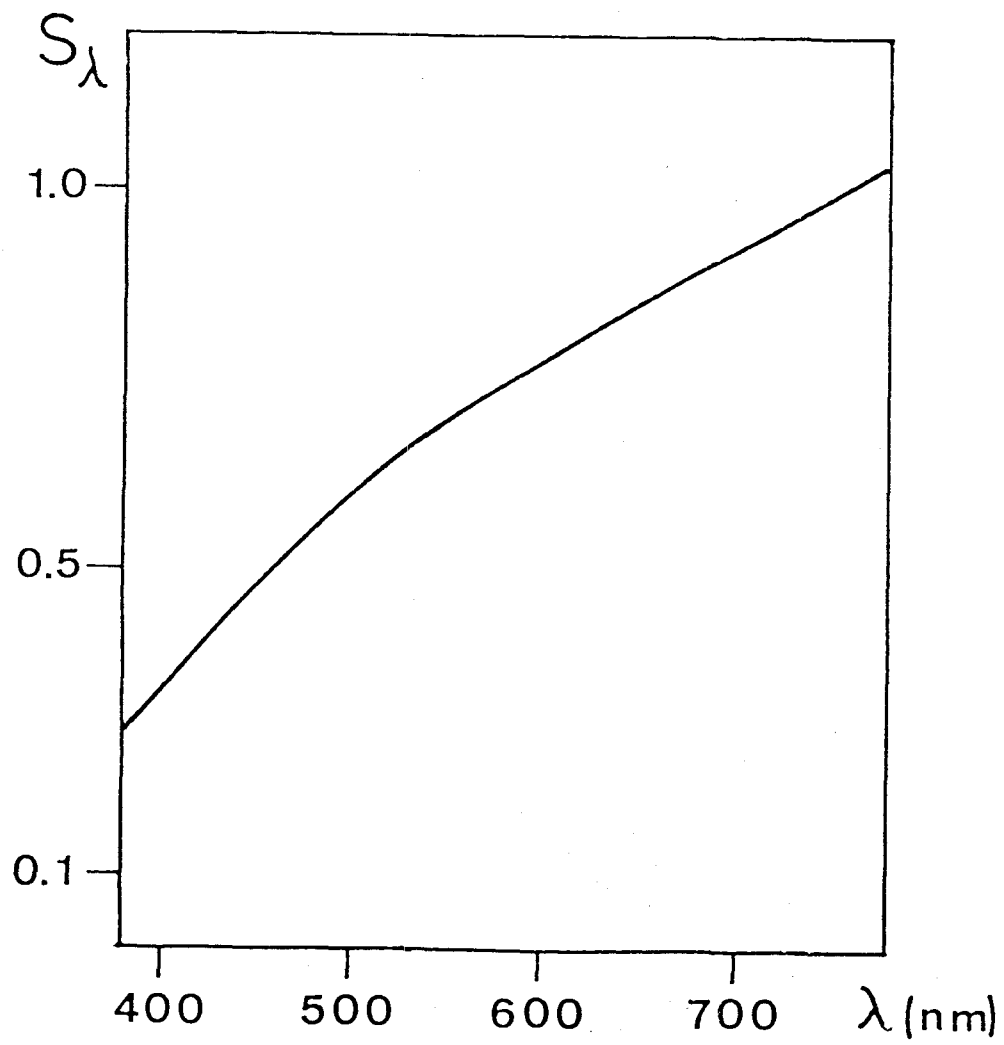


Figura V.12 Sensibilidad espectral del fotodiodo de Si.

Se puede apreciar en la figura anterior un aumento de la respuesta conforme aumenta la longitud de onda, lo que genera valores más bajos para longitudes de onda cortas dentro del visible.

La linealidad de la fotocélula fue comprobada sobre el propio dispositivo experimental haciendo incidir sobre ella la radiación correspondiente a un determinado estímulo y, variando la intensidad que le llega mediante polarizadores, se pudo comprobar una alta correlación en el ajuste lineal entre la intensidad incidente y respuesta registrada.

En la Figura V.13 presentamos la sensibilidad espectral relativa del dispositivo experimental completo, producto del factor de reflexión espectral del espejo, de la efectividad del monocromador y de la respuesta espectral del fotodiodo.

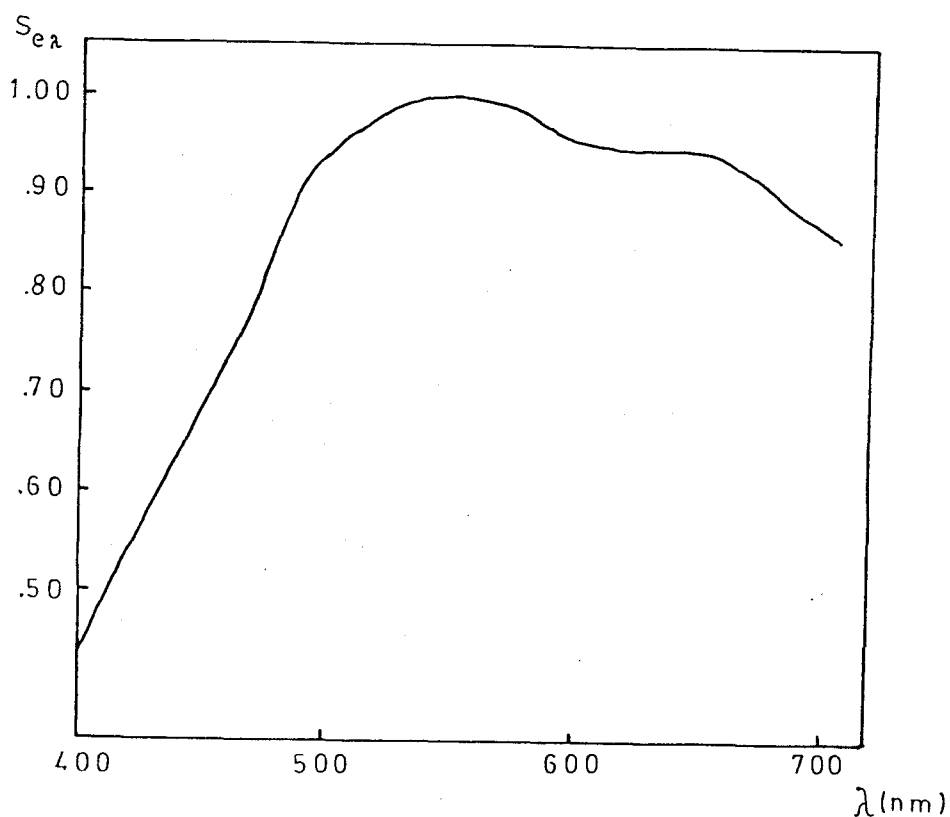


Figura V.13 Sensibilidad espectral relativa de todo el dispositivo experimental.

### V.2.3. REALIZACION DE CALIBRADOS

La radiancia espectral de los estímulos provenientes de la esfera integrante, I, fue determinada mediante la inclusión en el banco óptico, que soporta también el sistema de observación, del espejo cóncavo,  $E_1$ , de la Figura V.1; de manera que interceptase el haz colimado que emerge de  $L_1$ . El haz se dirige entonces hacia la entrada del monocromador, M, sobre cuya rendija de entrada se forma la imagen de R.

En tales condiciones la radiancia espectral del estímulo vendrá dada por

$$R_\lambda = M_\lambda ( \rho_\lambda \epsilon_\lambda S_\lambda )^{-1}$$

donde  $M_\lambda$  es la medida en mV sobre el multímetro,  $\rho_\lambda$  el factor de reflexión del espejo,  $\epsilon_\lambda$  la efectividad del monocromador y  $S_\lambda$  la respuesta espectral del fotodiodo.

Dado el gran número de estímulos a comparar con el de referencia, se ha exigido una gran reproducibilidad de los mismos; así como también la necesidad de un calibrado global del dispositivo que nos permita el cálculo de las coordenadas de cromaticidad de los estímulos utilizados en nuestros estudios. Para ello se procede a calibrar la energía radiante proveniente de cada uno de los filtros, y por separado, en función de las posiciones de los mandos que regulan los diafragmas de apertura. De esta manera se obtienen matrices, una para cada filtro, en las que las filas representan posiciones de mandos y las columnas longitudes de onda seleccionadas para el calibrado. Cada elemento de la matriz correspondiente a cada filtro representa la radiancia obtenida para cada longitud de onda y posición de mando; tras haber tenido en cuenta las curvas de respuesta espectral del fotodiodo, el factor de reflexión del espejo y la efectividad del monocromador.

Por otro lado, y dado que los filtros utilizados son interferenciales y no solapan sus curvas de transmisión, podemos determinar la radiancia espectral de un estímulo sin más que conocer las posiciones de mando de los tres diafragmas que regulan las can-

tidades de cada primario: azul, verde y rojo; de forma que la radiancia espectral del estímulo será la suma de las radiancias espectrales correspondientes a cada posición de los mandos, con lo que es inmediato determinar sus valores triestímulos y coordenadas de cromaticidad.

En cualquier caso, la reproducibilidad de los calibrados fue probada realizándose medidas en las que determinadas posiciones de mando del colorímetro fueron repetidamente colocadas, ya fueran en el sentido de abrir o cerrar el diafragma. Además, la reproducibilidad del calibrado fue también probada a lo largo del tiempo en que está encendido el colorímetro durante una sesión de experimentación, comprobándose la no influencia del tiempo en que está conectada la lámpara ni del posible calentamiento de los filtros.

En cualquier caso las longitudes de onda seleccionadas fueron siempre las mismas, tomadas en intervalos de 5 en 5 nm tal y como muestra la Tabla V.1 .

Primario	Longitudes de onda (nm)						
AZUL	440	445	450	455	460	465	470
VERDE	510	515	520	525	530	535	540
ROJO	640	645	650	655	660	665	670

Tabla V.1 Longitudes de onda seleccionadas en el calibrado para los tres estímulos primarios.



### V.3. PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Aunque muchas de las características de los elementos del dispositivo experimental y de las precauciones que han de tenerse en cuenta a la hora de hacer medidas colorimétricas, han sido ya descritas, hemos considerado interesante presentar una visión global de todo lo relacionado con la puesta a punto del dispositivo y la verificación correcta de la experimentación.

Pretendemos señalar tanto las peculiaridades del dispositivo que influyen en su puesta a punto como los errores instrumentales asociados a la experimentación y, en su caso, cómo se han tratado de evitar. Pasando a la descripción de la puesta a punto, y con referencia al sistema de iluminación, diremos que se ha asegurado la constancia en la emisión de las dos lámparas mediante el uso de un estabilizador, cuya tensión de salida ha permanecido fijada a 220V durante el desarrollo de las experiencias. Previamente se envejecieron éstas durante 2h de funcionamiento a intervalos periódicos de 15min y después se realizaron sucesivos calibrados, a fin de adecuar los datos a las radiancias reales que se disponen.

De esta forma se tuvo también en cuenta otro de los factores temporales que pueden afectar al dispositivo, esto es, el envejecimiento del recubrimiento de MgO de la esfera integrante que puede incluso ser selectivo según apunta Lozano (1978).

La mayor parte de los dispositivos electrónicos fueron conectados asimismo al estabilizador, tanto las lámparas del colorímetro y del proyector como el generador de pulsos y la puerta OR. La etapa de amplificación del fotodiodo de Si utilizado para los calibrados estuvo alimentada por una fuente estabilizada de tensión de  $\pm 15V$ .

En los sistemas de producción y observación de estímulos hemos tenido en cuenta la reproducibilidad de éstos, el alineamiento de los elementos ópticos y la colocación adecuada del observador en el dispositivo experimental.

En cuanto al primer apartado, y mediante un diseño apropiado de los mandos que regulan la apertura de los diafragmas, se

ha asegurado la ausencia de holguras e inercias mecánicas controlando tales términos por medio del calibrado para distintas, y repetidas, posiciones. Se encontró que dicha reproducibilidad se satisfacía exactamente dentro del propio error asociado al del instrumento de medida en el calibrado. Para evitar sobrecalentamientos del colorímetro, así como del proyector compacto utilizado para obtener el campo adaptante, se utilizaron como hemos mencionado antes ventiladores, comprobándose que no se observaban variaciones en los calibrados durante el tiempo que duraba una sesión experimental.

El alineamiento de los elementos ópticos del sistema fue realizado mediante el uso de una fuente láser de He-Ne de 0.5mW, procediéndose según normas convencionales a este respecto. Para facilitar tal alineamiento se dispusieron todos los elementos sobre bancos ópticos de perfil Zeiss, con jinetillos de desplazamiento mediante cremallera en horizontal y vertical que permiten el perfecto centrado en el eje óptico del sistema de los mismos.

Con referencia a la ubicación del observador al dispositivo, se ha exigido un acoplamiento tal que la pupila del ojo de éste y la artificial del dispositivo queden centradas a lo largo del eje óptico; lo que se ha conseguido con el sistema de fijación mediante dentonera rígidamente solidaria a la mesa de trabajo.

Respecto a los calibrados de los estímulos y para el cálculo de sus coordenadas de cromaticidad y luminancia hemos tenido en cuenta varios aspectos. De una parte, encontrar la independencia de los valores de las coordenadas respecto del número de cifras significativas tomadas al determinar el factor de reflexión espectral del espejo, la efectividad del monocromador y la responsividad espectral del fotodiodo. De otro lado, nos encontramos con los aspectos relacionados con la misma realización de los calibrados. En este sentido nos hemos asegurado de un correcto alineamiento del sistema de calibrado con el resto del dispositivo, cuidando además de que la rendija del monocromador quedara completa y uniformemente iluminada durante la realización de los calibrados. Previamente se ajustó a cero el sistema cuando no llegaba luz alguna a la fotocé-

lula a fin de restar la corriente de oscuridad, lo que se ha realizado mediante un potenciómetro en la etapa de amplificación. Así mismo, se ha elegido convenientemente una escala del multímetro digital que permitiera una lectura estable de la señal, evitándose fluctuaciones debidas al ruido de los elementos.

En cuanto al uso del monocromador, hemos tenido en cuenta su resolución y reproducibilidad en las posiciones que fijan las longitudes de onda seleccionadas. El primer factor ha sido ya ampliamente expuesto en los apartados anteriores y sólo añadiremos que para los calibrados se utilizaron resoluciones de 4nm, lo que se ajusta bien a los cálculos colorimétricos, Seve (1982). En relación con la reproducibilidad de las posiciones, hemos comprobado mediante una fuente láser de He-Ne y lámparas de Na y Hg que las longitudes de onda que el mando selector indica coinciden realmente con las seleccionadas. No obstante, se ha actuado siempre sobre el mando selector en el mismo sentido de giro para evitar así inercias mecánicas.

Por último, y con referencia al cálculo de los valores triestímulo teniendo en cuenta la resolución del monocromador, hemos realizado la suma espectral correspondiente a cada cálculo de 5 en 5nm, según las consideraciones antes mencionadas. Es de destacar también que siempre se comete un error en el cálculo de los valores triestímulo al pasar de la integral a la sumatoria, debido a que la radiancia espectral no puede ser medida continuamente a lo largo del espectro y a que las funciones de mezcla están tabuladas para puntos determinados de éste, tal y como pone de manifiesto Krystek (1982).

En resumen, hemos estimado el error en nuestras medidas como el asociado al escalón mínimo de variación de los mandos del colorímetro, expresados en términos de coordenadas de cromaticidad y luminancia. Por otra parte, los errores aleatorios propios a este tipo de trabajo los hemos considerado sujetos a la propagación de éstos descritos por Nimeroff (1957) y Wyzecki (1959), lo que por otro lado fundamenta al cálculo estadístico del elipsoide de discriminación, representativo de los umbrales.

## VI. METODO EXPERIMENTAL

### VI.1. DESCRIPCION GENERAL

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en nuestro trabajo, hemos de desarrollar un método experimental adecuado que nos posibilite determinar una serie de parámetros cuyo tratamiento y análisis nos evalúe la influencia de las condiciones de adaptación, tanto en la determinación de umbrales diferenciales de color como en el estudio de las igualaciones en apariencia. Todo ello nos lleva a tener en cuenta una serie de características comunes a los trabajos que se llevan a cabo dentro de la Óptica Fisiológica.

En primer, lugar habremos de realizar medidas experimentales que sean ajenas, en la medida de lo posible, a las condiciones psicológicas particulares de los observadores que participen en la investigación. Se trata en definitiva de obtener resultados que, si

bien son característicos de cada observador, no vengán afectados por ciertos condicionamientos no ya sólo psicológicos sino también circunstanciales a cada momento de la investigación. El observador en este caso deberá considerarse como un "elemento de cero", emitiendo juicios sobre la igualdad o desigualdad entre estímulos y siempre ajeno a las circunstancias experimentales propias del desarrollo de las medidas.

Para conseguir tal objetividad hemos seguido el método de presentación de "estímulos constantes", frente a otros también utilizados por diferentes investigadores como son el del "error medio" o el de los "límites". El método del "error medio" se basa en la realización de igualaciones de color cuando el propio observador actúa como experimentador sobre los mandos del colorímetro. Tal método supone, como señala Le Grand (1972), la aparición de posibles efectos táctiles que pueden afectar a la determinación de las medidas, junto con la imposición del ajuste a una distribución normal de los resultados cuando éstos son evaluados. El método de los "límites" supone la variación continua de los estímulos hasta apreciar diferencias respecto de una igualación inicial. Este método no parece presentar reproducibilidad y exactitud en la determinación de umbrales como ha podido constatarse en trabajos previos realizados por nuestro equipo de investigación, además de poder influir otros parámetros no controlados como son la velocidad de variación del estímulo o la adaptación continua al estímulo de referencia cuyo umbral se pretende determinar, Le Grand (1972).

Según lo mencionado anteriormente, el método de los "estímulos constantes" nos presenta las mejores características de objetividad y reproducibilidad de las medidas, dado que el observador interviene en el proceso únicamente como "elemento de cero", cuya función a desempeñar es la de juzgar la igualdad o desigualdad entre estímulos presentados por comparación sucesiva. Una vez que se elige un estímulo a estudiar, bien para determinar su umbral o para hallar el estímulo que lo iguala en apariencia bajo determinadas condiciones de adaptación, se presenta al observador una secuencia de estímulos cuya igualdad habrá de juzgar. En el caso de la determinación

del umbral diferencial de color esta secuencia se lleva a cabo mediante la presentación sucesiva de parejas de estímulos (estímulo de referencia/estímulo variable) y, en el caso del estudio de la apariencia, mediante sucesiones de estímulos variables. Hemos de decir que la presentación de los estímulos variables se hace de forma aleatoria y sin ningún conocimiento previo por parte del observador. La descripción más detallada de tales presentaciones la haremos en el apartado VI.3 del presente capítulo.

Indiquemos también que la presentación de los estímulos de color al observador se ha llevado a cabo, al contrario de como han sugerido otros autores, sin imponer restricción alguna en cuanto a la constancia en luminancia o cromaticidad de éstos. Nos proponemos en este caso que tales condiciones de observación sean lo más parecidas a las llevadas a cabo en la vida ordinaria, es decir, cuando se deben de emitir juicios sobre la igualdad o desigualdad entre estímulos que no tienen porqué presentar la misma luminancia o cromaticidad, de ahí que tales presentaciones se hagan mediante una variación simultánea de la luminancia como de la cromaticidad.

La obtención de los diferentes estímulos variables se realiza mediante la variación, en sus diferentes formas posibles, de las aperturas que regulan los orificios del colorímetro donde se insertan los estímulos primarios. Cada uno de estos estímulos variables se presenta al observador 10 veces.

Con objeto de que el observador no varíe su posición, crítica como sabemos en el caso de visión maxwelliana, las respuestas fueron dadas mediante un sistema de interruptores que accionaban pilotos luminosos; de manera que éstas eran registradas por el experimentador.

Las sesiones de observación de cada observador se realizaron mediante la determinación de tres umbrales de color entre las 15 combinaciones posibles de estímulos de referencia y condiciones de adaptación. Las medidas de apariencia se llevaron a cabo mediante sesiones sucesivas, hasta ser completadas, para la determinación de cinco igualaciones en apariencia de entre también las 15 posibles combinaciones.

Otro factor, también tenido en cuenta con el fin de evitar la fatiga del observador, dada la atención que se requiere en este tipo de exposiciones, fue el limitar como máximo a 25min la duración de cada sesión. Como consecuencia de ello se requirieron sucesivas sesiones de observación, realizadas en diferentes horas del día y en distintos días, con lo que por otro lado también conseguíamos otro objetivo ya señalado por diferentes autores, Wyszecski (1972) e Hita y Romero (1981), esto es, la necesidad de promediar los diferentes condicionamientos psicológicos del observador a lo largo del tiempo. De esta forma las medidas realizadas se hacen lo más independientes posible de tales variaciones, que como han podido apreciar los citados autores vienen determinadas no sólo de un día para otro sino también en mismo día de experimentación.

## VI.2. PARAMETROS ANALIZADOS.

En la descripción del dispositivo experimental se detalló y justificó una serie de parámetros experimentales que íbamos a controlar y evaluar, no obstante pasaremos ahora con más detalle a examinar éstos y otros aun no mencionados.

Hemos decir, antes de comenzar tal descripción, que algunos de estos parámetros vienen impuestos por las características de los dispositivos que se utilizan en la experimentación, tal es el caso de los niveles de luminancia de los estímulos de referencia y campo adaptante que como sabemos, y en colorímetros tipo Donaldson, no posibilitan altos valores de ésta pero que resultan ser un material muy interesante en el tipo de trabajo que nos incumbe. Es por ello preciso que debamos llegar a situaciones de compromiso que, si bien no nos permiten trabajar en condiciones de iluminación retiniana próximas a las usuales en la técnica o en la industria, sí podamos conseguir un nivel fotópico en el que la discriminación o igualación presente características parecidas a los niveles más altos, exceptuando el deslumbramiento.

En cuanto al factor humano necesario para llevar a cabo nuestro trabajo, y ésta es una característica de los que se realizan en la Optica Fisiológica, hemos de decir que también viene condicionado por este tipo particular de investigación. Es sabido que las condiciones de observación para la realización de trabajos en este campo de la ciencia resultan ser un tanto tediosas, precisando un alto interés y gran constancia a fin de que la experimentación se realice de una forma correcta. Se nos plantea pues determinar qué características habrán de poseer nuestros observadores así como el número mínimo preciso, con el fin de que nuestros resultados sean fiables y generalizables. Por tanto, independientemente de la justificación que hagamos sobre el número y tipo de observadores que hayan de intervenir en la realización de las medidas experimentales, se puede comprender que es difícil disponer de un gran número de éstos, lo que nos limita indudablemente a disponer de personas que estén directamente ligadas con este tipo de investigación.



Pasemos ahora a describir los parámetros experimentales considerados en el desarrollo de este trabajo.

#### A. PARAMETROS COLORIMETRICOS

El Subcomité sobre Diferencias de Color de la CIE, en vías a establecer unas líneas generales de investigación que conduzcan a una mejor comprensión de los mecanismos asociados a la visión del color, sugirió en 1978, Robertson (1978), una serie de puntos del diagrama cromático cuyo estudio se establecía como prioritario para conseguir un suficiente conjunto de datos que la comunidad científica internacional podría proporcionar. Se recomendaban cinco estímulos de color, cuatro de ellos de tonalidad roja, amarilla, verde y azul y uno acromático correspondiente a las coordenadas de cromaticidad del iluminante  $D_{65}$ . Siguiendo tales recomendaciones hemos seleccionado dos de estos estímulos de color, uno azul de coordenadas de cromaticidad  $x=0.219, y=0.217$  y otro rojo de coordenadas de cromaticidad  $x=0.483, y=0.342$ . El tercer estímulo seleccionado ha sido uno verde de coordenadas de cromaticidad  $x=0.298, y=0.493$ , que no coincide con el estímulo verde recomendado por el Subcomité, pero que hemos creído conveniente estudiar puesto que éste presenta una saturación mayor que la de los dos estímulos seleccionados así como la de los demás propuestos.

En cuanto a los estímulos adaptantes diremos que se han utilizado cuatro, más la adaptación a la oscuridad; tres de ellos correspondientes a las tonalidades roja, verde y azul y uno acromático. Las cromaticidades de los tres estímulos adaptantes fueron obtenidas a partir de tres filtros interferenciales idénticos a los de los estímulos primarios. Se ha procedido de esta manera con el fin de estudiar la influencia de la adaptación cromática sobre las direcciones que éstos determinan con los estímulos de referencia en el diagrama cromático. La adaptación acromática fue obtenida mediante la utilización, tal y como mencionamos en la descripción del dispositivo experimental, de un filtro neutro aplicado al sistema de proyección.

En la Tabla VI.1 aparecen las coordenadas de cromaticidad de los estímulos de referencia estudiados, estímulos primarios

utilizados y estímulos adaptantes.

La Figura VI.1 muestra en el diagrama CIE 1931 los estímulos de color seleccionados, el triángulo que determinan los tres primarios y los cuatro estímulos adaptantes considerados.

<u>Estímulos de referencia</u>	<u>x</u>	<u>y</u>
AZUL	0.219	0.217
VERDE	0.298	0.493
ROJO	0.483	0.342
<u>Estímulos Primarios</u>		
AZUL	0.151	0.024
VERDE	0.126	0.809
ROJO	0.727	0.273
<u>Estímulos Adaptantes</u>		
AZUL	0.149	0.025
VERDE	0.126	0.809
ROJO	0.726	0.274
ACROMATICO	0.423	0.432

Tabla VI.1 Coordenadas de cromaticidad de los estímulos de referencia, primarios y adaptantes. El estímulo acromático adaptante posee una temperatura correlacionada de color de 2800K.

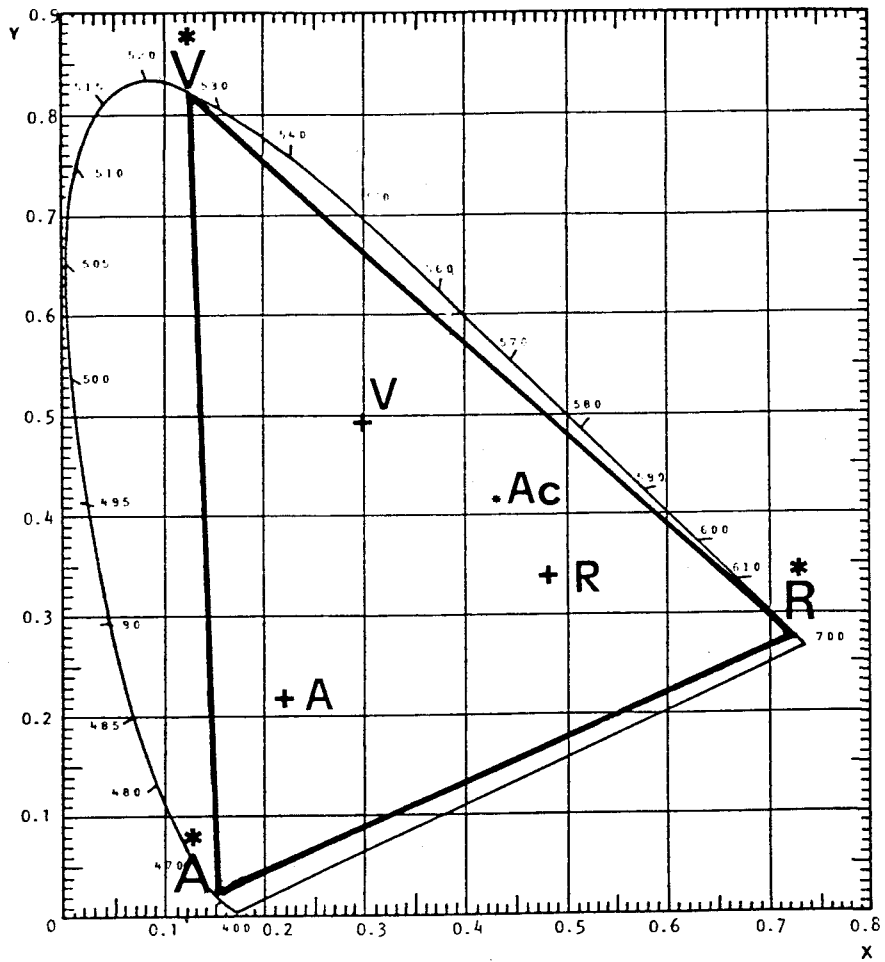


Figura VI.1 Estímulos analizados: Azul (A), Verde (V) y Rojo (R). Estímulos primarios referidos con las respectivas letras en \*, que coinciden con las tres adaptaciones cromáticas y adaptación acromática (Ac).

