

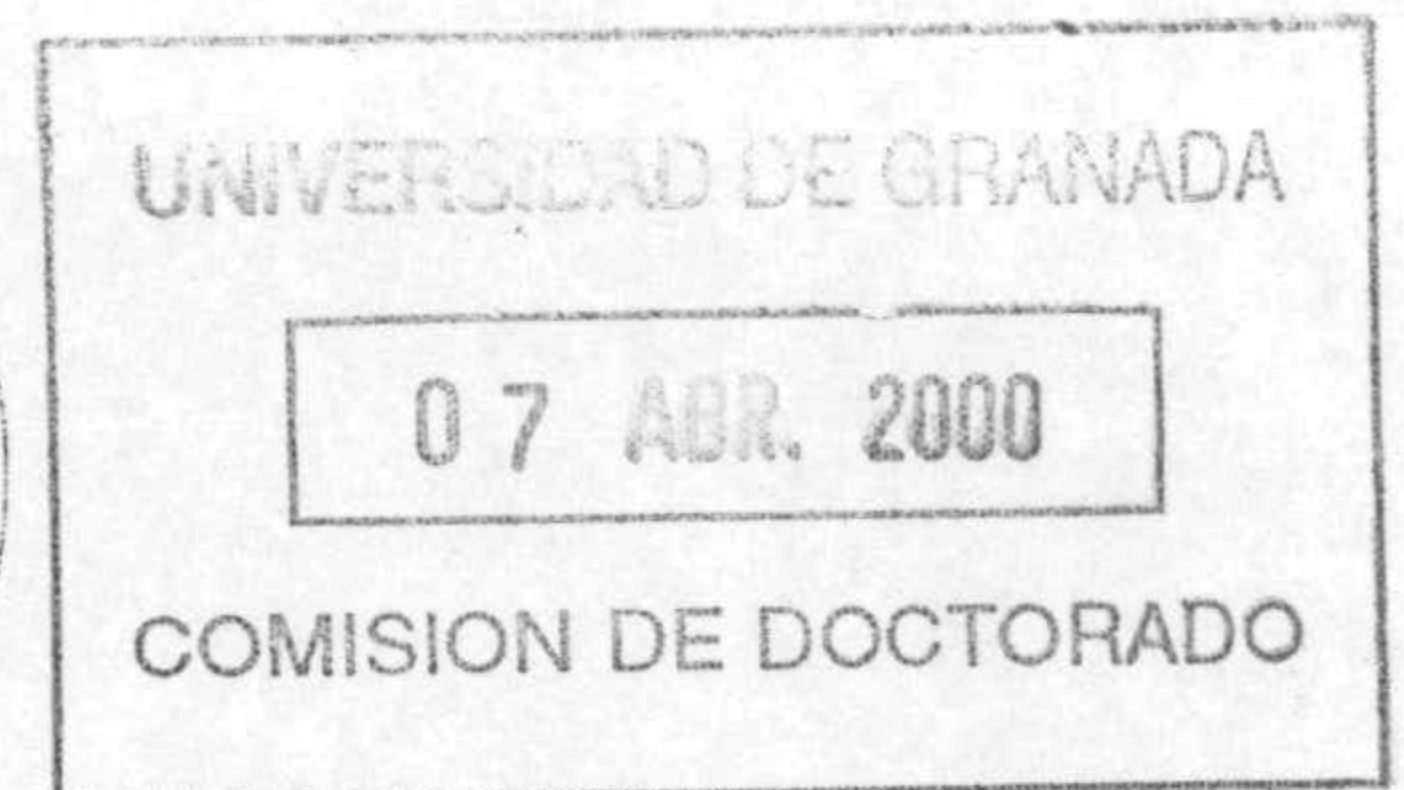
T-10-133

T. Prov. 23/159

UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Fecha 25/4/00
ENTRADA NUM. 1585

Tesis doctoral

Mecanismos de visión del color en tareas de
detección espacial:
CSF cromática y aplicaciones.



Departamento de Óptica
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada

Eva M. Valero Benito

Abril 2000



Biblioteca Universitaria de Granada



01254950

MECANISMOS DE VISIÓN DEL COLOR EN TAREAS DE
DETECCIÓN ESPACIAL: CSF CROMÁTICA Y APLICACIONES.

por

Eva M. Valero Benito.

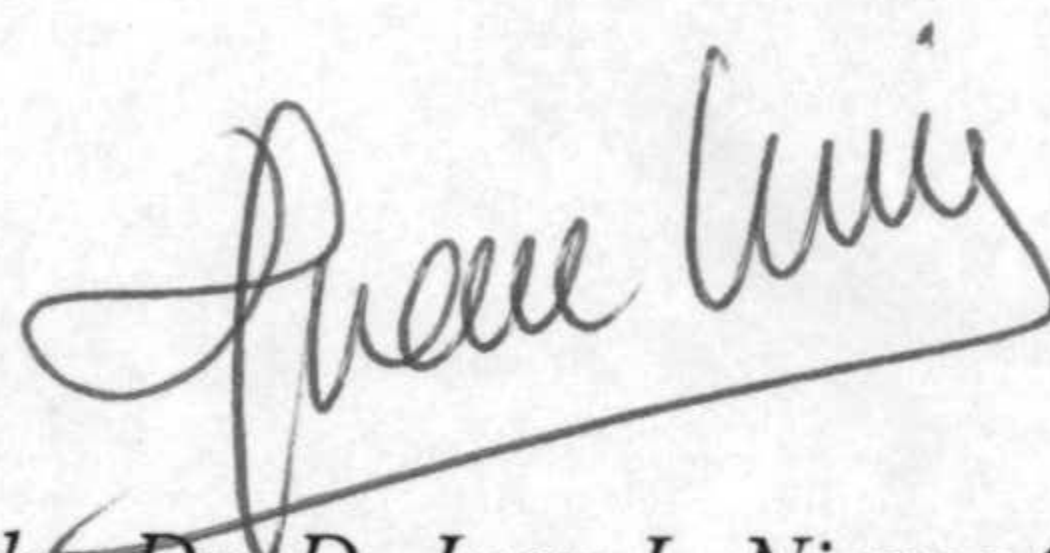
Visado en Granada
a 7 de Abril de 2000.

DIRECTORES DE LA TESIS



Fdo: Dr. D. José A. García García

Prof. Titular de la Universidad de Granada




Fdo: Dr. D. Juan L. Nieves Gómez

Prof. Asociado de la Universidad de Granada.

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
GRANADA
N.º Documental 13366499
N.º Copia 117763332

Memoria presentada para optar al grado de
DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS



Fdo: Eva M. Valero Benito

Licenciada en Ciencias Físicas

Quiero expresar mi agradecimiento a todos los que me han ayudado durante estos años, aunque no pueda hacerlo con la extensión que yo quisiera, porque ocuparía seguramente más espacio que el más largo de los capítulos de esta memoria.

A D. Enrique Hita Villaverde y a D. Luis Jiménez del Barco, por su confianza en el proyecto y por su constante apoyo. A D. Javier Romero Mora, por su ayuda y por sus valiosos consejos. Al Doctor Miguel Guerrero, por su muy importante colaboración y por su interés en la investigación.

A mis directores: José Antonio García García, por aportar su visión, basada en la experiencia, y por enriquecer el trabajo con numerosos e importantes detalles, y además por su comprensión de mis especiales circunstancias personales, lo que me ha ayudado mucho; Juan Luis Nieves Gómez, por ser mi tabla de salvación en más de una oportunidad, por aguantar todas mis neuras y las sesiones de medida con singular paciencia, y por ser la persona que mejor sabe trabajar en equipo, y una de las de mejor carácter que conozco.

A mis compañeros del Departamento de Óptica, por su sincero interés en el desarrollo del trabajo y por su simpatía, que ha hecho que me sienta como en casa. Voy a dar sólo unos pocos ejemplos de lo mucho que les debo:

A Javi, el "observador patrón"; sólo yo sé cuántas cosas he de agradecerle, porque es tan generoso que habrá olvidado más de la mitad de todo lo que ha hecho por mí en este tiempo. A JR, por haberme hecho reír tantas veces, y por darme la oportunidad de aprovechar al máximo el dispositivo. A Antonio, por su habilidad con "el hacha" y por hacer del desayuno uno de los mejores momentos del día. A "Herr Doktor" José Antonio Díaz, por haberme sacado de más de un brete informático, de forma que aprendiese mucho de la experiencia. A Paco, por sus consejos sobre páginas pares e impares, y sobre la vida en general. A Carlos Salas, por ser tan bueno y cariñoso conmigo, y por su dominio en el arte de la impresión. A Manolo Rubiño, por ayudarme con los libros clave y en muchas otras pequeñas cosas. A María del Mar Lázaro, por su ayuda en el trato con los pacientes. A Saro y Amor, por muchos momentos de amistad y buena compañía.

A Pietro, por darme tanto durante muchos días intensos, lo que me hacía volver con renovadas fuerzas al trabajo. A mis padres, por ser como son, por saber "atarse los machos" cuando la situación lo requiera y soportar tan bien inesperados cambios de horario en las cenas; no los cambiaría por nada del mundo. Sin ellos, no habría podido llegar hasta el final.

A mi familia.

ÍNDICE

Capítulo I. Introducción.....1

**BLOQUE I. ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO Y
OBJETIVOS.**

Capítulo II. Color Y Visión Espacial.....9

2.1. Introducción.....9

2.2. Curva de sensibilidad al contraste (CSF) en luminancia.....10

2.3. Modelo de filtros sintonizados en frecuencia: adaptación y enmascaramiento.....16

2.3.1. Adaptación en frecuencia espacial.....17

2.3.2. Enmascaramiento (“masking”).....19

2.4. Curva de sensibilidad al contraste cromático.....21

2.4.1. Efecto de la aberración cromática del ojo.....25

2.4.2. Aproximación fisiológica a la explicación de la forma de la CSF cromática.....27

2.5. Modelos de múltiples mecanismos cromáticos sintonizados.

Interacciones cromaticidad-luminancia.....31

2.5.1. Adaptación en frecuencia espacial.....31

2.5.2. “Masking” con redes cromáticas y “masking” cruzado.....32

2.6. Significado y aplicaciones de la CSF.....40

2.6.1. Importancia para el estudio global del sistema visual.....41

**2.6.2. Aplicaciones de la CSF en luminancia para el diagnóstico y estudio
de la evolución de determinadas patologías.43**

Capítulo III. Trabajos Anteriores.....49

3.1. Introducción.....49

3.2. Análisis de la CSF cromática, con y sin modulación temporal.....50

3.3. Sumación subumbral para cromaticidad y luminancia.66

3.4. Aplicaciones de tests de visión del color y de CSF cromática en esclerosis múltiple.	73
Capítulo IV. Planteamiento y objetivos.	79
4.1. Planteamiento.	79
4.2. Objetivos.	82
BLOQUE II. MATERIAL Y MÉTODO.	
Capítulo V. Dispositivo Experimental.	87
5.1. Introducción.	87
5.2. Sistema productor de estímulos.	89
5.2.1. Características generales de los dispositivos CRT Color.	89
5.2.2. Descripción general del sistema de producción de estímulos.	93
5.3. Puesta a punto del dispositivo.	95
5.3.1. Configuración del monitor Sony CSD17SF2 para la tarjeta VSG2/3 DSP.	95
5.3.2. Calibrado del monitor de presentación.	97
5.3.3. Hipótesis de calibración utilizadas.	102
Capítulo VI. Método Experimental.	105
6.1. Introducción.	105
6.2. Selección de los estímulos de color.	105
6.2.1. Descripción colorimétrica básica.	105
6.2.2. Definición de contraste cromático.	110
6.2.3. Líneas intermedias. Condicionantes sobre la definición de contraste.	114
6.2.4. Selección de estímulos para la técnica de sumación subumbral.	117
6.3. Determinación de la isoluminancia.	118
6.4. Descripción del método experimental.	120
6.4.1. Observadores.	123
6.4.2. Frecuencias espaciales utilizadas.	124
6.4.3. Cabina de observación.	126

6.4.4. Parámetros visuales.....	126
 BLOQUE III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	
 <i>Capítulo VII. CSF Cromática.</i>	
	133
7.1. Introducción.	133
7.2. Resultados para los ejes cardinales.	133
7.2.1. Eje rojo-verde.	134
7.2.2. Eje amarillo-azul.	135
7.3. Comparación con resultados de otros autores.	136
7.4. Influencia de las variaciones en tamaño de campo sobre la visibilidad.	141
7.5. Influencia de las variaciones en la luminancia media de las redes sobre la visibilidad.....	146
 <i>Capítulo VIII. Posibles interacciones entre los mecanismos de visión del color.....</i>	
	149
8.1. Introducción.	149
8.2. Resultados para los ejes intermedios.	150
8.2.1. Resultados para la línea intermedia '1'.	150
8.2.2. Resultados para la línea intermedia '2'.	152
8.2.3. Comparación de los resultados con los de los ejes cardinales.	153
8.2.4. Aportación a la caracterización de las posibles interacciones entre mecanismos visuales.	159
8.3. Resultados obtenidos por sumación subumbral.	161
8.3.1. Curvas de sumación subumbral para ambos observadores.	162
8.3.2. Aportación a la polémica sobre interacción luminancia-cromaticidad.	164
 <i>Capítulo IX. Aplicaciones de la CSF en Esclerosis Múltiple.</i>	
	167
9.1. Introducción.	167

9.2. Método experimental.	168
9.2.1. Descripción del método experimental.	168
9.2.2. Selección de los estímulos y definición de contraste cromático.	170
9.2.3. Parámetros experimentales.	172
9.3. Caracterización de los observadores.	173
9.4. Resultados del test de CSF cromática.	180
9.4.1. Análisis estadístico de las diferencias entre los resultados medios de ambos grupos.....	186
9.4.2. Análisis comparativo de los resultados en función de la prueba de Agudeza Visual.....	194

BLOQUE IV. CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA.

<i>Capítulo X. Conclusiones.</i>	199
10.1. Aportaciones.	199
10.2. Conclusiones.	200
<i>Capítulo XI. Bibliografía.</i>	205
<i>Apéndice. Esclerosis Múltiple.</i>	217

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Lo que se necesita para favorecer el genio de los descubrimientos es, en primer término, despertar las ideas; la audacia para concebir, que con nuestra educación no hace más que languidecer; el saber derramado a manos llenas, que centuplica el número de los investigadores, y por último, la conciencia de que la humanidad va a dar un paso hacia delante, porque casi siempre ha inspirado el entusiasmo o algunas veces la ilusión del bien a todos los grandes bienhechores.

Piotr Kropotkin. La conquista del pan.

Dentro del amplio campo de la visión del color, explorado ya en numerosos y muy importantes estudios, hay todavía algunas parcelas relativamente poco transitadas. Una de ellas es el objetivo del presente trabajo de investigación, que trata sobre la visión espacial del color o, en jerga técnica, el procesado de la información espacial por los mecanismos oponentes cromáticos.

Las razones de que haya sido estudiada con poca profusión no son, en este caso, de tipo técnico, pues los dispositivos experimentales más eficientes para generar redes cromáticas, los estímulos que se utilizan en este campo, se hallan suficientemente desarrollados desde hace más de treinta años. Para abordar trabajos de investigación en este campo resultaba necesario además un suficiente conocimiento del funcionamiento del sistema visual humano en lo referente a la visión espacial, que se desarrolló desde sus inicios para variaciones de luminancia. Esta puede ser una razón que explicaría, en sus inicios, el espaciado temporal entre las contribuciones al estudio de la visión espacial cromática. Hay una mayor proliferación de estudios sobre este argumento a partir de mediados de los años ochenta, cuando se comienza a explorar las posibilidades de las redes cromáticas con más detalle, en especial desde un punto de vista psicofísico y de aplicaciones clínicas, pues los estudios de tipo puramente fisiológico en animales con estímulos que varían espacialmente en cromaticidad son algo menos recientes (mediados de los sesenta hasta principios de los ochenta). Como se había venido demostrando con abundantes trabajos sobre visión espacial en luminancia, el campo de la visión espacial resulta de una importancia relevante tanto desde un punto de vista clínico o asistencial como desde la perspectiva que abre en torno al futuro desarrollo de sistemas de visión artificial, pues el

conocer con detalle cómo funciona nuestro procesado del contenido espacial de las escenas visuales es fundamental para abordar la tarea de reconocimiento de objetos.

Sin embargo, el estudio de la curva de sensibilidad al contraste cromático sigue presentando bastantes aspectos no resueltos, que van desde las distintas condiciones experimentales que han utilizado los distintos autores hasta la corrección o no de aberraciones cromáticas, o las distintas frecuencias utilizadas. Por otra parte, profundizar en su estudio puede ayudarnos a contribuir en temas de tanta actualidad como el análisis de las posibles interacciones entre los distintos mecanismos visuales. Además, y desde un punto de vista aplicado, resulta un test muy adecuado para detectar pérdidas de visión en determinadas patologías. Todo esto nos impulsó a emprender una nueva línea de investigación en el Grupo de Óptica de Granada, con todo lo que eso conlleva en cuanto a preparación teórica previa y ausencia de apoyos cercanos con conocimientos amplios sobre el tema. Aún con altibajos, comunes a todo trabajo de investigación, la experiencia de estos cuatro años ha resultado bastante positiva, lo que nos ha impulsado a continuar con la línea en un futuro inmediato. En esta memoria, hemos plasmado los resultados de este período inicial de la misma, según la estructura que esbozamos a continuación.

Hemos estructurado nuestro trabajo atendiendo a los cuatro grandes bloques usuales: el primero recoge los *antecedentes, planteamiento y objetivos*, en el segundo se trata todo lo referente al *material y método experimental*, en el tercero, *resultados y discusión*, se exponen y analizan los resultados obtenidos y en el último, *conclusiones y bibliografía*, las principales aportaciones y conclusiones obtenidas, así como las referencias bibliográficas consultadas. Cada uno de estos bloques quedará dividido además en distintos capítulos que tratarán los contenidos más específicos, según se expone a continuación.

El primer gran bloque en el que dividimos la memoria agrupa, además del presente capítulo de introducción, los dedicados a antecedentes, planteamiento y objetivos del trabajo (capítulos segundo, tercero y cuarto).

En el capítulo II se resumen los conocimientos previos básicos para abordar los siguientes capítulos, dedicando especial atención a los estudios sobre visión espacial en luminancia y los procedimientos que han permitido conocer el funcionamiento interno de la captación y elaboración de información espacial, tanto en luminancia como en cromaticidad. En especial, se dedica un amplio espacio a la definición y características de la *Curva de sensibilidad al contraste*

o CSF, tanto cromática como en luminancia, que representa el umbral de visibilidad frente a la frecuencia espacial y que es la función básica de trabajo en visión espacial. También se estudian varios métodos que han servido para construir los modelos más aceptados sobre procesado espacial, modelos que incluyen una serie de filtros sintonizados cuya envolvente da como resultado la CSF. Al final del capítulo, se dedica un apartado a las aplicaciones de tipo médico de la CSF a las que hacíamos referencia anteriormente.

En el tercer capítulo, nos centramos en los estudios más directamente relacionados con nuestro trabajo, referentes por tanto a la Curva de sensibilidad al contraste cromático y aplicaciones clínicas de las redes cromáticas para detectar pérdidas visuales en determinadas patologías. Hacemos referencia también, dado que es uno de los principales temas tratados en nuestro estudio, al problema de la interacción entre canales oponentes cromáticos a nivel subumbral, y en especial a una de las técnicas que emplearemos posteriormente para caracterizarla, denominada *sumación subumbral*. En la exposición de los aspectos más relevantes de los trabajos, en cada apartado se sigue un orden cronológico y se comentan los dispositivos experimentales y las técnicas empleadas, así como las conclusiones de mayor importancia que hemos podido extraer de la lectura de estos estudios.

El capítulo IV se dedica al planteamiento del trabajo a partir de lo expuesto en los dos capítulos anteriores y de lo que entendemos que resulta interesante abordar. Planteamos la necesidad de estudiar la influencia de varios parámetros experimentales sobre los resultados de umbrales de sensibilidad espacial, tanto en luminancia como cromáticos. Toda esta primera parte nos permitirá detallar los principales objetivos que pretendemos conseguir con el desarrollo del trabajo.

Una vez realizada la declaración de intenciones, entramos en terreno de la puesta en práctica de la misma, con el segundo bloque de la memoria, que incluye los dos capítulos dedicados a los medios técnicos necesarios y su puesta a punto (*Dispositivo experimental*, capítulo V) y también a la selección de estímulos empleados y a las varias partes del procedimiento de determinación de umbrales que utilizamos en el primer bloque de resultados del trabajo (*Método experimental*, capítulo VI).

Llegamos entonces a los tres capítulos que se dedican a la exposición y discusión de los resultados obtenidos (VII, VIII y IX), conformando el tercer bloque. El capítulo VII aborda la determinación la CSF cromática con estímulos situados a lo largo de los dos ejes cardinales del

espacio de representación cromática que hemos escogido, comparando los resultados obtenidos con los de trabajos anteriores y estudiando la influencia que sobre los valores de visibilidad umbral han tenido varios parámetros experimentales utilizados.