Los estímulos de referencia analizados fueron seleccionados como hemos podido ver según cromaticidades que abarcasen zonas diversas del diagrama cromático y, a su vez, que presentasen el mismo nivel de iluminación retiniana. Este último factor viene impuesto por las características del colorímetro utilizado y por el tipo de filtros que generan los estímulos primarios. El que presenten la misma luminancia, y por tanto igual iluminación retiniana, es debido a la necesidad de hacer comparables los resultados obtenidos entre sí; además de posibilitar un mismo factor de luminancia para el campo de adaptación. También el nivel de luminancia se ha buscado de manera que fuera lo suficientemente alto y factible de ser conseguido en el colorímetro, aun cuando evaluásemos los estímulos variables que determinan el umbral o la igualación en apariencia.

El nivel de iluminación retiniana para cada uno de los tres estímulos estudiados quedó fijado en 30td, correspondiéndole un valor a la magnitud fotométrica relativa de  $Y=8.52$ . Hemos de tener en cuenta, según trabajos de Brown (1951) y Walraven (1962), que el nivel de luminancia no afecta significativamente en los resultados de discriminación cromática cuando nos encontramos dentro de niveles fotópicos.

La iluminación para el campo adaptante fue fijada en  $1/5$  del valor correspondiente a la de los estímulos observados. La razón de la elección de tal factor fue doble: por un lado, la luminancia del campo adaptante debía de ser menor que la del campo de observación para evitar la anulación, tal y como muchas veces ocurre, de la cromaticidad del estímulo a estudiar y, por otro lado, el factor de  $1/5$  pudo comprobarse en medidas preliminares que era el mayor que verificaba la razón anterior y que permitía además una cómoda observación. También, y de acuerdo a Siegel (1969), el nivel de luminancia del campo adaptante debe de ser siempre menor que el correspondiente al de los estímulos a observar si efectivamente no queremos que vengan afectados los resultados en la discriminación.

Una vez seleccionados los estímulos de referencia, éstos nos permiten determinar las posiciones de los mandos del colorímetro

a través de un programa de cálculo por ordenador, conocidos los valores de  $x$ ,  $y$  e  $Y$  de cada estímulo. De esta forma conseguimos reproducir un determinado punto del espacio cromático dentro del error asociado al tamaño del escalón en las posiciones de los diafragmas del colorímetro, que, en nuestro caso, corresponde a una precisión del orden de la tercera cifra decimal en las coordenadas de cromaticidad  $x$  e  $y$ .

Respecto al tipo de fusión de primarios, se ha utilizado la fusión espacial de los mismos mediante la utilización de una esfera integrante recubierta de  $MgO$ . No obstante y según trabajos llevados a cabo anteriormente, Hita y Jiménez (1980a), no parecen influir en la determinación de los umbrales de discriminación el tipo de fusión de primarios empleado, ya sea temporal o espacial, lo que nos ha llevado a inclinarnos por la segunda con miras a no tener que introducir ningún dispositivo adicional a nuestro sistema de producción de estímulos.

## B. PARAMETROS TEMPORALES

Dadas las características de nuestra investigación, y respecto a la presentación de estímulos, hemos de considerar dos parámetros temporales que determinan el método experimental para la obtención de los datos, uno el tiempo de exposición de estímulos y otro el tiempo intermedio entre dos presentaciones consecutivas. En cuanto al primero de ellos, no existen demasiados trabajos que indiquen cuál es el tiempo mínimo necesario para que un determinado estímulo quede almacenado en la memoria. Sí existen, por el contrario, trabajos relativos al reconocimiento de formas, Uchikawa e Ikeda (1981), siendo el tiempo mínimo, según estos autores, de al menos 0.5s para su integración por memoria.

Hita y otros (1980b,1982b) han puesto de manifiesto que con tiempos de exposición del orden de ls los umbrales de discriminación se estabilizan, referidos éstos a comparaciones simultáneas de color. Nosotros hemos considerado, por tanto, suficiente un tiempo de exposición de ls para los estímulos de color, ya sean de re-

ferencia o variables, tal y como se ha venido trabajando en comparaciones simultáneas puesto que pruebas preliminares, para comparaciones sucesivas, nos indicaban ese tiempo como idóneo para la percepción y memorización de los estímulos, y trabajar así cómodamente. Otros autores han trabajado en comparaciones sucesivas con otros tiempos de exposición, tal y como Newhal y otros (1957) con 5s, Uchikawa e Ikeda (1981) con 0.11s; no aportando justificación alguna sobre las elecciones de tales tiempos de exposición.

En cuanto al tiempo de exposición intermedio, objeto de estudio en trabajos anteriores, Romero (1984) y Romero y otros (1986), hemos considerado el tiempo óptimo de 8s entre presentaciones de estímulos puesto que, tal y como pusieron de manifiesto los trabajos anteriormente citados, es precisamente la duración más pequeña a partir de la cual se estabilizan los parámetros característicos en la discriminación. Hemos de indicar también que, dadas las características de nuestro estudio, es decir, las relativas a los aspectos temporales en comparaciones sucesivas de color con efectos de memoria en intervalos cortos de tiempo, no tiene sentido utilizar tiempos excesivamente largos entre presentaciones aunque indudablemente puedan presentar interés el estudio de tales efectos.

### C. PARAMETROS VISUALES

Hablaremos en este subapartado tanto de las características del tipo de visión empleada como de las propias en los procesos de adaptación cromática.

Tal y como hemos podido observar en la descripción de nuestro dispositivo experimental, el tipo de visión empleada ha sido monocular y maxwelliana. Este tipo de visión nos permite iluminar homogéneamente una determinada zona de la retina de forma que puedan ser controlados los posibles efectos no deseados de contribución de los bastones, al menos en cuanto a la presentación de los estímulos a observar. El tamaño del campo de observación fue de  $1.7^\circ$ , dimensiones usuales en estos estudios, el cual nos permite utilizar las funciones de mezcla del observador patrón CIE 1931 para campos menores de  $4^\circ$ . Otros autores, marcándose objetivos distintos a los

nuestros, han estudiado la influencia del tamaño del campo de observación no sólo sobre los umbrales de discriminación, McCree (1960) y Bedford y Wyszecki (1958), sino también sobre las igualaciones en apariencia de color, Hasegawa (1982); destacando el comportamiento tritanópico por parte de observadores normales en cuanto a los primeros trabajos y la variación de la apariencia, incluso variaciones en la tonalidad, respecto del segundo.

La forma del campo de observación y de adaptación fue circular uniforme, siendo el tamaño de éste último de  $10^\circ$ . El modo de presentación de estímulos fue de apertura; es decir, a través de luz dirigida una vez que la fusión espacial de los primarios se ha llevado a cabo, y no mediante luz difundida por medio de superficies difusoras o modo objeto.

En cuanto a la adaptación diremos que ésta fue espacio-temporal. De esta forma, aparecía alternativamente el campo adaptante uniforme y el campo de observación rodeado del adaptante. Sólomente cuando se trabajaba con adaptación a la oscuridad aparecía únicamente el campo de observación.

#### D. OBSERVADORES

Para realizar este trabajo se han utilizado dos observadores identificados por las iniciales JR y AC, experimentados en este tipo de observaciones aunque inicialmente llevaron a cabo un periodo previo de familiarización con el dispositivo y método experimental mediante pruebas preliminares.

Ambos observadores pertenecen al sexo masculino y con edades de 26 años, JR, y 27 años, AC, al comienzo del desarrollo de la parte experimental de la investigación. Ambos poseen visión normal al color medida mediante el test de Ishihara y el anomaloscopio de Pickford-Nicolson. Uno de ellos posee un ligero astigmatismo, corregido, en el ojo con el cual realizó las sesiones experimentales.

Como dijimos anteriormente tanto el número como las características de estos observadores suele ser el usual en los trabajos desarrollados dentro del campo de la Optica Fisiológica, Ronchi y Ferrara (1963).

### VI.3. DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS

Una vez descritos los distintos parámetros experimentales que se han tenido en cuenta en el desarrollo de este trabajo, vamos a esbozar las líneas generales de actuación a lo largo de las sesiones experimentales así como la evolución temporal de la investigación.

En un principio, y tras marcarnos los objetivos de nuestro trabajo, desarrollamos una serie de sesiones experimentales encaminadas a conseguir una buena preparación y familiarización de los observadores con el dispositivo experimental. En este periodo se estuvieron determinando algunos umbrales de discriminación por comparación sucesiva, distintos a los que habríamos de determinar según los estímulos seleccionados, con el fin de que no hubiese aprendizaje previo alguno que pudiese provocar algunas modificaciones, por ejemplo en un menor tamaño del umbral, sobre los elipsoides de discriminación definitivos.

Una vez superada esta primera fase, emprendimos definitivamente el trabajo experimental que habría de concluir en la exposición de la presente memoria. El primer estudio que hicimos fue el relativo a la obtención de los umbrales de discriminación de los tres estímulos considerados por comparación sucesiva, y bajo las cinco adaptaciones ya mencionadas. El procedimiento experimental para obtener los datos que nos llevarían a la elaboración de los elipsoides de discriminación fue el que a continuación describimos.

Una vez que el observador se disponía a comenzar el desarrollo de sucesivas sesiones, que no acababan hasta que quedaban completadas tres de las quince combinaciones posibles entre estímulo de referencia/adaptación, repartidas a lo largo de diferentes horas del día y en sucesivos días, comenzaba la sesión experimental tras adaptarse previamente durante un minuto a la oscuridad con el fin de evitar ligeras influencias de luces vistas con anterioridad. Después de este corto periodo inicial venía uno más largo de adaptación al estímulo adaptante (azul, verde, rojo o acromático) o a la oscuridad cuya duración era de cinco minutos, tiempo usual en este tipo de trabajos, Loomis y Berger (1979). Seguidamente, y manteniéndolo-



se la adaptación, se presentaban alternativamente el estímulo de referencia, con un segundo de exposición, y los estímulos variables, también con un segundo de exposición, a intervalos de ocho segundos entre cada sucesión estímulo de referencia/estímulos variables. Cada vez que el estímulo variable era presentado, hasta un máximo de diez veces, el observador emitía su juicio de igualdad o desigualdad frente al de referencia accionando el sistema de interruptores diseñado para tal fin.

En cuanto al estudio de las igualaciones en apariencia, las sesiones experimentales sufrieron ciertas modificaciones con el fin de hacer posible la determinación de los estímulos de color que igualaban en apariencia a uno dado bajo una determinada adaptación. Como ya dijimos, la adaptación bajo la cual se realizan todas las igualaciones es la correspondiente al estímulo acromático. Diremos también que estas sesiones experimentales quedaban completadas cuando se estudiaba la apariencia para cinco de las quince combinaciones posibles entre estímulo de referencia/adaptación.

Dadas las características del dispositivo experimental y la técnica seguida para el estudio de las mencionadas igualaciones en apariencia por comparación sucesiva, se nos presentó un primer problema a la hora de determinar la igualación puesto que incluso cambiaba de tonalidad respecto del estímulo de referencia observado bajo las adaptaciones cromáticas, y cuya solución la vimos en la utilización de un atlas Munsell, al menos para aproximarnos al estímulo visto bajo la adaptación siempre acromática que igualaba en apariencia a los de referencia bajo otra determinada adaptación. Inicialmente el observador se adaptaba durante un minuto a la oscuridad para adaptarse seguidamente al estímulo adaptante, u oscuridad, durante cinco minutos. Después de este periodo se presentaba al observador durante tres minutos el estímulo de referencia, manteniéndose la adaptación anterior, con el fin de poder ser recordados los atributos que los definen. Seguidamente, y con la ayuda del atlas Munsell, se buscaba un estímulo que fuese lo más parecido al estímulo de color visto en la sesión experimental, determinándose de esta forma las coordenadas de cromaticidad según los valores de

"hue", "croma" y "value". Utilizando un programa de cálculo por ordenador se nos permitía reproducir la cromaticidad deseada según las posiciones conocidas de los mandos del colorímetro. Una vez acabado este primer paso comenzaba otra sesión experimental en la que se repetían de nuevo la adaptación durante un minuto a la oscuridad, la adaptación correspondiente durante cinco minutos y la presentación del estímulo de referencia durante tres minutos. Seguidamente venía otro periodo de adaptación a la oscuridad de otros tres minutos para seguir con el periodo de adaptación al estímulo acromático, bajo el cual se habrá de determinar siempre la igualación, durante cinco minutos; finalizado este último periodo se pasaba a presentar al observador el estímulo cuyas coordenadas de cromaticidad reproducían al correspondiente del atlas Munsell. Bajo la adaptación acromática a la que se encuentra, el observador trata de perfilar definitivamente el estímulo de la igualación en apariencia por comparación sucesiva en tantas sesiones como él creyese necesarias. Una vez que el estímulo de la igualación era aproximadamente especificado, se pasaban diferentes estímulos variables en sucesivas sesiones experimentales para determinar definitivamente el estímulo de la igualación, teniendo en cuenta los pesos estadísticos dados por el observador.

Obtenidos los resultados correspondientes al estudio de los umbrales diferenciales de color y al de las igualaciones en apariencia procedimos al tratamiento y análisis de éstos, cuyo desarrollo será objeto del siguiente apartado.

#### VI.4. TRATAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para determinar los umbrales diferenciales de color a partir de la nube de puntos que rodean a un determinado estímulo de referencia, se ha utilizado el método de ajuste basado en los estudios sobre propagación de errores en Colorimetría, Wyszecki (1959).

El método que se ha utilizado se basa en el análisis de la varianza y covarianza de los puntos en función de sus pesos estadísticos, ajustándose la mencionada nube de puntos a un elipsoide que recoge, al menos, el 95% de los puntos analizados y que representa la capacidad de discriminación asociada al observador en un determinado espacio tridimensional de representación, Hita y Romero (1981).

La ecuación del elipsoide en el diagrama de representación CIE 1931 viene dada como

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

donde A,B,C,D,E y F son los coeficientes característicos del elipsoide y  $(x_0, y_0, Y_0)$  representan las coordenadas del centro de éste. Mediante tal elipsoide de discriminación se puede determinar ciertos parámetros que caracterizan la capacidad de discriminación del observador tales como el volumen, semiejes, orientación, etc.

En el plano de cromaticidad el umbral diferencial de cromaticidad viene entonces caracterizado por una elipse de discriminación, correspondiente a una sección elíptica obtenida al cortar al elipsoide por un plano a luminancia constante; dicha ecuación adopta la forma

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

Nosotros hemos estudiado las secciones elípticas principales determinadas por el corte del plano a luminancia constante que pasa por el centro del elipsoide. De manera que la capacidad global de discriminación de un observador vendrá dada por el volumen del elipsoide de error y el umbral diferencial de cromaticidad vendrá caracterizado por el área, semiejes y orientación de la sec-

ción elíptica principal.

El umbral diferencial de luminancia viene expresado por medio del logaritmo de la fracción de Weber ( $\log (\Delta L/L)$ ). El cálculo seguido para determinar tal fracción de Weber a partir del elipsoide de discriminación fue determinar la línea de cromaticidad constante que pasa por el centro del elipsoide, y es paralela al eje de luminancias, y determinar así el  $\Delta L$  como la diferencia de luminancias de los puntos de corte con el elipsoide.

Todos los cálculos necesarios para llevar a cabo el ajuste de la nube de puntos al elipsoide de error se realizaron mediante un programa diseñado en FORTRAN V, y ejecutado en el ordenador que el Centro de Informática de esta Universidad dispone para sus usuarios.

También se realizaron estudios relativos a los umbrales diferenciales en las direcciones que determinan el estímulo de referencia y los estímulos primarios, sin más que determinar los pesos estadísticos de los puntos correspondientes a las variaciones de cada mando del colorímetro, manteniendo siempre fijos dos de éstos. El umbral vendrá caracterizado por los parámetros estadísticos correspondientes a la distribución normal de los puntos en cada dirección, la media y desviación típica, Hita y otros (1982a). Determinaremos el tamaño del umbral direccional como cuatro veces la desviación típica, puesto que  $\bar{x} \pm 2S$  representa el intervalo en la dirección determinada que recoge el 95% de los puntos analizados.

Por otro lado, hemos creído conveniente representar también los resultados obtenidos sobre los umbrales diferenciales de color en el sistema CIELUV descrito con anterioridad. Hemos de indicar que los elipsoides de discriminación se obtienen de igual forma que los correspondientes obtenidos en el sistema CIE 1931, y no a través de transformaciones de estos elipsoides al CIELUV, Hita y otros (1983-4) y Pointer (1981). Al evaluar las coordenadas de cromaticidad de los estímulos en el sistema CIELUV se ha tomado como estímulo acromático el equienergético, según las recomendaciones citadas a la hora de trabajar con luces directas.

Respecto al tratamiento de los resultados derivados del estudio de las igualaciones en apariencia, indicaremos que a éstos les fue aplicado el mismo programa de cálculo que se utilizó para la determinación de los umbrales, sólo que éste nos sirvió para determinar el estímulo de la igualación medido a través del centro del elipsoide que se obtiene al rodear al estímulo inicialmente igualado. Los elipsoides así determinados no representan realmente el umbral correspondiente al estímulo de la igualación en apariencia puesto que no era éste nuestro propósito, aunque los parámetros característicos de tales elipsoides sí pueden ser representativos de cada "umbral" a efectos de comparaciones relativas entre ellos.

## VII. RESULTADOS EXPERIMENTALES: ANALISIS Y DISCUSION

El estudio que hemos emprendido en el presente trabajo se enmarca dentro de dos campos claramente diferenciados, los cuales obedecen a las líneas de investigación que usualmente se han desarrollado en la Colorimetría.

De una parte, el estudio de los umbrales diferenciales de color ha sentado las bases de la Colorimetría Diferencial al tratar de explicar, en función de los resultados derivados de las distintas investigaciones, cómo actúan los mecanismos responsables de la visión del color cuando el ojo humano ha de discriminar entre estímulos que se le presentan bajo unas determinadas condiciones de observación.

Paralelamente, al menos así lo hemos podido constatar en la revisión bibliográfica de los trabajos realizados, fundamentalmente desde la década de los cuarenta pues a partir de entonces

se profundiza más sobre las bases de la Colorimetría establecidas por diferentes autores, se han emprendido también una serie de trabajos que, de otro lado, trataban de explicar cómo actúan los mencionados mecanismos visuales cuando un determinado observador trata de establecer igualaciones de color; en este caso quizá con un mayor interés de tipo técnico y comercial.

En este apartado describiremos en primer lugar los resultados experimentales obtenidos cuando se ha evaluado la influencia de la adaptación cromática sobre comparaciones sucesivas de color, teniendo en cuenta los ya mencionados campos donde se ha desarrollado nuestra investigación.

Hemos de indicar que bajo el estudio general de las discriminaciones de color, se han evaluado tanto los parámetros que representan la capacidad de discriminación de ambos observadores, asociados éstos a los umbrales diferenciales, como los correspondientes cuando tal capacidad diferencial se analiza a lo largo de determinadas direcciones del espacio, que como hemos mencionado anteriormente vienen determinadas por los estímulos primarios utilizados y los de referencia seleccionados.

Pasemos entonces a describir los resultados obtenidos en el estudio de las discriminaciones e igualaciones de color bajo diferentes condiciones de adaptación, para finalizar con el posterior análisis y discusión de los mismos.

## VII.1. DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS

### VII.1.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS DISCRIMINACIONES DE COLOR

Como hemos indicado, en el estudio de las discriminaciones de color para los tres estímulos analizados, las cinco adaptaciones consideradas y para ambos observadores, se han evaluado los distintos parámetros característicos de los umbrales diferenciales: el volumen y el umbral de luminancia para medir la capacidad global de discriminación, referida a los elipsoides de error, y el área, orientación, relación de semiejes y los centros de las secciones elípticas principales que caracterizan a los umbrales diferenciales de cromaticidad.

En las Tablas VII.1 y VII.2 aparecen tales parámetros para cada observador. En la Tabla VII.3 mostramos los valores promediados sobre ambos observadores.

En las Figuras VII.1, 2 y 3 se representan en el diagrama CIE 1931 las secciones elípticas principales correspondientes a los tres estímulos analizados bajo las cinco adaptaciones consideradas para cada uno de los observadores.



OBSERVADOR: AC

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>VOLUMEN</u>	<u>AREA</u>	<u>ORIEN.</u>	Log. <u>F.W.</u>	<u>REL.</u> <u>SEMI.</u>	<u>CENTRO</u>
A	A	.00039	.00054	72.1°	-.923	.298	x=.218 y=.218
Z	V	.00024	.00034	73.5°	-.968	.276	x=.217 y=.215
U	R	.00187	.00158	70.0°	-.715	.579	x=.221 y=.220
L	Ac	.00033	.00041	72.4°	-.936	.257	x=.217 y=.215
	O	.00029	.00057	71.2°	-1.044	.275	x=.217 y=.218
V	A	.00248	.00419	73.8°	-1.004	.130	x=.294 y=.484
E	V	.00105	.00182	76.6°	-1.002	.336	x=.296 y=.491
R	R	.00772	.00546	89.5°	-.624	.674	x=.299 y=.495
D	Ac	.00252	.00366	75.1°	-.917	.429	x=.297 y=.494
E	O	.00204	.00264	74.4°	-.917	.241	x=.300 y=.495
R	A	.00118	.00254	43.6°	-1.112	.121	x=.480 y=.342
O	V	.00107	.00183	40.9°	-1.011	.257	x=.483 y=.346
J	R	.00268	.00235	24.6°	-.734	.725	x=.488 y=.342
O	Ac	.00045	.00077	38.9°	-1.130	.383	x=.483 y=.340
	O	.00066	.00156	41.7°	-1.163	.157	x=.483 y=.340

Coordenadas de los estímulos: AZUL x=.219 y=.217  
 VERDE x=.298 y=.493  
 ROJO x=.483 y=.342

Tabla VII.1 Resultados obtenidos por el observador AC correspondientes a los umbrales de discriminación según los tres estímulos y adaptaciones analizados, en el diagrama de representación CIE 1931.

OBSERVADOR: JR

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>VOLUMEN</u>	<u>AREA</u>	<u>ORIEN.</u>	<u>Log.</u> <u>F.W.</u>	<u>REL.</u> <u>SEMI.</u>	<u>CENTRO</u>
A	A	.00031	.00046	-71.8°	- .949	.538	x=.217 y=.218
Z	V	.00046	.00066	71.9°	- .952	.170	x=.218 y=.217
U	R	.00326	.00196	65.1°	- .618	.731	x=.222 y=.219
L	Ac	.00035	.00054	71.8°	- .967	.247	x=.217 y=.215
	O	.00046	.00059	72.4°	- .903	.253	x=.217 y=.213
V	A	.00384	.00440	74.0°	- .869	.155	x=.295 y=.495
E	V	.00240	.00276	96.7°	- .824	.784	x=.295 y=.498
R	R	.00735	.00495	-38.1°	- .640	.439	x=.304 y=.490
D	Ac	.00104	.00198	75.0°	-1.036	.353	x=.299 y=.492
E	O	.00198	.00295	74.7°	- .937	.312	x=.299 y=.491
R	A	.00249	.00345	42.2°	- .999	.162	x=.477 y=.341
O	V	.00155	.00211	40.3°	- .914	.353	x=.479 y=.343
J	R	.00118	.00116	- 5.6°	- .828	.753	x=.485 y=.339
O	Ac	.00071	.00095	11.7°	- .902	.733	x=.482 y=.341
	O	.00226	.00308	41.9°	- .904	.261	x=.476 y=.337

Coordenadas de los estímulos:   AZUL   x=.219   y=.217  
   VERDE   x=.298   y=.493  
   ROJO    x=.483   y=.342

Tabla VII.2 Resultados obtenidos por el observador JR correspondientes a los umbrales de discriminación según los tres estímulos y adaptaciones analizados, en diagrama de representación CIE 1931.

VALORES PROMEDIADOS

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>VOLUMEN</u>	<u>AREA</u>	<u>ORIEN.</u>	<u>Log. F.W.</u>	<u>REL. SEMI.</u>
A	A	.00035	.00050	72.0°	- .936	.418
Z	V	.00035	.00050	72.7°	- .960	.223
U	R	.00257	.00177	67.6°	- .666	.655
L	Ac	.00034	.00048	72.1°	- .951	.252
	O	.00038	.00058	71.8°	- .974	.264
V	A	.00316	.00430	73.9°	- .937	.143
E	V	.00173	.00229	86.7°	- .913	.560
R	R	.00754	.00521	115.7°	- .632	.557
D	Ac	.00178	.00282	75.1°	- .977	.391
E	O	.00201	.00280	74.6°	- .927	.277
R	A	.00184	.00300	42.9°	-1.055	.142
O	V	.00131	.00197	40.6°	- .962	.305
J	R	.00193	.00176	99.5°	- .784	.739
O	Ac	.00058	.00086	25.3°	-1.016	.558
	O	.00146	.00232	41.8°	-1.033	.209

Coordenadas de los estímulos:    AZUL    x=.219    y=.217  
    VERDE    x=.298    y=.493  
    ROJO    x=.483    y=.342

Tabla VII.3 Resultados promediados a los dos observadores correspondientes a los umbrales de discriminación, en el diagrama de representación CIE 1931.

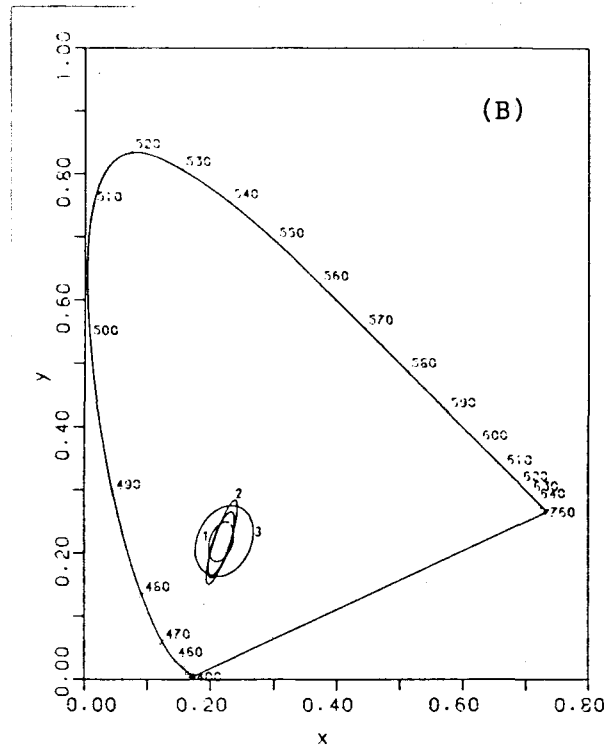
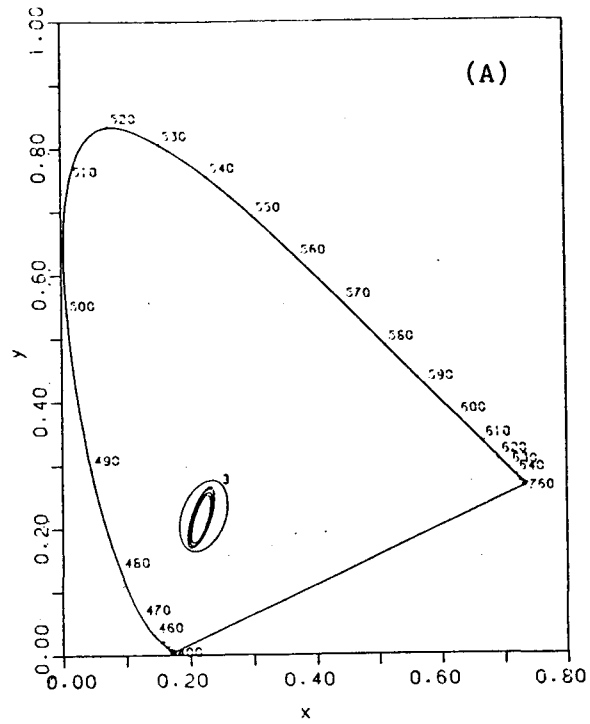


Figura VII.1 Secciones elípticas principales de discriminación para el estímulo AZUL. Observadores: (A)AC y (B) JR. Adaptaciones: 1 Azul, 2 Verde, 3 Roja, 4 Acromática y 5 Oscuridad. Ampliadas cuatro veces su tamaño real.

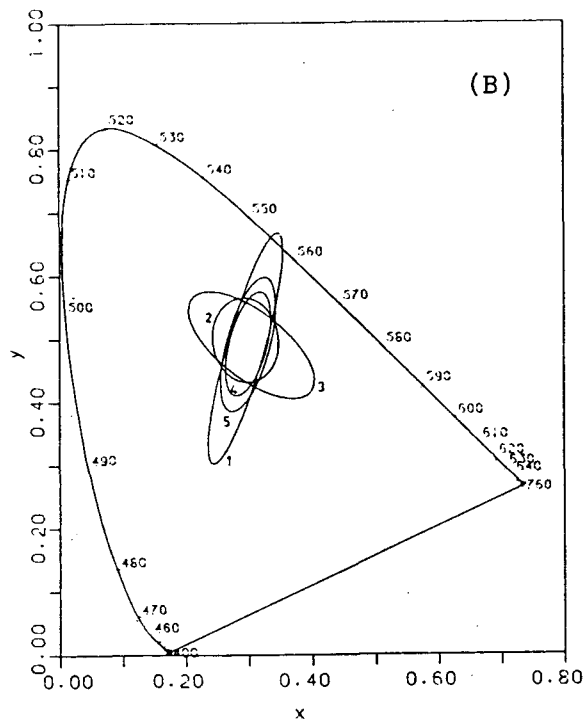
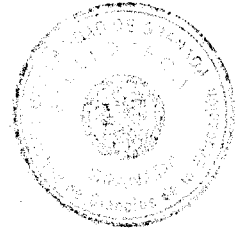
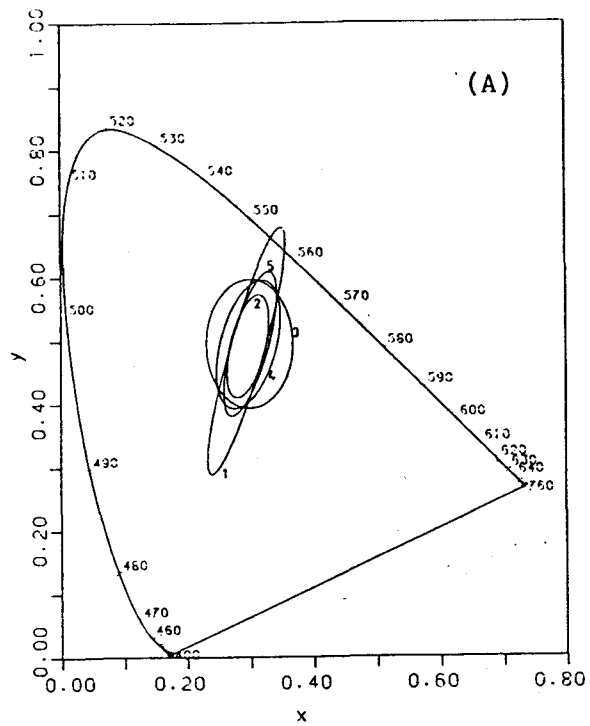


Figura VII.2 Secciones elípticas principales de discriminación para el estímulo VERDE. Observadores: (A) AC y (B) JR. Adaptaciones: 1 Azul, 2 Verde, 3 Roja, 4 Acromática y 5 Oscuridad. Ampliadas cuatro veces su tamaño real.

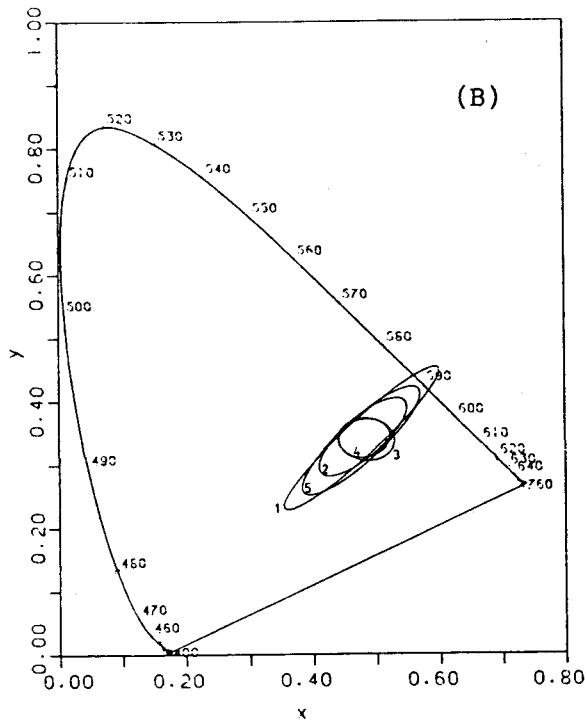
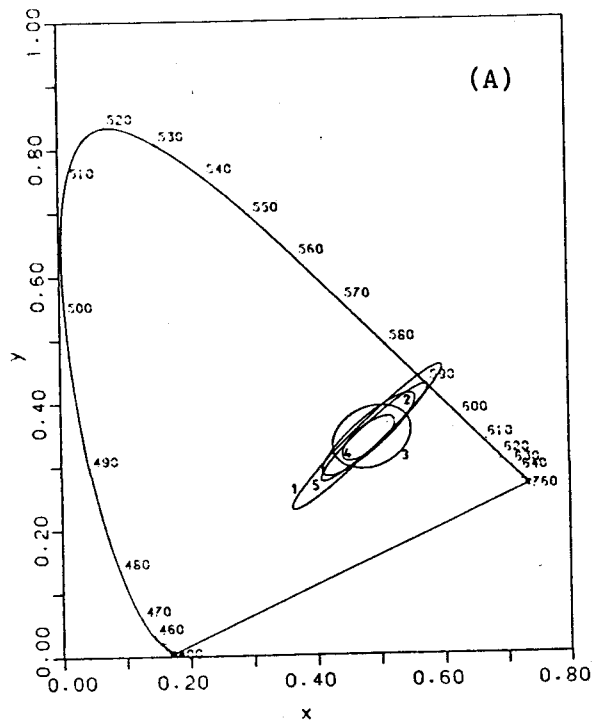


Figura VII.3 Secciones elípticas principales de discriminación para el estímulo ROJO. Observadores: (A)AC y (B) JR. Adaptaciones: 1 Azul, 2 Verde, 3 Roja, 4 Acromática y 5 Oscuridad. Ampliadas cuatro veces su tamaño real.

A continuación presentamos las Figuras VII.4, 5, 6, 7 y 8 en donde se han realizado estudios comparativos, entre los dos observadores empleados en nuestra investigación, de los parámetros característicos de los umbrales diferenciales correspondientes a cada estímulo y condiciones de adaptación: volúmenes de los elipsoides, umbrales de luminancia, áreas de las secciones elípticas principales, orientaciones y relaciones de semiejes de las mencionadas secciones.

Pasamos seguidamente a presentar en las Figuras VII.9, 10, 11, 12 y 13 los valores promediados sobre ambos observadores de los parámetros característicos de los umbrales de discriminación. Con este estudio podemos analizar cuáles son las tendencias de las evoluciones de los citados parámetros conforme se cambia de adaptación.

Tales estudios se pueden realizar en base a la gran similitud de los resultados obtenidos por ambos observadores, y que se desprende del análisis de los datos aportados.

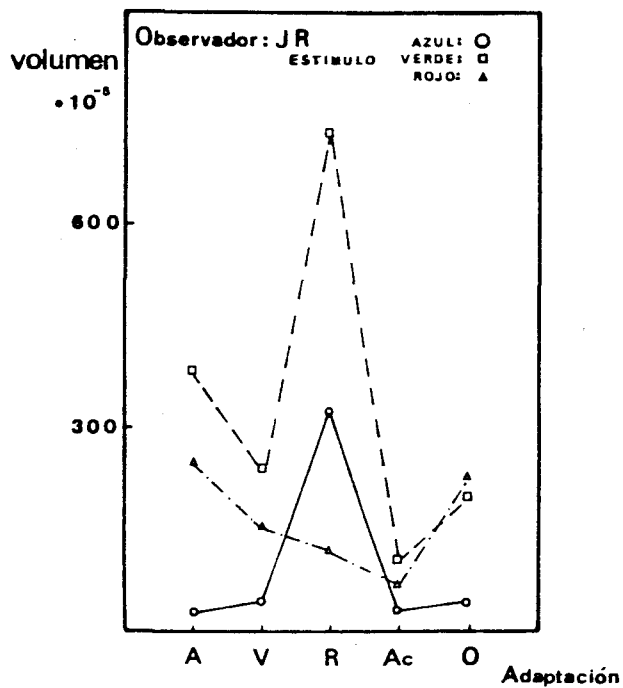
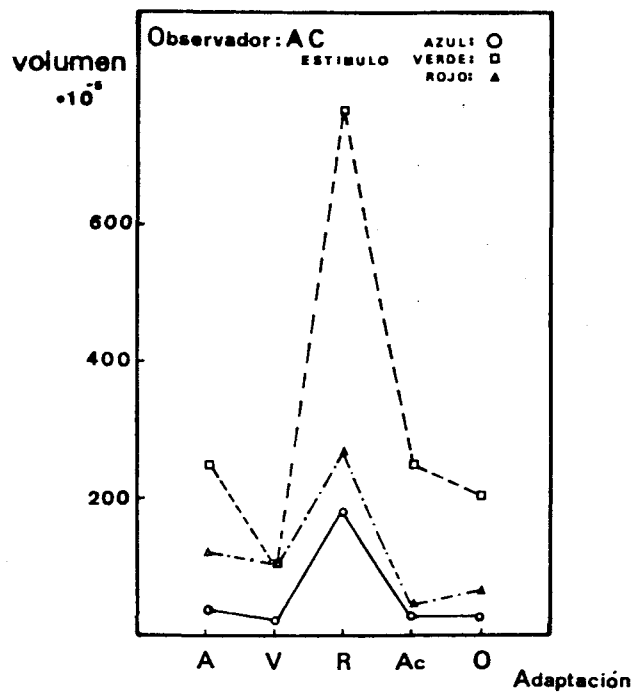


Figura VII.4 Volumen de los elipsoides de discriminación para ambos observadores.



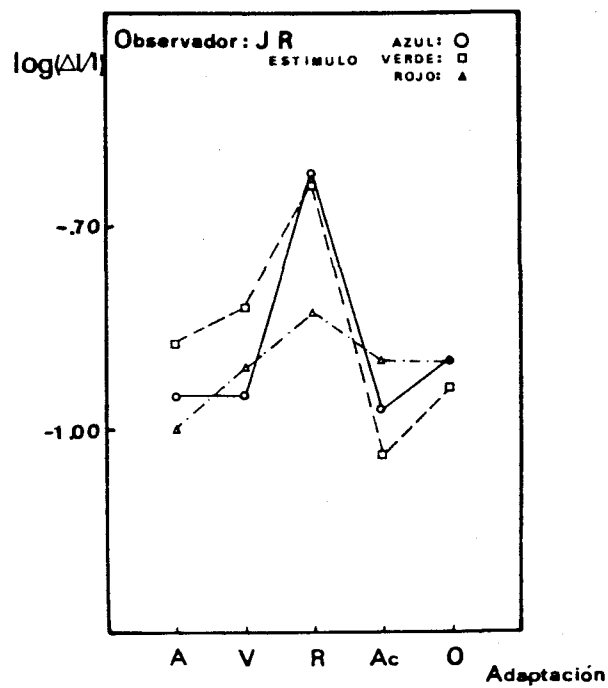
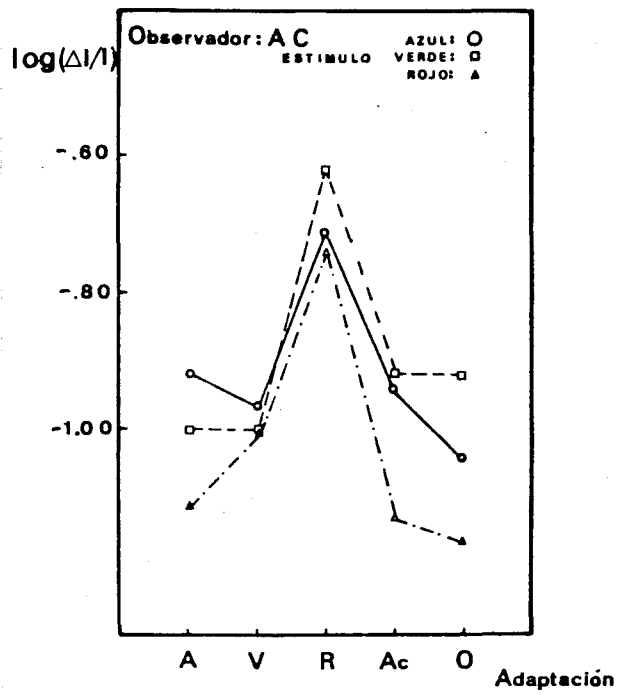


Figura VII.5 Logaritmo de los umbrales de luminancia correspondientes a ambos observadores.

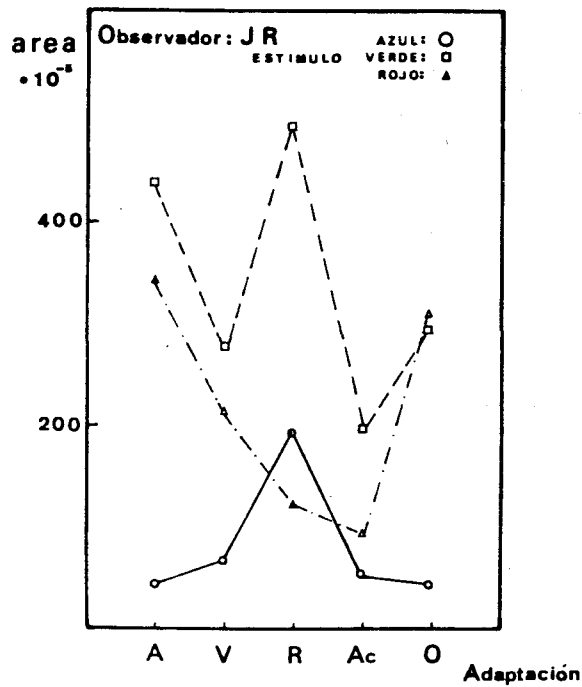
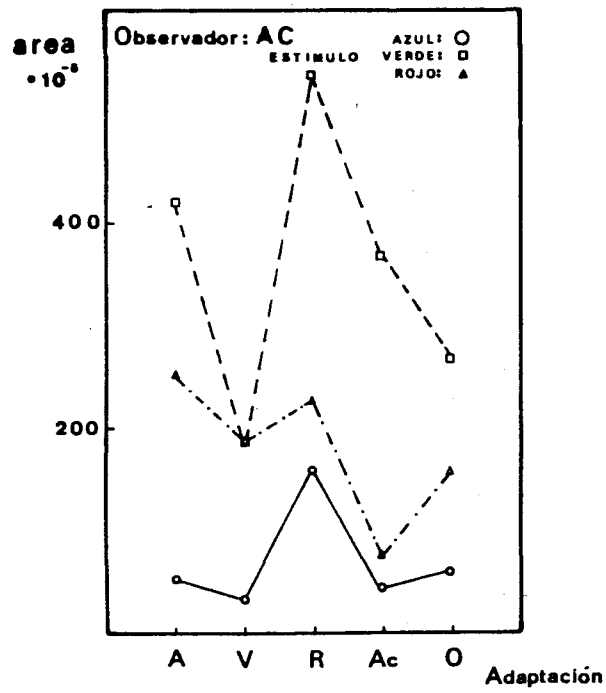


Figura VII.6 Area de las secciones elípticas principales correspondientes a los umbrales diferenciales de cromaticidad para ambos observadores.

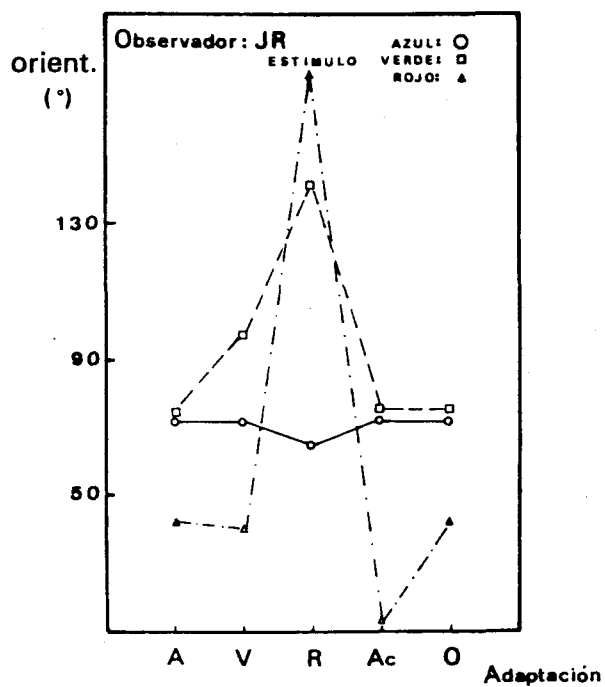
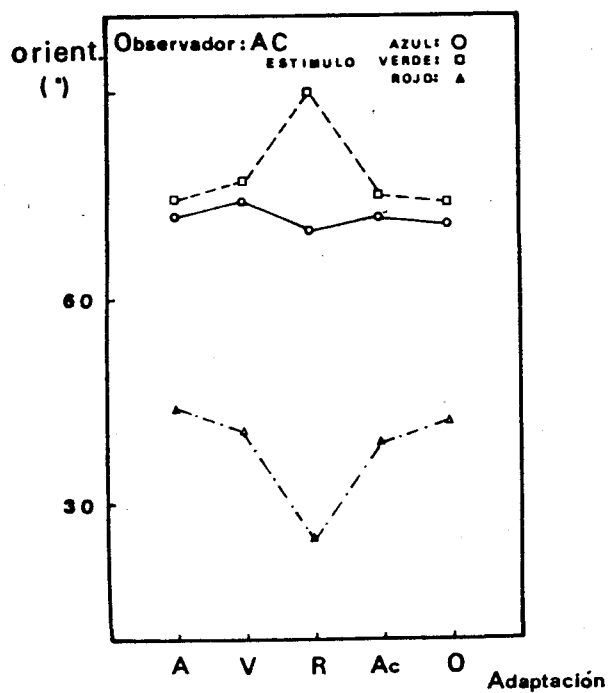


Figura VII.7 Orientación de las secciones elípticas principales correspondientes a cada observador.

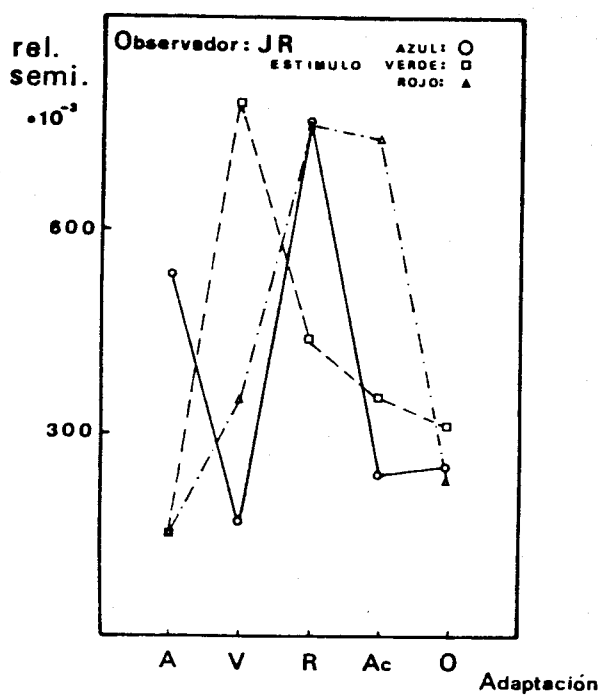
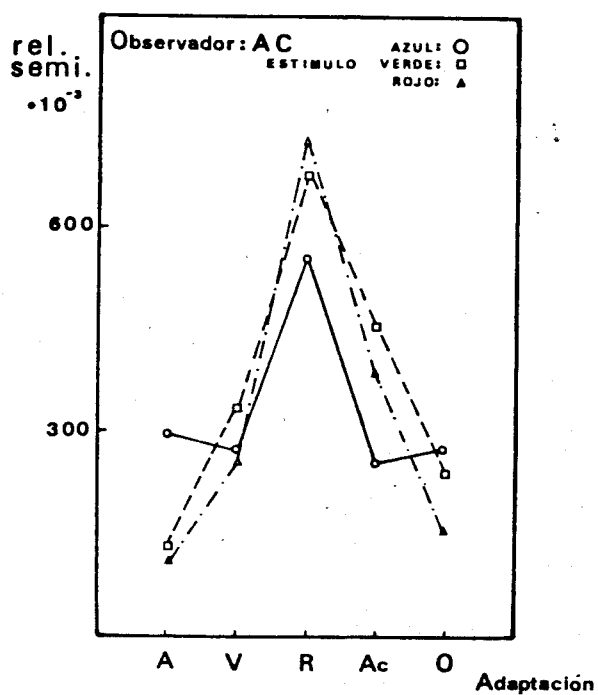


Figura VII.8 Relación de semiejes de las secciones elípticas principales correspondientes a cada observador.

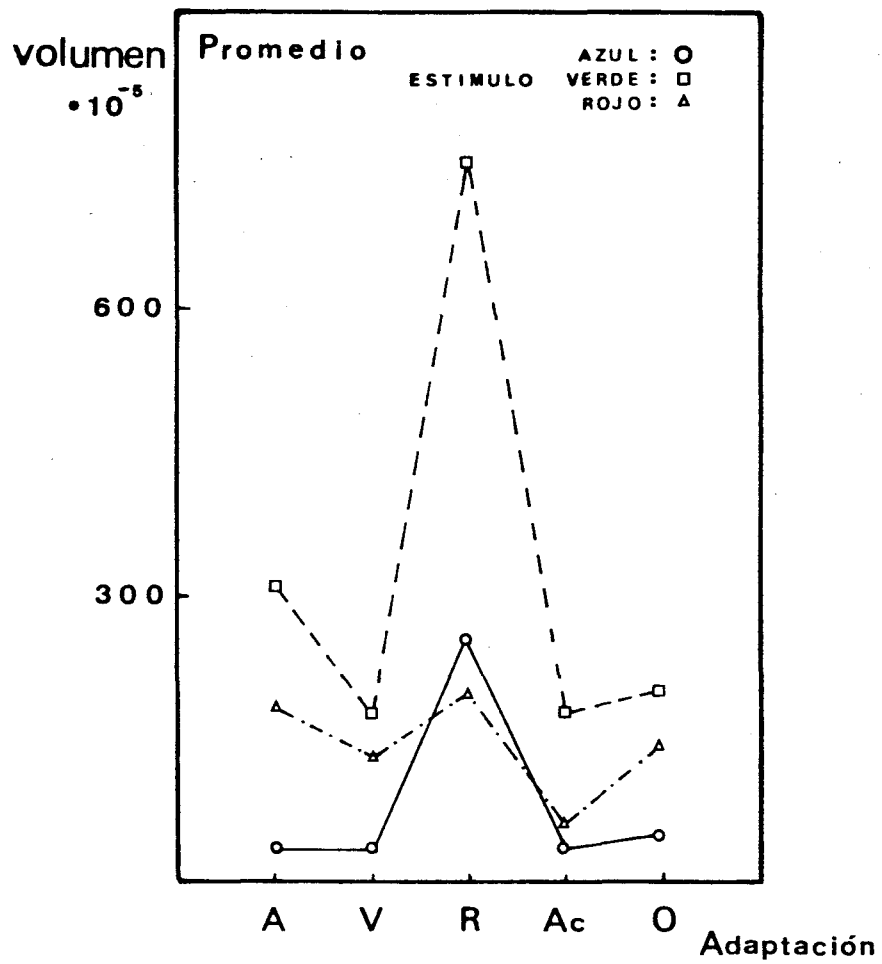


Figura VII.9 Valores promediados sobre ambos observadores de los volúmenes de los elipsoides de discriminación.

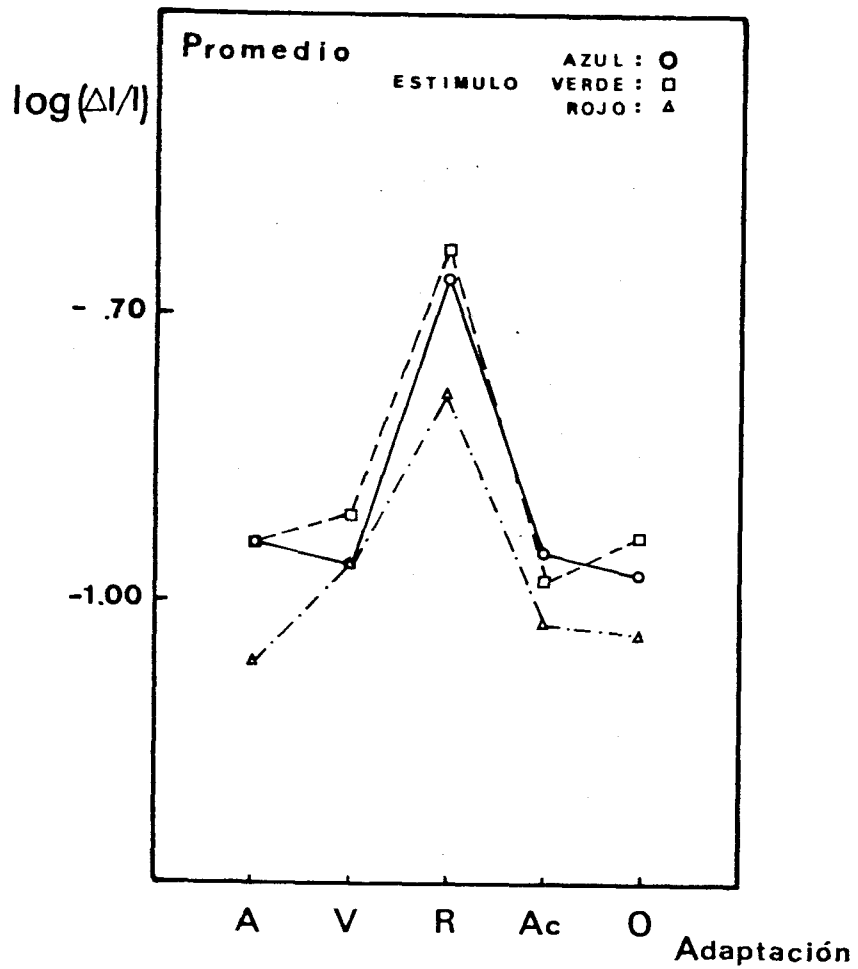


Figura VII.10 Valores promediados sobre ambos observadores de los logaritmos de los umbrales de luminancia.

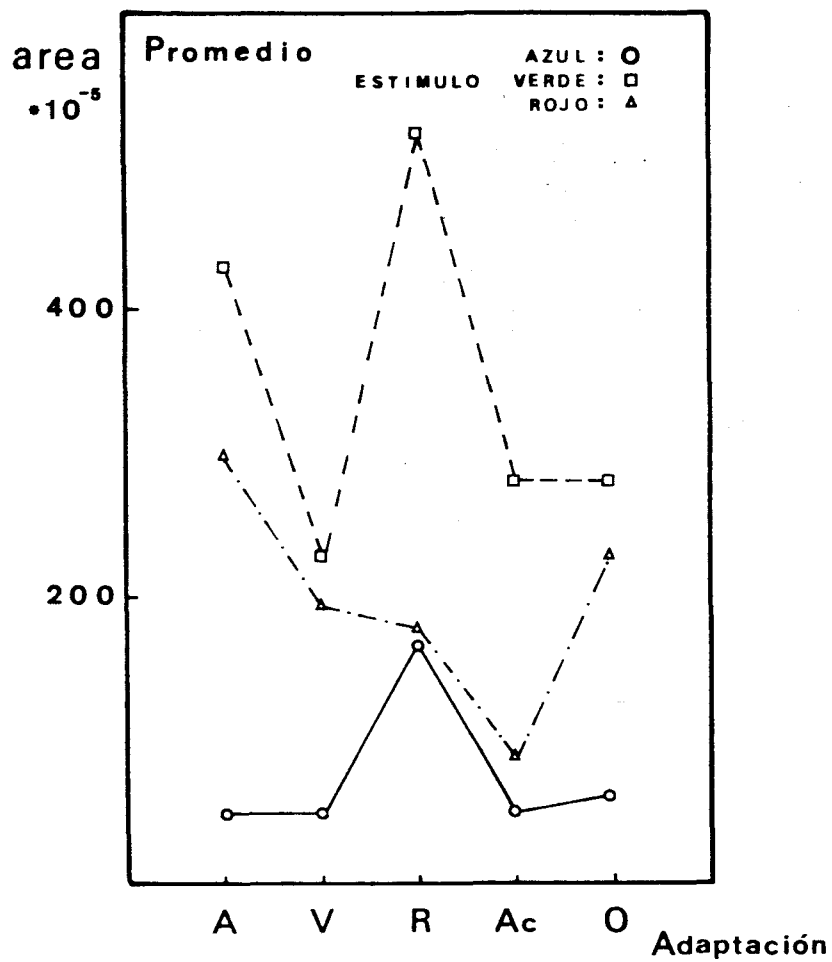


Figura VII.11 Valores promediados sobre ambos observadores de las áreas de las secciones elípticas principales.