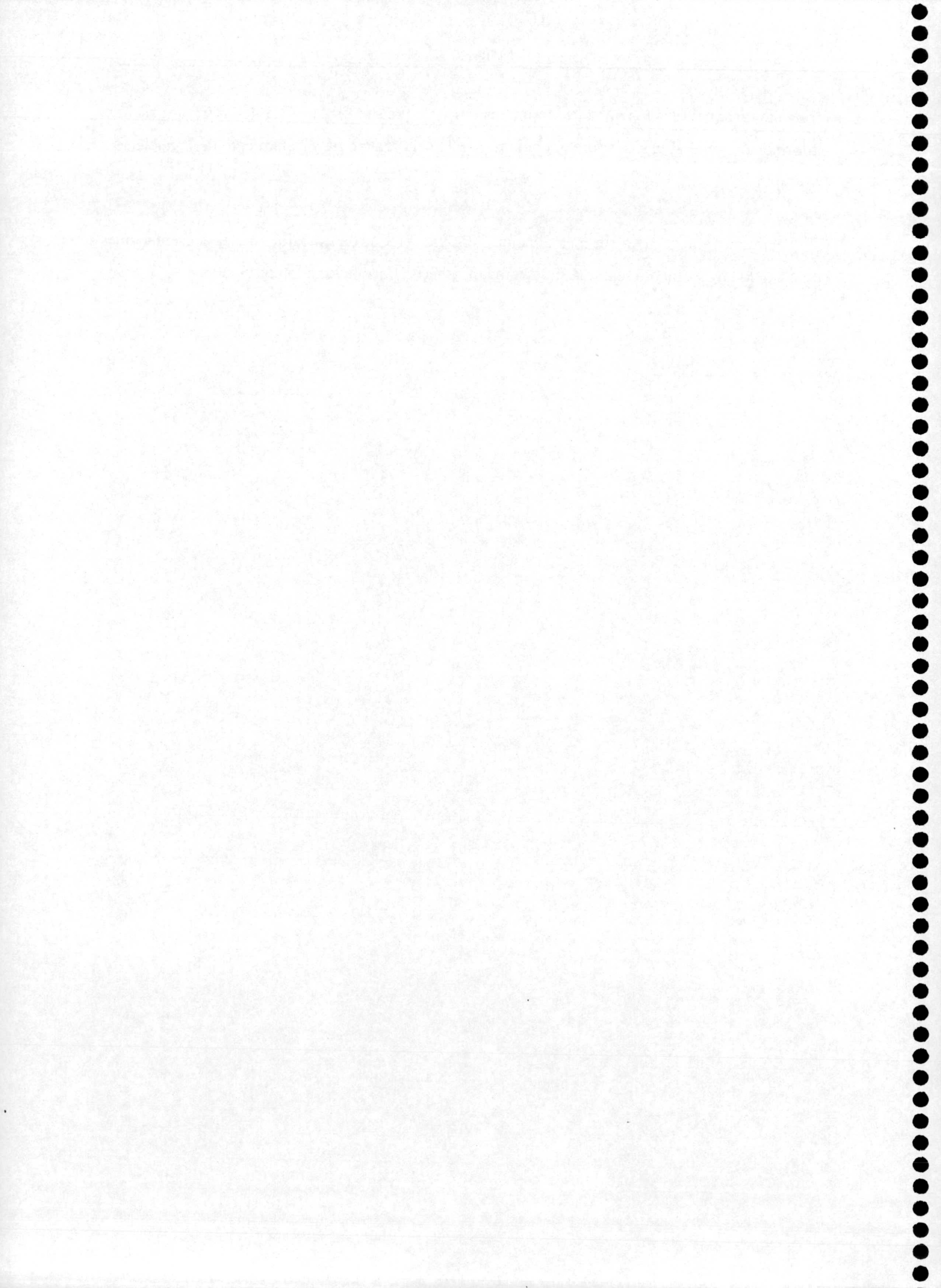
En el capítulo VIII se divide en dos partes, con una estrecha relación entre ellas. La primera trata de la determinación de la CSF cromática mediante estímulos que no se sitúan en los ejes cardinales, sino en líneas para las que se estimulan simultáneamente ambos canales oponentes. También se discuten las posibilidades que ofrecen estos umbrales de estimulación conjunta para estudiar posibles interacciones entre los canales cromáticos oponentes en la zona por debajo del umbral de percepción. En la segunda parte, se aborda de nuevo la cuestión de las posibles interacciones entre mecanismos mediante la técnica alternativa de sumación subumbral, y se exponen los resultados de dicho estudio junto con nuestra aportación a una polémica relativamente reciente sobre interacciones cromaticidad-luminancia.

El tercer capítulo del bloque de resultados se dedica a la parte más aplicada de la memoria, sobre medidas de CSF cromática en pacientes de Esclerosis Múltiple. Previamente, dadas las especiales condiciones de los sujetos que intervienen en las experiencias, se explica el desarrollo de un método experimental apropiado para llevar a cabo un estudio sobre visión espacial cromática en este grupo tan particular, ya que muchos de estos sujetos tienen problemas de movilidad, coordinación, concentración y en general de tipo psicológico. En la segunda parte del capítulo, se detallan los resultados obtenidos en cuanto a caracterización visual del grupo de pacientes según un conjunto de pruebas estándar, y los derivados del test sobre CSF cromática desarrollado especialmente para ellos. Posteriormente, se estudia su efectividad para detectar pérdidas visuales en los pacientes, se analizan los datos estadísticamente, y se consideran separadamente los sujetos que tienen agudeza visual normal dentro del grupo de pacientes. De este modo, podemos ver la influencia que un parámetro como la agudeza visual, que forma parte del examen visual básico tanto en la consulta oftalmológica como en las ópticas, tiene sobre los resultados de este tipo de pacientes en nuestro propio test.

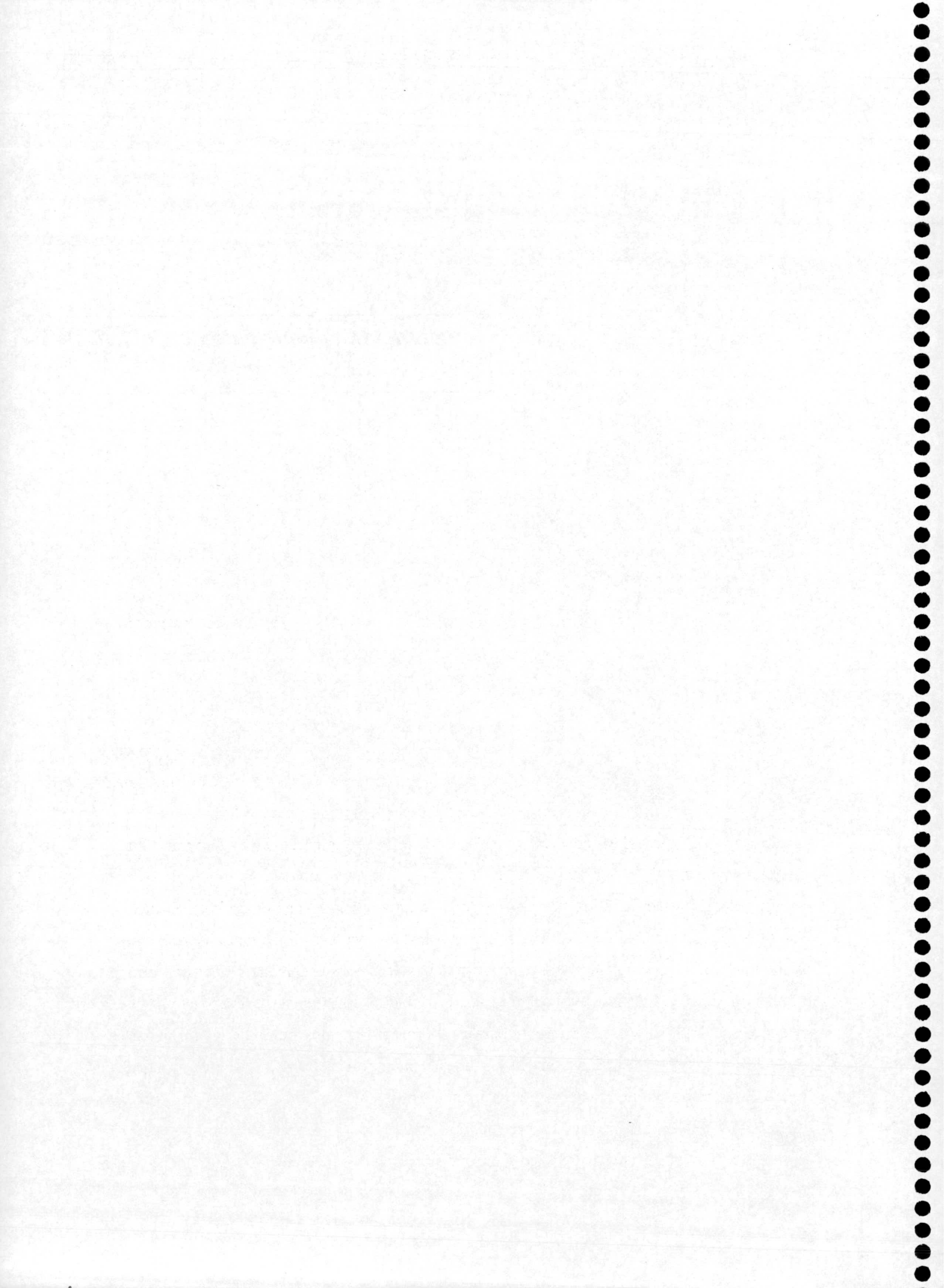
El último bloque de la memoria incluye los capítulos X y XI. En el décimo capítulo se presentan las principales aportaciones y conclusiones que hemos extraído de los resultados obtenidos y del desarrollo de las experiencias, y también se sugieren brevemente aspectos que merecerían en nuestra opinión ser objeto de futuras investigaciones. El capítulo XI lo dedicamos a la lista de las referencias bibliográficas que mencionamos a lo largo del texto, para facilitar la

consulta de aquellos a los que puedan interesar. El bloque se cierra con un *Apéndice* que incluye información general básica sobre la epidemiología, sintomatología y tratamiento de la Esclerosis Múltiple.

Pasemos entonces ya sin más dilación al primer bloque del trabajo, que las presentaciones demasiado largas incomodan más que agradan, y hacen flaco favor a lo presentado.



Antecedentes, planteamiento y objetivos.



CAPÍTULO II

COLOR Y VISIÓN ESPACIAL

¡Ojalá pluguiera a los Dioses, Agatón, que la sabiduría fuera una cosa que pudiera verterse de una inteligencia a otra cuando dos hombres están en contacto, como el agua pasa de una copa llena a otra vacía a través de una tira de lana!

Platón. El banquete.

2.1. INTRODUCCIÓN.

Dedicaremos este capítulo a exponer algunas cuestiones generales que servirán, por un lado, para desarrollar el marco en el que se encuadra nuestro trabajo y, por otro, para entender con más claridad diversos aspectos de los capítulos posteriores en los que abordaremos con mayor concreción los antecedentes y objetivos del mismo. Seguiremos una estructura paralela en los distintos apartados acerca de la visión espacial con variaciones de luminancia y los referidos a la visión espacial cromática, así como las interacciones existentes entre los mecanismos visuales que procesan la información en luminancia y cromaticidad.

A menudo en el campo de la visión nos encontramos con una serie de parcelas separadas, que se tratan como temas casi totalmente independientes. Este es el caso de la visión del color y la visión espacial. Sin embargo, en las escenas cotidianas nos encontramos usualmente (al menos en condiciones de iluminación suficientes para asegurar el nivel fotópico) con variaciones tanto de luminancia como de cromaticidad. Por ejemplo, cuando sobre los objetos incide la luz solar, sobre todo en horas de la mañana y de la tarde, se crean sombras en las zonas de los mismos que quedan menos iluminadas, lo que supone variaciones de luminancia en la escena. En muchas ocasiones estas variaciones son bastante más significativas que las de cromaticidad, por lo que cabe pensar que el sistema visual pueda procesarlas de forma preferente para conseguir el reconocimiento de las formas de los objetos. Pero, pensemos, por ejemplo, en un día nublado en que nos encontrásemos en un huerto de naranjos: las diferencias de luminancia entre las hojas de los árboles y las naranjas quedarían totalmente enmascaradas por las sombras producidas en los distintos estratos de hojas y ramas superpuestas, por lo que sin un sistema que detectase diferencias en el

contenido espectral de la luz reflejada sería una misión imposible distinguir visualmente el fruto del árbol de las hojas del mismo.

Este ejemplo puede servir como base para comprender por qué algunas especies han desarrollado un sistema visual mucho más complejo que otras para incluir el procesado de diferencias espaciales de color. En el caso de las especies nocturnas, la escasa iluminación nocturna condiciona que su percepción del mundo se realice sobre todo a través de sentidos no visuales como olfato y oído. En este grupo de especies resultaría bastante ineficiente contar con un sistema visual con sensibilidad espectral. Sin embargo, para especies diurnas cuya dieta consiste sobre todo en frutos y flores, la posibilidad de alimentarse puede depender en mucha medida de su capacidad para detectarlos entre el follaje e incluso reconocerlos bajo distintas condiciones de iluminación, lo que motiva el fenómeno de la constancia de color (Nieves, Romero, García y Hita, 2000). De ahí que bastantes especies de primates cuenten con visión del color bastante compleja, que conservamos nosotros como especie evolucionada a partir de aquellos.

Así pues, si consideramos por separado la visión espacial y la visión del color estaríamos dejando de lado la parcela común entre ambos tópicos, que tiene una importancia bastante considerable desde un punto de vista evolutivo. El estudio de lo que llamaremos *sensibilidad a las variaciones espaciales de cromaticidad* se ha desarrollado con bastante lentitud. No es hasta los últimos quince años cuando se detecta un creciente interés en la comunidad científica por completar diferentes aspectos asociados a este tema.

2.2.CURVA DE SENSIBILIDAD AL CONTRASTE (CSF) EN LUMINANCIA.

Cuando se trata de "visión espacial" en el sentido habitual del término, es decir, referido a variaciones de luminancia en las escenas naturales, hay un tipo de estímulos que se ha venido utilizando preferentemente desde que Campbell y Robson (1968) (aunque el pionero fue el estudio de Schade en 1958) explorasen las posibilidades del análisis de Fourier para estudios del contenido espacial de las escenas; este tipo de estímulos consisten en redes de perfil sinusoidal en las que la luminancia varía desde un valor máximo, L_{max} , hasta un mínimo, L_{min} , y la variación de tipo sinusoidal se repite periódicamente en el espacio con una cierta frecuencia. Estos tipos de estímulos resultan relativamente sencillos de generar, por ejemplo, con un monitor monocromo con un oscilador acoplado (Campbell y Robson,

1968). Los dos parámetros fundamentales de este tipo de estímulos son la *frecuencia espacial*, que determina el ancho de las barras alternadas claras y oscuras, cuya unidad usual son los ciclos por grado de ángulo visual (*c/deg* o *cpd*), y el *contraste en luminancia*, que se refiere básicamente a las diferencias de luminancia entre el máximo y el mínimo en cada ciclo. Este contraste se denomina usualmente contraste de Michelson y viene definido como:

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (1)$$

De modo que en el caso de que $L_{\min} = 0$, el contraste sería la unidad. Si el contraste va disminuyendo progresivamente, resulta cada vez más difícil para un observador distinguir las zonas claras de las oscuras, de modo que llega un momento en que el estímulo aparece como un campo gris uniforme. Algunos ejemplos se muestran en la figura 2.1.

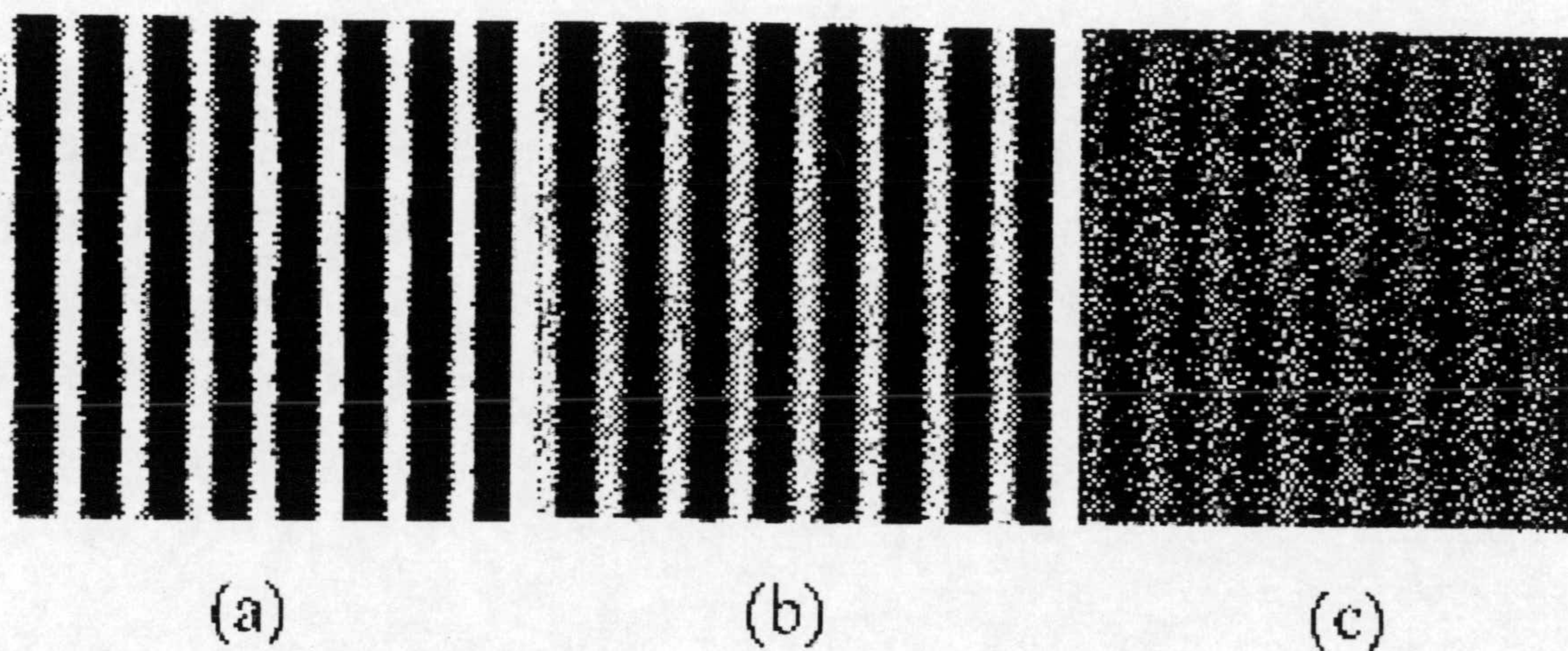


Figura 2.1. Ejemplos de redes sinusoidales en luminancia para valores de contraste (a) altos, (b) medios y (c) bajos.

Se puede, pues, determinar el valor de contraste para el que la red, de una determinada frecuencia espacial, resulta justamente perceptible por el observador (*contraste umbral*); repitiendo el procedimiento para un suficiente número de frecuencias espaciales se construye la *curva de sensibilidad al contraste en luminancia* (CSF), en la que se representa la inversa del contraste umbral (*visibilidad* o *sensibilidad*) en función de la frecuencia espacial. Un ejemplo típico de estas curvas puede observarse en la figura 2.2.

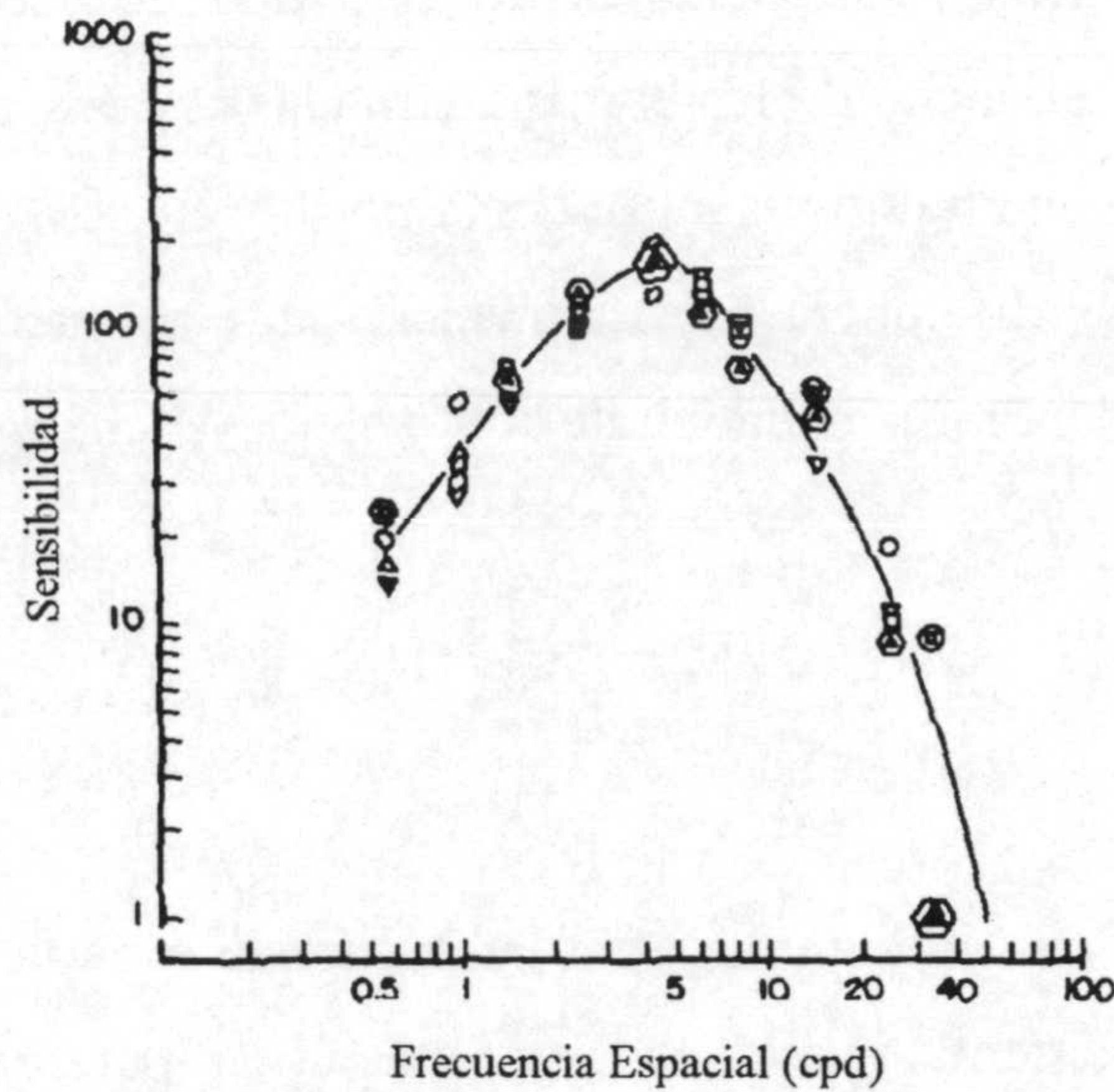


Figura 2.2. Ejemplo de CSF para un grupo de observadores (De Valois y De Valois, 1990). Puede observarse el crecimiento de sensibilidad desde valores bajos de frecuencia, hasta que se alcanza un máximo en torno a 5 cpd, para después decrecer en valores altos de frecuencia.

La CSF en luminancia ha sido obtenida no sólo con redes en las que la variación periódica en luminancia se produce entre un estímulo acromático “blanco” y otro negro, sino también para redes de otros colores, es decir, que en cada ciclo varían, por ejemplo, de verde brillante a negro. Estos estímulos se denominan *redes monocromáticas* en general, y los resultados (Kelly, 1974) muestran también un comportamiento similar al que podemos ver en la figura 2.2.

La forma típica que se obtiene de la curva se denomina *paso-banda*. La visibilidad resulta ser baja para frecuencias bajas, crece después hasta un máximo y tiende a disminuir de nuevo hasta alcanzar un valor mínimo (correspondiente a un estímulo que, aun a contraste máximo, no resulta perceptible para el sistema visual). La frecuencia para la cual se alcanza este mínimo de visibilidad se denomina *frecuencia de corte*.

También se ha obtenido la CSF en distintas especies animales, encontrándose que la forma es en todas bastante similar; si se normalizan las curvas, para descontar los efectos de los diferentes procesos de medición, se observa que la diferencia fundamental es el rango de frecuencias que cubre cada una de ellas (figura 2.3).