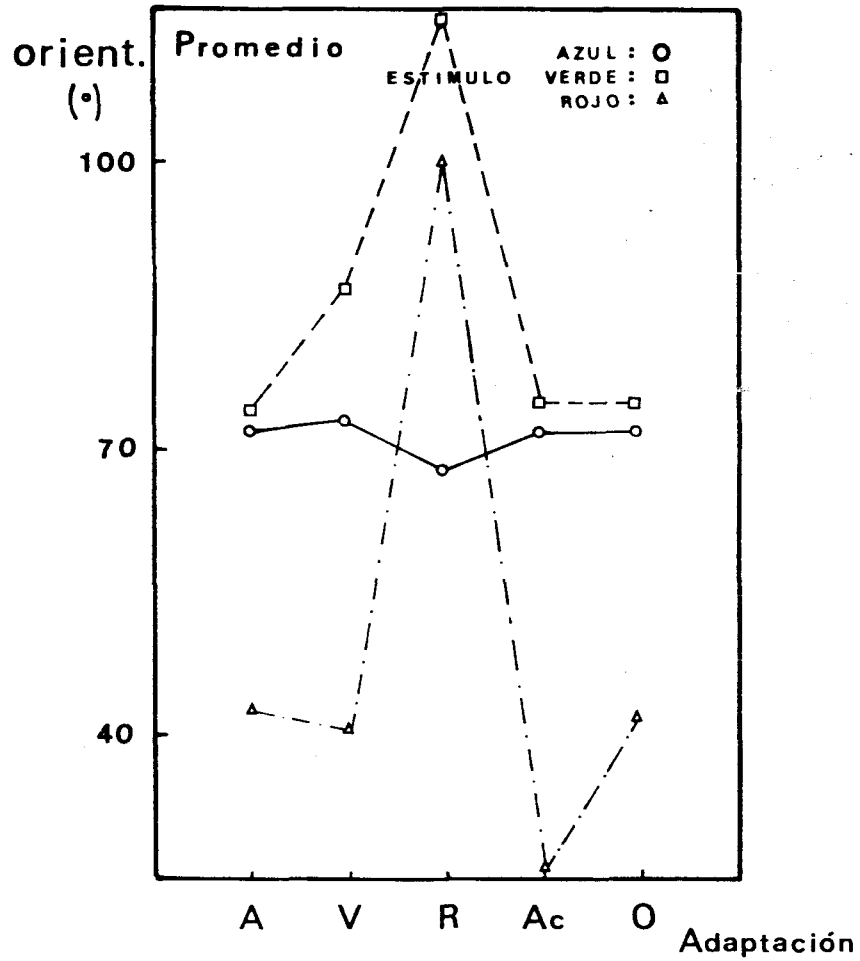


Figura VII.12 Valores promediados sobre ambos observadores de las orientaciones de las secciones elípticas principales.



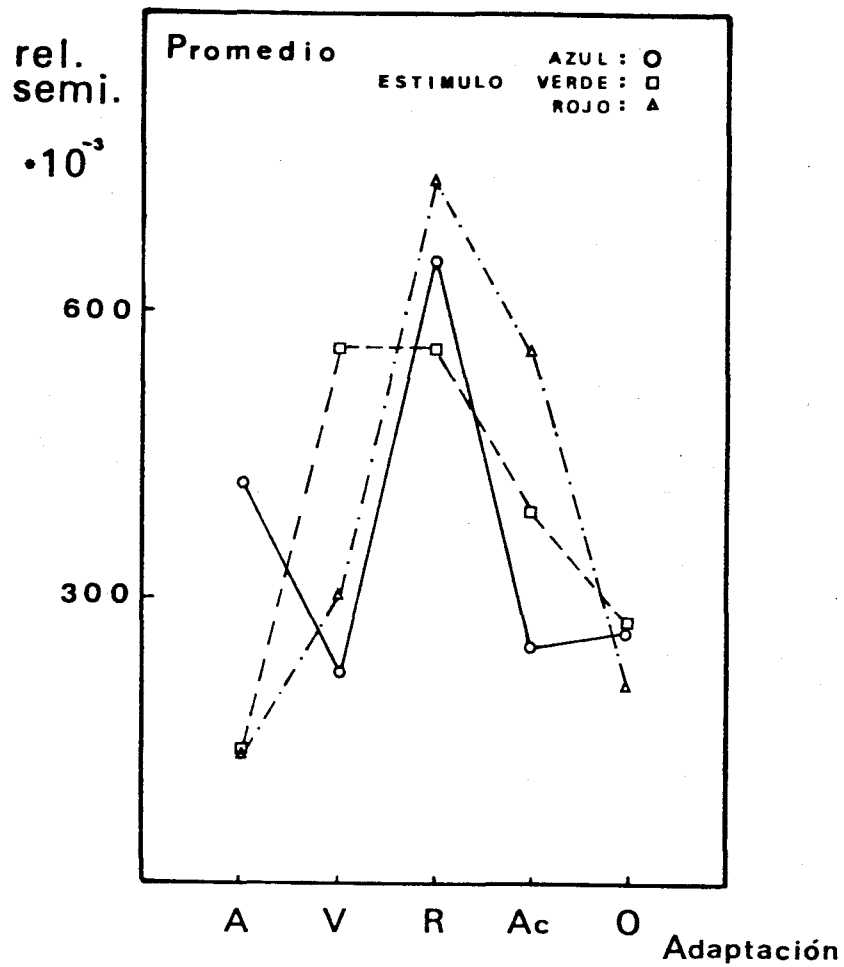


Figura VII.13 Valores promediados sobre ambos observadores de las relaciones de semiejes de las secciones elípticas principales.

Dentro del presente estudio sobre umbrales de discriminación hemos emprendido otro relativo a la determinación de umbrales de discriminación de color en las direcciones del espacio que determinan los estímulos analizados con los estímulos primarios.

El objetivo de este estudio radica en el interés que en el campo de los fenómenos perceptivos pueda presentar el análisis de la influencia de la adaptación, mediante cada uno de los primarios del dispositivo, sobre la capacidad de discriminación, supuesta ésta influida por la actuación que sobre los mecanismos receptores pudiera presentar la mayor o menor saturación de los fotorreceptores correspondientes, y que podría traducirse en una inhibición en la respuesta final, Bartleson (1977).

En las Tablas VII.4 y VII.5 mostramos los tamaños de los umbrales direccionales correspondientes a cada observador y para cada estímulo de referencia, adaptación y direcciones según los estímulos primarios. Tales umbrales vienen caracterizados por un segmento de longitud el tamaño del umbral, que corresponde a cuatro veces la desviación típica de la distribución de estímulos variables según sus pesos estadísticos, y por el centro del mismo que corresponde al punto medio de la distribución de estímulos en cada una de las direcciones consideradas.

En la Tabla VII.6 aparecen tales resultados cuando éstos se promedian a ambos observadores.

OBSERVADOR: AC

ESTI.	ADAP.	DIRECCION	UMBRAL DIRECCIONAL	PUNTO MEDIO	
				x	y
A	A	Azul	.0439	.218	.217
		Verde	.0285	.218	.219
		Roja	.0162	.218	.219
Z	V	Azul	.0337	.217	.213
		Verde	.0243	.217	.219
		Roja	.0123	.217	.216
U	R	Azul	.0576	.219	.219
		Verde	.0442	.218	.223
		Roja	.0315	.225	.219
L	Ac	Azul	.0414	.217	.214
		Verde	.0283	.218	.217
		Roja	.0135	.217	.216
	O	Azul	.0453	.217	.216
		Verde	.0180	.218	.222
		Roja	.0169	.217	.219
V	A	Azul	.1683	.294	.480
		Verde	.0398	.297	.496
		Roja	.0339	.295	.495
E	V	Azul	.0749	.297	.488
		Verde	.0304	.298	.495
		Roja	.0294	.295	.495
R	R	Azul	.1063	.299	.495
		Verde	.0692	.296	.497
		Roja	.0718	.300	.493
D	Ac	Azul	.1007	.299	.494
		Verde	.0368	.297	.494
		Roja	.0463	.294	.493
E	O	Azul	.1032	.300	.497
		Verde	.0463	.297	.493
		Roja	.0352	.300	.490

Continúa

Continuación.

ESTI.	ADAP.	DIRECCION	UMBRAL DIRECCIONAL	PUNTO MEDIO		
				x	y	
R	A	Azul	.1412	.480	.341	
		Verde	.0277	.479	.343	
		Roja	.0254	.480	.342	
O	V	Azul	.0840	.486	.347	
		Verde	.0243	.478	.345	
		Roja	.0515	.482	.341	
J	R	Azul	.0685	.489	.346	
		Verde	.0410	.480	.343	
		Roja	.0460	.489	.338	
O	Ac	Azul	.0506	.483	.340	
		Verde	.0166	.482	.341	
		Roja	.0307	.482	.340	
	O		Azul	.0867	.497	.353
			Verde	.0208	.482	.341
			Roja	.0245	.482	.340

Coordenadas de los estímulos:    AZUL    x=.219    y=.217  
    VERDE    x=.298    y=.493  
    ROJO    x=.483    y=.342

Tabla VII.4 Resultados obtenidos por el observador AC correspondientes a los umbrales direccionales de discriminación para los tres estímulos y adaptaciones analizados.

OBSERVADOR: JR.

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>DIRECCION</u>	<u>UMBRAL DIRECCIONAL</u>	<u>PUNTO</u> <u>x</u>	<u>MEDIO</u> <u>y</u>
A		Azul	.0315	.218	.217
	A	Verde	.0248	.218	.219
		Roja	.0183	.217	.219
Z		Azul	.0612	.218	.217
	V	Verde	.0285	.218	.215
		Roja	.0146	.216	.215
U		Azul	.0623	.218	.217
	R	Verde	.0648	.218	.223
		Roja	.0372	.226	.220
L		Azul	.0472	.218	.215
	Ac	Verde	.0267	.218	.215
		Roja	.0152	.217	.216
		Azul	.0464	.216	.211
	O	Verde	.0306	.217	.218
		Roja	.0158	.218	.216
V		Azul	.1636	.295	.480
	A	Verde	.0513	.297	.494
		Roja	.0360	.295	.493
E		Azul	.0654	.299	.496
	V	Verde	.0383	.296	.498
		Roja	.0525	.291	.497
R		Azul	.0745	.298	.493
	R	Verde	.0713	.305	.482
		Roja	.1040	.309	.488
D		Azul	.0805	.299	.493
	Ac	Verde	.0281	.298	.491
		Roja	.0315	.298	.492
E		Azul	.1027	.298	.491
	O	Verde	.0385	.298	.491
		Roja	.0381	.300	.490

Continúa

Continuación

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>DIRECCION</u>	<u>UMBRAL DIRECCIONAL</u>	<u>PUNTO</u> <u>x</u>	<u>MEDIO</u> <u>y</u>
R		Azul	.1468	.478	.339
	A	Verde	.0306	.478	.344
		Roja	.0408	.475	.343
O		Azul	.0831	.482	.343
	V	Verde	.0311	.478	.344
		Roja	.0333	.476	.343
J		Azul	.0439	.484	.341
	R	Verde	.0353	.484	.338
		Roja	.0442	.487	.339
O		Azul	.0405	.484	.341
	Ac	Verde	.0284	.481	.343
		Roja	.0322	.482	.340
		Azul	.1124	.473	.334
	O	Verde	.0357	.482	.339
		Roja	.0350	.481	.341

Coordenadas de los estímulos:    AZUL    x=.219    y=.217  
    VERDE    x=.298    y=.493  
    ROJO    x=.483    y=.342

Tabla VII.5 Resultados obtenidos por el observador JR correspondientes a los umbrales direccionales de discriminación para los tres estímulos y adaptaciones analizadas.

VALORES PROMEDIADOS

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>DIRECCION</u>	<u>UMBRAL DIRECCIONAL</u>
A		Azul	.0377
	A	Verde	.0267
		Roja	.0173
Z		Azul	.0475
	V	Verde	.0264
		Roja	.0135
U		Azul	.0600
	R	Verde	.0545
		Roja	.0344
L		Azul	.0443
	Ac	Verde	.0275
		Roja	.0144
		Azul	.0459
	O	Verde	.0243
		Roja	.0164
V		Azul	.1660
	A	Verde	.0456
		Roja	.0350
E		Azul	.0702
	V	Verde	.0344
		Roja	.0410
R		Azul	.0904
	R	Verde	.0703
		Roja	.0879
D		Azul	.0906
	Ac	Verde	.0325
		Roja	.0389
E		Azul	.1030
	O	Verde	.0424
		Roja	.0367

Continúa

Continuación

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>DIRECCION</u>	<u>UMBRAL DIRECCIONAL</u>	
R	A	Azul	.1440	
		Verde	.0292	
		Roja	.0331	
O	V	Azul	.0836	
		Verde	.0277	
		Roja	.0424	
J	R	Azul	.0562	
		Verde	.0382	
		Roja	.0451	
O	Ac	Azul	.0456	
		Verde	.0225	
		Roja	.0315	
	O	O	Azul	.0996
			Verde	.0283
			Roja	.0298

Coordenadas de los estímulos:      AZUL    x=.219    y=.217  
    VERDE    x=.298    y=.493  
    ROJO    x=.483    y=.342

Tabla VII.6 Valores promediados a los dos observadores correspondientes a los umbrales direccionales de discriminación para los tres estímulos y adaptaciones analizadas.



A continuación representamos en las Figuras VII.14, 15 y 16 los tamaños de los umbrales direccionales correspondientes a los estímulos AZUL, VERDE y ROJO, para cada observador y condiciones de adaptación, según las tres direcciones de los primarios.

Asimismo, en las Figuras VII.17, 18 y 19 presentamos los tamaños de estos umbrales, pero esta vez referidos a las direcciones de cada uno de los primarios azul, verde y rojo, correspondientes a cada observador y para los estímulos y adaptaciones analizados.

En las Figuras VII.20, 21, 22, 23, 24 y 25 mostramos finalmente los tamaños promediados de los umbrales direccionales sobre ambos observadores, correspondientes a los dos estudios anteriormente mencionados.

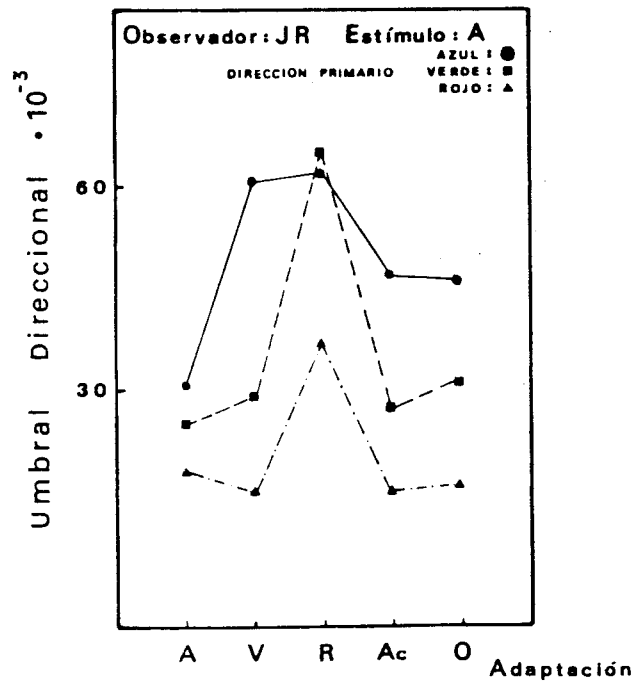
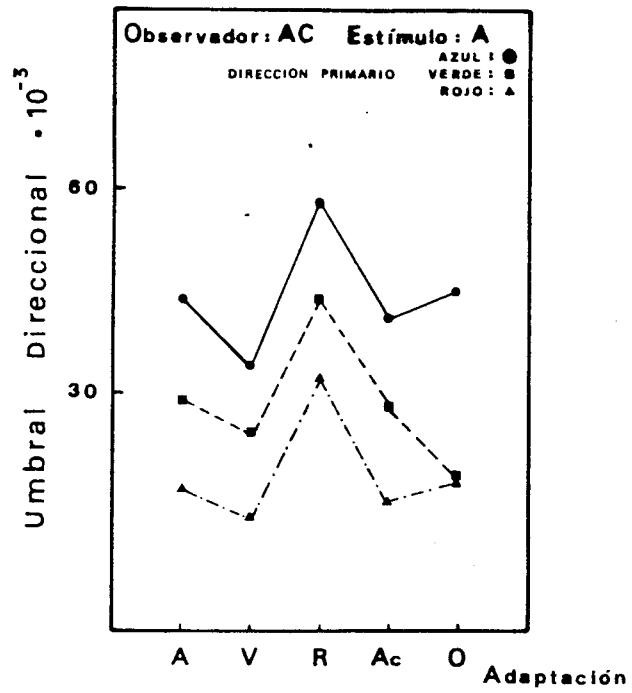


Figura VII.14 Umbral direccional para el estímulo AZUL según las tres direcciones de los estímulos primarios y cada observador.

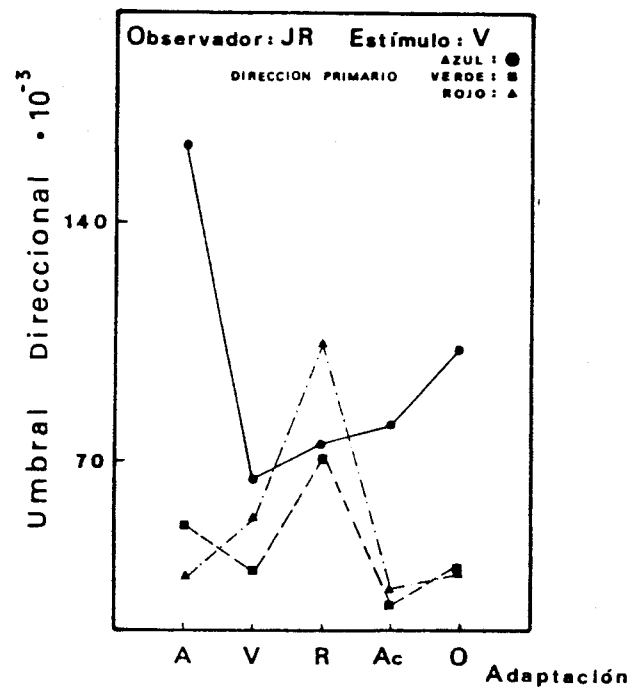
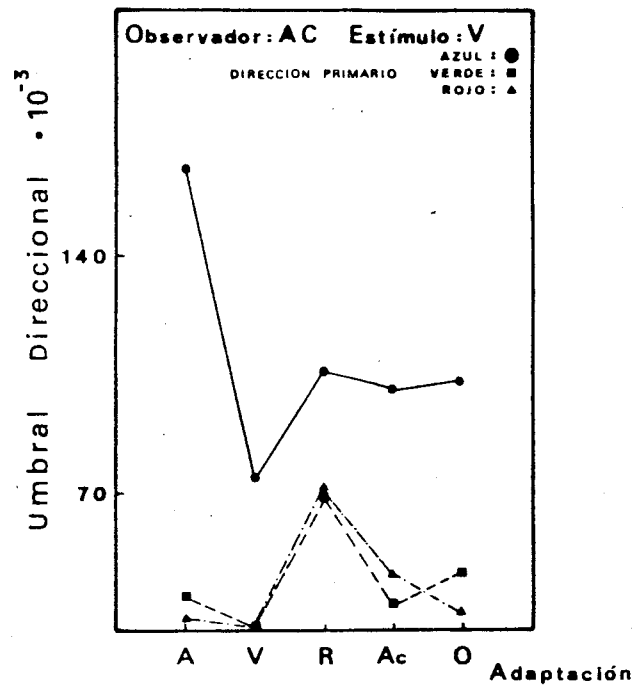


Figura VII.15 Umbral direccional para el estímulo VERDE según las tres direcciones de los estímulos primarios y cada observador.

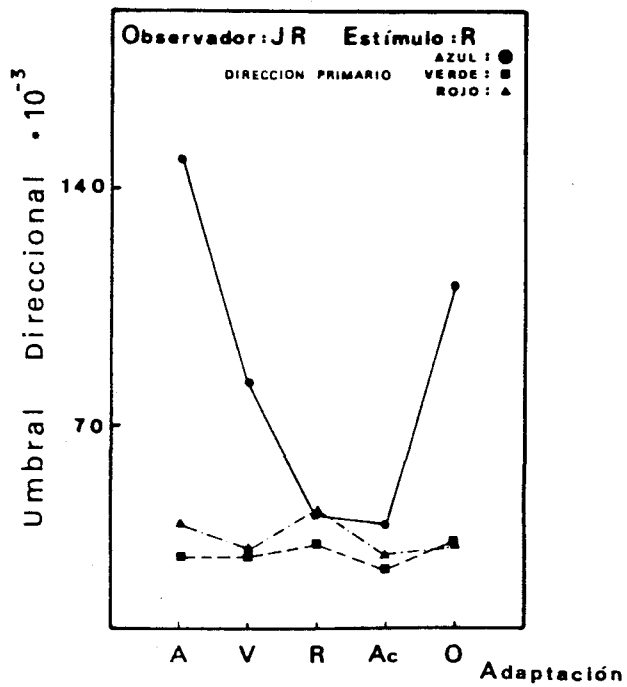
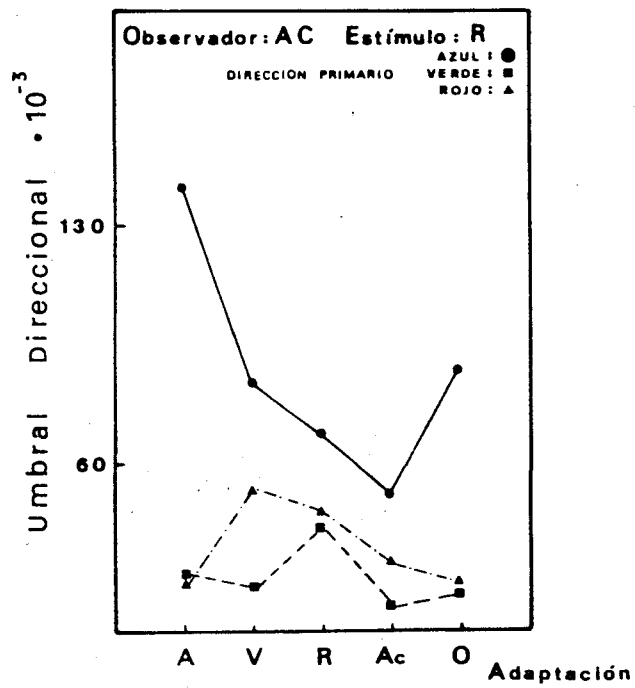


Figura VII.16 Umbral direccional para el estímulo ROJO según las tres direcciones de los estímulos primarios y cada observador.

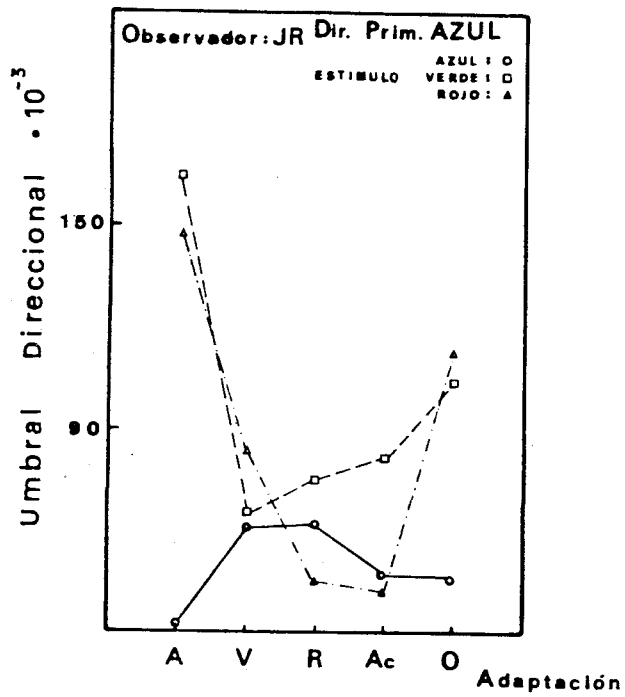
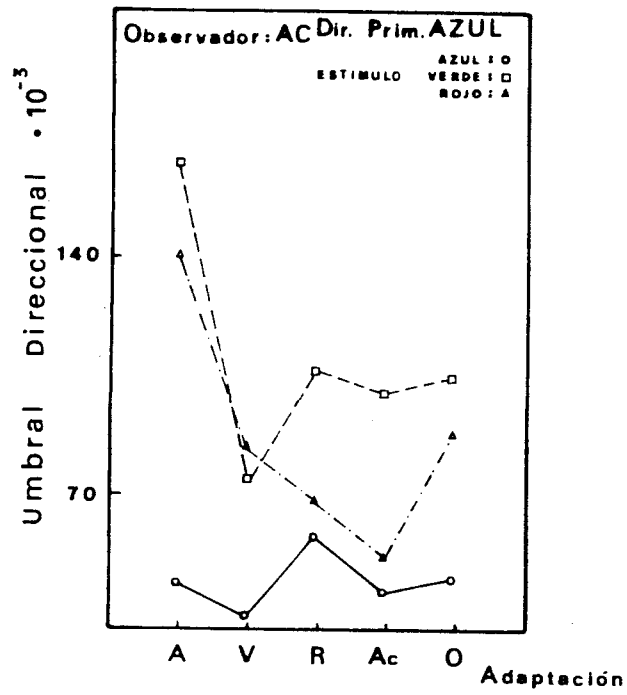


Figura VII.17 Umbral en la dirección del primario AZUL correspondiente a los tres estímulos estudiados y para cada observador.

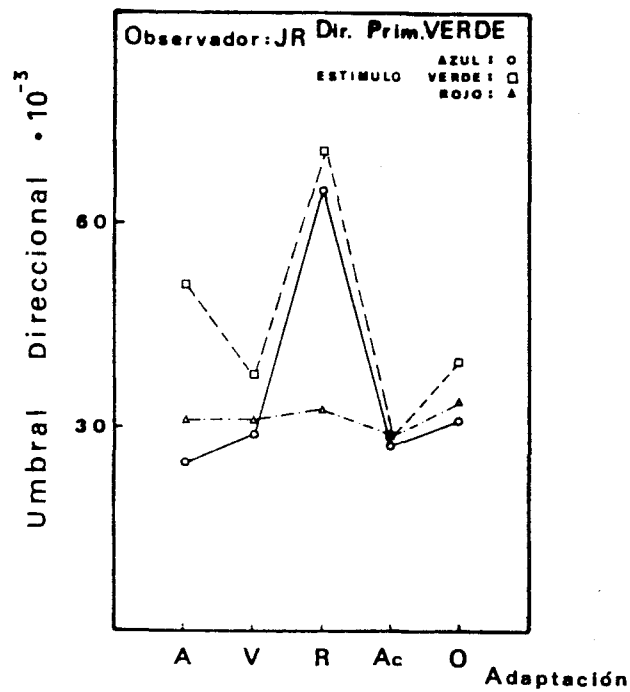
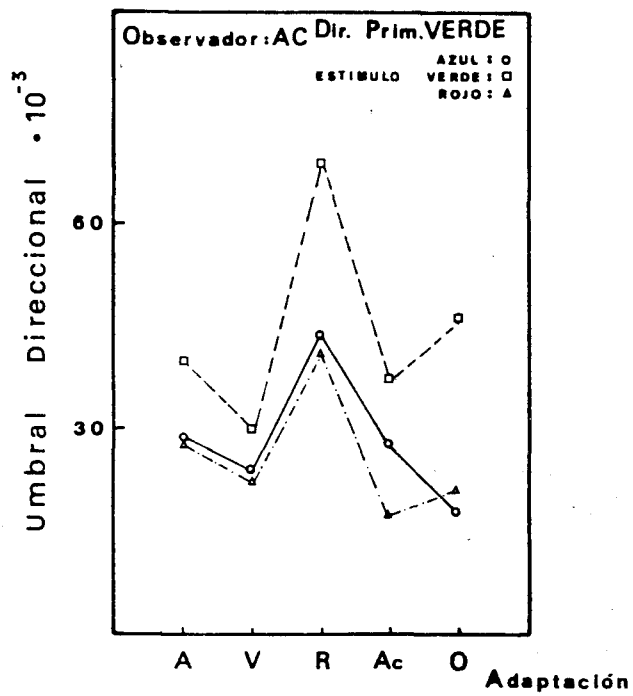


Figura VII.18 Umbral en la dirección del primario VERDE correspondiente a los tres estímulos estudiados y para cada observador.

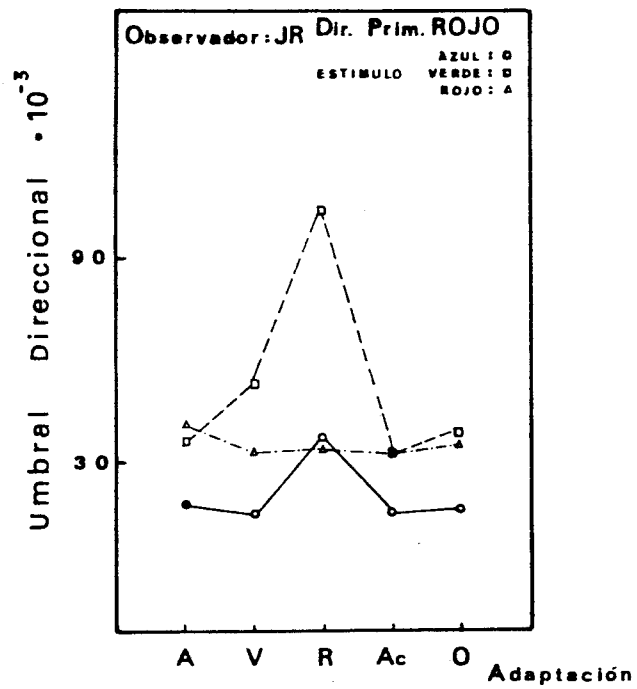
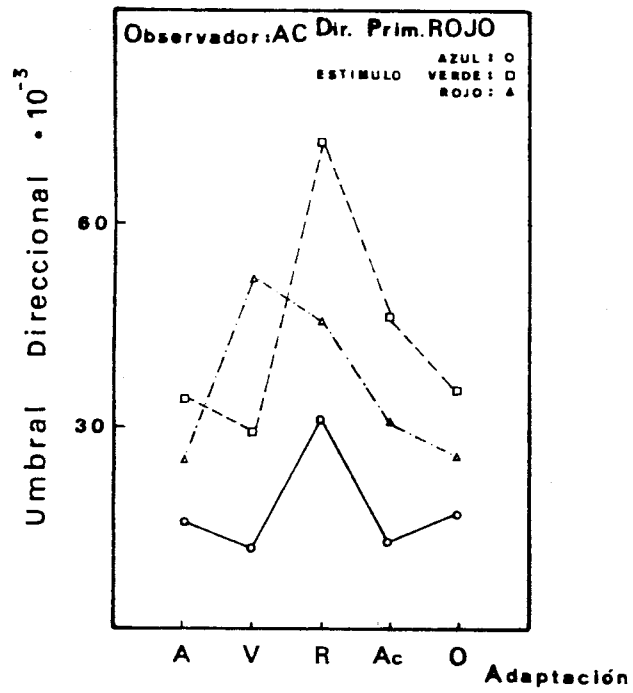


Figura VII.19 Umbral en la dirección del primario ROJO correspondiente a los tres estímulos estudiados y para cada observador.

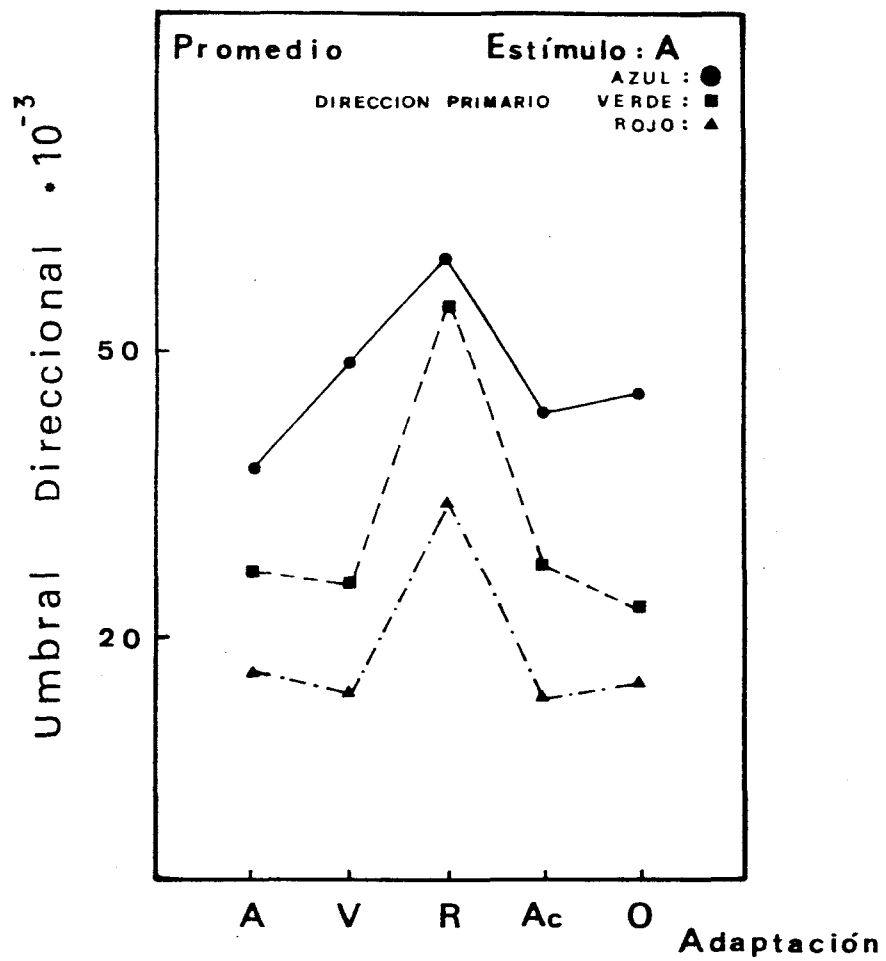


Figura VII.20 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales direccionales para el estímulo AZUL según las tres direcciones de los estímulos primarios.



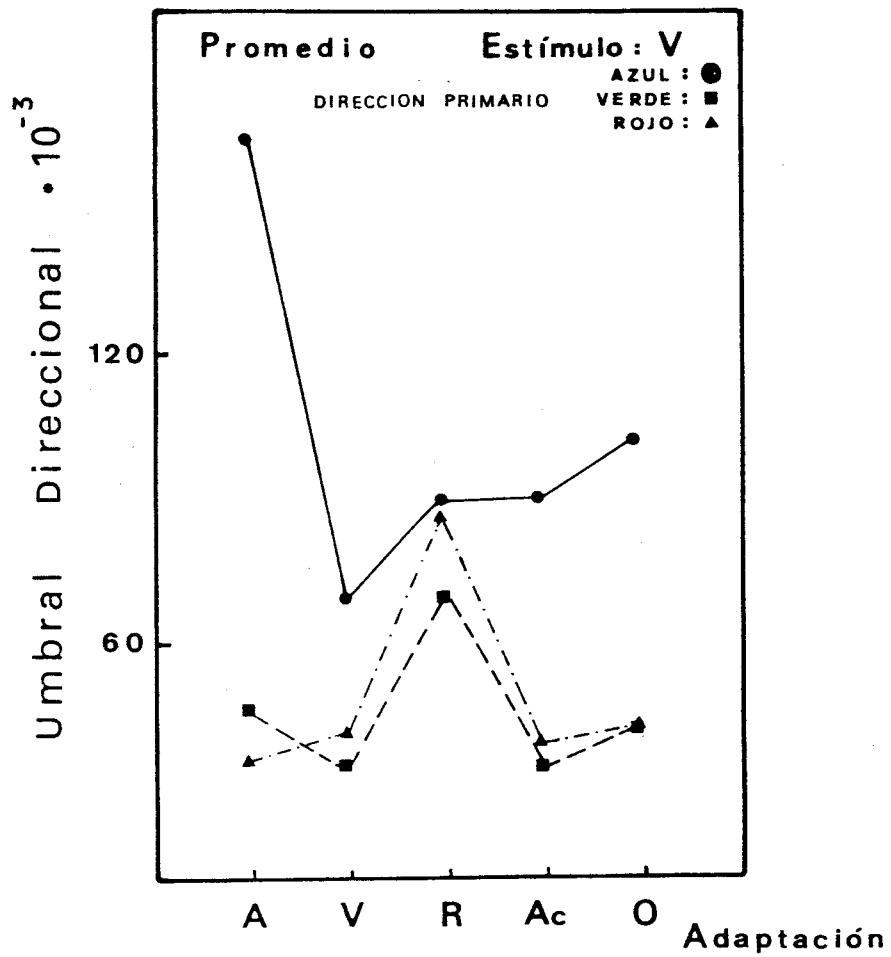


Figura VII.21 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales direccionales para el estímulo VERDE según las tres direcciones de los estímulos primarios.

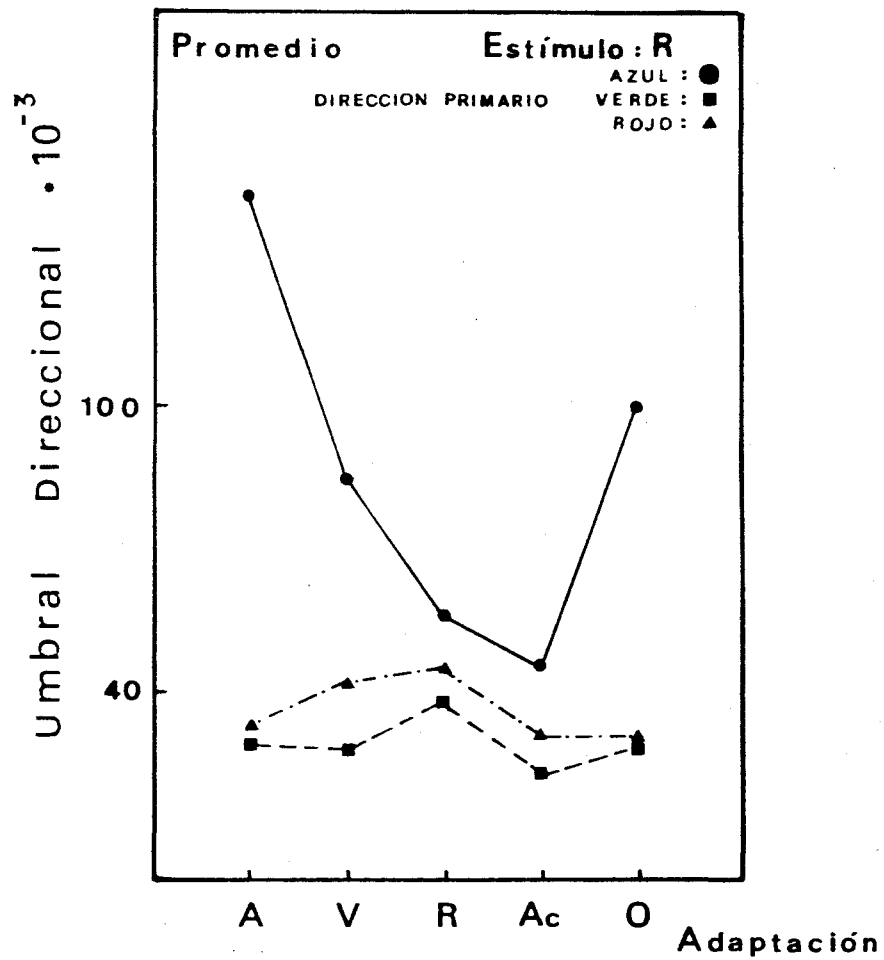


Figura VII.22 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales direccionales para el estímulo ROJO según las tres direcciones de los estímulos primarios.

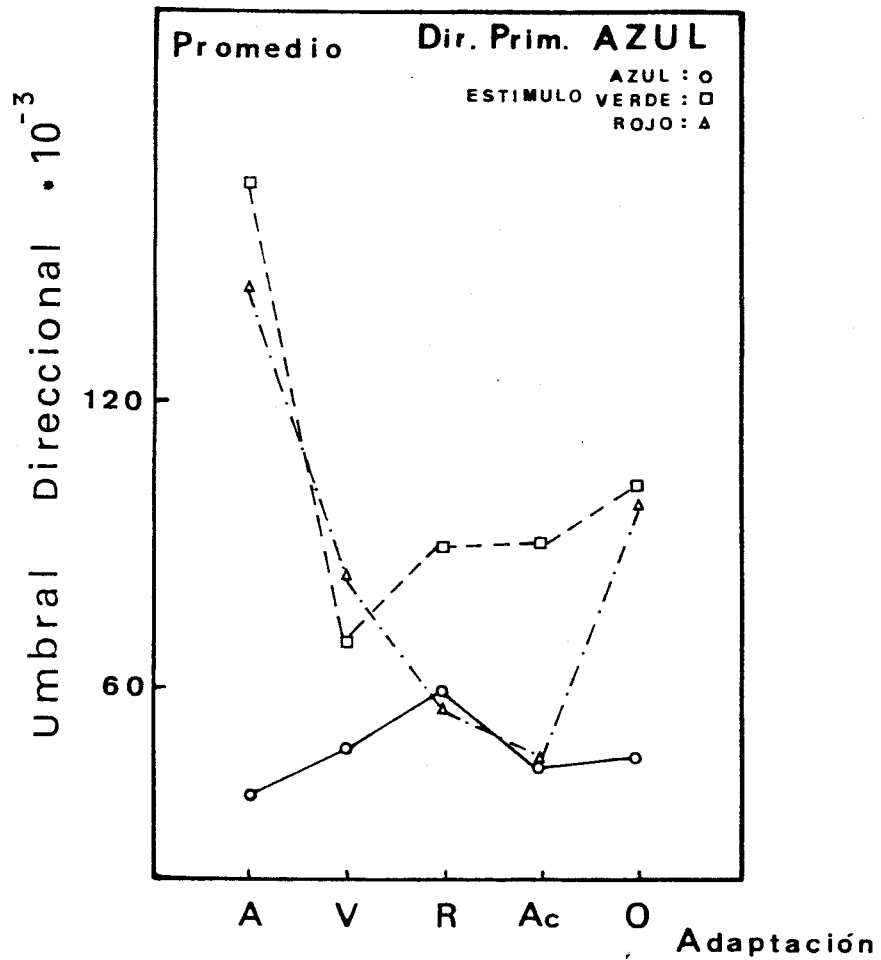


Figura VII.23 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales en la dirección del primario AZUL correspondientes a los tres estímulos analizados.

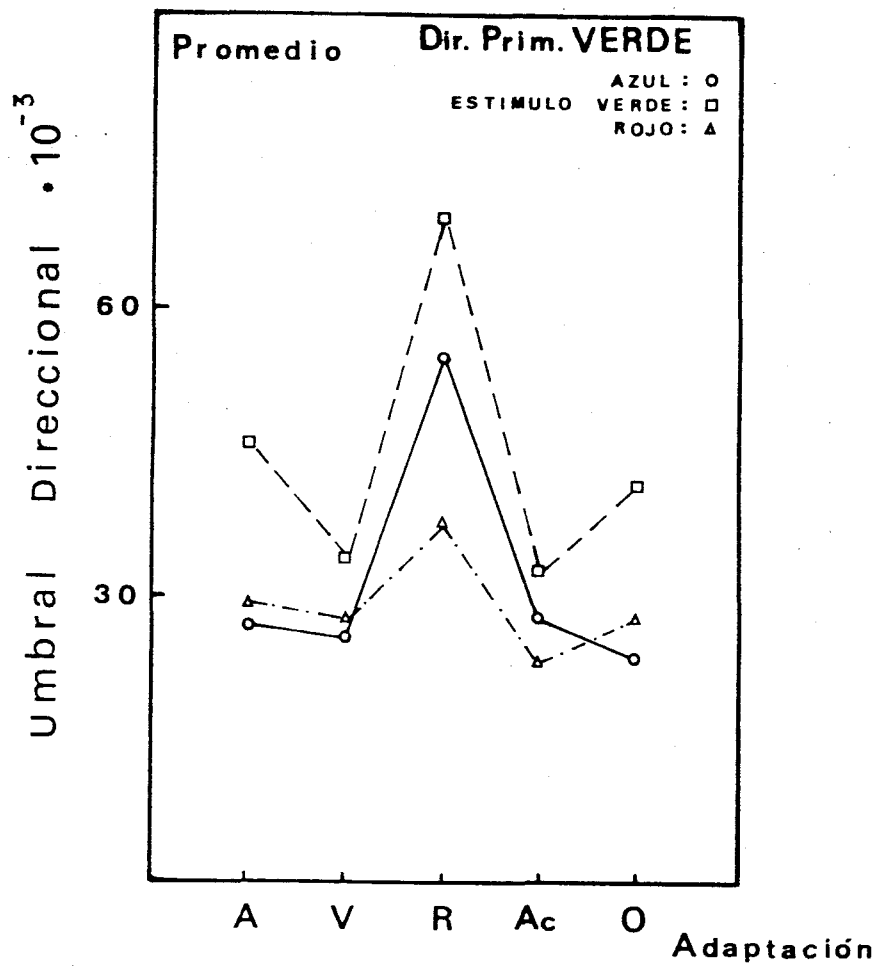


Figura VII.24 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales en la dirección del primario VERDE correspondientes a los tres estímulos analizados.

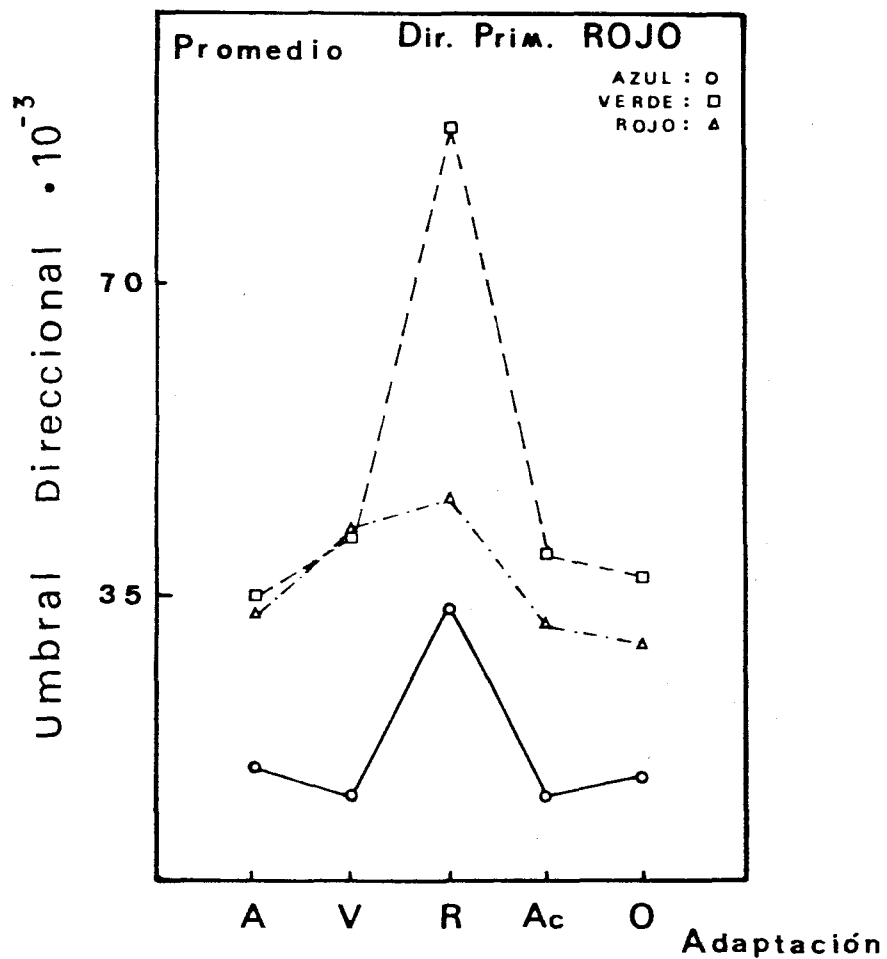


Figura VII.25 Valores promediados a los dos observadores de los umbrales en la dirección del primario ROJO correspondientes a los tres estímulos analizados.

Como hemos podido observar, los estudios realizados sobre los umbrales de discriminación vienen referidos al sistema de representación CIE 1931, pues éste es el que presenta un mayor interés a la hora de representar los resultados experimentales dada la posibilidad de hacerlos comparables con los obtenidos por otros autores.

No obstante, y con el fin de generalizar, presentamos tales resultados en otro sistema de representación que sea a su vez utilizado por otros investigadores. El sistema CIELUV presenta tales características y por ello ha sido seleccionado, aun cuando no hagamos en este sistema el extenso estudio desarrollado en el sistema CIE 1931 para analizar nuestros resultados experimentales.

En las Tablas VII.7 y VII.8 mostramos, al igual que se hizo en las Tablas VII.1 y VII.2, los parámetros característicos de los umbrales diferenciales para cada uno de los observadores pero en el sistema de representación CIELUV 1976.

OBSERVADOR: AC

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>VOLUMEN</u>	<u>AREA</u>	<u>ORIEN.</u>	<u>F.W.</u>	<u>REL. SEMI.</u>	<u>CENTRO</u>
A	A	571.84	257.15	99.1°	-1.331	.300	u*=-33.2 v*=-74.6
Z	V	358.78	167.40	100.3°	-1.396	.270	u*=-33.1 v*=-77.0
U	R	2645.05	763.67	103.7°	-1.087	.596	u*=-32.0 v*=-73.2
L	Ac	491.80	201.50	99.0°	-1.371	.256	u*=-32.8 v*=-76.5
	O	420.21	276.01	97.9°	-1.428	.277	u*=-33.4 v*=-75.1
V	A	877.00	503.01	99.4°	-1.410	.197	u*=-52.7 v*= 43.7
E	V	362.88	211.47	106.9°	-1.401	.514	u*=-53.2 v*= 45.9
R	R	2630.77	640.24	-24.8°	-1.042	.707	u*=-52.7 v*= 47.2
D	Ac	856.62	421.96	107.4°	-1.299	.662	u*=-53.2 v*= 46.7
E	O	711.20	311.93	101.4°	-1.335	.389	u*=-52.3 v*= 47.2
R	A	1040.01	752.32	74.7°	-1.494	.251	u*= 80.5 v*= 21.0
O	V	903.14	523.24	67.2°	-1.408	.534	u*= 80.2 v*= 23.1
J	R	2276.99	677.48	-3.5°	-1.155	.549	u*= 85.2 v*= 22.3
O	Ac	391.88	221.41	52.9°	-1.550	.764	u*= 82.2 v*= 21.0
	O	547.13	430.06	70.5°	-1.565	.343	u*= 83.2 v*= 25.4

Coordenadas de los estímulos: AZUL u\*=-33.2 v\*=-76.5  
 VERDE u\*=-52.4 v\*= 46.3  
 ROJO u\*= 81.6 v\*= 21.2

Tabla VII.7 Resultados obtenidos por el observador AC correspondientes a los umbrales de discriminación según los tres estímulos y adaptaciones analizados, en el diagrama de representación CIELUV.

OBSERVADOR: JR

<u>ESTI.</u>	<u>ADAP.</u>	<u>VOLUMEN</u>	<u>AREA</u>	<u>ORIEN.</u>	<u>F.W.</u>	<u>REL. SEMI.</u>	<u>CENTRO</u>
A	A	450.60	220.14	103.6°	-1.317	.526	u*=-33.5 v*=-74.8
Z	V	667.82	313.03	97.9°	-1.382	.174	u*=-32.8 v*=-75.7
U	R	4627.11	966.73	109.8°	- .978	.737	u*=-31.3 v*=-73.7
L	Ac	515.26	262.55	98.3°	-1.374	.248	u*=-32.7 v*=-76.5
	O	689.63	293.80	98.9°	-1.326	.250	u*=-32.7 v*=-78.1
V	A	1408.41	548.59	99.9°	-1.299	.230	u*=-52.6 v*= 44.0
E	V	772.04	303.29	-15.1°	-1.225	.666	u*=-54.6 v*= 47.5
R	R	2614.14	590.27	- 8.0°	-1.068	.269	u*=-49.6 v*= 46.8
D	Ac	362.30	231.51	104.4°	-1.424	.558	u*=-52.3 v*= 46.4
E	O	709.88	353.69	102.7°	-1.329	.496	u*=-52.0 v*= 46.1
R	A	2166.23	1004.27	71.9°	-1.408	.326	u*= 78.9 v*= 20.2
O	V	1326.14	608.50	62.0°	-1.313	.715	u*= 79.2 v*= 21.8
J	R	1034.11	338.29	- 5.1°	-1.256	.422	u*= 84.5 v*= 21.1
O	Ac	610.22	271.23	- 2.7°	-1.311	.499	u*= 81.6 v*= 21.4
	O	2039.24	935.24	69.7°	-1.294	.525	u*= 80.7 v*= 19.0

Coordenadas de los estímulos:    AZUL    u\*=-33.2    v\*=-76.5  
    VERDE    u\*=-52.4    v\*= 46.3  
    ROJO    u\*= 81.6    v\*= 21.2

Tabla VII.8 Resultados obtenidos por el observador JR correspondientes a los umbrales de discriminación según los tres estímulos y adaptaciones analizados, en el diagrama de representación CIELUV.



### VII.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS IGUALACIONES EN APARIENCIA DE COLOR

Como señalamos al comienzo del presente capítulo, hemos desarrollado un estudio sobre igualaciones en apariencia de color correspondiente a los tres estímulos seleccionados cuando éstos son observados bajo las cinco diferentes condiciones de adaptación.

Se han determinado los estímulos de color que igualan en apariencia a cada uno de los de referencia bajo cada una de las adaptaciones analizadas por comparación sucesiva, tal y como describimos en apartado VI.3 sobre el desarrollo de las experiencias, en este caso referidas al estudio de la apariencia.

En las Tablas VII.9 y VII.10 aparecen para cada observador los estímulos, observados siempre bajo la adaptación acromática, que igualan en apariencia a cada uno de los tres estímulos de referencia observados bajo las adaptaciones azul, verde, roja, acromática y oscuridad. Las igualaciones en apariencia así determinadas vienen caracterizadas por la cromaticidad y luminancia relativa de los estímulos observados bajo la adaptación acromática sobre la que siempre se establece la igualación.

En las Figuras VII.26, 27 y 28 mostramos en el diagrama CIE 1931 los desplazamientos correspondientes para cada observador cuando los estímulos de referencia AZUL, VERDE y ROJO son observados bajo las cinco adaptaciones analizadas. Hemos de destacar que tales desplazamientos, y para cada una de las tres adaptaciones cromáticas, siempre se dan hacia cromaticidades según el sentido que determinan los estímulos adaptantes y los de referencia.

En las Figuras VII.29 y VII.30 presentamos los valores de la luminancia relativa, para cada observador y promediadas sobre ambos respectivamente, correspondientes a los estímulos que igualan en apariencia a los de referencia bajo una determinada adaptación.

OBSERVADOR: AC

ESTI.	ADAP.	IGUALACION		LUMINANCIA RELATIVA
		x	y	Y
A	A	.318	.365	9.170
Z	V	.245	.196	8.548
U	R	.179	.207	8.261
L	Ac	.211	.197	8.052
	O	.224	.217	8.677
V	A	.409	.551	9.947
E	V	.335	.440	8.283
R	R	.289	.593	9.139
D	Ac	.289	.506	9.115
E	O	.280	.445	8.682
R	A	.559	.405	9.291
O	V	.491	.296	8.852
J	R	.403	.383	8.635
O	Ac	.464	.329	8.135
	O	.495	.361	8.607

Coordenadas de los estímulos: AZUL x=.219 y=.217  
 VERDE x=.298 y=.493  
 ROJO x=.483 y=.342

Luminancia relativa estímulos: AZUL Y=8.524  
 VERDE Y=8.518  
 ROJO Y=8.522

Tabla VII.9 Coordenadas de cromaticidad y luminancia relativa de las igualaciones en apariencia de color correspondientes a los tres estímulos y adaptaciones analizadas para el observador AC, en el diagrama de representación CIE 1931.