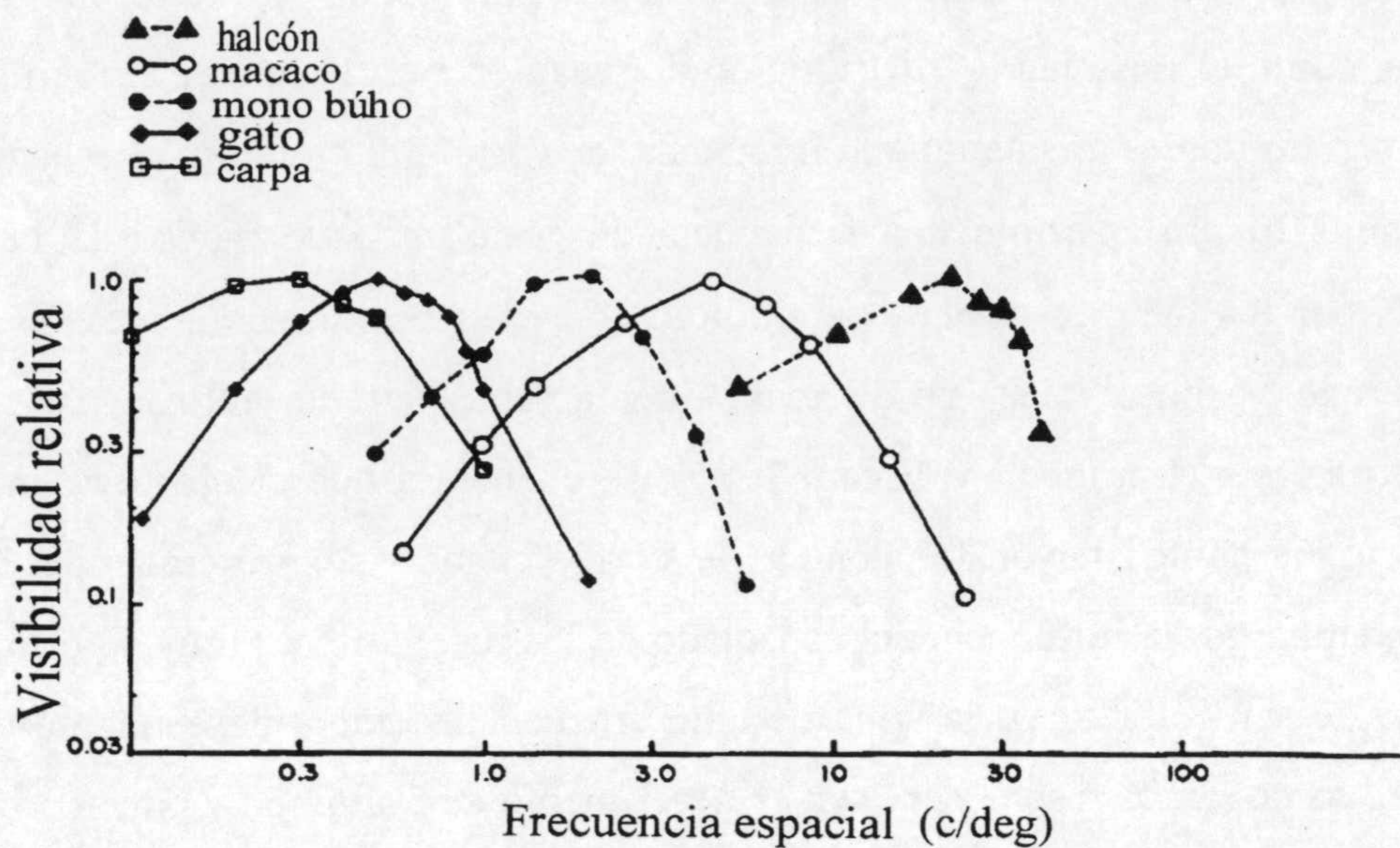


Figura 2.3. CSF normalizada para diferentes especies. Las curvas parecen desplazadas unas con respecto a otras: la CSF del halcón tiene el máximo de visibilidad en torno a 20 cpd, frecuencia que para el gato resulta imperceptible (De Valois y De Valois, 1990).

Con posterioridad, se estudió la dependencia de la forma de la curva y de su valor máximo de visibilidad con una serie de factores, entre los que destacamos el nivel medio de luminancia del estímulo y el tamaño del campo visual presentado. Se encontró que a medida que se reduce el nivel medio de luminancia del estímulo, la frecuencia de máxima sensibilidad de la curva tiende a adoptar valores más bajos y la visibilidad en general se ve reducida. Sobre la influencia del tamaño de campo, los resultados indican que se da un aumento de visibilidad para tamaños de campo menores de 2° y a partir de este valor la visibilidad se mantiene aproximadamente constante (De Valois y De Valois, 1990).

A parte de los distintos factores que influyen en la forma de la CSF en luminancia, un número importante de estudios se ha dedicado a intentar explicar su forma característica, en particular el origen de las propiedades de su forma paso-banda, es decir, la disminución de la sensibilidad umbral tanto para bajas como para altas frecuencias espaciales. Veámoslo con algo más de detenimiento.

Comenzaremos por la zona de altas frecuencias. Hay una serie de factores que contribuyen decisivamente a la atenuación de la sensibilidad que se produce en esta zona. Por un lado, factores que denominaremos de tipo óptico, como son las imperfecciones en la

córnea y el cristalino que introducen aberraciones, difracción por la pupila, difusión de luz en los medios oculares y variaciones de forma en el globo. Por otro lado, factores de tipo neurológico, como el espaciado y distribución de receptores en la retina. Sin embargo, estos últimos no son limitantes en cuanto a la frecuencia de corte. Por ejemplo, el espaciado medio en fovea (de 2,20 μm) permite una frecuencia de corte un poco mayor de la que viene determinada por los factores ópticos ya aludidos (60 cpd aproximadamente). Si se mide la CSF con redes sinusoidales producidas directamente en la retina por medio de interferometría láser (Campbell y Green, 1965), se encuentra que el ojo tiene mayor poder resolutivo (y por tanto mayor frecuencia de corte) cuando se prescinde de los medios ópticos. Sin embargo, la influencia del espaciado de los receptores es muy significativa en la disminución de sensibilidad en la zona de altas frecuencias (rama descendente de la curva paso-banda), como también se observa en el experimento de Campbell y Green.

La atenuación a bajas frecuencias no resulta tan fácil de explicar en primera instancia. Desde luego, los factores ópticos y de espaciado de receptores no tienen nada que ver con un efecto de este tipo, así que las causas deben situarse sobre todo en niveles posteriores del procesado visual, principalmente en las características de la respuesta de las células bipolares de la retina. El estudio de los campos receptivos de este grupo de células y la posterior organización de conexiones neurales (con las células horizontales y ganglionares y a un nivel post-retiniano con el *núcleo geniculado lateral* y la *corteza visual*), resulta clave en muchos de los trabajos de visión espacial, tanto de variaciones en luminancia como en cromaticidad. Por ello, dedicaremos un poco de espacio a exponer un ejemplo de argumentación basada en características de tipo neurofisiológico de las células de la retina, que sirve, en el caso que nos ocupa, para aproximarnos a las causas de la atenuación a frecuencias espaciales bajas.

El campo receptivo de una célula nerviosa retiniana (bipolar, horizontal, ganglionar, etc.) define la zona del campo visual en la que dicha célula responde a estímulos visuales. Esta zona es el resultado del conjunto de receptores que están conectados a la célula en cuestión. Generalmente, se representa con una figura que ilustra cómo responde la célula a incrementos de luz en las diferentes zonas de su campo receptivo. Como éste es una superficie, la figura resultante es tridimensional (algo similar a un sombrero mejicano), pero generalmente se suele realizar un corte transversal como el mostrado en la figura 2.4.

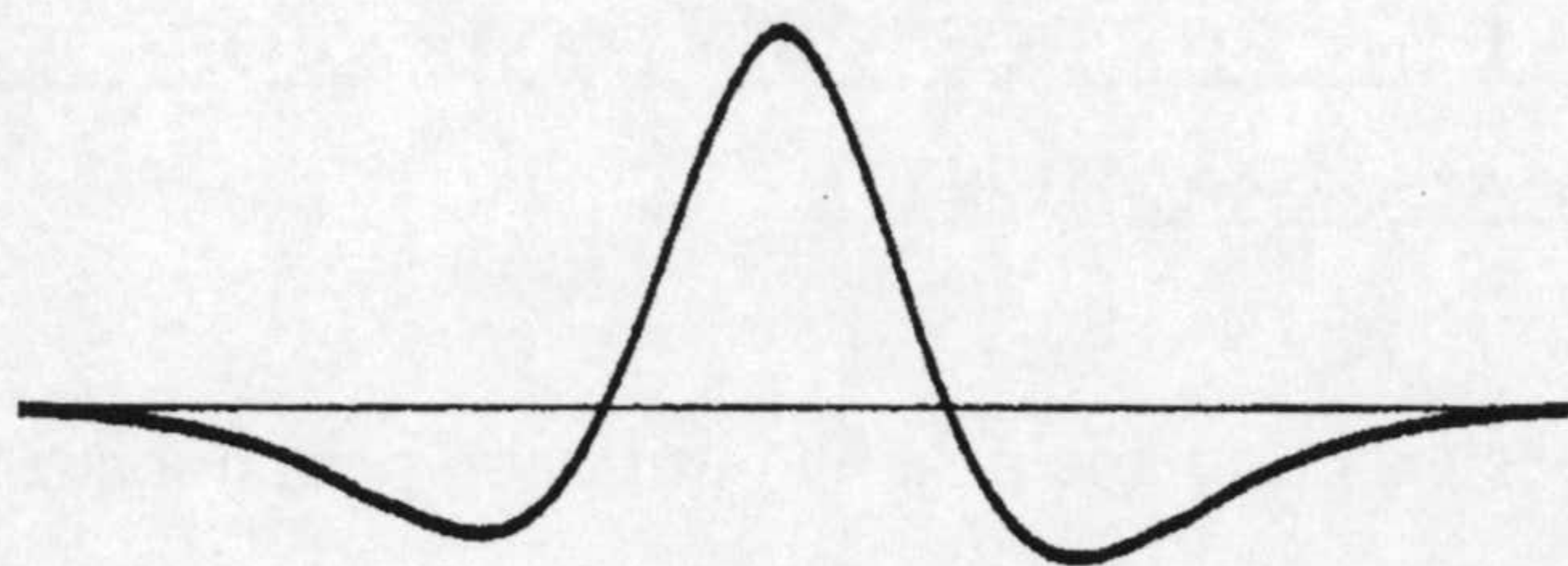


Figura 2.4. Perfil del campo receptivo de una célula bipolar que reacciona ante incrementos de luminancia (De Valois y De Valois, 1990).

Perfiles como los de la figura 2.4 indican esencialmente que la célula responde despolarizándose (o sea, conduciendo el impulso nervioso) si el incremento de luz se sitúa en la parte central del campo receptivo, mientras que si aquél se sitúa algo desplazado lateralmente, la célula se hiperpolariza (inhibe la transmisión del impulso nervioso). Pensemos entonces que la máxima respuesta que podremos obtener con esta célula se producirá para una frecuencia espacial que posibilite que la parte luminosa del ciclo coincida con el centro del campo receptivo, mientras que a los lados queden partes oscuras, pues si hemos dicho que se registra inhibición para incrementos de luz en esta zona, el efecto es el contrario para disminuciones de luz: los alrededores del campo receptivo reaccionan despolarizándose, y el grado de conducción del impulso nervioso es el máximo posible.

Sin embargo, si consideramos un estímulo de una frecuencia espacial lo suficientemente baja, tendremos que la parte luminosa del ciclo ocupa no sólo el centro sino también los alrededores del campo receptivo, con lo que éstos responden inhibiéndose y la transmisión del impulso nervioso se ve bastante disminuida con relación al caso anterior.

De esta forma podemos encontrar una primera explicación de por qué se produce una menor sensibilidad del sistema visual para la zona de bajas frecuencias. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que no estamos considerando el resto de los pasos o procesos que modifican la señal visual hasta que se recibe en la corteza visual. Como la complejidad de las conexiones neurológicas se incrementa considerablemente después de la retina, estas fases del procesado visual se conocen menos, por lo que resulta alentador que ya en los primeros estadios del procesado visual podamos dar cuenta de algunas de las características principales de la CSF en luminancia.

2.3. MODELO DE FILTROS SINTONIZADOS EN FRECUENCIA: ADAPTACIÓN Y ENMASCARAMIENTO.

Las redes sinusoidales en luminancia se han utilizado para construir modelos visuales de procesado de la información espacial. Esto obedece principalmente a dos causas: la primera se refiere a que, como apuntábamos antes, no podemos basar toda la explicación de las características de la CSF en procesos receptorales, sin entrar en la etapa posterior; la segunda causa es que no debemos olvidar que las escenas naturales no constan precisamente de redes sinusoidales, sino de estímulos bastante más complejos, usualmente cubriendo un rango amplio de frecuencias espaciales. Convendría entonces relacionar estímulos relativamente simples (como las redes) con los objetos reales para consolidar la utilidad de éstas en el estudio de la visión espacial humana. Ya en el trabajo de Campbell y Robson (1968) se intentó determinar las características del sistema visual como filtro de información espacial en concreto si era lineal o no. Si se comportase como filtro lineal, bastaría conocer su respuesta a estímulos de un conjunto de frecuencias espaciales aisladas para, a partir de ella, predecir la respuesta a estímulos más complejos.

Los resultados de Campbell y Robson (1968) son muy claros en este sentido: el sistema visual no se comporta linealmente como un filtro simple. Estos autores propusieron como hipótesis el utilizar un conjunto de filtros lineales con un ancho de banda bastante más reducido que el global derivado de la CSF. En otras palabras, la CSF sería la envolvente de las curvas de sensibilidad al contraste de un conjunto de canales neurales o mecanismos sintonizados —con una frecuencia de sensibilidad máxima— en varias frecuencias características. Una representación gráfica de esta hipótesis puede verse en la figura 2.5.

Thomas (1970) sugirió que estos filtros o mecanismos reflejarían las propiedades de los campos receptivos corticales de diferentes tamaños. A partir de estos trabajos, surge una serie de nuevas experiencias dedicadas a conocer las características y número de estos filtros. De este tipo de experiencias, señalaremos dos grandes grupos, por su valor como aportaciones al modelo de procesado espacial y su relación con las experiencias posteriores que incluyen variaciones de cromaticidad. Los dos grupos corresponden a las experiencias que involucran procesos de adaptación y las que proceden del empleo de la técnica del “enmascaramiento” (masking en la literatura anglosajona).

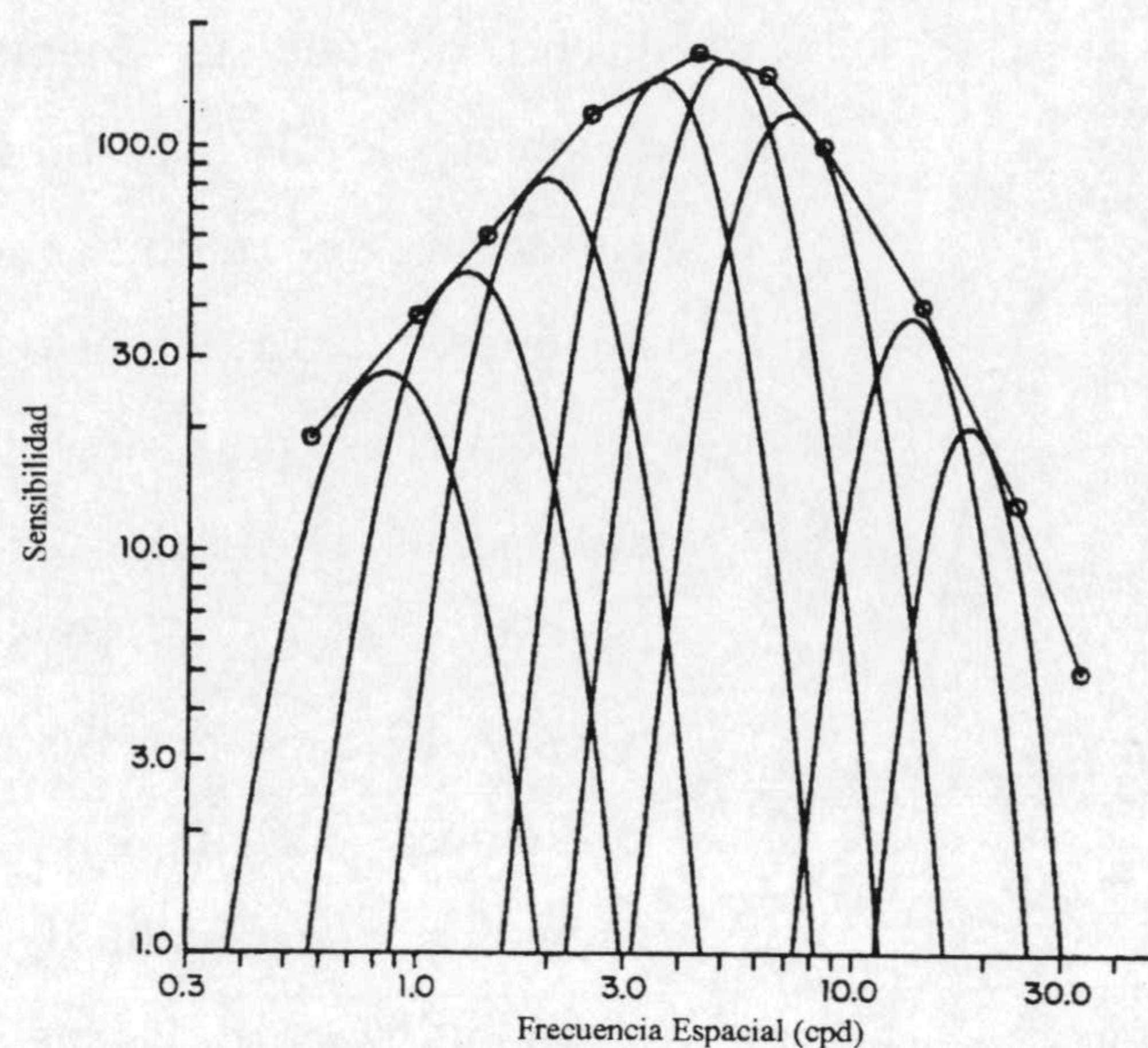


Figura 2.5. CSF como envolvente de varios mecanismos de menor ancho de banda, sintonizados en frecuencias clave (De Valois y De Valois, 1990).

2.3.1. Adaptación en frecuencia espacial.

El primer estudio que encontramos en este sentido es el de Blakemore y Campbell (1969), en el que se mide la CSF primero según el procedimiento usual que ya hemos explicado y, de nuevo, tras adaptar al sujeto a una red de frecuencia fija. Se concluyó que había pérdidas de sensibilidad en un rango de ± 1 octava* alrededor de la frecuencia de adaptación. Un ejemplo de los resultados puede verse en la figura 2.6.

Las pérdidas de sensibilidad por adaptación se relacionan con la estimulación de un determinado mecanismo de procesado: al adaptarse el sujeto a una frecuencia fija, el mecanismo que la procesa queda temporalmente inhibido, con lo que el sujeto encuentra dificultades para percibir no sólo la frecuencia en cuestión, sino todas aquellas que cubra dicho mecanismo. Si representamos la *elevación del umbral* (abreviada TE, que se define como el cociente entre el umbral pre y post adaptación) en función de la frecuencia, podremos tener una idea del rango de frecuencias que cubre el filtro y cuál es su frecuencia de pico o de máxima sensibilidad, tal y como se aprecia en la figura 2.7.

* Las octavas se definen en base a la fórmula $\text{No. Octavas} = \log_2 (f/f_0)$. Así, aumentar una octava significa doblar el valor de la frecuencia, y disminuir una octava, reducir la frecuencia a la mitad de su valor.

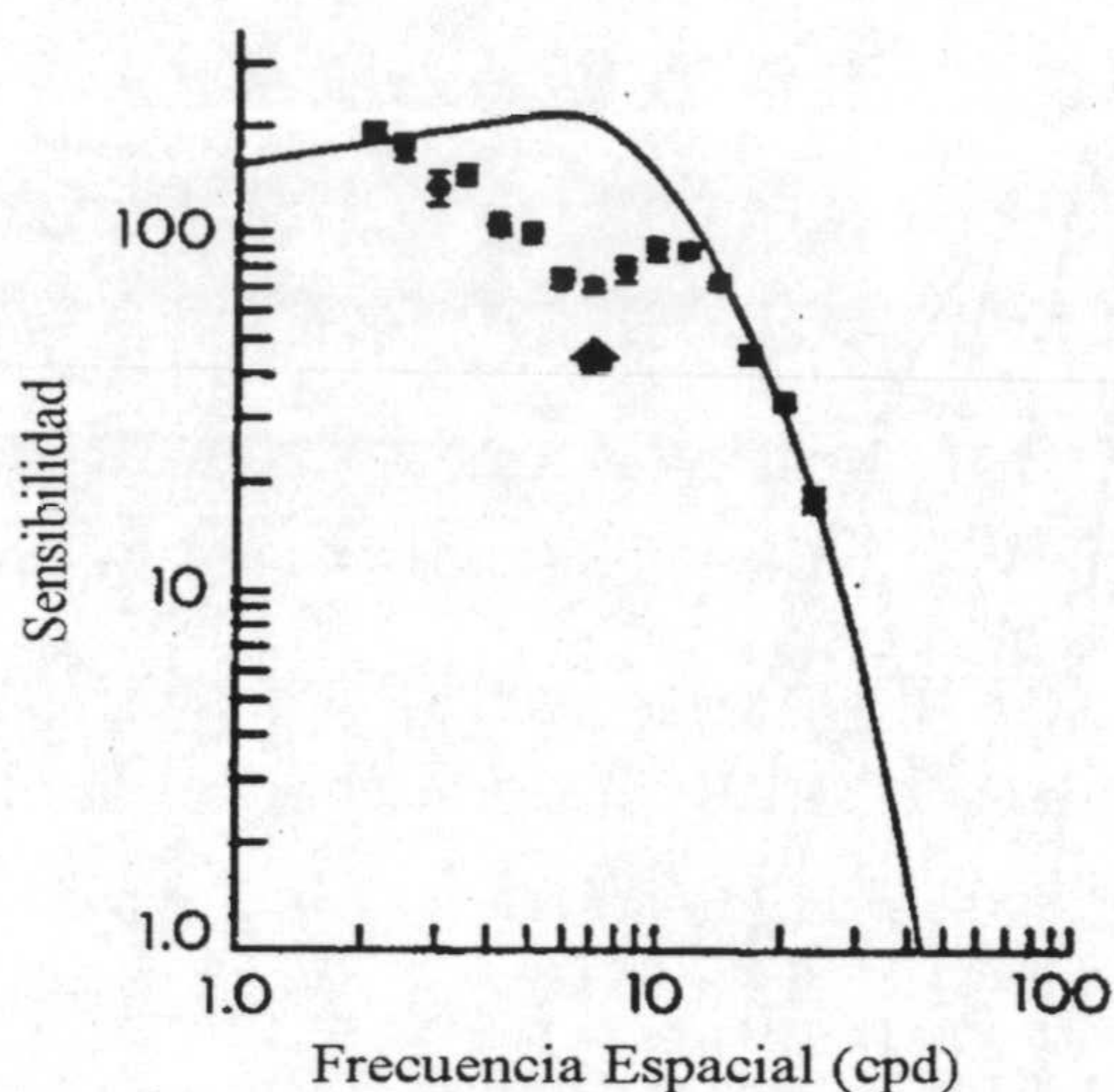


Figura 2.6. CSF antes (línea continua) después (puntos) de la adaptación a una red d frecuencia espacial de 5 cpd, indicada por l flecha (De Valois y De Valois, 1990).

mucho más amplio, así que un estímulo de 1 cpd tendría también componentes en frecuencia no despreciables de 3 cpd y, como el observador es bastante más sensible a 3 cpd, los efectos de adaptación a redes de 1 cpd y de 3 cpd resultarían muy similares.