OBSERVADOR: JR

ESTI.	ADAP.	IGUALACION		LUMINANCIA RELATIVA
		x	y	Y
A	A	.300	.311	8.602
Z	V	.242	.210	8.674
U	R	.177	.206	9.195
L	Ac	.217	.214	8.712
	O	.221	.219	9.411
V	A	.411	.533	9.524
E	V	.305	.365	8.447
R	R	.216	.565	9.012
D	Ac	.292	.490	8.048
E	O	.284	.460	8.939
R	A	.560	.405	9.539
O	V	.456	.282	8.455
J	R	.328	.354	8.504
O	Ac	.480	.331	8.148
	O	.444	.367	8.751

Coordenadas de los estímulos: AZUL x=.219 y=.217

VERDE x=.298 y=.493

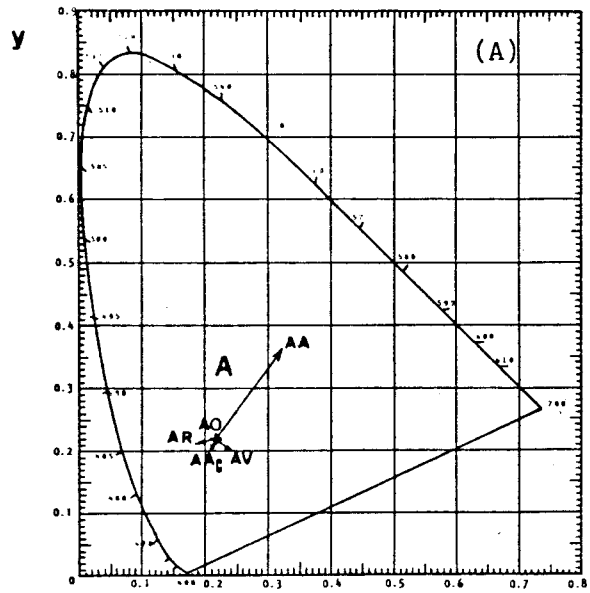
ROJO x=.483 y=.342

Luminancia relativa estímulos: AZUL Y=8.524

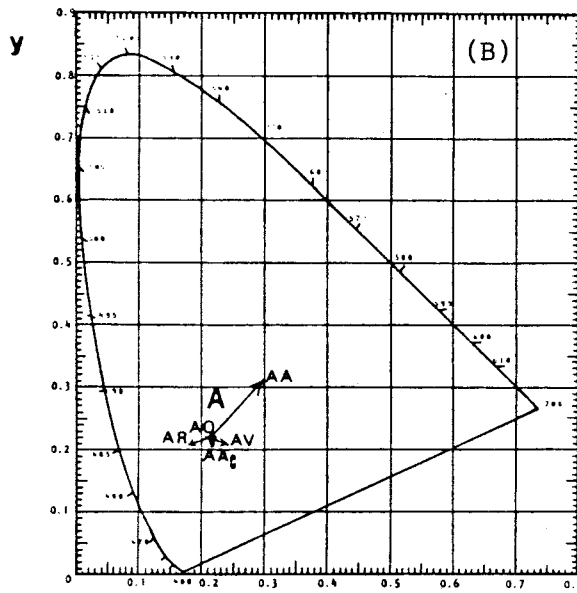
VERDE Y=8.518

ROJO Y=8.522

Tabla VII.10 Coordenadas de cromaticidad y luminancia relativa de las igualaciones en apariencia de color correspondientes a los tres estímulos y adaptaciones analizadas para el observador JR, en el diagrama de representación CIE 1931.



X



X

Figura VII.26 Igualaciones en apariencia de color del estímulo AZUL bajo las cinco adaptaciones analizadas según los observadores: (A) AC y (B) JR.

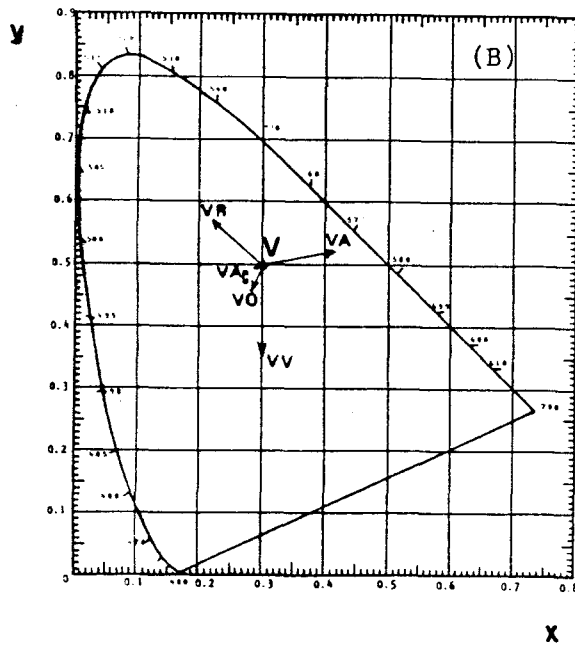
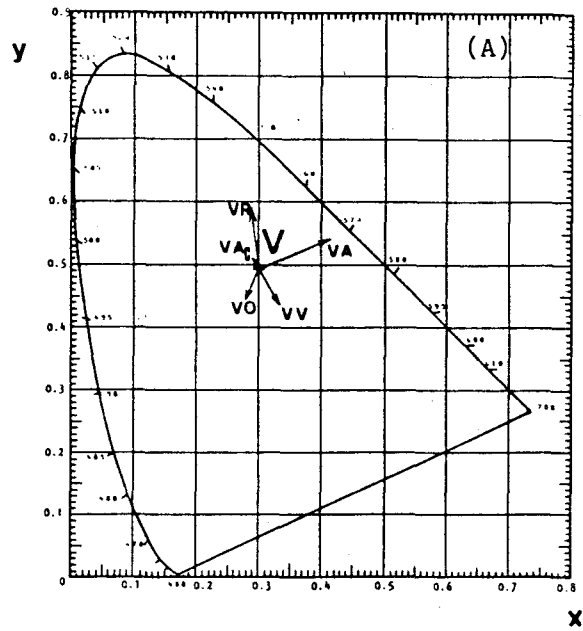


Figura VII.27 Igualaciones en apariencia de color del estímulo VERDE bajo las cinco adaptaciones analizadas según los observadores: (A) AC y (B) JR.

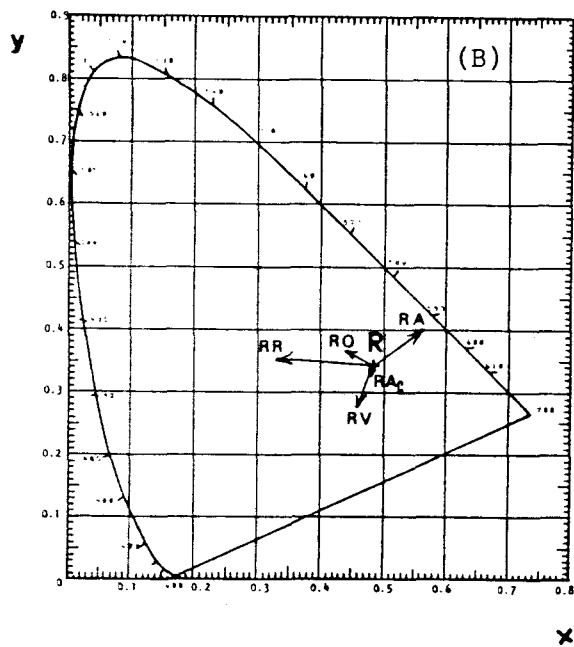
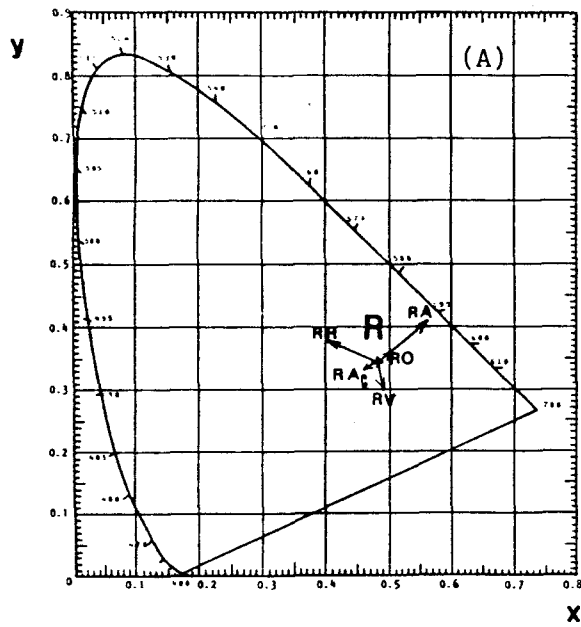


Figura VII.28 Igualaciones en apariencia de color del estímulo ROJO bajo las cinco adaptaciones analizadas según los observadores: (A) AC y (B) JR.

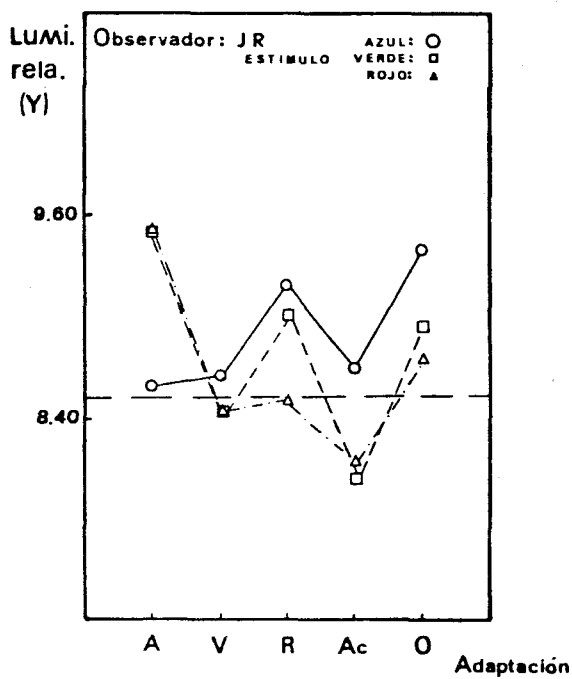
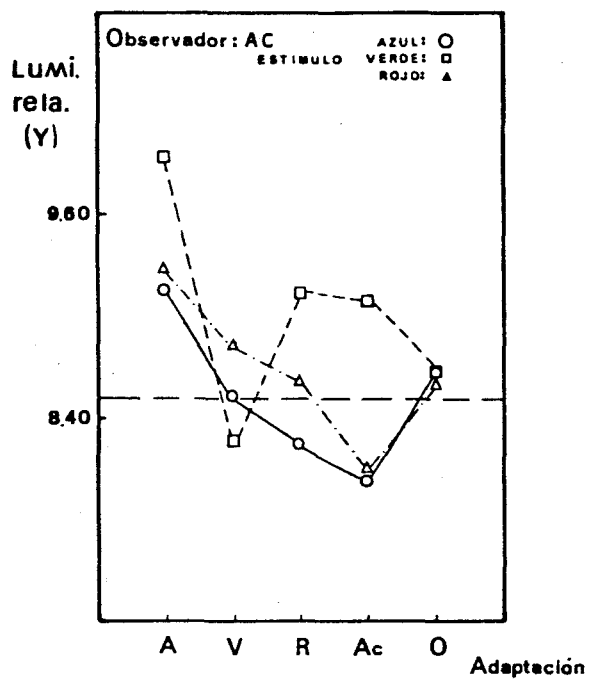


Figura VII.29 Luminancia relativa de las igualaciones en apariencia de color para ambos observadores. Se representa el valor de 8.52 correspondiente a la luminancia relativa de los tres estímulos estudiados.

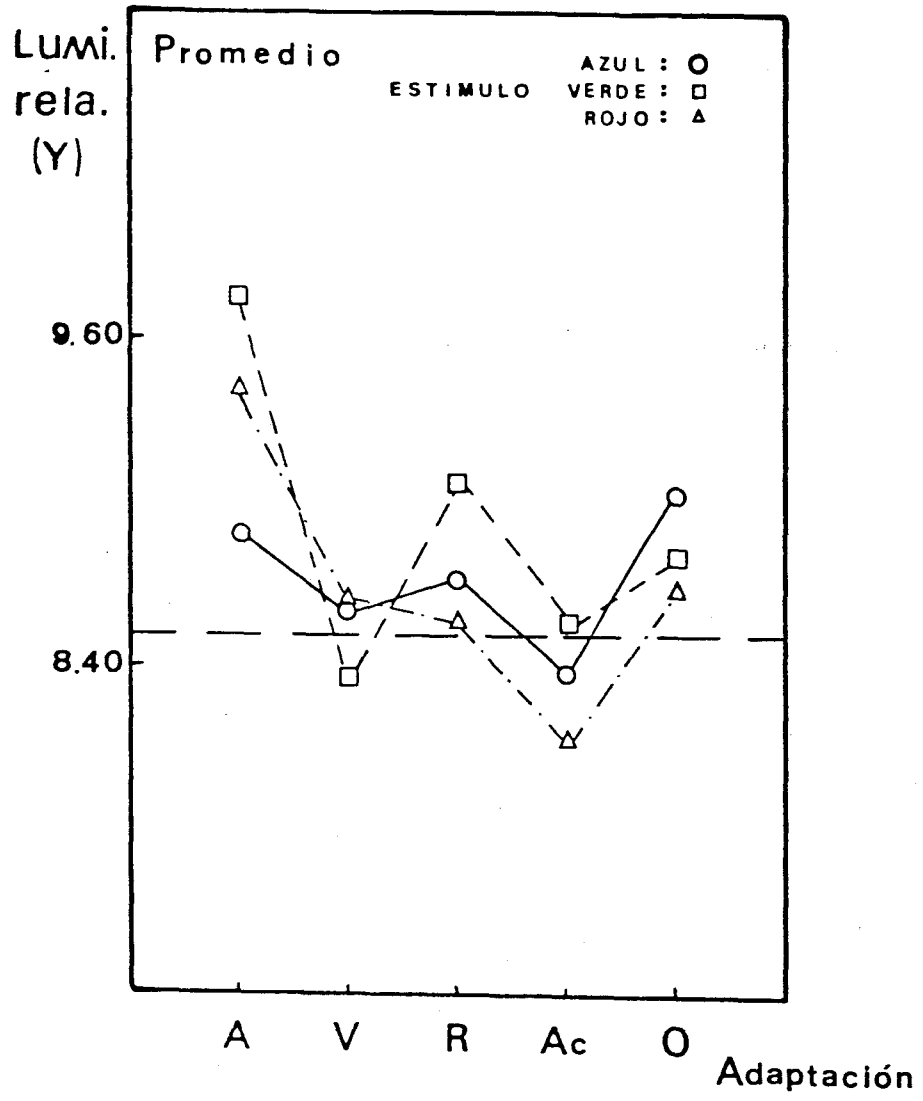


Figura VII.30 Valores promediados a los dos observadores de las luminancias relativas en las igualaciones en apariencia de color. Se representa el valor de 8.52 correspondiente a la luminancia relativa de los tres estímulos estudiados.



## VII.2. ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Una vez que hemos expuesto los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo del trabajo pasamos ahora a evaluar la influencia de la adaptación cromática sobre las comparaciones sucesivas de color que hemos realizado.

Con miras a una exposición sistemática del análisis y discusión de los mismos, desarrollaremos el presente apartado según el contexto de los dos estudios que nos marcamos al comienzo de nuestra investigación. En primer lugar evaluaremos los resultados obtenidos en las discriminaciones de color para acabar con los relativos a las igualaciones en apariencia de color.

### VII.2.1. DISCRIMINACIONES DE COLOR

Como sabemos, la capacidad de discriminación de un observador ante estímulos que ha de comparar viene especificada por los parámetros característicos de los elipsoides de discriminación. El volumen de tales elipsoides determina la capacidad global de la discriminación en base a un sistema de representación tridimensional, donde además de considerar las cromaticidades de los estímulos se tiene en cuenta la luminancia de éstos y, por otro lado, la medida de la fracción de Weber ( $\Delta L/L$ ) determina a su vez el umbral característico de luminancia.

Los resultados de las Tablas VII.1 y VII.2, referentes al análisis de ambos parámetros, vienen representados en las Figuras VII.4 y VII.5. Podemos observar en ellas que para una misma adaptación los volúmenes de los elipsoides de discriminación son menores, y en este orden, para el estímulo azul que para el rojo y para éste último menores que para el verde; con la salvedad de en sólo dos casos para el observador JR. Tales resultados pueden justificarse si tenemos en cuenta que el diagrama CIE 1931 es un sistema de representación no uniforme, correspondiendo a sensaciones visuales iguales diferencias geométricas de distinto tamaño en el mencionado sistema, bien sean para las áreas de las elipses (umbrales de cromat-

ticidad) o volúmenes de los elipsoides (umbrales de color); siendo menores para los estímulos azules que para los rojos y éstos menores que para los verdes.

Observamos además que tanto para los volúmenes de discriminación como para los umbrales de luminancia existen valores máximos para la adaptación al estímulo rojo, independientemente de los estímulos de referencia que se analicen; salvo en el caso del volumen para el observador JR, y referido sólo al estímulo de referencia rojo.

En cuanto a los centros de los elipsoides, Tablas VII.1 y VII.2, no se aprecian desplazamientos significativos respecto a los de los estímulos de referencia, independientemente de la adaptación considerada. Tales resultados los podemos explicar en base a las comparaciones de partida realizadas, que en nuestro caso son isómeras, Hita y Jiménez (1980a); observándose, por el contrario, desplazamientos significativos que llegan incluso a no recoger dentro del umbral al estímulo de referencia cuando éstas comparaciones son metámeras, Hita y otros (1986).

Por otro lado, la adaptación acromática y a la oscuridad no inducen tendencias, siempre en el mismo sentido, sobre los volúmenes y umbrales de luminancia en función de los estímulos analizados para el observador AC. Sí se dan aumentos de tales volúmenes y umbrales, independientemente de los estímulos de referencia, bajo la adaptación acromática que frente a la oscuridad para el observador JR, ya detectadas con anterioridad, Romero (1984).

En cuanto a los umbrales diferenciales de cromaticidad, podemos observar en las Figuras VII.1, 2 y 3 que las elipses de discriminación se orientan en las direcciones de confusión tritanópicas, salvo en el caso del estímulo rojo y verde bajo adaptación roja para el observador JR donde se detectan giros significativos hacia las direcciones de confusión deuteranópicas. Tales resultados determinan la evidencia de una menor capacidad de discriminación en las direcciones de los azules, obteniéndose elipses de discriminación cuyos semiejes mayores se orientan en esas direcciones, salvo

para las excepciones hechas anteriormente.

Nuestros resultados, por otro lado, no coinciden con las conclusiones de otros investigadores al detectar unos ciertos alargamientos de las elipses de discriminación en las direcciones de los estímulos adaptantes, Wright (1941) y Pointer (1974), aunque sí podemos afirmar que éstos se dan pero no de una forma generalizada; poniéndose claramente de manifiesto en los casos de los estímulos verde y rojo bajo adaptación roja para el observador JR.

La medida de la capacidad de discriminación cromática viene dada mediante el área de las secciones elípticas principales correspondientes al corte central de los elipsoides de discriminación. En la Figura VII.6 podemos ver cómo para los estímulos de referencia azul y verde observados bajo adaptación al estímulo rojo, y para ambos observadores, aparecen unas áreas mayores que para el resto de las adaptaciones estudiadas. La excepción se da para el estímulo rojo, y también para ambos observadores, en el que bajo la adaptación azul se obtiene una peor capacidad de discriminación cromática (mayores áreas de las elipses diferenciales de cromaticidad).

Observamos también para las áreas de las secciones elípticas un comportamiento no generalizable respecto a diferencias entre la adaptación acromática y la oscuridad.

En la Figura VII.7 podemos apreciar con más detalle la influencia de la adaptación sobre las orientaciones de las elipses de discriminación. Vemos que para el estímulo azul no se dan cambios sustanciales en la orientación cuando se cambia de estado de adaptación. Por el contrario, para los estímulos verde y rojo sí aparecen modificaciones en la orientación de las elipses cuando pasamos de una adaptación a otra, siendo la adaptación al estímulo rojo la determinante de la magnitud del cambio de orientación que, como podemos observar, para el observador JR es tendente a determinar el mayor valor de ésta y para el observador AC en un sentido mayor para el estímulo verde y en uno menor para el rojo.

Las relaciones entre los semiejes menor y mayor de las

elipses de discriminación nos dan cuenta de los alargamientos relativos en una de las direcciones de los semiejes, correspondiendo entonces umbrales diferenciales de cromaticidad más próximos a figuras circulares cuando tal relación sea más grande. En la Figura VII.8 podemos ver como para el observador AC la mayor relación de semiejes corresponde siempre a la adaptación roja, independientemente de los estímulos de referencia, al igual que para el observador JR salvo para el estímulo verde que corresponde a la adaptación verde.

Las Figuras VII.9, 10, 11, 12 y 13 ponen de manifiesto, a través de los valores promediados sobre ambos observadores, la marcada tendencia de la adaptación roja a determinar los máximos valores de los parámetros analizados en las discriminaciones de color.

En base al análisis anteriormente desarrollado podemos establecer una influencia de la adaptación cromática sobre la capacidad de discriminación para ambos observadores, a diferencia de los resultados obtenidos en otros trabajos para comparaciones simultáneas e igualaciones metámeras, Cruz y Alvarez-Claro (1973).

Los resultados experimentales obtenidos nos inducen a establecer que la capacidad de discriminación en color y cromaticidad puede mejorarse cuando un observador se adapta a un estímulo de la misma tonalidad que el observado, tal y como ocurre para el observador JR en los volúmenes de los elipsoides y áreas de las elipses (menores volúmenes y áreas para las adaptaciones de la misma tonalidad que los estímulos de referencia). En cambio, para el observador AC no aparecen tales variaciones sistemáticas pues, si bien sucede que para el estímulo verde los menores tamaños de los elipsoides y elipses se dan bajo la adaptación verde, no ocurre lo mismo para los estímulos azul y rojo aunque para el azul tales valores están próximos a los más pequeños, en relación, claro está, a las tres adaptaciones cromáticas consideradas. Hemos de notar pues, y en base a lo analizado, que nuestros resultados están en parte de acuerdo con los obtenidos por Loomis y Berger (1979) cuando analizan la influencia de la adaptación cromática sobre la discriminación. Obser-

ron que tal discriminación en cromaticidad mejoraba cuando la cromaticidad adaptante era próxima a la del test y empeoraba bajo adaptaciones de estímulos complementarios a los del test. Diremos que en nuestro caso, a diferencia del estudio realizado por los citados autores, las cromaticidades de las tres adaptaciones cromáticas no están próximas a la de los estímulos de referencia analizados.

Finalmente, los tamaños de los umbrales diferenciales de color y cromaticidad por comparación sucesiva son siempre mayores que los que se han determinado por comparación simultánea, Brown y MacAdam (1949) y MacAdam (1943) respectivamente. Resultados igualmente obtenidos por Romero (1984) e interpretados en base a una menor capacidad de discriminación como consecuencia de los efectos inducidos por la integración en memoria del color.

También dentro del presente estudio sobre discriminación hemos analizado los umbrales diferenciales en las direcciones que determinan los tres primarios con cada uno de los estímulos de referencia, observados bajo las cinco adaptaciones consideradas.

En las Tablas VII.4, 5 y 6 presentamos los tamaños y puntos medios de tales umbrales direccionales referidos a ambos observadores y a sus valores promediados respectivamente. Podemos apreciar ligeros desplazamientos respecto de los estímulos de referencia cuando analizamos los puntos medios de los mencionados umbrales direccionales, lo que induce a ligeras asimetrías en los umbrales diferenciales de cromaticidad según determinadas direcciones del espacio detectadas ya con anterioridad, Hita y otros (1982).

En las Figuras VII.14, 15 y 16 se analizan los tamaños de los umbrales direccionales para cada uno de los estímulos de referencia y estados de adaptación. Se aprecian valores mayores de los tamaños de los umbrales en las direcciones del primario azul que en las otras dos direcciones, independientemente del estímulo de referencia y adaptación considerada, con la salvedad para el observador JR en el estímulo verde bajo adaptación roja. Tales resultados tienen su explicación dadas las orientaciones de las elipses de discriminación que, como dijimos anteriormente, determinan capacidades de discriminación menores en las direcciones de los azules del diagrama cromático.

Para el estímulo azul analizado observamos siempre un tamaño del umbral mayor, para las tres direcciones consideradas, correspondiente a la adaptación roja.

Respecto al estímulo verde se detectan mayores tamaños de los umbrales direccionales, para las direcciones de los primarios verde y rojo, cuando éste es observado bajo adaptación también al estímulo rojo. En cambio, para la dirección del primario azul el mayor tamaño corresponde a la adaptación al estímulo azul.

Para el estímulo rojo se aprecian ligeros tamaños más grandes en las direcciones de los primarios verde y rojo bajo la adaptación roja, salvo para el observador AC en la dirección del primario verde. Para la dirección del primario azul los tamaños más grandes corresponden a la adaptación azul al igual que para el estímulo verde.

A la vista de los resultados podemos establecer que la adaptación al estímulo rojo conlleva un mayor tamaño del umbral en las direcciones de los primarios verde y rojo para los tres estímulos analizados. En cambio para la dirección del primario azul los valores máximos se dan para la adaptación azul y para los estímulos de referencia verde y rojo, pero no para el estímulo azul.

En las Figuras VII.17, 18 y 19 se realiza el mismo estudio anterior pero en base a las direcciones de los tres primarios azul, verde y rojo.

Observamos que en términos generales, e independientemente de las direcciones consideradas y estados de adaptación, los mayores tamaños de los umbrales direccionales corresponden al estímulo verde; cuya justificación viene dada en función de la no uniformidad del espacio cromático CIE 1931.

Según la dirección del primario azul los mayores tamaños de los umbrales corresponden a la adaptación azul, salvo para el estímulo azul que corresponde a la adaptación roja. También se puede observar que los tamaños de los umbrales en esta dirección son menores cuando el estímulo de referencia es observado con adaptación de la misma tonalidad, a excepción hecha del observador AC para el estímulo azul.

En la dirección del primario verde los mayores tamaños de los umbrales corresponden siempre a la adaptación roja, independientemente de los estímulos considerados.

En la dirección del primario rojo los mayores tamaños de los umbrales direccionales corresponden a la adaptación roja, salvo para el observador AC que en el estímulo verde le corresponde a la dirección verde.

Podemos establecer, al igual que en el anterior estudio pues éste es equivalente al primero, que en las direcciones de los primarios verde y rojo los mayores tamaños de los umbrales se dan bajo la adaptación roja. Para la dirección del primario azul y para los estímulos verde y rojo los máximos valores de los umbrales corresponden a la adaptación azul; para el estímulo azul éstos corresponden a la adaptación roja.

Por otro lado, según podemos observar en las Figuras VII.20, 21, 22, 23, 24 y 25, existe una ligera tendencia general a tomar valores más grandes los umbrales direccionales bajo adaptación a la oscuridad que al estímulo acromático, aunque no ocurre en todas las direcciones y estímulos analizados.

Del análisis específico que acabamos de realizar se derivan algunos aspectos que pensamos son de interés comentar dadas las repercusiones que de ellos pueden obtenerse.

En primer lugar, y en lo que se refiere a los volúmenes de discriminación obtenidos de los elipsoides correspondientes, es de destacar la similitud del comportamiento entre ambos observadores, salvo alguna discrepancia que, aunque hayamos comentado, pensamos no es especialmente significativa dado el contexto de las experiencias realizadas.

Como aspecto particular más significativo cabe destacar la disminución de la capacidad de discriminación de ambos observadores para la adaptación al estímulo rojo. Este hecho se repite de forma similar para el caso de umbrales de luminancia y cromaticidad, circunstancia ésta que le da mayor relevancia a las conclusiones que puedan derivarse.

En lo que se refiere a las demás adaptaciones no parece

que puedan entresacarse pautas determinadas en las evoluciones de las discriminaciones correspondientes.

Esta circunstancia pone de manifiesto que en el caso de las discriminaciones en color no son aplicables algunas conclusiones obtenidas en otros campos de la Óptica de la Visión, como podrían ser los derivados de la fase fotópica existente en esta adaptación, Le Grand (1972). No obstante sí hay similitud con otros aspectos como el estudio de la agudeza estereoscópica en función de la adaptación, Hita y otros (1983).

La justificación del fenómeno no parece sencilla en principio, pues, si bien la adaptación al rojo es de efectos similares a la adaptación a la oscuridad, todo parece indicar que la capacidad de discriminación en ambos casos debiera de ser similar; lo que aquí no sucede. No obstante, debemos tener en cuenta que este fenómeno está considerado en base a los umbrales absolutos de luminancia y no en lo que concierne a umbrales diferenciales de color.