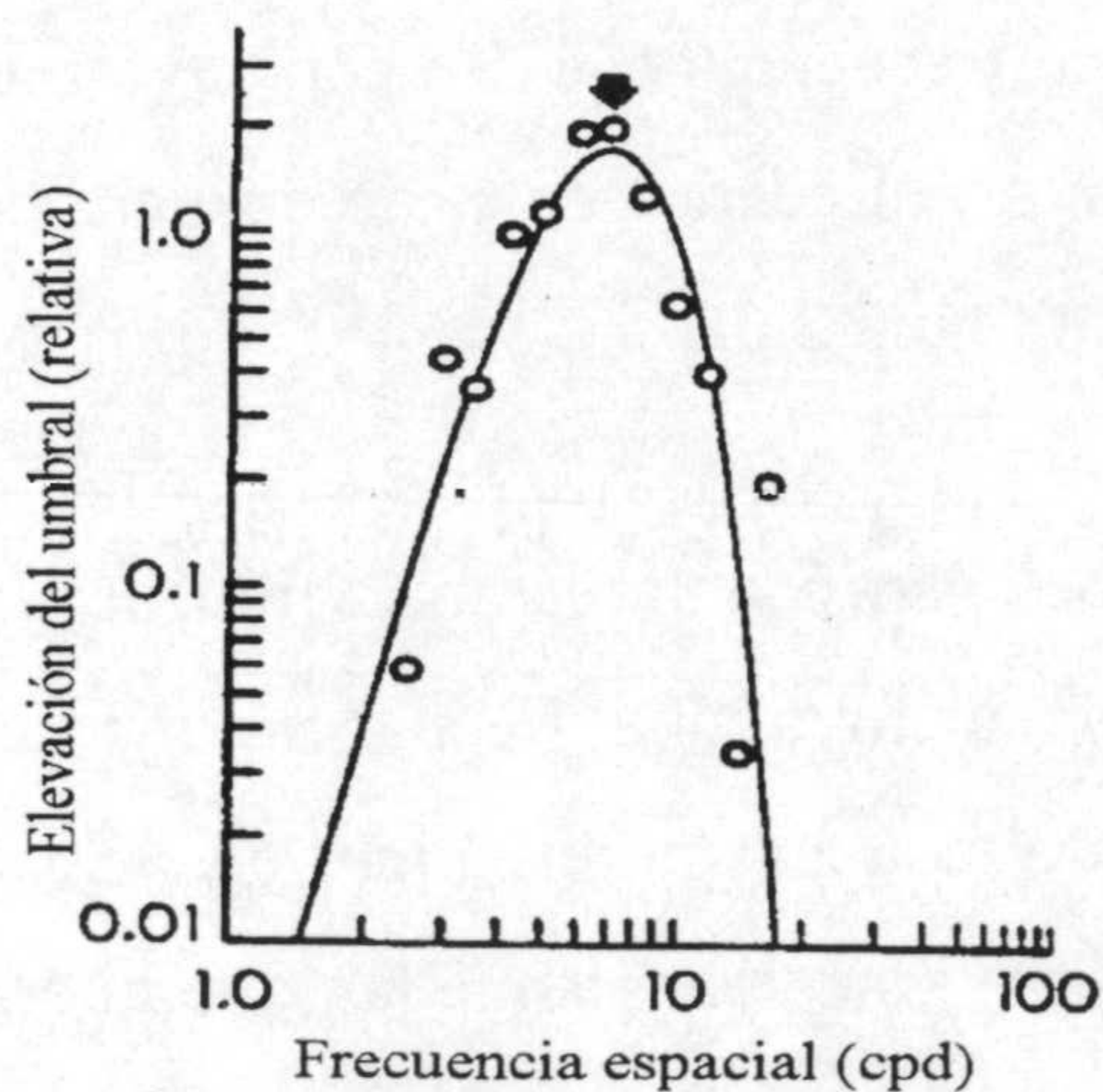


Figura 2.7. Elevación del umbral producida por la adaptación a 5 cpd para diferentes frecuencias.

inhibición que pesa sobre el resto cuando el filtro está activo, como consecuencia de lo cual se produce el aumento de sensibilidad. (De Valois y De Valois, 1990).

Un resultado curioso de este estudio es el hecho de que la adaptación a frecuencias menores de 3 cpd produce una curva de elevación del umbral centrada en 3 cpd, mientras que para el resto de casos el centro de la curva es precisamente la frecuencia de adaptación. De hecho, en trabajos posteriores (Savoy y McCann, 1975; Jones y Tulunay-Keesey, 1975) se demuestra que el resultado de Blakemore y Campbell (1969) estaba condicionado por el tamaño demasiado pequeño del campo utilizado en las medidas. Si el número de ciclos que se muestra al observador es demasiado pequeño, el espectro en frecuencia espacial del estímulo se extiende en un rango mucho más amplio, así que un estímulo de 1 cpd tendría también componentes en frecuencia no despreciables de 3 cpd y, como el observador es bastante más sensible a 3 cpd, los efectos de adaptación a redes de 1 cpd y de 3 cpd resultarían muy similares.

Otra conclusión del estudio de Blakemore y Campbell (1969) es la independencia de los diferentes filtros. Este resultado fue refutado posteriormente, demostrándose que el efecto de adaptación a 1 cpd repercutía también en un aumento de sensibilidad a frecuencias superiores a 4 cpd, bastante lejos del alcance del filtro centrado en 1 cpd. Esto significa que los diferentes mecanismos pueden inhibirse mutuamente, de forma que al adaptarse el observador a uno de ellos, se elimina la

2.3.2. Enmascaramiento ("masking").

Las características específicas de los distintos filtros espaciales involucrados en el procesado de información espacial se han estudiado también por medio de la técnica psicofísica denominada usualmente "enmascaramiento", que consiste en medir el umbral de detección de un test sin y con un estímulo superpuesto. Si no aparecen variaciones en el umbral se admite que los mecanismos que procesan ambos tipos de test son independientes, mientras que la aparición de algún efecto sobre el umbral indicará que, o bien los estímulos son procesados por el mismo mecanismo, o que hay interacción entre los diferentes mecanismos involucrados. El efecto sobre el umbral se clasifica en dos categorías: la denominada *facilitación* si la máscara ayuda a percibir el test y el *masking* a secas si la máscara dificulta su detección. Para visualizar gráficamente los resultados de este tipo de estudios, se utilizan generalmente dos tipos de representaciones:

- 1) elevación del umbral (TE) frente a la frecuencia espacial (abreviada SF), de forma similar a como se hace en los trabajos de adaptación espacial;
- 2) elevación del umbral (TE) frente al contraste de la máscara (abreviado C), que en algunos casos presenta una típica forma en gaviota, como se puede ver en la figura 2.8.

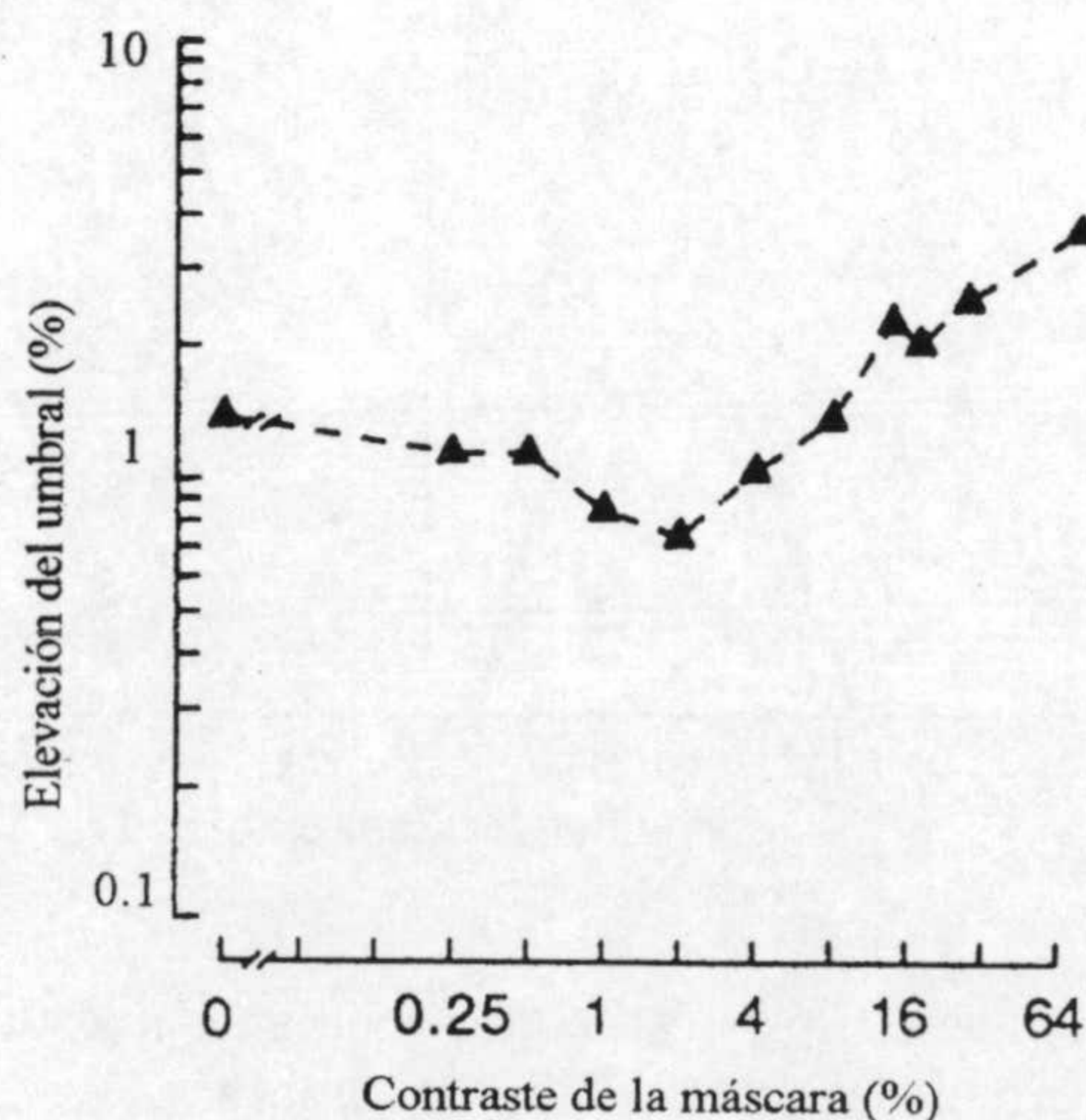


Figura 2.8. Representación de la elevación del umbral (en %) frente al contraste de la máscara (Switkes, Bradley y De Valois, 1988). Este tipo de representación suele presentar curvas similares todas a la forma "gaviota".

Los primeros trabajos en este campo utilizaron como test y máscara estímulos de la misma configuración espacial (redes cosenoidales); sin embargo, cuando el test y la máscara tenían la misma frecuencia espacial en realidad la tarea se transformaba en una discriminación de variaciones en contraste y existían, además, varios efectos aparentes sobre el estímulo que podían utilizarse como pistas para su detección. Por estas razones, Wilson, McFarlane y Phillips (1983) modificaron el paradigma de masking de forma que el test pasara de ser una red periódica de una cierta frecuencia a ser un estímulo cuya transformada de Fourier tuviera un ancho de banda de 1 octava. En el espacio de coordenadas espaciales, su perfil corresponde a una sexta derivada de Gaussiana, algo así como un sombrero mejicano bastante picudo de alas altas. La máscara seguía siendo una red periódica sinusoidal, pero con una orientación de $14,5^\circ$ con respecto a la vertical. Por eso, a esta técnica se llamó *masking oblicuo*. Del trabajo de Wilson *et al.* (1983), sobre test de frecuencias 0,25 a 22 cpd, resultaron seis diferentes mecanismos de procesado espacial, cuyas curvas normalizadas de elevación del umbral frente a la frecuencia espacial podemos ver en la figura 2.9. El ajuste que vemos en las curvas se consigue con funciones que resultan de diferencias de dos o, en algunos casos tres, curvas Gaussianas.

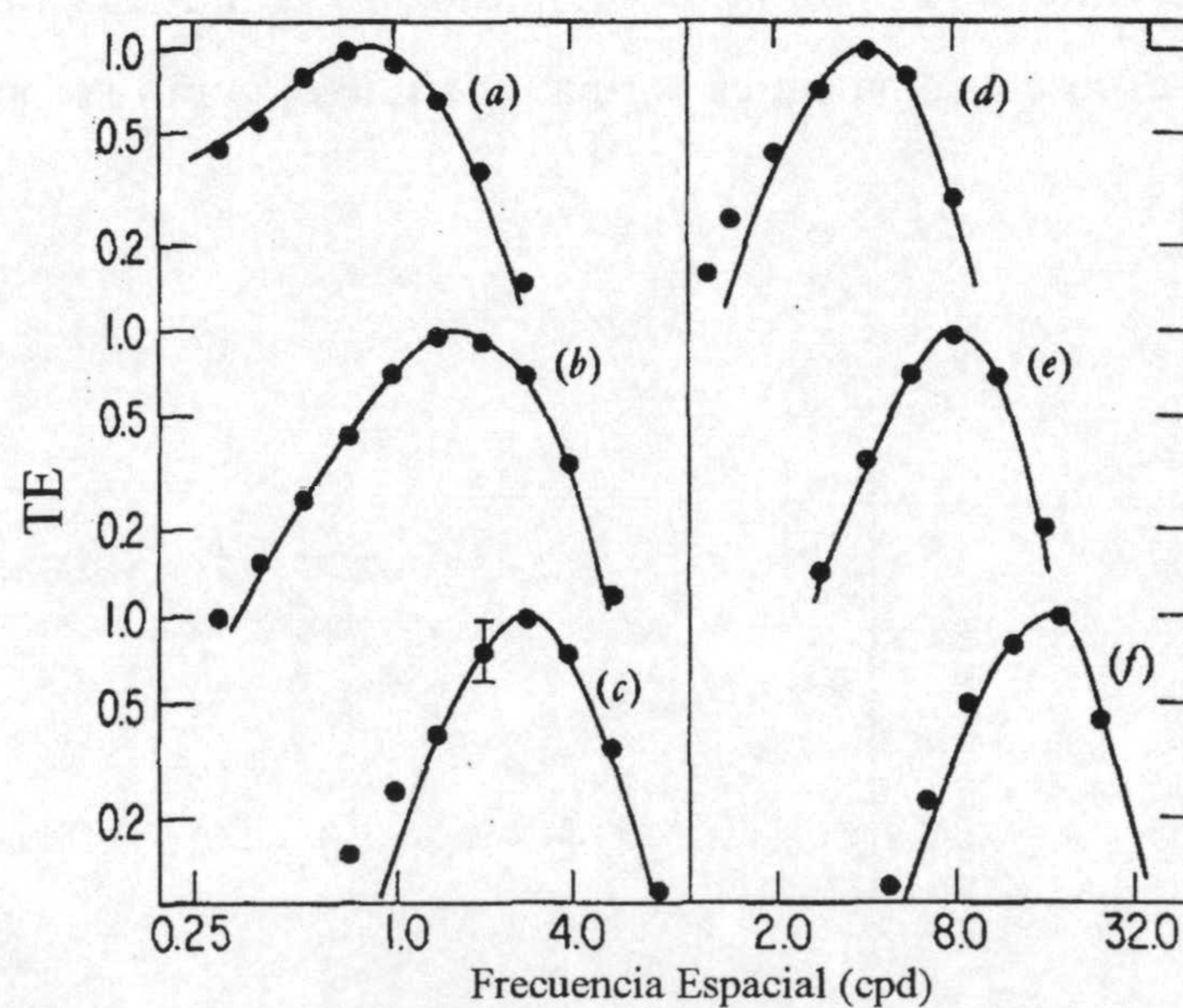


Figura 2.9. Sensibilidades de los seis filtros estimados mediante masking oblicuo. La figura muestra en abscisas la frecuencia espacial, y en ordenadas la elevación del umbral (TE). Se puede observar que los anchos de banda son menores para frecuencias de pico mayores. (Wilson *et al.*, 1983).

A partir del aislamiento de los distintos mecanismos involucrados en el procesado de la información espacial, se abre la posibilidad de calcular las respuestas de los diferentes filtros a un estímulo dado. Se podrían combinar, entonces, dichas respuestas para intentar predecir la respuesta global del sistema al estímulo, pero teniendo cuidado de utilizar un método de combinación apropiado. La interacción entre los diferentes mecanismos descarta la simple combinación lineal, así que se opta por una combinación cuadrática de funciones no lineales que reflejaban la respuesta de los distintos mecanismos a un test en concreto, ajustada sobre la base de datos fisiológicos y psicofísicos existentes. Otra segunda no-linealidad se introduce para calcular las respuestas individuales de cada mecanismo. Está basada en la evidencia derivada de los trabajos de masking acerca del procesado no lineal del contraste por cada uno de los diferentes filtros. Se trabaja además con respuestas diferenciales, puesto que para determinar umbrales se compara siempre el estímulo en cuestión con uno de referencia, en nuestro caso de contraste cero (Vision and Visual Dysfunction, tomo 10, pag. 68-71).

Una vez que hemos desarrollado algunos aspectos relevantes referidos a la curva de sensibilidad al contraste en luminancia, pasamos a explicar las características de la curva análoga para visión espacial cromática (que incumbe de forma directa a nuestro estudio, por lo que le dedicaremos un estudio más extenso en el capítulo siguiente). También expondremos los modelos existentes sobre el funcionamiento del procesado de este tipo de estímulos, así como la interacción entre los mecanismos que procesan el contenido espacial en luminancia y en cromaticidad.

2.4. CURVA DE SENSIBILIDAD AL CONTRASTE CROMÁTICO.

Vamos primero a describir el tipo de estímulos a los que nos referiremos, equivalentes a las redes sinusoidales en luminancia de una frecuencia espacial y contraste dados con las que iniciamos la primera parte del capítulo. A este tipo de estímulos les llamaremos *redes sinusoidales cromáticas*. En ellas, el concepto de frecuencia espacial no se altera con respecto a las redes moduladas en luminancia. El cambio fundamental se produce en el atributo del estímulo que varía de forma sinusoidal a lo largo de cada ciclo, que es la cromaticidad. Esto puede ser un poco más difícil de imaginar, por dos razones sobre todo:

- 1) Para la variación en luminancia, a lo largo de cada ciclo de la red se pasa de un máximo a un mínimo, entonces ¿cómo definimos los valores extremos en el caso de las redes cromáticas?
- 2) ¿Cómo se define el estímulo para asegurar que la variación de cromaticidad sea efectivamente sinusoidal?

Respondamos primero a la primera cuestión. Para las redes en luminancia recordemos que partimos de un valor medio y definimos dos extremos absolutos, un mínimo que resulta ser cero y un máximo que es el doble de dicho valor medio, de forma que, para un contraste unidad, recordando la expresión (1), en cada ciclo la luminancia varía del mínimo al máximo absoluto. Si queremos considerar variaciones de cromaticidad el asunto gana en complejidad. Sobre el diagrama CIE 1931, podemos trazar dos líneas que pasen por un determinado punto del mismo, de forma que al movernos sobre ellas varíe la estimulación de un solo canal oponente. Por ejemplo, tomando como punto de referencia el equienergético (de coordenadas 0,333; 0,333), podemos trazar una línea rojo-verde y una amarillo-azul tales que sobre ellas se estimulen los respectivos canales oponentes. Pero también podemos pensar en movernos sobre otro tipo de líneas, para las cuales se estarían estimulando simultáneamente ambos mecanismos oponentes, como por ejemplo una línea cuyos extremos fuesen naranja y verde azulado. En principio, cabe discutir si se obtendrían los mismos resultados si midiéramos umbrales de sensibilidad para redes cromáticas definidas en ambos tipos de líneas. Así pues, para construir una red modulada en cromaticidad necesitaremos en principio elegir una línea sobre el CIE 1931 o cualquier otro espacio de representación del color que queramos utilizar. Además de este problema, nos encontramos con el de dar una definición adecuada de contraste para la red. Si bien para las redes en luminancia la definición tipo Michelson está universalmente aceptada y considerada como muy razonable y simple por la inmensa mayoría de expertos en visión espacial, no hay acuerdo hasta la fecha sobre cómo definir el *contraste cromático*. Haremos una revisión más amplia sobre el tema en el capítulo VI, dedicado al "Método Experimental", donde también explicaremos la definición que hemos introducido para este parámetro.

Sobre la segunda cuestión, existe un acuerdo claro desde el trabajo de Van der Horst y Bouman (1969), sobre cómo diseñar el estímulo para obtener una variación sinusoidal de cromaticidad en cada ciclo, si bien el primer intento, algo polémico, fue el de Schade (1958).