Sea como fuere, algún mecanismo de inhibición se produce cuando la adaptación se realiza a la luz roja. Este hecho presenta un gran interés dada la frecuencia con que este tipo de adaptación es empleada, pues si bien beneficia en lo que a umbrales absolutos se refiere, de nuestros resultados se deriva un empeoramiento en la discriminación cromática.

Cuando se analizan por separado las discriminaciones en luminancia y cromaticidad, se observa que la pérdida de la capacidad que venimos analizando se debe, esencialmente, a la luminancia más que a la cromaticidad. Todo parece indicar que en base a modelos de visión de tipo oponentes se establecen canales cromáticos y acromáticos, la contribución al canal acromático de los fotorreceptores sensibles a las largas longitudes de onda es de mayor contribución que la de los demás, ya que un aumento o pérdida de la capacidad de discriminación en luminancia puede deberse a la inhibición de estos fotorreceptores, generada por la adaptación al estímulo rojo.

Es precisamente en umbrales de cromaticidad, donde la luminancia permanece constante, cuando el fenómeno analizado no se presenta de forma tan acusada; si bien en cierta medida sí ocurre puesto que estos resultados se obtienen a partir de umbrales globa-



les donde siempre se presentan variaciones de la luminancia. Podría pensarse aquí el interés de plantear experiencias a luminancia constante tal y como han trabajado otros investigadores, MacAdam (1942), Parra (1970), Crawford (1970), etc, pero por otro lado estimamos que tales experiencias serían limitadas y los resultados que se infieren de nuestras condiciones de observación permiten, a su vez, llegar a planteamientos similares sin necesidad de restringir el funcionamiento normal del ojo humano.

En el caso de las elipses de discriminación, se observa una disminución de la capacidad de discriminación en el caso de los estímulos verde y azul en el mismo sentido que hemos apuntado anteriormente. En el caso del estímulo azul, en el que se presentó una discrepancia entre ambos observadores, se observa cómo al analizar las cromaticidades independientemente tales discrepancias no son tan acusadas, puesto que para uno de los observadores lo que realmente aparece es una falta de variación con las distintas adaptaciones cromáticas analizadas y, en el otro, una disminución en el umbral respecto de la adaptación roja. Por estos motivos pensamos de nuevo que, en base a un modelo de canales oponentes, la adaptación al estímulo rojo influye notoriamente salvo para estímulos con alto contenido en largas longitudes de onda. Este hecho es, en principio, razonable puesto que en tales circunstancias todas las variaciones posibles se producen en función del mencionado canal, con lo que las alteraciones le afectan fundamentalmente a éste sin producirse desequilibrios en los restantes.

Tales consideraciones se pueden justificar a su vez en función de las densidades relativas de los fotorreceptores, Walraven (1973), donde se encuentra una densidad mucho más elevada de los fotorreceptores sensibles al rojo que la de los demás.

Especial significación cobran los resultados en cuanto se analizan las orientaciones de las elipses de discriminación y las relaciones de semiejes, ya que de ellos pueden derivarse consideraciones de interés en relación a los comportamientos defectivos tipo protán, deután y tritán.

Los resultados indican, por lo general, un cierto comportamiento tipo deután para las adaptaciones al rojo, así como tri-

tán para adaptaciones al azul. Estos resultados pueden explicarse también en base a los factores de cancelación que venimos postulando, y que son la base de los modelos de canales oponentes; siendo más pronunciados en el caso de las adaptaciones a las longitudes de onda largas que a las medias o cortas debido, debido ésto a la mayor concentración de los fotorreceptores sensibles a estas longitudes de onda.

Finalmente queremos destacar que nuestro análisis puede explicar también los comportamientos similares a las adaptaciones a la oscuridad y al estímulo acromático, puesto que en ambos casos no se producen descompensaciones en la respuesta de los canales respectivos.

### VII.2.2. IGUALACIONES EN APARIENCIA DE COLOR

En las Tablas VII.9 y VII.10 se presentan los resultados obtenidos para ambos observadores cuando se determinan los estímulos de color que, bajo adaptación siempre al estímulo acromático, igualan en apariencia a los estímulos de referencia bajo las distintas adaptaciones analizadas.

En las Figuras VII.26, 27 y 28 aparecen representados en el diagrama CIE 1931 los mencionados estímulos. Observamos que siempre los estímulos de la igualación se desplazan hacia cromaticidades del diagrama cromático en el sentido del estímulo adaptante hacia el estímulo observado, y no exactamente alineados en las direcciones que éstos determinan. Análogos resultados para un estímulo azul de coordenadas de cromaticidad  $x=0.23, y=0.20$ , con adaptaciones a luces monocromáticas de 450nm, 580nm y 650nm e igualaciones realizadas bajo visión haploscópica, obtuvieron Jameson y Hurvich (1972) según puede verse en la Figura III.1.

Podemos apreciar que para el estímulo azul los máximos desplazamientos en las igualaciones en apariencia ocurren para ambos observadores bajo la adaptación azul. En cambio, para los estímulos verde y rojo los mayores desplazamientos no se dan bajo una misma adaptación. Es de destacar que para ambos observadores los mayores desplazamientos se dan bajo adaptaciones de la misma tonalidad que el estímulo de partida. No obstante, para el observador AC tales tendencias son menos pronunciadas.

Por otro lado, las adaptaciones a la oscuridad y al estímulo acromático no inducen grandes modificaciones de las coordenadas de cromaticidad de los estímulos igualados respecto de los de referencia. Pueden detectarse desplazamientos ligeramente más grandes cuando la igualación se realiza bajo adaptación a la oscuridad que bajo al estímulos acromático; interpretación que puede venir dada como consecuencia de que las condiciones de adaptación e igualación para el estímulo acromático son las mismas.

Podemos establecer en base a los desplazamientos observados que cuando un estímulo es observado bajo una adaptación de igual, o parecida, tonalidad a la de éste, el estímulo que lo iguala

en apariencia bajo la adaptación acromática, próxima al iluminante A, es menos saturado que el estímulo de partida. Por el contrario, cuando la adaptación se lleva a cabo bajo tonalidad complementaria a la del estímulo de referencia, la igualación se establece para estímulos más saturados que el de partida.

Tales resultados pueden explicarse en base al modelo de visión de colores oponentes, Hurvich y Jameson (1958), Jameson y Hurvich (1961). Cuando un observador se adapta a un estímulo rojo se inhibe parcialmente la respuesta de los R-receptores, aumentando la de los correspondientes oponentes (G-receptores), determinándose de esta forma un desplazamiento en la igualación hacia estímulos en la dirección del complementario de la adaptación.

Otro parámetro que hemos analizado en las igualaciones en apariencia ha sido el de la luminancia relativa de los estímulos igualados.

En las Figuras VII.29 y 30 aparecen representados tales valores de la luminancia, para ambos observadores y promediada respectivamente, teniendo en cuenta a su vez la luminancia relativa de los estímulos de referencia que son igualados bajo las distintas adaptaciones.

Podemos destacar una tendencia clara a aumentar la luminancia de la igualación respecto de los estímulos de partida cuando ésta se produce bajo adaptación acromática. En estos casos, y además de la influencia que pueda tener la comparación por integración de memoria al color, tales tendencias pueden ser justificadas como consecuencia de una mayor activación de los mecanismos fotorreceptores cuando éstos se encuentran adaptados al estímulo acromático que a la oscuridad; de forma que se necesitaría un mayor valor de la luminancia de los estímulos en la igualación, siempre bajo la adaptación acromática, para tener la misma sensación relativa de igualdad para el estímulo observado bajo la adaptación a la oscuridad que al estímulo acromático.

Se detectan también valores mayores de la luminancia relativa cuando la igualación se da bajo la adaptación al estímulo

azul, salvo para el observador JR en el estímulo azul. Esta característica de las igualaciones bajo la adaptación azul pueden ser explicadas en base a la densidad de conos responsables del mecanismo de percepción correspondiente al azul, frente a la de los restantes fotorreceptores. Al ser la proporción de los B-receptores mucho menor que la de los R y G-receptores, Walraven (1973), cuando se da la adaptación bajo el estímulo azul éstos serán inhibidos frente a los otros dos mecanismos, y al estar estos últimos en una mayor proporción, es factible pensar que los estímulos observados bajo adaptación azul presentarán una mayor luminancia relativa que bajo al resto de las adaptaciones; necesitándose de esta forma un mayor valor de la luminancia para obtener la misma sensación de igualdad en apariencia para los estímulos observados bajo la adaptación azul que bajo las adaptaciones verde y roja.

Esta circunstancia podría considerarse como un apoyo experimental a los trabajos desarrollados por Walraven.

Otro análisis que también hemos llevado a cabo ha sido el estudio de la validez de diferentes ecuaciones de transformación propuestas cuando los estímulos de color son observados bajo condiciones de adaptación distintas. Tal y como pudimos examinar en el apartado III, las ecuaciones de transformación propuestas por los diferentes investigadores surgen en base a la suposición de cómo se modifican las sensibilidades de los mecanismos fotorreceptores cuando éstos cambian de estado de adaptación.

De esta forma, el problema que se plantea cuando un estímulo es observado bajo dos condiciones de adaptación es determinar los valores triestímulo correspondientes a aquellos que lo igualan bajo los mencionados estados de adaptación.

Supongamos un estímulo de color que es observado bajo unas condiciones de adaptación A, los valores triestímulo R,G,B vendrán dados como

$$R = \int \bar{r}_\lambda R_\lambda d\lambda \quad ; \quad G = \int \bar{g}_\lambda R_\lambda d\lambda \quad ; \quad B = \int \bar{b}_\lambda R_\lambda d\lambda$$

donde  $\bar{r}_\lambda, \bar{g}_\lambda, \bar{b}_\lambda$  representan las funciones de respuesta espectral de los tres mecanismos fotorreceptores, relacionados con los correspondientes al observador patrón CIE 1931 mediante una transformación lineal, y  $R_\lambda$  la radiancia espectral del estímulo.

Cuando el mismo estímulo es observado bajo otras condiciones de adaptación  $A'$ , el estímulo que lo iguala en apariencia de color bajo la misma adaptación  $A$  tendrá por valores triestímulo

$$R' = \int \bar{r}_\lambda R'_\lambda d\lambda ; G' = \int \bar{g}_\lambda R'_\lambda d\lambda ; B' = \int \bar{b}_\lambda R'_\lambda d\lambda$$

siendo ahora  $R'_\lambda$  la radiancia espectral del estímulo que lo iguala.

Ahora bien, el estímulo observado bajo la adaptación  $A'$  tendrá los valores triestímulo

$$R' = \int \bar{r}'_\lambda R_\lambda d\lambda ; G' = \int \bar{g}'_\lambda R_\lambda d\lambda ; B' = \int \bar{b}'_\lambda R_\lambda d\lambda$$

donde ahora  $\bar{r}'_\lambda, \bar{g}'_\lambda, \bar{b}'_\lambda$  representan las funciones de respuesta espectral modificadas de los tres mecanismos visuales al cambiar de estado de adaptación.

Por las condiciones establecidas en la igualación, los correspondientes valores triestímulo habrán de ser iguales, es decir

$$\begin{aligned} R' &= \int \bar{r}_\lambda R'_\lambda d\lambda = \int \bar{r}'_\lambda R_\lambda d\lambda \\ G' &= \int \bar{g}_\lambda R'_\lambda d\lambda = \int \bar{g}'_\lambda R_\lambda d\lambda \\ B' &= \int \bar{b}_\lambda R'_\lambda d\lambda = \int \bar{b}'_\lambda R_\lambda d\lambda \end{aligned}$$

Hemos de decir que los valores triestímulo del color observado bajo la adaptación  $A'$  los determinamos por medio de la igualación bajo la misma adaptación inicial  $A$ .

Según la ley de los coeficientes de von Kries, las sensibilidades modificadas de los tres mecanismos visuales, independientes entre sí, cambiarán respecto del estado inicial mediante las ecuaciones:

$$\bar{r}'_{\lambda} = k_r \bar{r}_{\lambda} \quad , \quad \bar{g}'_{\lambda} = k_g \bar{g}_{\lambda} \quad , \quad \bar{b}'_{\lambda} = k_b \bar{b}_{\lambda}$$

Lo que conduce a su vez a un cambio entre los valores triestímulo dado por

$$R' = \int k_r \bar{r}_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda = k_r R$$

$$G' = \int k_g \bar{g}_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda = k_g G$$

$$B' = \int k_b \bar{b}_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda = k_b B$$

Es decir, los valores triestímulo del color observado bajo la adaptación A serán proporcionales a los del estímulo de color observado bajo la misma adaptación A, y que iguala al anterior bajo la adaptación modificada A'.

Para determinar la validez de la ley de von Kries en las igualaciones realizadas en nuestro trabajo, cuando los estímulos de referencia cambian de la adaptación acromática a las adaptaciones a los estímulos azul, verde y rojo, debemos de elegir las funciones de respuesta espectral  $\bar{r}_{\lambda}, \bar{g}_{\lambda}, \bar{b}_{\lambda}$  que nos permitan calcular, a partir de los valores triestímulo CIE 1931 X,Y,Z, los correspondientes valores triestímulo R,G,B.

Hemos trabajado inicialmente con las funciones de respuesta espectral de König, Fick, Pitt y Judd para determinar los mencionados valores triestímulo correspondientes a cada pareja de adaptaciones. Al no observarse diferencias significativas entre las relaciones de valores triestímulo correspondientes a unas funciones u otras, elegimos las funciones de respuesta espectral de König dado el uso generalizado que han tenido por otros autores. Lo que sí podemos afirmar es que los resultados que se deriven de la comprobación de la validez de la ley de los coeficientes, no vienen afectados por establecimiento del conjunto de respuestas fundamentales elegidas.

En la Tabla VII.11 presentamos las relaciones obtenidas entre los valores triestímulo correspondientes a los estímulos de la igualación y los de partida, para cada par de adaptaciones y para ambos observadores .

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo AZUL

OBSERVADOR AC				OBERVADOR JR		
	R'/R	G'/G	B'/B	R'/R	G'/G	B'/B
A	1.158	1.029	0.329	1.004	0.892	0.464
Estímulos V	1.110	0.985	0.196	1.204	1.065	0.279
R	1.148	1.087	0.161	1.173	1.147	0.177
Valores medios	1.139	1.034	0.229	1.127	1.035	0.307

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo VERDE

A	1.078	0.972	1.008	1.006	0.936	0.977
Estímulos V	0.920	0.847	1.147	1.060	0.987	2.133
R	1.105	0.939	1.245	1.044	0.978	1.688
Valores medios	1.034	0.919	1.133	1.037	0.967	1.599

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo ROJO

A	1.011	1.107	1.013	1.038	1.150	1.189
Estímulos V	1.000	1.019	0.492	1.104	1.212	0.976
R	1.037	1.280	0.943	1.002	1.424	1.642
Valores medios	1.016	1.135	0.816	1.048	1.262	1.269

Tabla VII.11 Relaciones obtenidas entre valores triestímulo según las funciones de respuesta espectral de König. R,G,B representan los valores triestímulo bajo la adaptación acromática. R',G', B' son los correspondientes bajo las adaptaciones a los estímulos azul, verde y rojo.



Según la ley de los coeficientes de von Kries, tales relaciones, para cada pareja de adaptaciones y para cada uno de los valores triestímulo, deben de ser independientes del estímulo bajo el cual se realiza la igualación; circunstancias que aquí se cumplen según las relaciones obtenidas. De esta forma, establecemos los coeficientes para cada relación entre valores triestímulo, y según el cambio de estado de adaptación, mediante el valor medio obtenido para los tres estímulos analizados.

De las ecuaciones anteriores, obtenidas según las condiciones de la igualación al pasar de un estado A a otro A', obtenemos matrices de transformación de la forma

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

donde X',Y',Z' son los valores triestímulo CIE 1931 de los estímulos que igualan, bajo la adaptación A, los estímulos de partida bajo la adaptación A', éstos últimos de valores triestímulo X,Y,Z;  $a_{ij}$  son los coeficientes de la transformación lineal correspondientes a las funciones de respuesta espectral y  $k_r, k_g, k_b$  los coeficientes tipo von Kries para cada pareja de adaptaciones.

Teniendo en cuenta los coeficientes de las funciones de respuesta espectral de König y los coeficientes característicos del cambio de adaptación para cada relación entre valores triestímulo, obtenemos las siguientes ecuaciones de transformación para cada observador y parejas de adaptaciones:

OBSERVADOR AC

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo AZUL

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0526 & 0.2543 & -0.1698 \\ 0.0064 & 1.1200 & -0.0013 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.2290 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo VERDE

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9395 & 0.2784 & 0.0398 \\ 0.0070 & 1.0130 & -0.0015 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.1328 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo ROJO

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1135 & -0.2883 & -0.0613 \\ 0.0072 & 1.0370 & -0.0015 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.8159 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

OBSERVADOR JR

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo AZUL

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0514 & 0.2228 & -0.1537 \\ -0.0056 & 1.1103 & -0.0012 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.3069 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo VERDE

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9794 & 0.1695 & 0.1278 \\ -0.0042 & 1.0243 & -0.0008 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.5987 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo ROJO

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.2233 & -0.5184 & 0.0092 \\ -0.0130 & 1.0863 & 0.0027 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.2688 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

A partir de las ecuaciones de transformación obtenidas, podemos determinar cuáles serían los estímulos de color que igualarían en apariencia a los estímulos analizados cuando éstos cambian de la adaptación acromática a las respectivas adaptaciones cromáticas. Parece lógico que tales predicciones serán tanto más próximas a los estímulos determinados experimentalmente, y que nos sirvieron para determinar las relaciones promediadas entre valores triestímu-

lo, cuanto menores sean las desviaciones entre los coeficientes respecto de los valores medios obtenidos.

La Tabla VII.12 recoge tales predicciones y las coordenadas de cromaticidad de los estímulos igualados experimentalmente.

En las Figuras VII.31 y 32 representamos en el diagrama CIE 1931 los estímulos así predichos y los determinados para las tres parejas de adaptaciones. Las diferencias entre unos y otros vienen descritas por medio de segmentos con flecha, donde los orígenes de éstos representan a los estímulos igualados experimentalmente bajo cada una de las adaptaciones y los extremos finales los predichos según las transformaciones obtenidas. La denominación de cada segmento viene dada por dos letras, la primera representa cada uno de los estímulos analizados y la segunda las adaptaciones bajo las cuales son observados y que, a su vez, son igualados siempre bajo la adaptación acromática.

Podemos observar que las ecuaciones de transformación tipo von Kries predicen adecuadamente, dentro de ciertos límites en principio tolerables en base a la discriminación normal de los observadores, los estímulos determinados experimentalmente. En algunos casos aparecen discrepancias relativamente grandes, al ser observadas en el diagrama de representación, y que podrían parecer que no serían recogidas por el umbral del estímulo determinado experimentalmente. Hemos de decir que los umbrales diferenciales de cromaticidad, para cada uno de los estímulos de referencia observados bajos los cinco estados de adaptación, no representan los umbrales correspondientes a los estímulos aquí determinados puesto que el método de determinación no es el mismo que el seguido para determinar los estímulos en las igualaciones en apariencia, aunque sí tengan en común la comparación sucesiva de éstos.

No obstante, podemos comparar nuestras predicciones, en base a las transformaciones propuestas, con otras establecidas por diferentes autores y con diferentes técnicas experimentales. Bartleson (1979b) ha realizado un interesante y amplio estudio sobre las distintas acuaciones de transformación bajo adaptación cromática propuestas. Analiza la "bondad" de tales transformaciones mediante

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo AZUL

		OBSERVADOR AC				OBSERVADOR JR			
		Predichos		Medidos		Predichos		Medidos	
		x'	y'	x'	y'	x'	y'	x'	y'
Estímulos	A	0.325	0.419	0.318	0.365	0.315	0.394	0.300	0.311
	V	0.393	0.561	0.409	0.551	0.386	0.547	0.411	0.533
	R	0.561	0.389	0.559	0.405	0.565	0.375	0.560	0.405

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo VERDE

Estímulos	A	0.241	0.174	0.245	0.196	0.222	0.150	0.242	0.210
	V	0.360	0.441	0.335	0.440	0.319	0.402	0.305	0.365
	R	0.484	0.304	0.491	0.296	0.463	0.283	0.456	0.282

Cambio de adaptación ACROMATICA al estímulo ROJO

Estímulos	A	0.171	0.247	0.179	0.207	0.143	0.207	0.177	0.206
	V	0.191	0.614	0.289	0.593	0.413	0.350	0.328	0.354
	R	0.444	0.373	0.403	0.383	0.413	0.350	0.328	0.354

Tabla VII.12 Predicciones establecidas en base a las ecuaciones de transformación tipo von Kries propuestas para cada uno de los observadores.

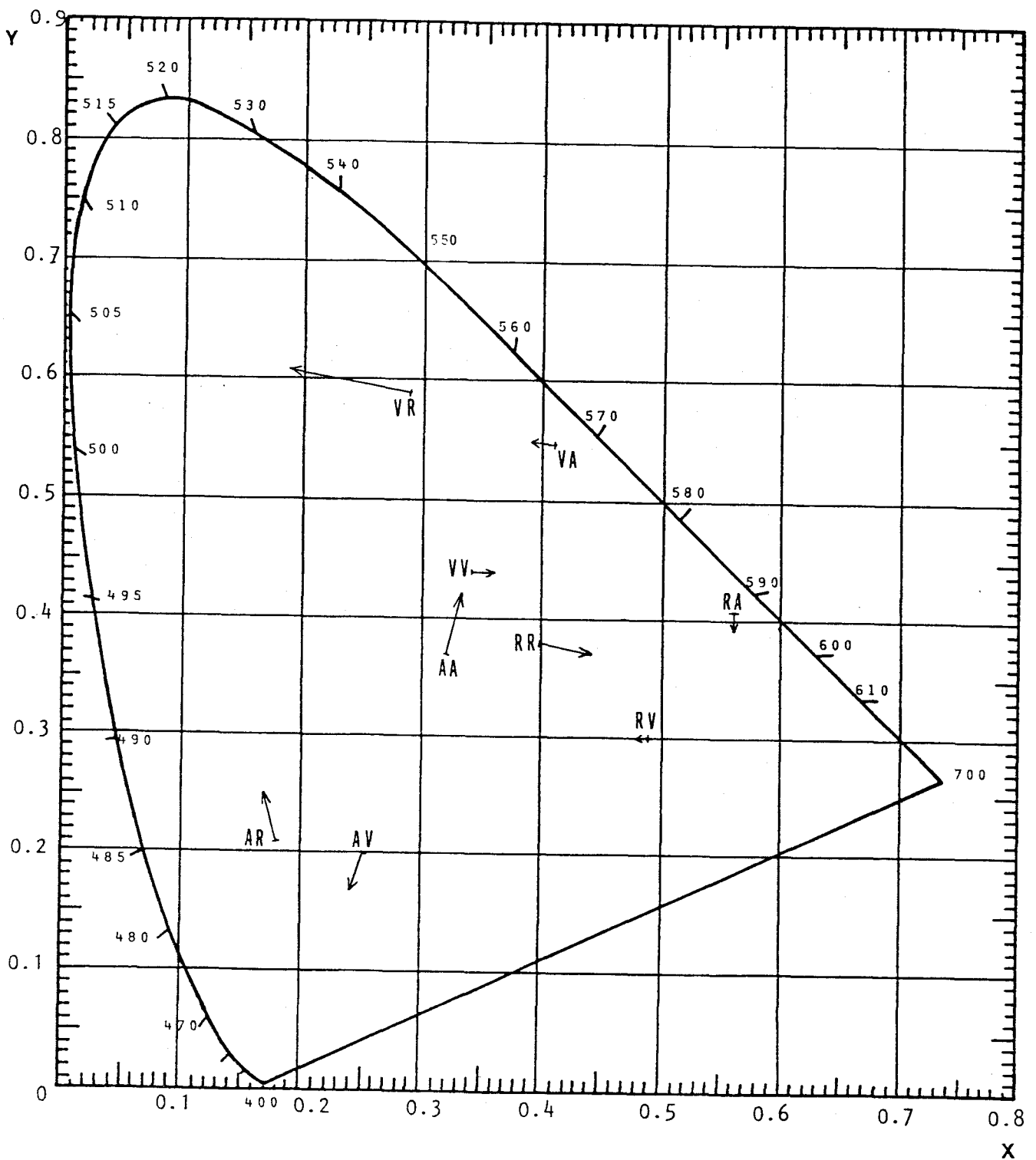


Figura VII.31 Estímulos de color predichos en base a las ecuaciones de transformación propuestas según la ley de los coeficientes de von Kries. Los orígenes de las flechas representan los estímulos determinados experimentalmente, los extremos finales los predichos para el observador AC.

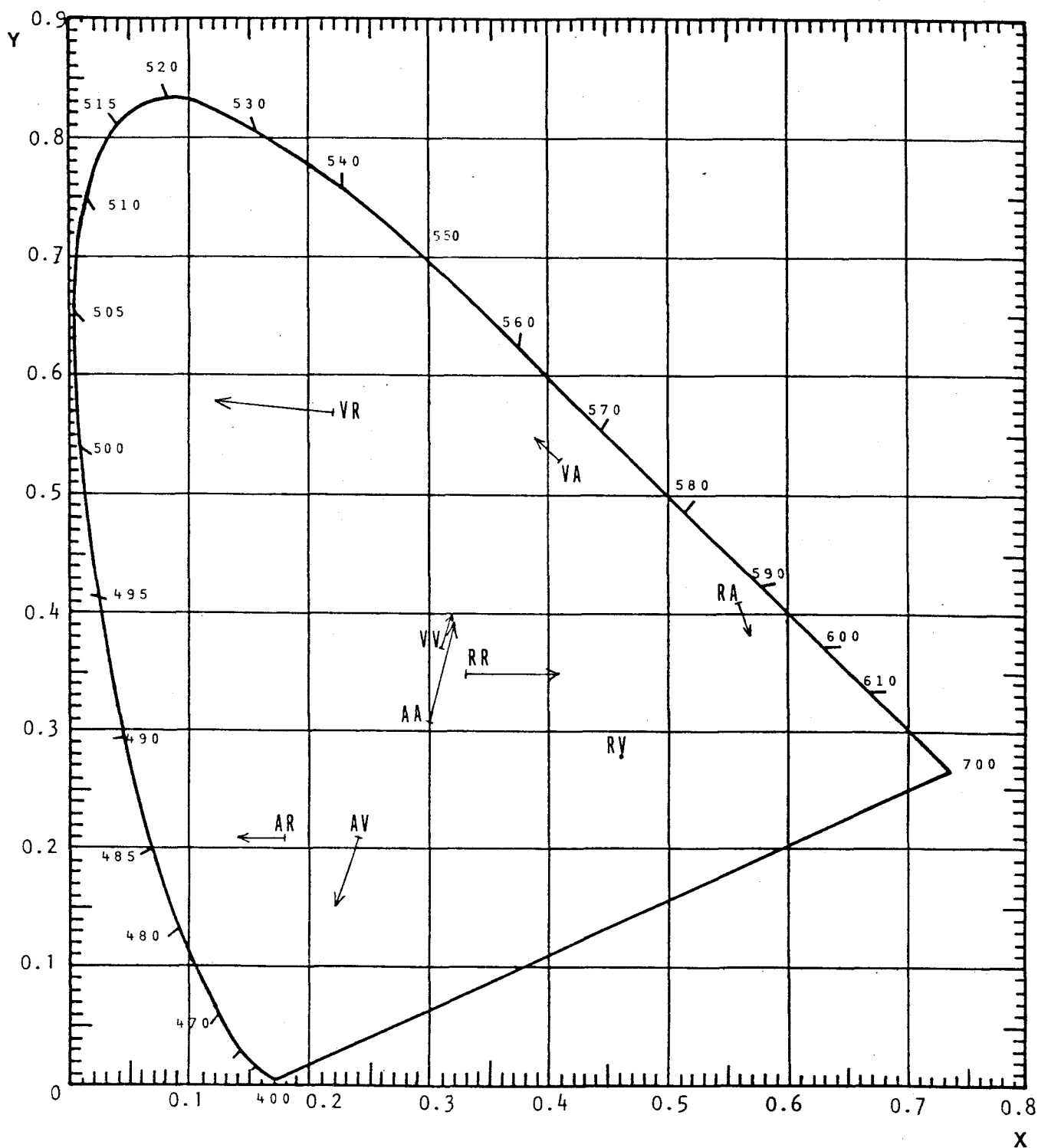


Figura VII.32 Estímulos de color predichos en base a las ecuaciones de transformación propuestas según la ley de los coeficientes de von Kries. Los orígenes de las flechas representan los estímulos determinados experimentalmente, los extremos finales los predichos para el observador JR.

las distancias en el diagrama de cromaticidad entre los estímulos predichos y los determinados experimentalmente, siendo la gran mayoría de los estímulos estudiados los referentes a muestras Munsell cuando son observadas bajo el iluminante A y bajo los iluminantes luz de día, C o  $D_{65}$ . Las distancias medias entre los estímulos predichos y los determinados para cada uno de los investigadores aparecen en la Tabla VII.13, donde a su vez se especifican tales valores comparados con las predicciones formuladas por Bartleson (1979b). Por otro lado, las distancias medias correspondientes a cada uno de los observadores según nuestras ecuaciones de transformación también aparecen en la Tabla VII.13.