El sistema que se ha utilizado consiste básicamente en la superposición de dos redes sinusoidales monocromáticas de igual frecuencia en oposición de fase. Para ilustrar esto veamos la figura 2.10: la red A es de color rojo y varía sinusoidalmente su luminancia, de forma que a lo largo de un ciclo pasamos de un rojo de alta luminancia a un rojo oscuro, que en nuestro caso es negro porque las redes tienen contraste Michelson unidad. La red B es de color verde, en todo igual a la roja menos en cromaticidad y fase inicial, que es de 180° de modo que el primer ciclo comienza por negro. El estímulo resultante de la superposición de

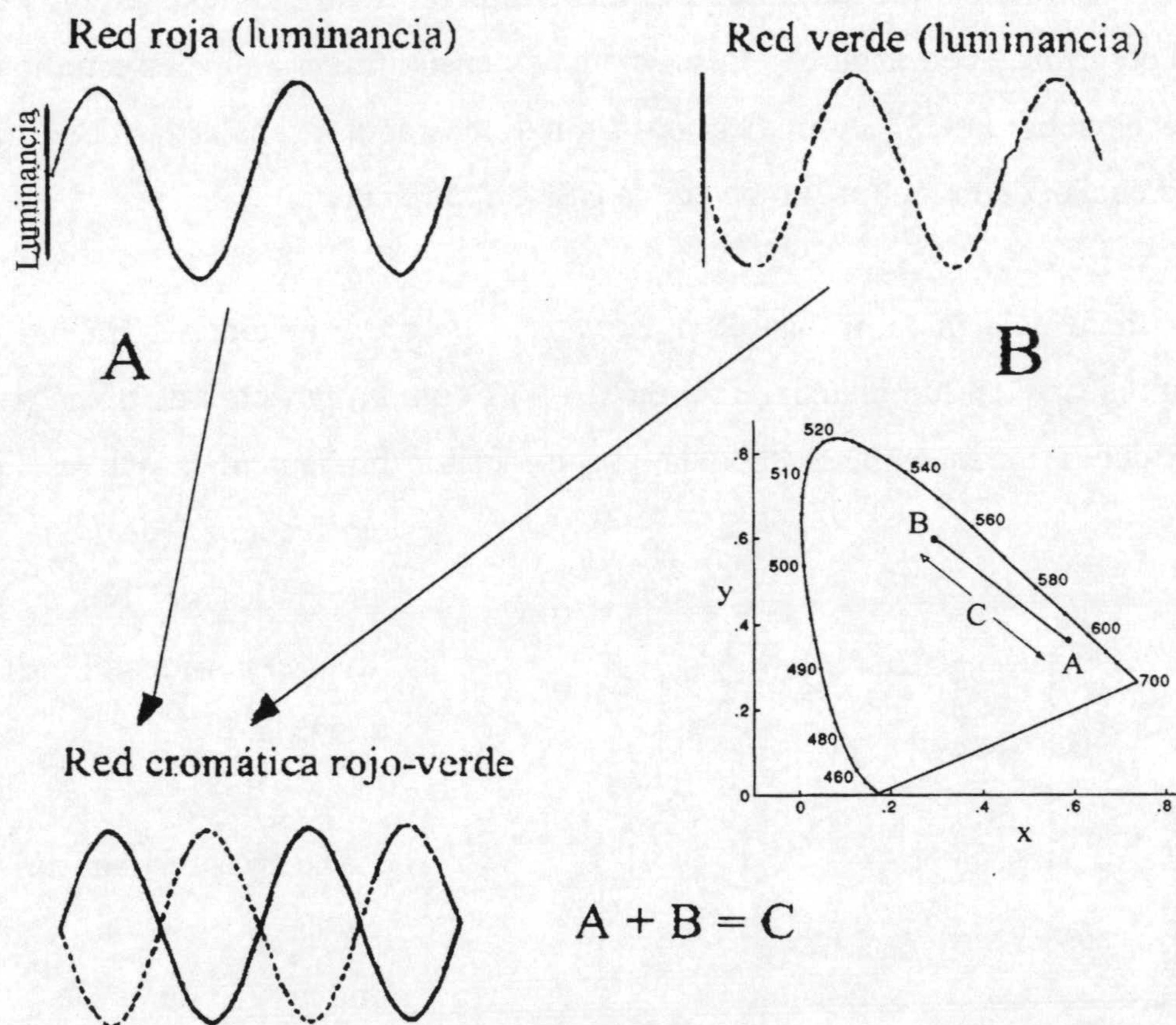


Figura 2.10. Construcción de una red sinusoidal cromática como combinación de una red en luminancia roja A y otra verde B, desfasadas 180°. A la derecha podemos ver un ejemplo de posiciones relativas de A, B y la línea que define la variación cromática de C, en el diagrama CIE 1931.

ambas redes (red C) presenta una tonalidad roja al inicio del ciclo (suma de rojo A + negro B) para llegar a un verde luminoso (suma de negro A + verde B) pasando por una serie de valores intermedios de tonalidad amarilla (suma de rojo A + verde B), en una modulación sinusoidal, puesto que hemos superpuesto dos redes sinusoidales. La línea sobre el diagrama

CIE 1931 que se ha usado en este caso para construir la red no pasa por el equienergético, sino por el amarillo resultante de combinar el rojo de la red A y el verde de la red B a las luminancias medias correspondientes.

Una vez conocido el tipo de estímulo del que hablamos, pasamos a revisar brevemente las principales aportaciones al conocimiento de lo que podemos llamar visión espacial cromática, o más técnicamente procesado de la información espacial por los canales cromáticos. Comenzaremos describiendo la forma de la curva de sensibilidad al contraste espacial cromático, o CSF cromática, siguiendo un curso análogo al del principio del capítulo para estímulos que varían en luminancia, pero, dado que dedicaremos el siguiente capítulo a describir y comentar con la suficiente extensión los principales estudios realizados hasta la fecha sobre la CSF cromática, nos limitaremos aquí a señalar las dos características que la diferencian de modo inequívoco de la CSF en luminancia:

- a) La frecuencia máxima visible o *frecuencia de corte* resulta ser mucho menor que para la CSF en luminancia, en torno a 10-12 cpd. La posición de dicha frecuencia se ve determinada en gran medida por un factor fundamental, que es la adecuada corrección de la aberración cromática del ojo en el dispositivo experimental utilizado para medirla.

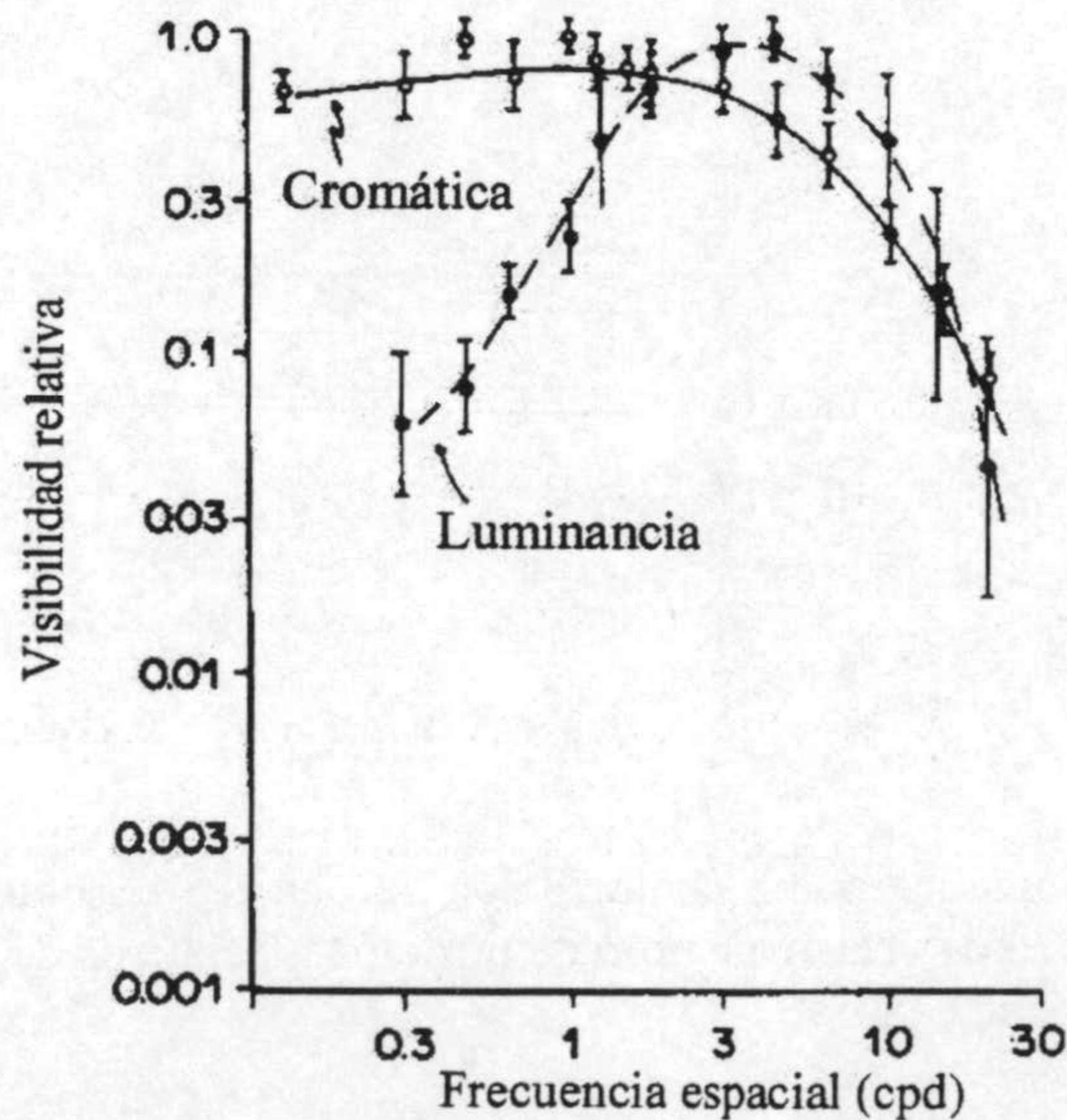


Figura 2.11. Comparación entre los resultados derivados de la medida de la CS cromática y la CSF en luminancia (Vision an Visual dysfunction, tomo 10, pag. 142).

- b) La curva resulta de tipo *paso-baja*, o sea, la visibilidad es máxima para la zona de frecuencias espaciales bajas (valores comprendidos entre 0 y 3 cpd aproximadamente), para luego decrecer hasta el valor de la frecuencia de corte.

En la figura 2.11 podemos observar, a modo de ejemplo, una comparación entre

datos de CSF cromática y de luminancia. La CSF cromática se ha medido sin corrección de aberración cromática, por lo que puede apreciarse que su frecuencia de corte es bastante mayor del valor real indicado anteriormente.

2.4.1. Efecto de la aberración cromática del ojo.

El factor de la aberración cromática, como se indicó en el apartado anterior, cobra especial importancia para la zona de frecuencias espaciales altas. Algunos autores (Flitcroft, 1989) señalan que puede ser de relativa importancia incluso para frecuencias medias, a partir de 2 cpd. Si se estudia la zona de la CSF de frecuencias bajas, no se produce una influencia significativa de este factor sobre los resultados de visibilidad.

¿Por qué no consideramos su influencia en la zona de bajas frecuencias y sí en la de medias y sobre todo altas? Por dos razones fundamentalmente: primero, el efecto del desenfoque (producido por la aberración cromática longitudinal) y distorsión de la frecuencia (producido por la aberración cromática transversal) resulta bastante más grave cuando el detalle que debe apreciarse sea más fino en el estímulo en cuestión (lo que implica un mayor contenido en frecuencias altas); segundo, conforme desciende la visibilidad umbral en la curva, los valores de contraste que debemos presentar al observador se acercan más al máximo, lo que equivale a decir que los colores que constituyen los extremos de cada ciclo son cada vez más diferentes entre sí, con lo que el efecto de las aberraciones comienza a constituir un problema apreciable.

Como ejemplo del alcance de la aberración cromática longitudinal y la potencia de algunos modelos de ojo desarrollados para su predicción, veamos la figura 2.12 (Thibos, Ye, Zhang y Bradley, 1992). En ella se representan los datos experimentales de ocho sujetos, obtenidos por el método bicolor de Vernier*, y la curva hiperbólica de predicción del modelo. Cuando se mide en fovea, el error refractivo causado por la aberración cromática va de -1,5 a 0,5 Dp aproximadamente, de uno a otro extremo del espectro visible.

* Consiste en aislar mediante un agujero estenopeico los rayos marginales que entran en el ojo, procedentes de un test de referencia (de 555nm) y otro de la longitud de onda para la que se quiere medir la aberración. De este modo, la diferencia de foco pasa a una diferencia de alineación entre ambos test, que el sujeto determina psicofísicamente. El error refractivo es proporcional a esta diferencia de alineación.

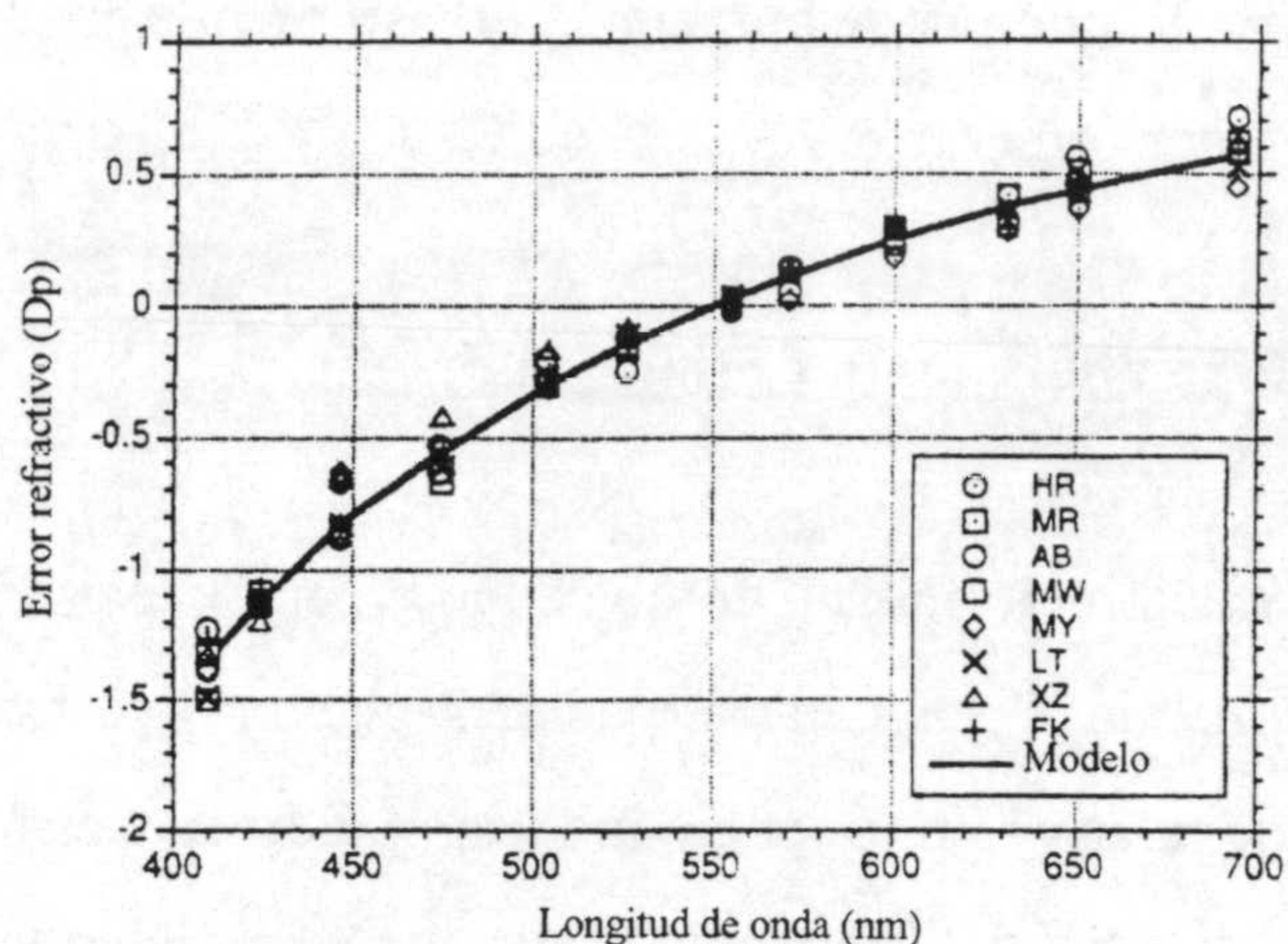


Figura 2.12. Aberración cromática longitudinal para un grupo de ocho sujetos. El error refractivo es relativo a la longitud de onda de 555 nm. Las predicciones se basan en el modelo de Thibos *et al.* (1992).

En la zona extrafoveal, se ha medido recientemente (Rynders, Navarro y Losada, 1998) la aberración cromática longitudinal (A.C.L.) por un método objetivo, ya que la escasa agudeza visual dificulta la tarea del observador en los métodos psicofísicos. Los resultados muestran que la A.C.L. crece con la excentricidad hasta 40°, aunque el crecimiento es muy reducido, aproximándose casi al nivel de significación estadística.

En cuanto a la aberración cromática transversal (A.C.T.), en el trabajo de Ogboso y Bedell (1987) se mide como función de la excentricidad. Los resultados muestran una falta de simetría con respecto al meridiano que contiene al eje óptico, lo que ha hecho que resulten bastante discutidos en trabajos posteriores (Flitcroft, 1989; Thibos, Bradley, Still, Zhang y Howarth, 1990).

Un enfoque diferente de la cuestión consiste en investigar posibles formas de corregir las aberraciones cromáticas, es decir, de acromatizar al ojo. El sistema que se ha venido utilizando por la mayoría de los investigadores interesados en eliminar la A.C.T. y A.C.L. es el diseño de Powell (1981). Consiste en un doblete de lentes más un triplete, cuya función es principalmente la de eliminar la A.C.T. adicional inducida por el primer doblete. Aún consiguiendo muy buenos resultados en la corrección de A.C.L. y A.C.T. oculares, tal y como se señala en el trabajo de Bradley, Zhang y Thibos (1991), éstos están muy condicionados por la precisión que se requiere para mantener la distancia del sistema corrector al ojo, pues los aumentos introducidos por el mismo dependen fuertemente de este parámetro, y cualquier pequeño desplazamiento lateral del ojo causaría un efecto de paralaje y la consecuente introducción de

cantidades significativas de A.C.T. Por esto, se recomienda el uso de inmovilizadores, como la barra dental, para minimizar los riesgos señalados antes. Además, como señalan Bradley *et al.* (1991), todos los estudios realizados, tanto para la medida como para la corrección de ambas aberraciones, utilizan estímulos de ancho de banda muy reducido. Sin embargo, cuando se ve un estímulo de ancho de banda amplio a través de un sistema corrector, la mejora en la calidad de la imagen no es significativa, por lo que estos sistemas no serían recomendables para casos en los que los estímulos se situasen en la zona cercana al equienergético (como es nuestro caso, según explicaremos en el capítulo VI dedicado al Método Experimental).

2.4.2. Aproximación fisiológica a la explicación de la forma de la CSF cromática.

Pasamos ahora a ofrecer algunos aspectos fisiológicos que en una primera fase de procesado del estímulo visual pueden constituir una base para comprender el por qué de la forma diferente de ambas curvas.

Hay abundantes evidencias fisiológicas y psicofísicas (Hurvich y Jameson, 1957; De Valois y De Valois, 1975; Boynton, 1979) de que el sistema visual humano procesa la información visual sobre la base de tres canales independientes a nivel post-reptoral: dos de carácter oponente que codifican la cromaticidad y uno de carácter no oponente que codifica la luminancia. A esta división ya hemos hecho referencia en apartados previos del capítulo, pero en esta ocasión la destacamos con el fin de realizar un seguimiento del recorrido de la señal visual en cada uno de estos canales, partiendo de la fase primera del procesado (o fase pre-oponente) que comienza en retina. Esta primera fase se inicia en la respuesta generada por los fotorreceptores (conos L, M y S, y bastones en el área extrafoveal). Estas células están conectadas a neuronas bipolares y horizontales que llevan a su vez a neuronas de tipo ganglionar, las cuales conducen la señal nerviosa a través del nervio óptico. Después, la siguiente "estación de recambio" (unión sináptica con otras neuronas) se produce en el *núcleo geniculado lateral* (LGN), en el que los axones de las células ganglionares conectan con el cuerpo de las células geniculadas, cuyos axones llegan a la zona final de procesado en la corteza occipital (áreas 17, 18 y 19 de Brodmann).

La característica más destacable de la mayoría de células ganglionares y del LGN de los primates (en concreto monos macacos, pero también presumiblemente de los humanos) es que presentan respuestas cromáticamente oponentes, o sea, que si se representa la actividad de

impulsos nerviosos ante la presencia de un incremento de luz de diferentes longitudes de onda, se obtienen gráficas como las mostradas en la figura 2.13, con respuesta excitatoria (+ en la figura) para una zona del espectro visible e inhibitoria (- en la figura) para la correspondiente oponente. Según el tipo de respuesta, se pueden clasificar en cuatro grandes grupos (De Valois y De Valois, 1990), dos por cada canal oponente, como se muestra también en la figura 2.13.

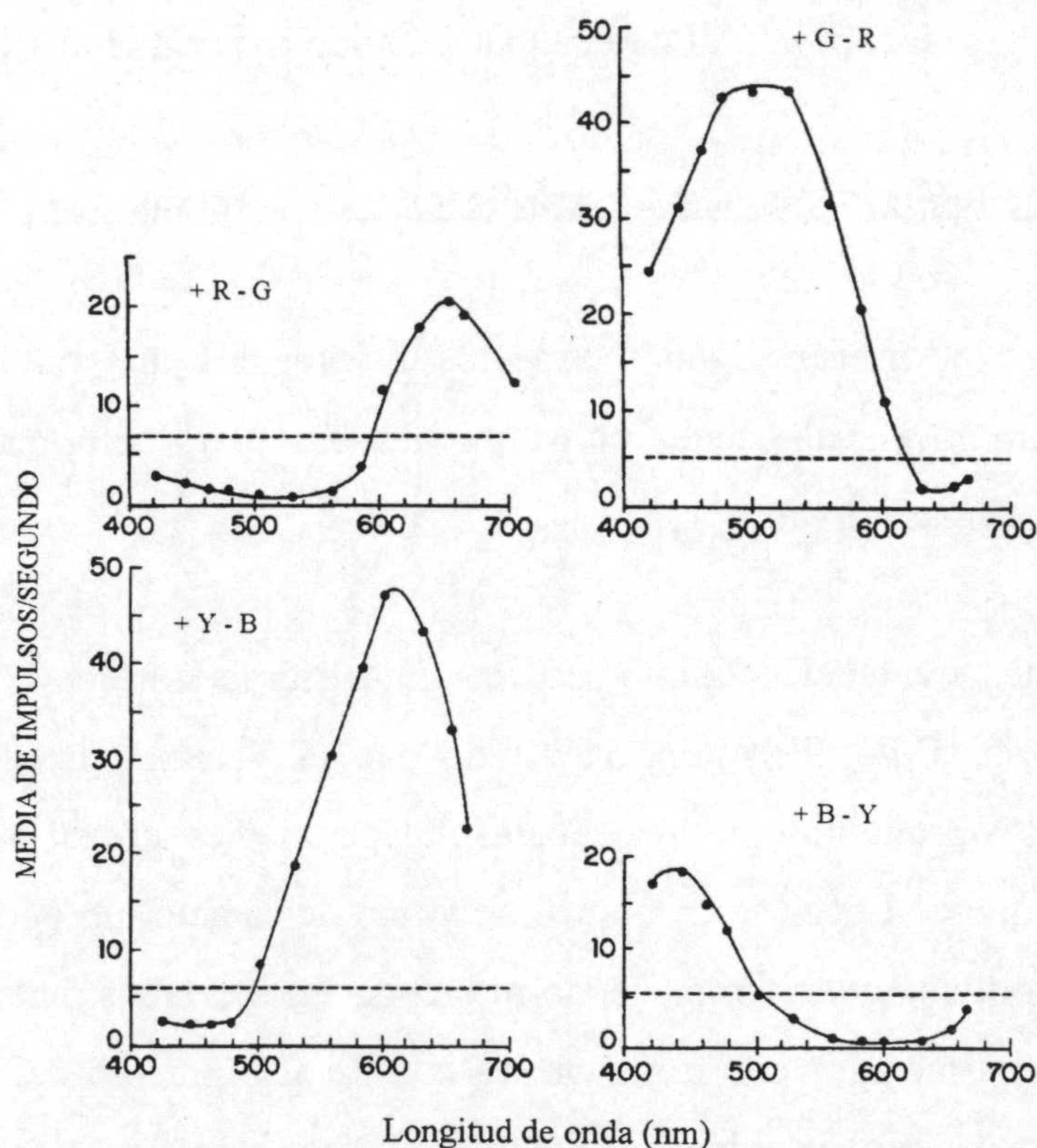


Figura 2.13. Funciones de sensibilidad espectral de los distintos grupos de células ganglionares y del LGN que presentan carácter oponente (De Valois y De Valois, 1990).

En general no se rechaza la hipótesis de que la información de luminancia se procesa con la suma de las señales neurales de los diferentes tipos de conos (sensibles a largas (L), medias (M) y cortas (S) longitudes de onda), aunque existen discrepancias en cuanto a la contribución o no de los conos S (Wiesel y Hubel, 1966; Derrington, Krauskopf y Lennie, 1984). También hay acuerdo general sobre la cuestión de que la información de cromaticidad se procesa mediante diferencias de las señales de los conos. Células ganglionares como las que se muestran en la figura 2.13 están involucradas en el procesado de información cromática (pues sus respuestas dependen de la longitud de onda del estímulo), y se denominan generalmente como *oponentes*. Por ejemplo, las células de tipo +R -G responden excitándose ante incrementos de luz roja e

inhibiéndose para incrementos de luz verde, y de forma opuesta reaccionan las de tipo +G -R. Este carácter oponente de las respuestas neuronales complica algo el esquema de campos receptivos que tratamos al principio del capítulo, pues la respuesta a estímulos con variación de cromaticidad será diferente que a aquellos que varían sólo en luminancia.

A nivel de los fotorreceptores, sin embargo, no hay distinción en absoluto entre clases de estímulos: un determinado tipo de cono puede dar una respuesta excitatoria tanto debido a un incremento de luminancia en el estímulo como a una variación de cromaticidad en el mismo hacia longitudes de onda para las que sea más sensible el fotorreceptor. Pero, como es lógico, a una misma variación de cromaticidad responden de modo diferente los distintos tipos de conos. En cambio la respuesta de las células ganglionares y del LGN permite distinguir entre tipos de estímulos, dado que reciben entradas de diferentes tipos de conos y las combinan, siendo además un factor clave la distribución espacial de estas entradas.

En el caso de una célula ganglionar de tipo + G -R, las entradas excitatorias proceden de los conos M y se concentran en la parte central del campo receptivo; las entradas de inhibición proceden de los conos L y se extienden por un área centrada en el mismo punto, pero bastante

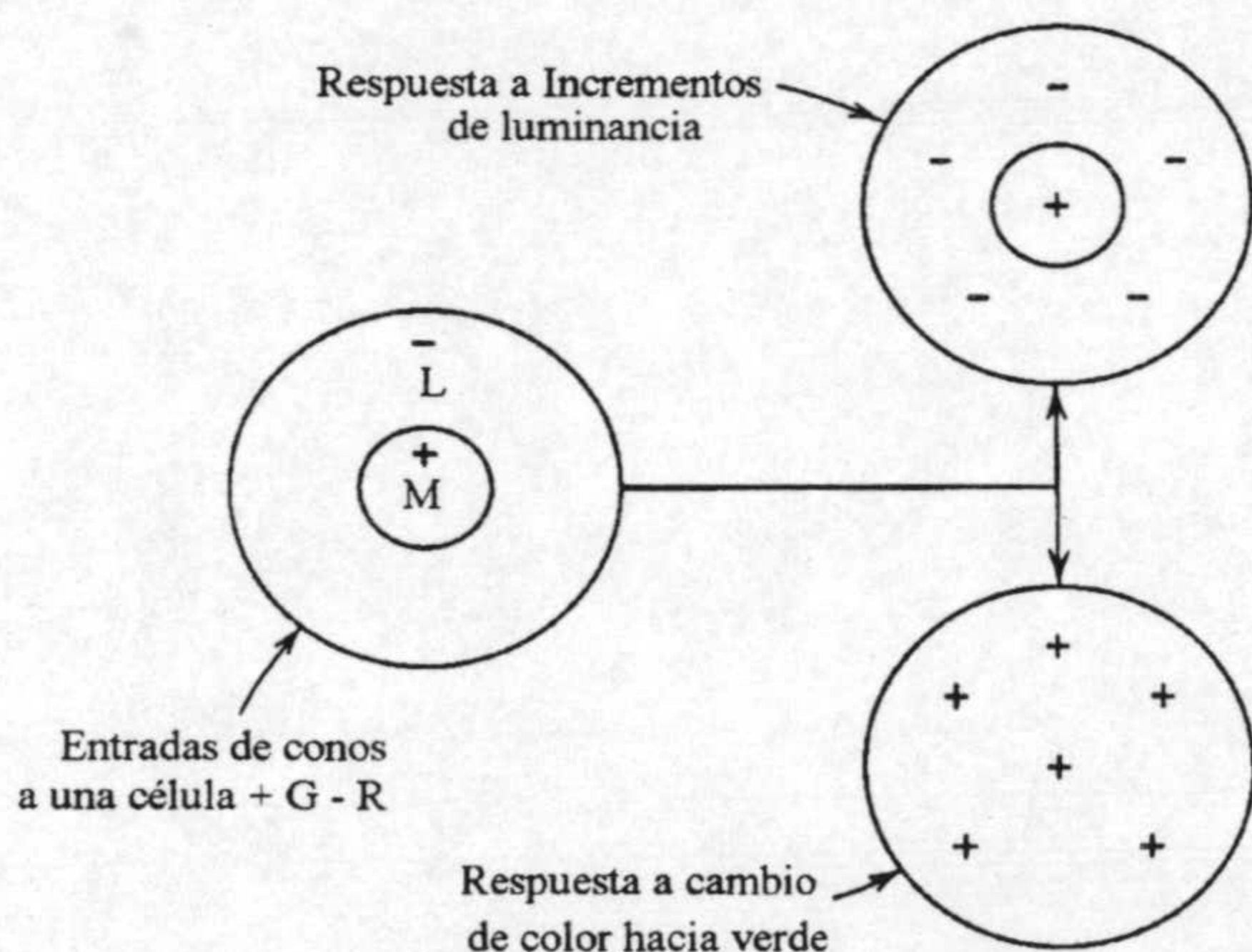


Figura 2. 14. Mapa de estimulación del campo receptivo de una célula tipo +G -R ante variaciones de luminancia y cromaticidad.

mayor. Si el estímulo que presentamos a esta célula es un test pequeño en el que se incrementa la luminancia, ambos tipos de conos enviarán señales, con lo que la parte central responderá excitándose y la periferia inhibiéndose; sin embargo, si el estímulo consiste en un test que cambia de cromaticidad a lo largo de su extensión, por ejemplo hacia el verde, los conos M enviarán señal, pero no así los de tipo L, que disminuirán su respuesta; con lo cual, al no existir inhibición, el efecto será

equivalente a una excitación de la totalidad del campo receptivo. El esquema de este razonamiento puede verse en la figura 2.14. Las consecuencias de esta configuración diferente del campo receptivo para estímulos que varían en luminancia y cromaticidad se refleja en las respuestas tan diversas que dan células ganglionares y del LGN oponentes a redes sinusoidales

en luminancia y cromaticidad (De Valois, Albrecht y Thorell, 1977). Si partimos de una red sinusoidal en luminancia cuya frecuencia sea tal que la mitad luminosa del ciclo ocupe el centro del campo receptivo y vamos progresivamente disminuyendo la frecuencia (aumentando el ancho de la zona luminosa), la respuesta global de la célula va disminuyendo progresivamente a medida que la banda luminosa invade los alrededores del campo receptivo. Si realizamos el mismo proceso con una red que varíe en cromaticidad (por ejemplo una red rojo-verde para la célula + G -R de antes), disminuir la frecuencia hace, en cambio, que aumente la respuesta excitatoria. Esto es así porque el centro y alrededores actúan de forma sinérgica, es decir, en la misma dirección (aunque con procesos fisiológicos distintos), cuando la variación de cromaticidad es del tipo adecuado (en nuestro caso, hacia el verde, si partíamos de una frecuencia tal que la parte verde del ciclo ocupase el centro del campo receptivo).

De hecho, si representamos gráficamente la respuesta de una célula oponente del LGN a redes en luminancia y cromáticas de distintas frecuencias, obtenemos, como se muestra en la figura 2.15, dos curvas con las mismas características básicas que las CSF en luminancia y cromaticidad.

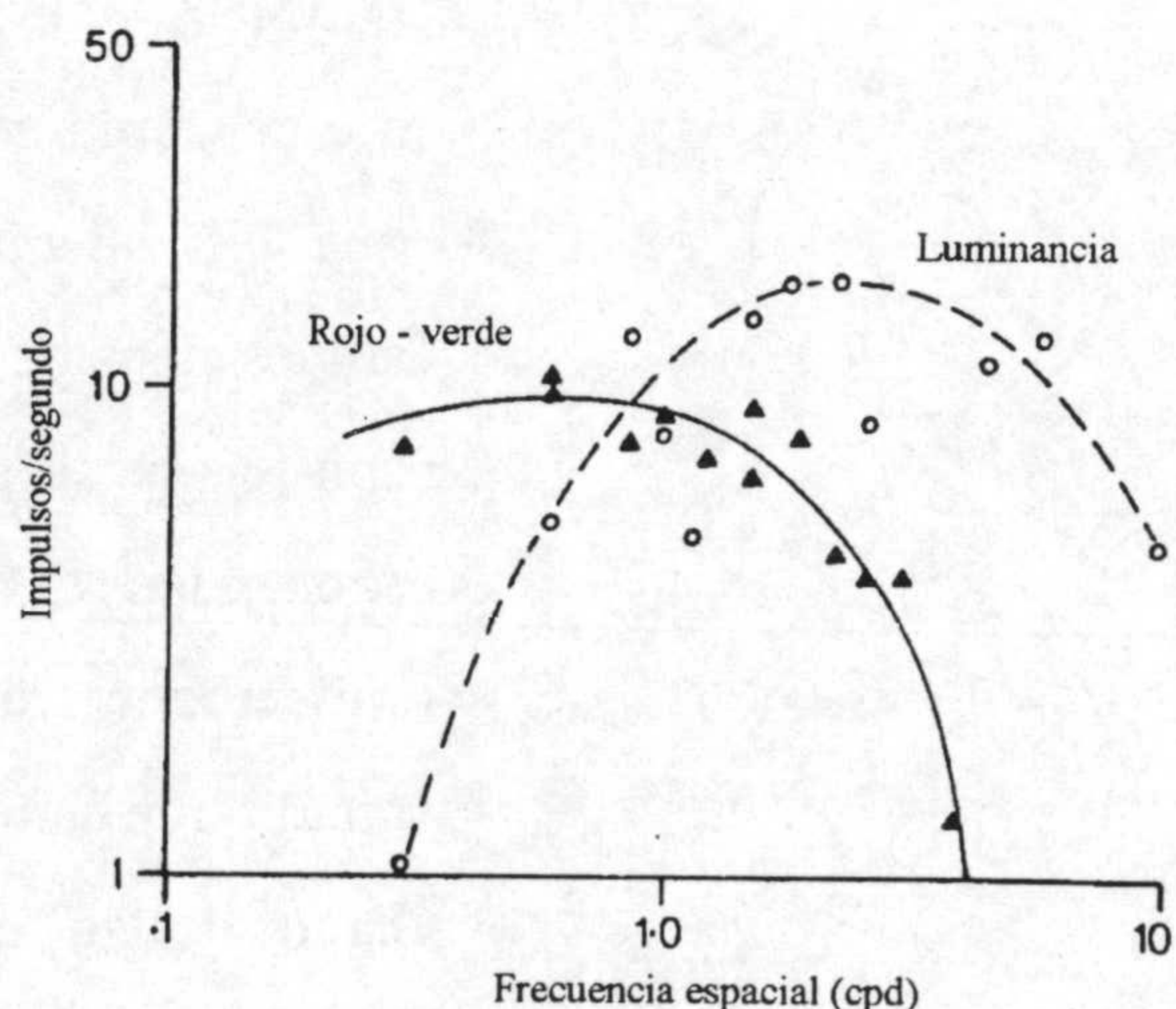


Figura 2.15. Respuesta de una célula oponente del LGN a redes rojo-verde y en luminancia. (De Valois y De Valois, 1990).

Este tipo de curvas constituye una primera explicación para una de las principales características de la CSF cromática, que es su carácter de paso-baja en frecuencia espacial; queda ahora señalar el por qué de la menor frecuencia de corte para las redes en cromaticidad. En principio, la frecuencia de corte queda determinada en función de la anchura del centro del campo receptivo, pues la sensibilidad baja, muy significativamente, para frecuencias a partir de

aquella en la que un ciclo ocupa la totalidad de dicho centro. Pero en el caso de redes en cromaticidad, la anchura efectiva del centro para una célula oponente es mucho mayor, ya que centro y alrededores actúan de forma sinérgica para este tipo de estímulos. Así pues, la frecuencia para la que un ciclo ocupa todo el centro efectivo del campo receptivo es bastante más baja para redes cromáticas.

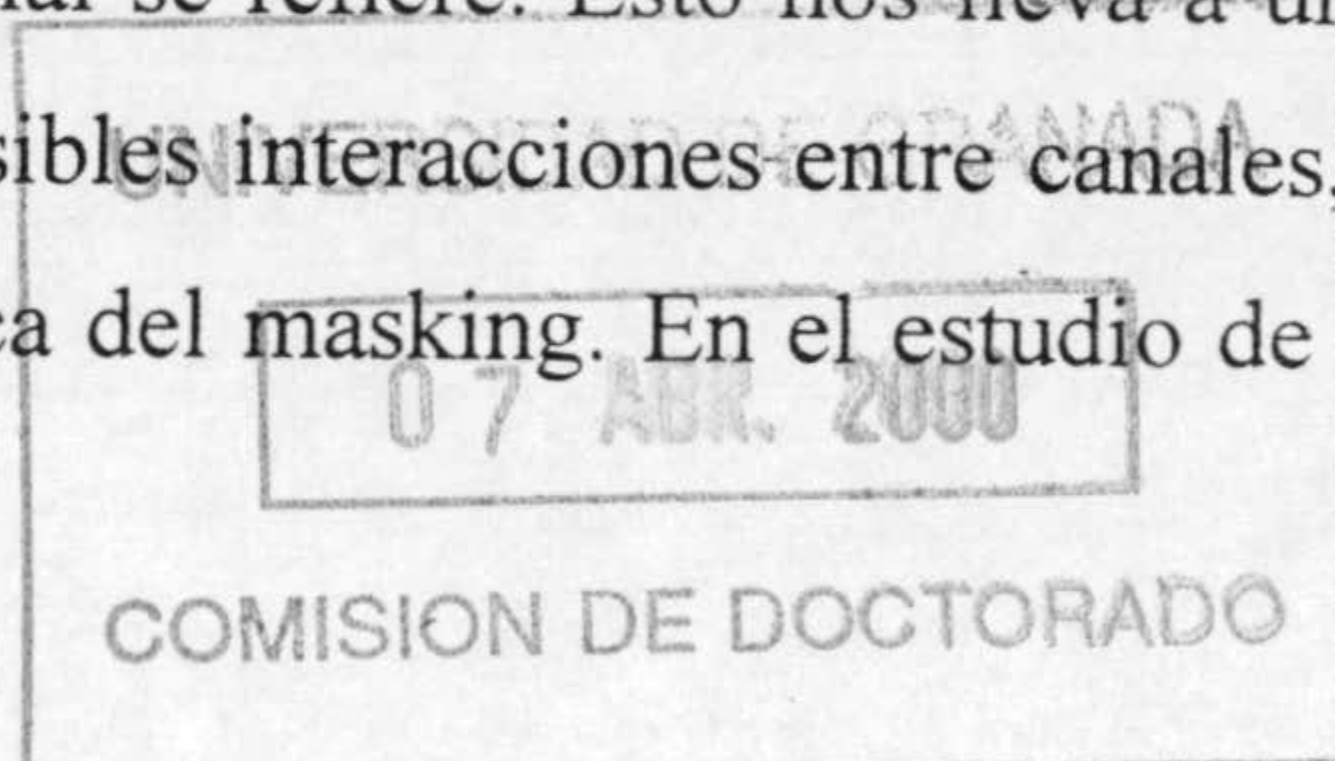
2.5. MODELOS DE MÚLTIPLES MECANISMOS CROMÁTICOS SINTONIZADOS. INTERACCIONES CROMATICIDAD-LUMINANCIA.

De manera análoga a como se hizo con la CSF en luminancia, cabe plantearse ahora la cuestión de si la curva de sensibilidad cromática es una especie de envolvente de otras curvas de menor ancho de banda centradas en una serie de frecuencias clave. Los experimentos psicofísicos y fisiológicos realizados hasta la fecha parecen indicar que efectivamente es así. Como para la CSF en luminancia, estas experiencias se pueden dividir en dos grupos según la técnica utilizada para aislar los distintos mecanismos: aquellas que hacen uso de la adaptación a ciertas frecuencias y las que utilizan la técnica del enmascaramiento.

2.5.1. Adaptación en frecuencia espacial.

Los principales estudios elaborados sobre adaptación selectiva en frecuencia espacial para redes cromáticas rojo-verde (Yujiri, Ejima, Alita y Noguchi, 1980; Bradley, Switkes y De Valois, 1985 y 1988) se muestran de acuerdo en que la adaptación selectiva se produce de forma similar para redes cromáticas y en luminancia, si bien las funciones de elevación del umbral de contraste frente a la frecuencia espacial parecen de mayor ancho de banda para las redes cromáticas. En el trabajo de Bradley *et al.* (1988), se miden ambos tipos de funciones bajo las mismas condiciones experimentales, con frecuencias hasta 16 cpd para redes en luminancia, y hasta 4 cpd para redes cromáticas. Los resultados pueden verse en la figura 2.16.

Si se considera la hipótesis de que los mecanismos que procesan la información espacial en cromaticidad sean diferentes de los que procesan la información espacial en luminancia, equivaldría a decir que los canales cromáticos y de luminancia son totalmente independientes en lo que al procesado de la información espacial se refiere. Esto nos lleva a una cuestión de gran interés en el campo que nos ocupa: las posibles interacciones entre canales, que han sido objeto de estudio en especial mediante la técnica del masking. En el estudio de Bradley *et al.*



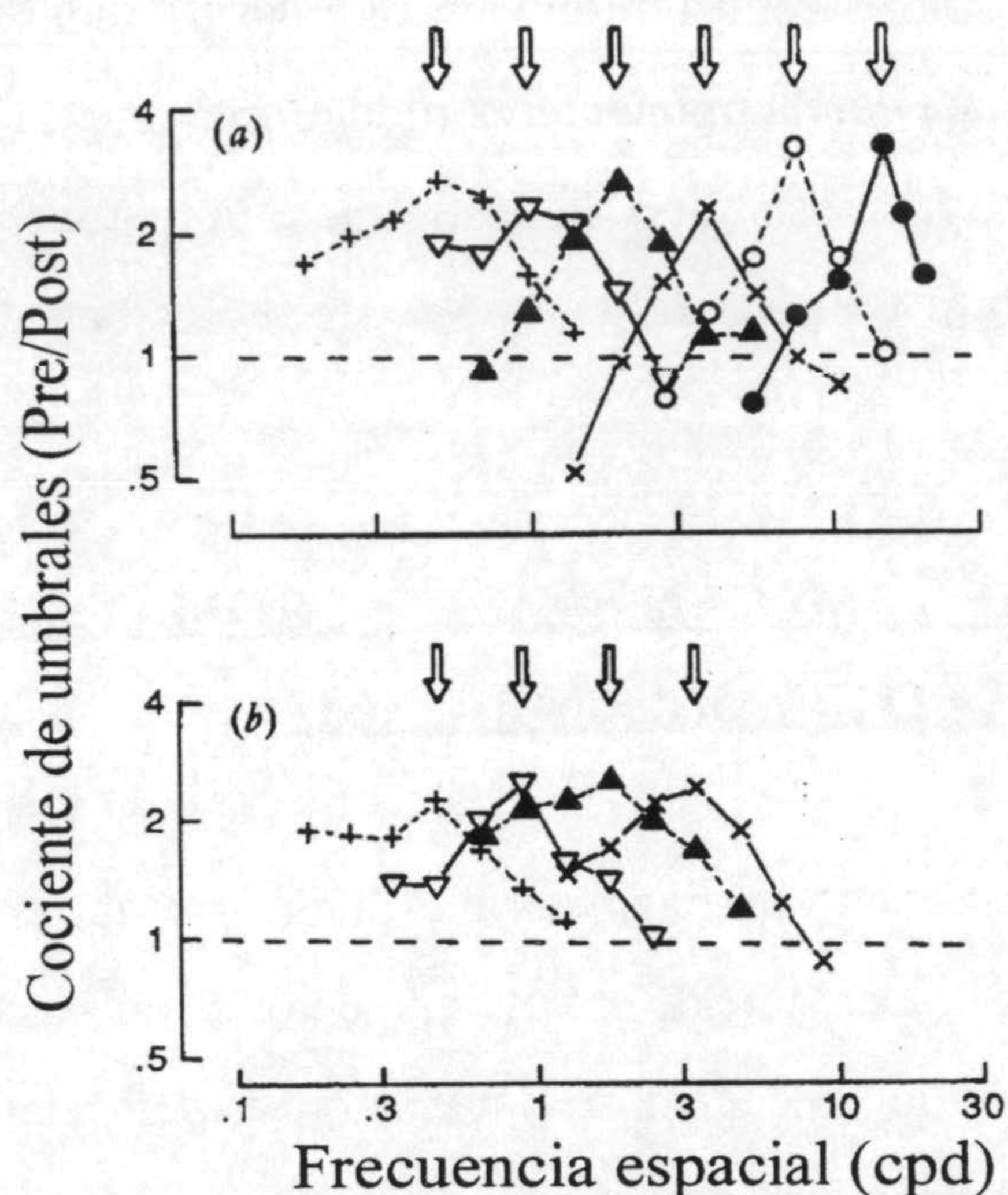


Figura 2.16. Elevación del umbral de contrast después de la adaptación a (a) redes en luminancia y (b) redes rojo-verde, de frecuencias 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0 16,0 cpd (las dos últimas sólo para redes en luminancia Bradley *et al.*, 1988).