	Bartleson (1979b)			
	$\bar{d}$	$S_{n-1}$	$\bar{d}$	$S_{n-1}$
Burnham y otros (1957)	0.026	0.023	0.024	0.022
Wasseff (1959)	0.016	0.010	0.034	0.021
McAdam (1956)	0.113	0.058	0.092	0.056
Helson y otros (1952)	0.097	0.089	0.086	0.056
Nuestras predicciones:				
Observador AC	0.037	0.028	-	-
Observador JR	0.053	0.032	-	-

Tabla VII.13 Resultados de las predicciones obtenidas por diferentes autores.

Podemos claramente apreciar que las predicciones que se obtienen mediante nuestras ecuaciones de transformación tipo von Kries presentan unas discrepancias, medidas a través de las distancias entre los estímulos predichos y los determinados experimentalmente, del orden de las obtenidas por los diferentes autores que han propuesto ecuaciones de transformación tanto lineales como no lineales.

También se ha querido comprobar la validez de otras ecuaciones de transformación propuestas por otros autores. Estas han sido una lineal tipo von Kries, Helson y otros (1952), y otra no lineal, Bartleson (1979b).

La transformación de Helson y colaboradores establece

un cambio entre los valores triestímulo según las ecuaciones

$$R' = (R_A/R_{A'}) R \ ; \ G' = (G_A/G_{A'}) G \ ; \ B' = (B_A/B_{A'}) B$$

donde las cantidades entre paréntesis son los coeficientes von Kries, referidos a los valores triestímulo de las adaptaciones inicial A y modificada A'.

Nosotros hemos aplicado la mencionada transformación al observador AC y para el cambio de adaptación acromática al estímulo azul. Los valores triestímulo de las adaptaciones acromática y azul, referidas a las funciones de respuesta espectral de Judd tal y como trabajaron estos investigadores, son

Adaptación Acromática: R=1.7040 G=1.6077 B=0.5483

Adaptación Azul: R=1.7040 G=3.4327 B=56.3002

dando unas relaciones entre valores triestímulo de

$$R' = 1.0000 R \quad G' = 0.4683 \quad B' = 0.0097$$

Estas relaciones nos permiten determinar los valores triestímulo R',G',B' a partir de los valores triestímulo R,G,B correspondientes al estímulo observado bajo adaptación acromática. A continuación ponemos tales resultados para los tres estímulos analizados para el cambio de adaptación acromática al estímulo azul para el observador AC.

Estímulos	Predichos			Medidos		
	R'	G'	B'	R'	G'	B'
AZUL	8.0519	4.4489	0.2347	9.1697	9.6627	7.9638
VERDE	9.1145	4.8753	0.0358	9.9470	10.2591	0.7221
ROJO	8.1349	2.9959	0.0496	9.2909	6.9246	0.8259

Vemos claramente la existencia de discrepancias entre los valores triestímulo predichos y medidos, siendo éstas más pronunciadas para los valores triestímulo B'. Todo ello conduce, una vez planteadas las ecuaciones de transformación entre los correspondientes valores triestímulo CIE 1931, a desviaciones significativas, traducidas a coordenadas de cromaticidad, entre las predicciones y las determinaciones experimentales.

Algo similar ocurre cuando tratamos de aplicar las ecuaciones de transformación de Bartleson (1979b). Estas vienen dadas, tal y como mencionamos en el subapartado III.3.2.4, como



$$R' = a_r R \quad G' = a_g G \quad B' = k (a_b B)^P$$

Pues bien, si las aplicamos para el cambio de adaptación acromática al estímulo azul y, por ejemplo para el observador AC, obtenemos las relaciones siguientes

$$R' = 1.1406 R \quad G' = 0.5322 G \quad B' = 3.3249 \cdot 10^{44} (0.0097 B)^{18.63}$$

Los valores triestímulo predichos para el estímulo azul observado bajo adaptación azul son:  $R'=9.1353$ ,  $G'=4.2356$ ,  $B'=1.3099 \cdot 10^{28}$ . Los valores triestímulo medidos experimentalmente son:  $R'=9.2784$ ,  $G'=8.1910$ ,  $B'=4.4677$ . Podemos observar una discrepancia muy importante para el valor triestímulo  $B'$ , lo que hace indudablemente inadecuadas estas ecuaciones de transformación de Bartleson para estos cambios de adaptación cromática.

Finalmente cabe decir que las discrepancias entre las ecuaciones de transformación propuestas por diferentes investigadores pueden ser explicadas en base a los iluminantes bajo los cuales se cambia de adaptación. Los estudios realizados han tratado de analizar la apariencia de color bajo las adaptaciones a los iluminantes A y C o  $D_{65}$ , presentando éstos coordenadas de cromaticidad relativamente próximas en el diagrama cromático; en cambio nuestros estímulos adaptantes sí presentan grandes diferencias de cromaticidad lo que hace que se traduzcan en grandes diferencias entre valores triestímulo. Las ecuaciones de Helson y de Bartleson, por ejemplo, que resultan aceptables en sus trabajos sobre cambio de adaptación, tienen en cuenta los valores triestímulo de los iluminantes adaptantes en los cambios inducidos sobre los valores triestímulo de las muestras de color analizadas. Esto hace que cuando las apliquemos nosotros introduzcan factores muy grandes o muy pequeños en los coeficientes entre valores triestímulo. Por el contrario, las ecuaciones de transformación propuestas por nosotros no introducen los valores triestímulo adaptantes en el cálculo de los mencionados coeficientes, lo que nos permite salvar las grandes diferencias de valores triestímulo entre cada pareja de estímulos adaptantes.

## VIII. CONCLUSIONES

Los resultados que hemos obtenido en relación a la influencia de las condiciones de adaptación sobre las comparaciones sucesivas de color realizadas, pueden resumirse en las conclusiones que a continuación se expresan:

### DE CARACTER GENERAL

1) Se ha diseñado un dispositivo experimental versátil que nos ha permitido el estudio y determinación, tanto de los umbrales diferenciales como de las apariencias de color bajo diferentes condiciones de adaptación.

2) La investigación llevada a cabo se enmarca en el estudio de la dependencia que presentan las comparaciones sucesivas de color con las adaptaciones a los estímulos de tonalidad azul, verde y roja, así como a un estímulo acromático y a la oscuridad.

Su justificación se basa en la escasez de trabajos que abordan este problema mediante el empleo de colorímetros visuales, y más aun cuando las comparaciones de color se realizan en forma sucesiva.

3) El dispositivo experimental utilizado y el método general desarrollado para la obtención de las medidas, concernientes al estudio de los diferentes apartados mencionados en el presente trabajo, presenta las características de objetividad y reproducibilidad de las mismas que se exigen en cualquier investigación dentro del área de la Física de la Visión.

En este mismo sentido nos podemos pronunciar con relación al método de análisis de datos experimentales al evitarse, en la medida de lo posible, la subjetividad del observador así como el análisis parcial del funcionamiento del receptor visual.

#### DE CARACTER PARTICULAR

Las conclusiones que aportamos dentro del estudio particular que hemos realizado, las podemos agrupar según los dos aspectos concretos sobre los cuales hemos centrado nuestra investigación.

##### A. DISCRIMINACION CROMATICA.

4) En primer lugar, es de destacar la similitud del comportamiento entre ambos observadores salvo alguna discrepancia, que no es esencialmente significativa dado el carácter de las experiencias realizadas; lo que nos permite, de otro lado, poder generalizar la validez de los resultados experimentales obtenidos.

5) Como aspecto más significativo cabe mencionar la disminución de la capacidad de discriminación cuando los observadores se adaptan al estímulo rojo, traduciéndose en un aumento del tamaño de los umbrales de luminancia y cromaticidad, como consecuencia de la aparición de algún mecanismo de inhibición sobre los R-receptores.

En cambio, para las otras dos adaptaciones cromáticas no se encuentra un comportamiento generalizado del que puedan entresacarse conclusiones particulares.

6) De lo anterior se puede inducir una corroboración experimental de un modelo de visión basado en la teoría de los colores

oponentes. Y, por otro lado, podemos confirmar también la validez de los trabajos que aportan densidades de fotorreceptores responsables del mecanismo rojo mayores que la de los otros tipo de fotorreceptores, tales como los de Walraven (1973), en base a la evolución de la capacidad de discriminación cromática en función de la adaptación.

7) Los resultados obtenidos indican un cierto comportamiento, por lo general, tipo deután cuando la adaptación se da al estímulo rojo y tipo tritán para adaptaciones al azul. Tales circunstancias pueden también explicarse, en base al modelo de colores oponentes, por la aparición de procesos de inhibición que son más pronunciados para adaptaciones a largas longitudes de onda que a las cortas o medias.

8) Respecto de las adaptaciones a la oscuridad y al estímulo acromático, podemos establecer que la no aparición de tendencias sistemáticas, indicando variaciones específicas en la capacidad de discriminación, pueden ser justificadas en base a nuestros razonamientos ya planteados, puesto que en ambos casos no aparecen descompensaciones en las respuestas de los canales respectivos.

9) En lo referente a los centros de los elipsoides de discriminación, no se detectan variaciones en la posición de los mismos cuando varía la adaptación. Este hecho indica la conservación del metamerismo al variar la adaptación cuando se utiliza presentación sucesiva.

10) Con arreglo al estudio llevado a cabo a lo largo de las direcciones que determinan los estímulos primarios y los de referencia, podemos destacar que la capacidad de discriminación disminuye en las direcciones del primario azul frente a las otras dos direcciones. Tales resultados, aunque no es fácil su explicación, son de esperar dadas las orientaciones de las elipses de discriminación, lo que determinan umbrales mayores en las direcciones de los azules del diagrama cromático; lo que puede estar también conectado con las densidades relativas de los fotorreceptores.

## B. IGUALACIONES EN APARIENCIA.

Respecto al estudio realizado en las igualaciones en apariencia de color bajo cambios de adaptación, podemos establecer las siguientes conclusiones:

11) Los desplazamientos en las igualaciones en apariencia, respecto de los estímulos de partida, se dan siempre en el sentido que determinan los estímulos adaptantes y los de referencia bajo los cuales se realizan las igualaciones. Tales desplazamientos son menores cuando la adaptación se lleva a cabo bajo el estímulo acromático que para los respectivos cromáticos, correspondiendo a éstos últimos mayores desplazamientos, en términos generales, para adaptaciones de la misma tonalidad que los estímulos de partida.

12) Las igualaciones en apariencia bajo adaptaciones de igual, o parecida, tonalidad a la de los estímulos iniciales se dan para estímulos menos saturados que los correspondientes analizados. Por el contrario, cuando la adaptación es complementaria a la de los estímulos de partida los estímulos que los igualan en apariencia tienden a ser más saturados que los iniciales.

13) De los resultados experimentales, que han derivado las dos conclusiones anteriores, se induce una corroboración experimental del modelo de visión basado en la teoría de los colores opo- nentes, al igual que sucede en el estudio realizado para las discrimi- naciones de color, puesto que los mecanismos de visión del color están sujetos a las posibles inhibiciones de los tres canales que se establecen, según el mencionado modelo, cuando se activan los fo- torreceptores bajo diferentes estados de adaptación.

14) Respecto a las diferencias existentes entre las adaptaciones a la oscuridad y al estímulo acromático, detectadas a través de las igualaciones en apariencia de color, podemos estable- cer que existen ligeras tendencias a darse mayores desplazamientos para los estímulos igualados cuando la adaptación se realiza a la oscuridad que frente al estímulo acromático; posiblemente debido a efectos de deslumbramiento, máxime teniendo en cuenta el caracter aleatorio de las direcciones de los desplazamientos.

15) La luminancia relativa de los estímulos igualados en apariencia aumenta respecto de la de los de partida cuando éstos son observados bajo la adaptación a la oscuridad, circunstancia que, como hemos podido analizar, puede venir motivada por la desactivación de los mecanismos fotorreceptores en tal adaptación; lo que induce a un aumento de la luminancia de los estímulos igualados, bajo la adaptación siempre acromática, para obtener la misma sensación relativa de igualdad.

De otro lado, se detectan también valores mayores de la luminancia relativa cuando la igualación se realiza bajo la adaptación al estímulo azul que para el resto de las adaptaciones cromáticas. Tales resultados pueden explicarse en base a la menor concentración de los receptores responsables del mecanismo azul frente a la de los restantes fotorreceptores.

16) En cuanto al establecimiento de ecuaciones de transformación que predigan los estímulos de color que igualan en apariencia a uno dado cuando éste es observado bajo dos condiciones distintas de adaptación, podemos establecer:

i) La relación entre los valores triestímulo correspondientes a los estímulos de color observados bajo dos estados de adaptación se puede considerar, dentro de los límites de validez asociados a este tipo de trabajos, que viene dada mediante coeficientes proporcionales de la forma  $R'=a_r R$ ,  $G'=a_g G$ ,  $B'=a_b B$ ; lo que parece confirmar, dentro del rango indicado, la validez de la ley de los coeficientes de von Kries y, por tanto, el cumplimiento de las leyes de la aditividad y proporcionalidad, junto con la persistencia de las igualaciones metámeras, para nuestras comparaciones asimétricas de color.

ii) Las diferentes ecuaciones de transformación propuestas por otros investigadores, y aquí probadas, no son aplicables en nuestro caso, posiblemente debido al carácter de las comparaciones realizadas así como de las adaptaciones cromáticas seleccionadas. No obstante, la probada validez de las mencionadas ecuaciones de transformación puede venir condicionada en función de los estados

de adaptación bajo los cuales se analizaron; es decir, a los iluminantes A y C o  $D_{65}$ .

Es de destacar que las ecuaciones de transformación de Wasseff (1959), deducidas a través de un ajuste por mínimos cuadrados y en donde se analizan adaptaciones a estímulos cromáticos, obedecen a transformaciones tipo von Kries que no tienen en cuenta los valores triestímulo de los estímulos adaptantes.

## IX. BIBLIOGRAFIA

- CJ BARTLESON (1977) "A Review of Chromatic Adaptation". Color 77, 63-96 (Adam Hilger:Bristol).
- CJ BARTLESON (1979a) "Changes in Color Appearance with Variations in Chromatic Adaptation". Color Res. & Appl.,4,119-138.
- CJ BARTLESON (1961) "Color Memory in Relation to Photographic Reproduction". Phot.Sci.Eng.,5,327-331.
- CJ BARTLESON (1978) "Comparison of Chromatic-Adaptation Transforms". Color Res. & Appl.,3,129-136.
- CJ BARTLESON (1960) "Memory Color of Familiar Objects". J.Opt.Soc. Am.,50,73-79.
- CJ BARTLESON (1981) "On Chromatic Adaptation and Persistence". Color Res. & Appl.,6,153-160.



- CJ BARTLESON (1979b) "Predicting Corresponding Colors with Changes in Adaptation". *Color Res. & Appl.*, **4**,143-155.
- RE BEDFORD y G WYSZECKI (1958) "Wavelength Discrimination for Point Sources". *J.Opt.Soc.Am.*, **48**,129-135.
- WRJ BROWN (1951) "The Influence of Luminance Level on Visual Sensitivities to Colour Differences". *J.Opt.Soc.Am.*, **41**,684-688.
- WRJ BROWN y DL MACADAM (1949) "Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences". *J.Opt.Soc.Am.*, **39**,808-834.
- RW BURNHAM, RM EVANS y SM NEWHALL (1957) "Prediction of Color Appearance with Different Adaptation Illuminations". *J.Opt.Soc.Am.*, **47**,35-42.
- BH CRAWFORD (1970) "Just Perceptible Chromaticity Shifts". *Proc.Intern. Color Congr.,Color 69*,302-311 (Munterschmidt:Göttingen).
- A CRUZ y M ALVAREZ-CLARO (1973) "Conservación del Metamerismo en los Cambios de Adaptación Cromática". *Op.Pur.Apl.*, **6**,143-150.
- T HASEGAWA (1982) "The Appearance of Colors Produced by a Minimum-Energy Stimulus and Two Pairs of Fundamental Color". *Color Res. & Appl.*, **7**,201-204.
- H HELMHOLTZ (1896) *Handbuch der Physiologischen Optik* (Vos:Hamburg).
- H HELSON, DB JUDD y MH WARREN (1952) "Object-Color Changes from Daylight to Incandescent Filament Illumination". *Illum.Eng.* **47**,221-233.
- E HITA, M ALVAREZ-CLARO y M GUERRERO (1977) "Differential Thresholds Representation of Color". *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **32**, 882-893.
- E HITA, F GONZALEZ-CABALLERO y A CERVANTES (1982a) "On The Geometric Structure of Color Discrimination Thresholds". *Farbe*, **30**, 55-64.
- E HITA y E JIMENEZ (1980a) "Differential Thresholds of Color from Isomeric Matching". *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **35**,511-526.
- E HITA, L JIMENEZ, J ROMERO y M CABRERIZO (1983) "Stereoscopic acuity as a function light illumination". *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **38**,611-620.

- E HITA, L JIMENEZ DEL BARCO, R MARTINEZ y E JIMENEZ (1980b) "Variación de los Umbrales Diferenciales de Luminancia con el Tiempo de Exposición". *Opt.Pur.Apl.*,**13**,91-96.
- E HITA, L JIMENEZ DEL BARCO y J ROMERO (1986) "Differential Thresholds from Metameric Matches. Experimental Results Concerning Failures of Colorimetric Additivity". *J.Opt.Soc. Am.(A)*,**3**,1203-1209.
- E HITA y J ROMERO (1981) "Análisis de la Influencia de las Condiciones de Observación en los Procesos de Discriminación en Color". *Opt.Pur.Apl.*,**14**,11-17.
- E HITA, J ROMERO, L JIMENEZ DEL BARCO y A CARRILLO (1983-4) "Uniform Color Spaces. A Comparative Analysis for Color Discrimination Data". *Farbe*,**31**,229-242.
- E HITA, J ROMERO, L JIMENEZ DEL BARCO y R MARTINEZ (1982b) "Temporal Aspects of Color Discrimination". *J.Opt.Soc.Am.*,**72**, 578-582.
- RWG HUNT (1950) "The Effect of Daylight and Tungsten Lights Adaptation on Color Perception". *J.Opt.Soc.Am.*,**40**,362-371.
- RWG HUNT (1953) "The Perception of Color in 1° Fields for Different States of Adaptation". *J.Opt.Soc.Am.*,**43**,479-484.
- LM HURVICH y D JAMESON (1958) "Further Development of a Quantified Opponent-Colours Theory". *Visual Problems of Colour*,**2**, 691-723 (HM Stationery Office:London).
- M IKEDA y H SHIMOZONO (1979) "Luminous Efficiency Functions Determined by Successive Brightness Matching". *J.Opt.Soc.Am.*,**68**,1767-1771.
- D JAMESON y LM HURVICH (1972) "Color Adaptation: Sensitivity, Contrast, Afterimages". *Handbook of Sensory Physiology*,**VII/4**,568-581 (Springer-Verlag:Berlin).
- D JAMESON y LM HURVICH (1961) "Opponent Chromatic Induction: Experimental Evolution and Theoretical Account". *J.Opt.Soc. Am.*,**51**,46-53.
- J JUAN (1974) "Variación de la Transmitancia Espectral y del Color de Vidrios al Cambiar la Temperatura". *Opt.Pur.Apl.*,**7**, 55-59.

- DB JUDD (1945) "Standard Response Functions for Protanopic and Deuteranopic Vision". J.Opt.Soc.Am., **35**,199-221.
- HAE KEITZ (1955) "Light Calculation and Measurements" (Technical Library:Eindhoven).
- JA VON KRIES (1905) "Die Gesichtsempfindungen". Nagel's Handbuch der Physiologie des Menschen **III**,109-282 (Wieweg:Braunschweig).
- M KRYSTEK (1982) "Calculation of Triestimulus Values from Spectral Data with Regard to Measurement Uncertainties". Optik, **62**,49-58.
- Y LE GRAND (1970) "Théories sur la Métrique de L'espace des Couleurs". Proc.Intern. Color Congr., Color 69,257-265 (Munterschmidt:Göttingen).
- Y LE GRAND (1972) "Optique Physiologique" (Masson:Paris).
- J LOOMIS y T BERGER (1979) "Effects of Chromatic Adaptation on Color Discrimination and Color Appearance". Vision Res.,**19**,891-901.
- RD LOZANO (1978) "El Color y su Medicción" (America Lee:Buenos Aires).
- DL MACADAM (1961) "A Nonlinear Hypothesis for Chromatic Adaptation". Vision Res.,**1**,9-41.
- DL MACADAM (1937) "Projective Transformations of ICI Color Specifications". J.Opt.Soc.Am.,**27**,294-299.
- DL MACADAM (1943) "Specification of Small Chromaticity Differences in Daylight". J.Opt.Soc.Am.,**33**,18-26.
- DL MACADAM (1942) "Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight". J.Opt.Soc.Am.,**32**,247-274.
- C MCCOLLOUGH (1965) "Color Adaptation of Edge-Detectors in the Human Visual System". Science,**149**,1115-1116.
- KJ MCCREE (1960) "Small Field Tritanopia and the Effects of Voluntary Fixation". Optica Acta,**7**,317-323.
- Y NAYATANI, K TAKAHAMA y H SOBAGAKI (1981) "Formulation of a Nonlinear Model of Chromatic Adaptation". Color Res. & Apl., **6**,161-171.
- Y NAYATANI, K TAKAHAMA y H SOBAGAKI (1986) "Prediction of Color Appearance under Various Adapting Conditions". Color Res. & Appl.,**11**,62-71.

- SM NEWHALL, RW BURHAM y JR CLARK (1957) "Comparison of Successive with Simultaneous Color Matching". *J.Opt.Soc.Am.*, **47**, 43-56.
- I NIMEROFF (1957) "Propagation of Error in Triestimulus Colorimetry" *J.Opt.Soc.Am.*, **47**, 697-702.
- F PARRA (1970) "Seuils Differentiels de Couleur". *Proc.Intern. Color Congr.*, Color 69, 727-733 (Munterschmidt:Göttingen).
- FHG PITT (1935) "Characteristics of Dichromatic Vision". *Med.Res. Council. Report of the Committee on Physiology of Vision XIV* (HM Stationery Office:London).
- MR POINTER (1981) "A Comparison of the CIE 1976 Color Spaces". *Color Res. & Appl.*, **6**, 108-118.
- MR POINTER (1974) "Color Discrimination as a Function of Observer Adaptation". *J.Opt.Soc.Am.*, **64**, 750-759.
- K RICHTER (1980) "Cube-Root Color Spaces and Chromatic Adaptation". *Color Res. & Appl.*, **5**, 25-43.
- AR ROBERTSON (1978) "CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation". *Color Res.Appl.*, **3**, 149-151.
- J ROMERO (1984) "Discriminación Cromática Diferencial por Comparación Sucesiva de Estímulos". Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- J ROMERO, E HITA y L JIMENEZ DEL BARCO (1986) "A Comparative Study of Successive and Simultaneous Methods in Color Discrimination". *Visión Res.*, **26**, 471-476.
- J ROMERO, E HITA y L JIMENEZ DEL BARCO (1985) "Adaptation Aspects of Color Discrimination by Successive Comparison Method" *Farbe*, en prensa.
- J ROMERO, E HITA, L JIMENEZ DEL BARCO y A CRUZ (1986) "Influencia de Parámetros Temporales en la Discriminación Cromática por Comparación Sucesiva de Estímulos". *Opt.Pur.Apl.*, **19**, 77-83.
- L RONCHI y G FERRARA (1963) "On the Characteristics of Observers Employed in Visual Research". *Atti Fond. Giorgio Ronchi*, **18**, 203-219.
- E SCHRODINGER (1920) "Grundlinien einer Theorie der Fabermetrik in Tagessehen". *Ann.Phys.*, **63**, 481-520.

- R SEVE (1982) "Erreurs Systématiques Liées a L'emploi des Colorimètres Trichromatiques". *Information Couleur*,14-18,10-16.
- MH SIEGEL (1969) "Color Discrimination and Luminance". *Perc.Psychophys.*,66,163-166.
- VC SMITH y J POKORNY (1972) "Spectral Sensitivity of Colorblind Observer and the Cone Pigments". *Vision Res.*,12,2059-2071.
- H SOBAGAKI, T YAMANAKA, K TAKAHAMA y NAYATANI (1974) "Chromatic Adaptation Study by Subjective-Stimulation Method". *J.Opt. Soc.Am.*,64,743-749.
- D STEFFEN (1955) "Untersuchungen zur Theorie des Farbensehens". *Z. Biol.*,108,161-177.
- WS STILES (1961) "Adaptation, Chromatic Adaptation, Colour Transformation". *An.R.Soc.Esp.Fis.Quim.*,57,149-155.
- WS STILES (1946) "A Modified Helmholtz Line Element in Brightness-Colour Space". *Proc.Phys.Soc.London*,58,41-65.
- WS STILES (1959) "Colour Vision: the Approach through Increment-Thresholds". *Proc.Natl.Acad.Sci.*,45,100-114.
- WS STILES (1949) "Increment Thresholds and the Mechanisms of Colour Vision". *Documenta Ophtal.*,3,138-163.
- K TAKAHAMA, H SOBAGAKI y Y NAYATANI (1977) "Analysis of Chromatic-Adaptation Effect by a Linkage Model". *J.Opt.Soc.Am.*,67,651-656.
- K TAKAHAMA, H SOBAGAKI y Y NAYATANI (1984) "Formulation of a Nonlinear Model of Chromatic Adaptation for a Light-Gray Background". *Color Res. & Appl.*,9,106-115.
- K UCHIKAWA (1983) "Purity Discrimination: Successive versus Simultaneous Comparison Method". *Vision Res.*,23,53-58.
- K UCHIKAWA y M IKEDA (1981) "Temporal Deterioration of Wavelength Discrimination with Successive Comparison Method". *Vision Res.*,21,591-595.
- JJ VOS y PL WALRAVEN (1971) "On the Derivation of the Foveal Receptors Primaries". *Vision Res.*,11,799-818.
- G WALD (1964) "The Receptors of Human Color Vision". *Science*,145,1007-1017.

- PL WALRAVEN (1962) "On the Mechanisms of Colour Vision". Tesis Doctoral. Universidad de Utrecht.
- PL WALRAVEN (1973) "Theoretical Models of the Colour Vision Network" Color 73 (Adam Hilger:London).
- J WALRAVEN (1981) "Perceived Colour under Condition Adaptation: Evidence for Gain Control by  $\pi$  Mechanisms". Vision Res., 21, 611-620.
- EGT WASSEF (1959) "Linearity of the Relationship between the Tristimulus Values of Corresponding Colours Seen under Different Conditions of Chromatic Adaptation". Opt. Acta, 6, 378-383.
- WD WRIGHT (1941) "The Sensitivity of the Eye to Small Colour Differences". Proc. Phys. Soc. London, 53, 93-112.
- WD WRIGHT (1981) "Why and How Chromatic Adaptation Has Been Studied" Color Res. & Appl., 6, 147-152.
- G WYSZECKI (1972) "Color Matching and Color-Difference Matching". J. Opt. Soc. Am., 62, 117-128.
- G WYSZECKI (1959) "Propagation of Errors in Colorimetric Transformations". J. Opt. Soc. Am., 49, 389-393.
- G WYSZECKI y GM FIELDER (1971) "New Color Matching Ellipses". J. Opt. Soc. Am., 61, 1135-1152.
- G WYSZECKI y WS STILES (1967) y 2ª Edición (1982) "Color Science" (Jonh Wiley & Sons:New York).
- AN ZAIDEL, GV OSTROVSKAYA y YI OSTROVSKI (1974) "Técnica y Práctica de Espectroscopía" (Mir:Moscú).