(1988), también se llevan a cabo experimentos de adaptación cruzada, o sea, experiencias donde se adapta al observador a redes cromáticas y se ve si hay disminución de sensibilidad para redes en luminancia de igual frecuencia espacial y viceversa. Los resultados muestran que si la adaptación se produce con redes en luminancia, casi no hay efectos significativos sobre la sensibilidad umbral para redes cromáticas, mientras que un efecto un poco mayor puede observarse cuando la adaptación es a redes cromáticas sobre la sensibilidad para redes en luminancia. Veremos que las interacciones que describen algunos de los estudios de masking resultan también de tipo

asimétrico (no de la misma intensidad cuando se estudia el efecto de luminancia sobre cromaticidad que viceversa), aunque de carácter mucho más inequívoco.

2.5.2. Masking con redes cromáticas y masking cruzado.

Las funciones de elevación del umbral, bien en términos de la frecuencia espacial o del contraste, fueron obtenidas por primera vez, para masking con redes cromáticas, por De Valois y Switkes (1983) y, posteriormente, por Switkes *et al.* (1988). Estos últimos autores, con el fin de aportar algún dato sobre el problema de la interacción entre canales, utilizaron también las condiciones "cruzadas" (máscara en cromaticidad y estímulo en luminancia, y viceversa) con una frecuencia espacial del test de 2 cpd.

En la figura 2.17 podemos ver las curvas de elevación del umbral frente al contraste para las condiciones no cruzadas, o sea, máscara y test son redes en luminancia o bien redes en cromaticidad. Como puede verse, la coincidencia es notable, pero esto sólo sucede así si se emplea una escala de contraste apropiada, pues, como señalamos antes, la definición de contraste cromático resulta bastante arbitraria. La escala de contraste en el trabajo de Switkes *et*

al. (1988) se define en términos del contraste umbral de detección de la red, de forma que éste adopta un valor unidad, quedando los contrastes subumbrales por debajo de 1 y los supraumbrales por encima de la unidad.

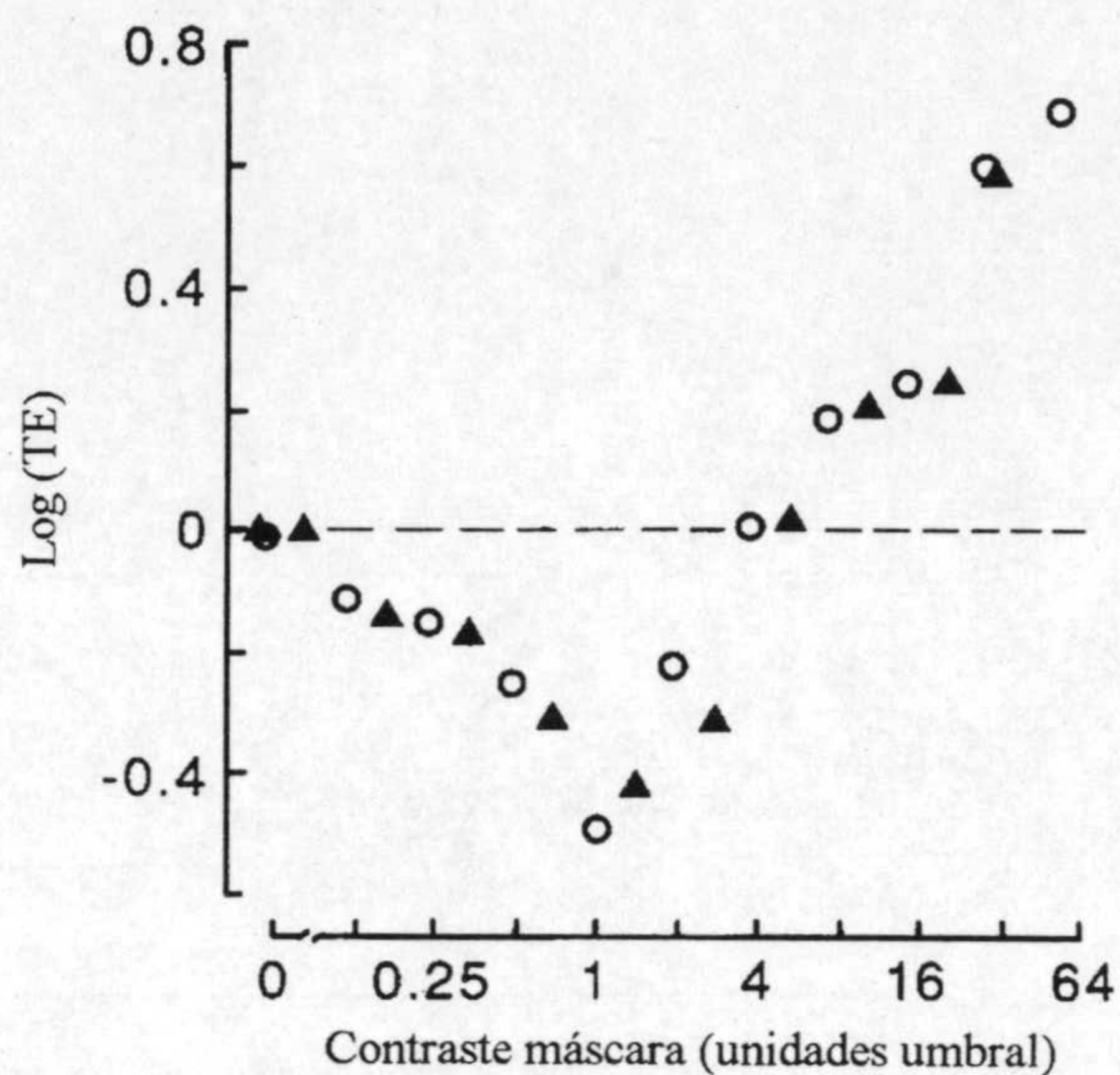


Figura 2.17. Funciones de elevación del umbral (TE) frente al contraste de la máscara para las condiciones L_{masc}/L_{test} (círculos) y C_{masc}/C_{test} (triángulos), donde L representa las redes en luminancia y C las redes cromáticas. La zona de la curva por encima de cero refleja el fenómeno de enmascaramiento (la máscara hace subir el umbral), mientras que la zona por debajo de cero refleja el fenómeno opuesto de facilitación (la máscara hace que disminuya el umbral), según los datos de Switkes *et al.* (1988).

Si comparamos las gráficas de TE vs SF (elevación del umbral frente a frecuencia espacial) para las cuatro condiciones de masking, para ver la sintonización en frecuencia en los distintos casos, debemos tener en cuenta que la forma de las curvas variará con el nivel de contraste de la máscara; para contrastes altos y condiciones no cruzadas, como se puede ver en la figura 2.17, el efecto producido es de atenuación o enmascaramiento (aumento del umbral del test), mientras que para contrastes subumbral, el efecto es el contrario, de facilitación. Como podemos ver en la figura 2.18, las curvas TE vs SF para las condiciones de atenuación son de mucho mayor ancho de banda que las correspondientes para facilitación, aunque resultan en ambos casos muy similares para cromaticidad y luminancia.

Sin embargo, para las condiciones cruzadas se produce una marcada asimetría entre la que denominaremos L_{masc}/C_{test} (máscara en luminancia, test en cromaticidad) y su opuesta C_{masc}/L_{test} : para el primer caso, aparece facilitación en la mayoría de condiciones experimentales y sólo hay atenuación para contrastes muy elevados de la máscara en luminancia. Para el

segundo caso ($C_{\text{masc}}/L_{\text{test}}$), en cambio, no aparece facilitación en ningún momento, mientras que hay atenuación para determinados contrastes de la máscara (5-8 veces el umbral en cromaticidad).

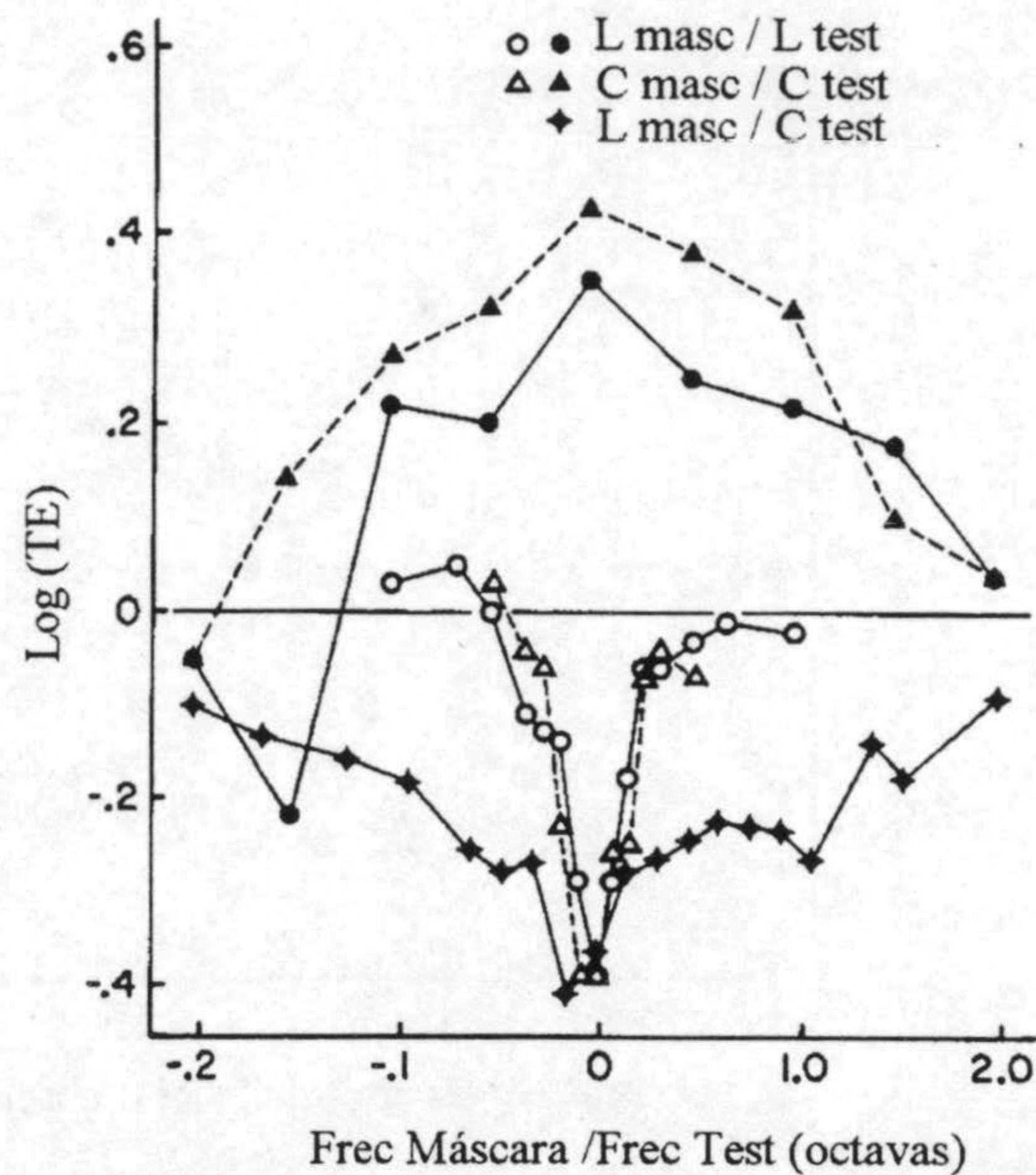


Figura 2.18. Funciones TE vs SF (elevación del umbral frente a frecuencia, también llamadas de selectividad espacial) para condiciones no cruzadas y cruzada $L_{\text{masc}}/C_{\text{test}}$. Las curvas por debajo de 0 (símbolos abiertos y rombos) reflejan facilitación, y aquellas por encima de cero (círculos y triángulos rellenos) atenuación. Para construir las curvas, se ha tomado un valor fijo de contraste de la máscara y se han representado los valores correspondientes de elevación del umbral frente a las diferentes frecuencias espaciales de la máscara.

Para intentar dar una explicación a estos resultados, a primera vista algo extraños, Switkes y colaboradores se decantan por un modelo de procesamiento de tipo inhibitorio simple, como el esquematizado en la figura 2.19. La fase intermedia representa un sistema de procesamiento de la señal no lineal, de tal forma que para contrastes muy bajos o muy altos, hace falta una variación mucho mayor de los mismos para provocar un aumento de la respuesta en el sistema que si los contrastes son intermedios. Las interacciones entre ambos canales pueden producirse antes y después de esta fase no lineal.

La entrada débil del canal de luminancia al cromático (marcada con un signo "+" en la figura) explicaría la facilitación para el caso $L_{\text{masc}}/C_{\text{test}}$, mientras que la entrada inhibitoria del canal cromático al de luminancia (marcado con un signo "-" en la figura) daría cuenta de los resultados de atenuación para la condición $C_{\text{masc}}/L_{\text{test}}$. Pero estos resultados también podrían explicarse, como indican los autores, por un modelo excitatorio más complejo, como el que se

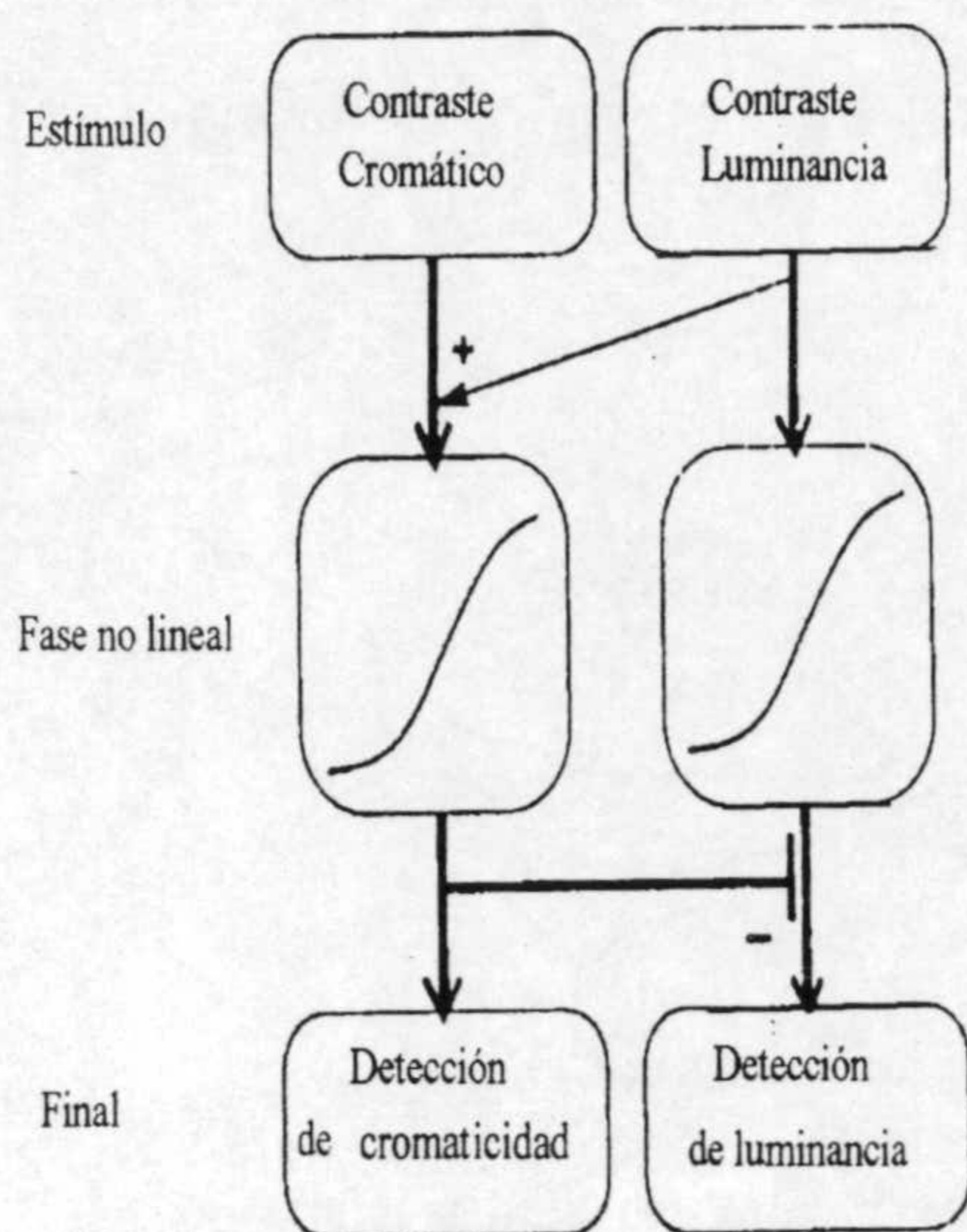


Figura 2.19. Modelo inhibitorio simple de interacciones luminancia-cromaticidad.

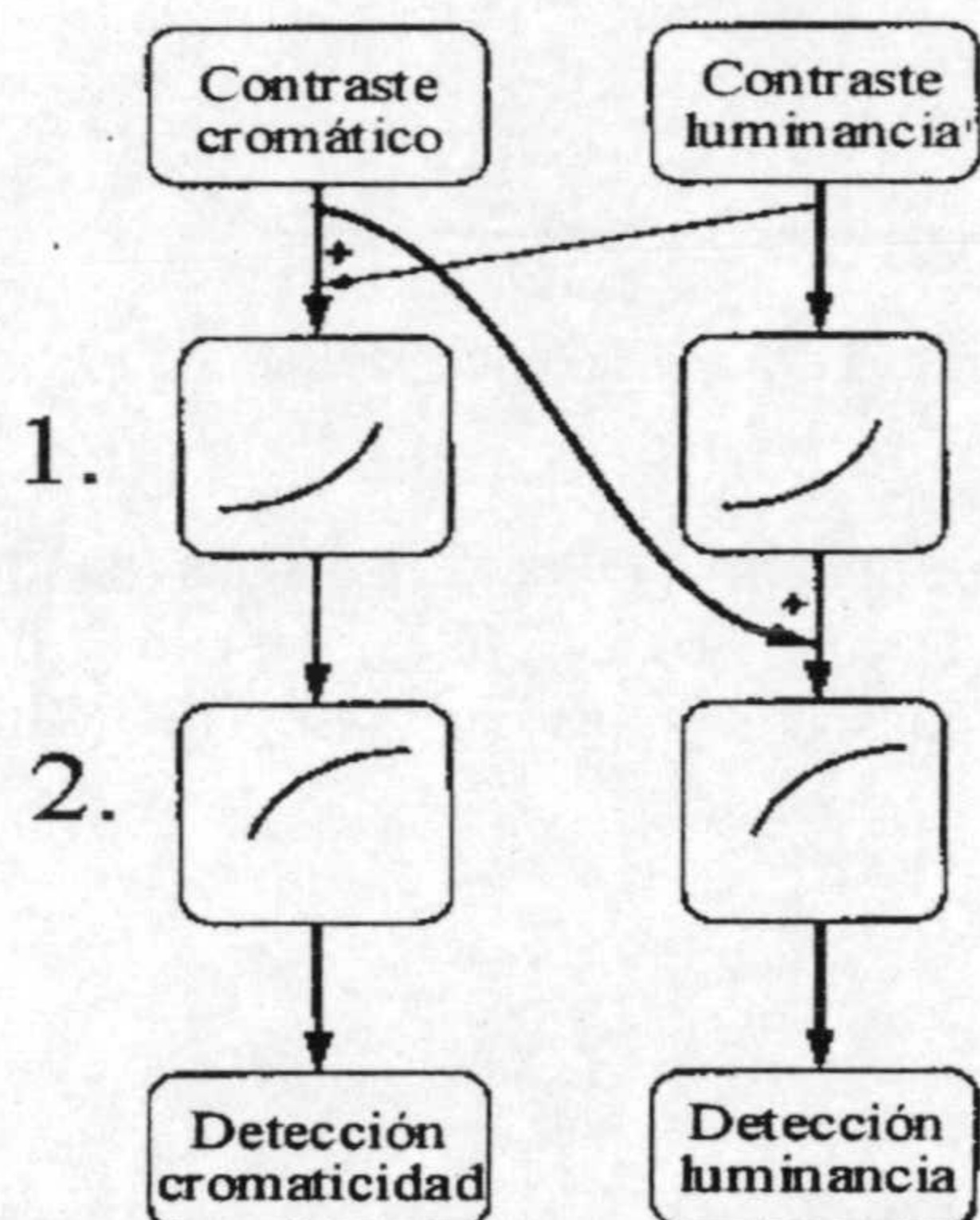


Figura 2.20. Modelo excitatorio con fase no lineal dividida en dos partes: 1) Fase de aceleración, para contrastes bajos. 2) Fase de compresión para contrastes elevados. A diferencia del modelo inhibitorio, sólo existen entradas de tipo "+" entre ambos canales.

muestra en la figura 2.20. En este caso, la fase no lineal se considera dividida en dos partes, una de aceleración efectiva (zona de bajos contrastes) y otra de compresión efectiva (zona de altos contrastes). Así, una entrada excitatoria del canal cromático al de luminancia que se produjese antes de la etapa de compresión efectiva también predeciría la atenuación C_{masc}/L_{test} (encontrada para contrastes 5-8 veces el umbral). En este aspecto, es necesario asumir dos hipótesis: primero, que la atenuación podría ser resultado de un nivel significativo de ruido en la señal neural y, en segundo lugar, que la proporción de ruido que introduce un estímulo depende de su capacidad para generar respuestas nerviosas ("fuerza"). De acuerdo con ambas hipótesis, un estímulo cromático claramente en la zona supraumbral (y por tanto con bastante "fuerza") podría generar la cantidad necesaria de ruido en el canal de luminancia como para producir el enmascaramiento (fenómeno de atenuación).

Otro importante grupo de resultados acerca de la determinación de la función elevación del umbral (TE) es el derivado de los trabajos de Losada y Mullen, también para redes de tipo rojo-verde. Comentaremos en primer lugar el estudio de Mullen y Losada (1994) en el que dichos autores vuelven a medir las funciones TE

vs C (elevación del umbral frente a contraste) para las condiciones cruzadas y frecuencias espaciales entre 0,25 y 1 cpd, pero con diferente método experimental que el empleado por Switkes *et al.* (1988). Los resultados pueden verse en la figura 2.21, siendo la característica más

destacable, a primera vista, la similitud en la forma de las dos curvas para las condiciones cruzadas (facilitación supraumbral y atenuación para contrastes muy elevados de la máscara).

Esencialmente, los resultados se mantienen si varía la frecuencia espacial del test y la fase de las redes que se presentan al observador. Sin embargo, si se incorporan al método dos fases de test y máscara, que se van seleccionando aleatoriamente para cada presentación, se encuentra que, para la condición C_{masc}/L_{test} , desaparece la facilitación supraumbral para dos de los observadores y se reduce mucho para los restantes. Así, concluyen que el efecto de facilitación no era una mayor facilidad para la detección de las redes en luminancia, sino que los observadores utilizaban pistas locales de comparación para reconocer cuándo se presentaba el test con la máscara. Para la otra condición, L_{masc}/C_{test} , la facilitación supraumbral

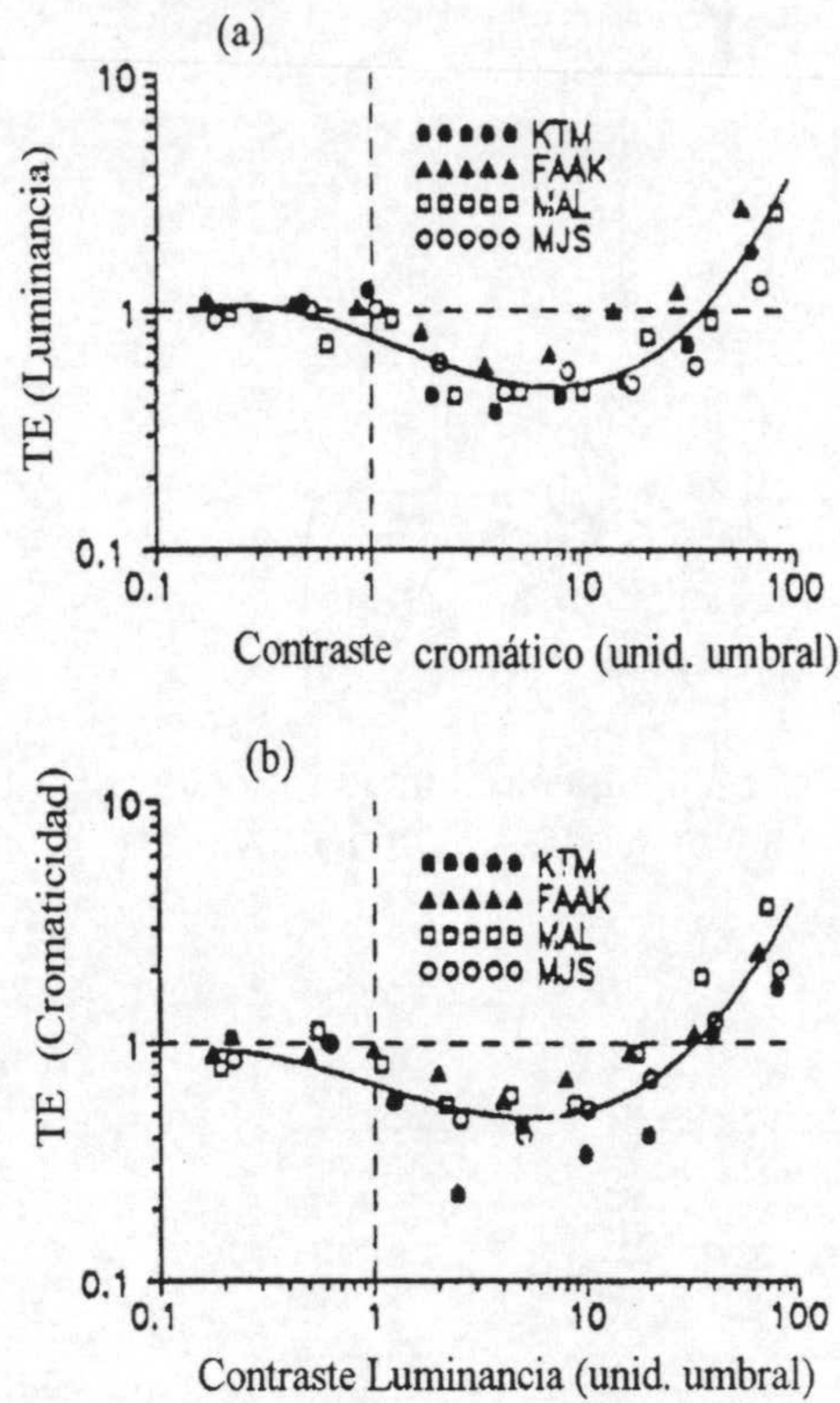


Figura 2.21. Función TE vs C para las condiciones cruzadas: (a) C_{masc}/L_{test} , y (b) L_{masc}/C_{test} , para los diferentes observadores con máscara y test en fase fija (Mullen Losada, 1994).

se sigue manteniendo para todos los observadores. Las funciones TE vs SF (elevación del umbral frente a la frecuencia espacial) para esta última condición resultan de bastante mayor ancho de banda para la facilitación que para la atenuación, de acuerdo con los resultados de Switkes *et al.* (1988). Con el fin de establecer qué tipo de modelo sería el más adecuado para describir las interacciones observadas entre cromaticidad y luminancia, si uno de tipo excitatorio simple o uno de tipo inhibitorio simple (como el mostrado en la figura 2.19 pero sin comunicación entre canales previa a la fase no lineal), los autores midieron de nuevo la función TE vs C para la condición no cruzada L_{masc}/L_{test} , pero añadiendo ahora un nivel fijo de contraste cromático al test. Según el modelo excitatorio, ambos tipos de contraste se sumarían y el umbral del test se elevaría de forma continua conforme creciera el contraste de la máscara, sin que apareciera facilitación. En cambio, según el modelo inhibitorio, luminancia y cromaticidad se

procesarían de forma independiente, de modo que seguiría apareciendo facilitación. El efecto de añadir contraste cromático a la curva sería provocar un desplazamiento de la misma en la escala de contraste. Como se observa en la figura 2.22, el modelo inhibitorio o separativo es el que mejor se ajusta a los datos experimentales.

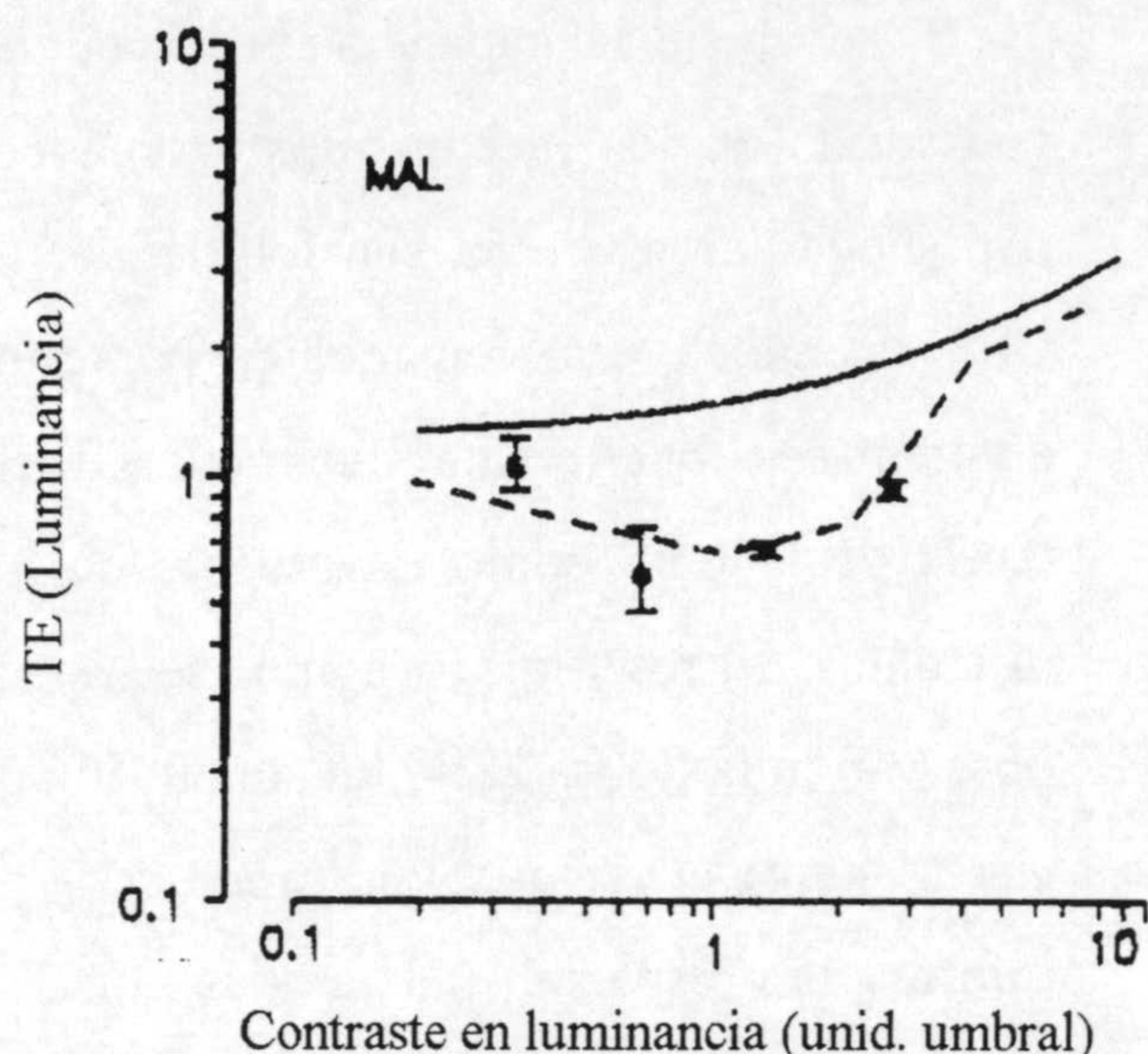


Figura 2.22. Función TE vs C (elevación del umbral frente al contraste de la máscara) para la condición n cruzada L_{masc}/L_{test} , pero con un pedestal de contrast cromático fijo para el observador MAL. La línea continu representa las predicciones de un modelo excitatori simple para el procesado de contraste en los canale cromáticos y de luminancia. La línea discontinu representa las predicciones de un modelo separativo inhibitorio, de fases no lineales independientes en ambo canales (Mullen y Losada, 1994).

Así pues, de acuerdo con Switkes *et al.* (1988), Mullen y Losada (1994) se decantan por un modelo inhibitorio con interacción a nivel cortical cromaticidad-luminancia. Esta interacción se produciría después de la fase no lineal de procesado de la información espacial. Para la interacción luminancia-cromaticidad, la persistencia del fenómeno de facilitación hace que estos autores se pronuncien a favor de considerar dicho fenómeno separado del masking cruzado. Para encontrar una suficiente explicación al mismo, habría que recurrir a otro tipo de modelos de interacción visual.

Una contribución importante que se produce con el estudio de Losada y Mullen (1994) es la construcción de las funciones de sensibilidad de los distintos mecanismos que intervienen en el procesado de la información espacial por vías cromáticas. La técnica es diferente a la de masking oblicuo utilizada por Wilson *et al.* (1983) para la vía de luminancia, consiste simplemente en una experiencia de masking convencional. Si las de las funciones de sintonizado de los filtros o mecanismos resultan lo bastante diferentes de las medidas para luminancia, esto podría confirmar la hipótesis de trabajo acerca de la independencia de procesado de información espacial por ambas vías. Los resultados para la frecuencia espacial de 0,25 cpd pueden verse en la figura 2.23, en la que se muestran también los derivados de la medida de la función de sensibilidad del filtro para luminancia. Aunque a primera vista resalta la mayor caída de la función de sensibilidad para luminancia en la zona de frecuencias de la máscara por debajo de la del test, dando los

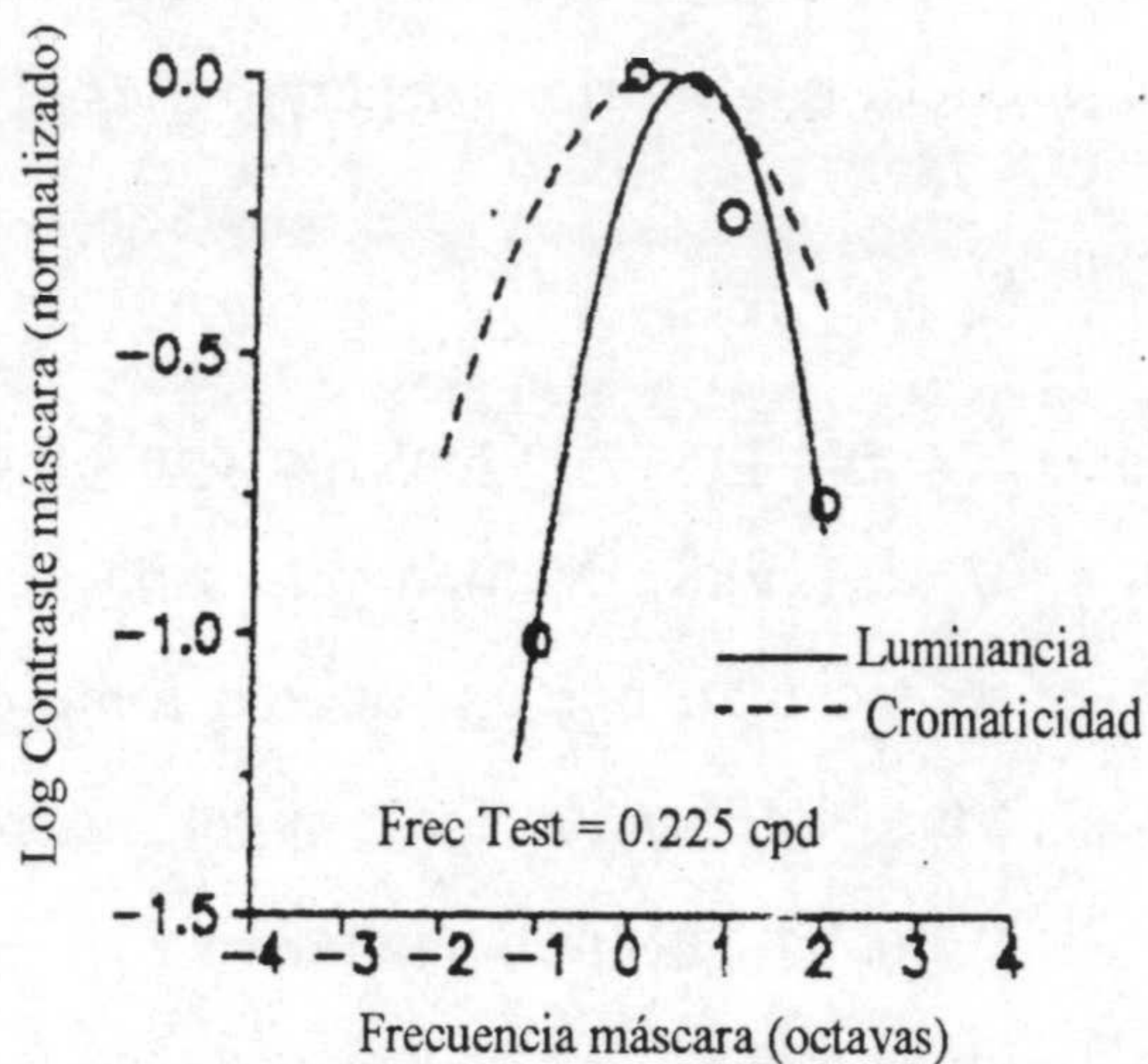


Figura 2.23. Ajustes gaussianos para las funciones de sintonizado o de sensibilidad en frecuencia espacial de los filtros centrados en 0,25 cpd para luminancia (línea continua) y cromaticidad (línea discontinua). Se representa en abscisas el contraste normalizado de la máscara que hace que el umbral del test sea doble (Losada y Mullen, 1994).

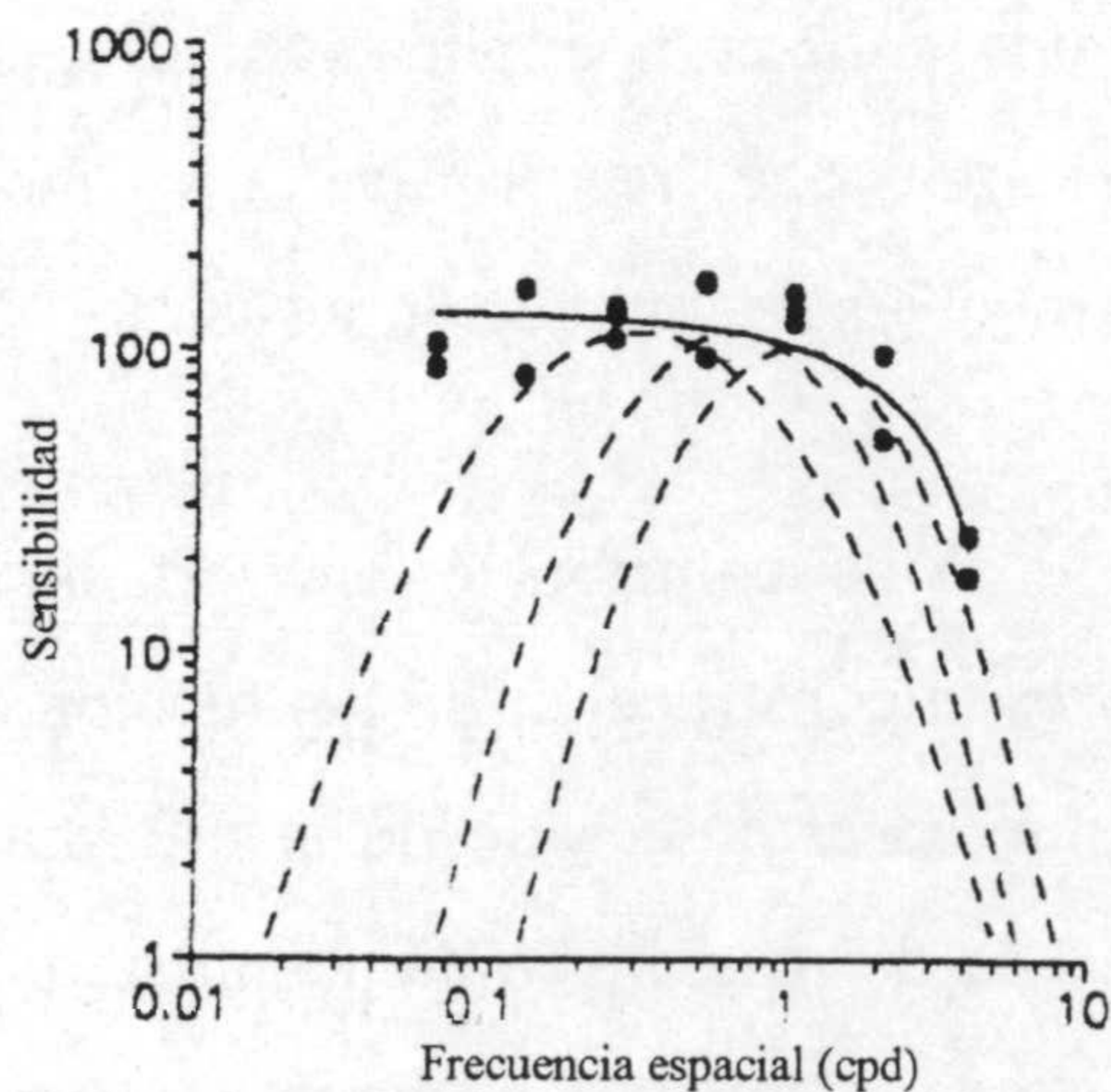


Figura 2.24. CSF cromática junto con las curvas de sensibilidad ajustadas para los filtros centrados en 0,25, 0,5 y 1,0 cpd, cuyo máximo de sensibilidad se desliza hasta alcanzar el de la CSF, mediante modificaciones de los parámetros de ajuste (Losada y Mullen, 1994).

ajustes realizados un ancho de banda siempre menor para luminancia que para cromaticidad, estadísticamente las diferencias no resultan significativas.

Si se ajusta la ganancia de las curvas gaussianas de los mecanismos cromáticos para llegar al nivel de sensibilidad de la CSF cromática, también medida por estos autores, se obtiene una ilustración de la teoría de la CSF como envolvente de los diferentes filtros, tal y como se puede observar en la figura 2.24. La conclusión de estos autores es que el procesado de información espacial por ambas vías se realiza de un modo bastante similar, descomponiendo las escenas en varias escalas espaciales que se pasan por filtros de tipo paso-banda centrados en diferentes frecuencias.

De forma casi paralela, Pandey y Vimal (1993) obtienen las curvas TE vs C (elevación del umbral frente a contraste de la máscara) del canal rojo-verde aislado por la técnica de cancelación de tono*, utilizando masking oblicuo. Posteriormente miden también las funciones de sensibilidad espectral de los filtros paso-banda de dicho canal (Vimal y Pandey,

* Consiste en añadir contenido azul a una mezcla de rojo y verde (en las proporciones de isoluminancia), mezcla que aparece de color amarillo en el caso de Pandey y Vimal (1993), hasta que el estímulo no parezca ya amarillo ni tampoco azul, sino acromático (Hurvich y Jameson, 1957).

1994), en el marco de la teoría de mecanismos múltiples que explicamos para el caso de luminancia en la primera parte del capítulo. Proponen seis mecanismos, uno paso-baja y cinco paso-banda, estos últimos con picos de sensibilidad en 0,13, 0,5, 2,0, 4,0 y 8,0 cpd. Estos no coinciden con los propuestos (hasta 2,0 cpd) por Losada y Mullen (1994), pero la técnica del masking oblicuo utiliza como test estímulos cuyo perfil espacial corresponde a una sexta derivada de Gaussiana y no redes sinusoidales, por lo que también la CSF rojo-verde tiene una forma algo distinta, y la frecuencia de corte resulta en torno a 16 cpd.

Más recientemente, Vimal (1998) se centra en la polémica sobre interacciones cruzadas luminancia-cromaticidad por la técnica del masking oblicuo, que estima más fiable que el masking convencional. Además, compara sus resultados con el resto de trabajos anteriores sobre el tema. Las frecuencias del test cubren un rango bastante más amplio que el de otros trabajos, de 0,125 a 8,0 cpd. Los resultados muestran bastantes coincidencias con los de Mullen y Losada (1994) en cuanto a la facilitación supraumbral reducida para la condición $C_{\text{test}}/L_{\text{masc}}$ y ausencia de la misma para la otra condición cruzada. Esto lo atribuye Vimal a la ausencia de efectos locales por la técnica utilizada. Además, en este estudio se aportan otros datos novedosos debido al mayor rango de frecuencias utilizado:

- 1) Ausencia de interacción ($TE=1$, o sea, el umbral no varía con la máscara) para frecuencias espaciales de la máscara muy alejadas de la del test.
- 2) Asimetrías en la atenuación: $C_{\text{test}}/L_{\text{masc}}$ la presenta ligeramente en menor medida que $L_{\text{test}}/C_{\text{masc}}$ para frecuencias mayores de 0.5 cpd; pero para 0.125 cpd, aparece el efecto opuesto, la atenuación es menor en la condición $L_{\text{test}}/C_{\text{masc}}$ que en la otra.

En cuanto a la modelización, resulta bastante menos concluyente que los estudios anteriores, apuntando la posibilidad de que existiesen vías o canales cruzados, o sea, que procesaran a la vez cromaticidad y luminancia (Webster y Mollon, 1994), además de los canales que tradicionalmente se vienen considerando en el estudio del sistema visual. Pero estos canales cruzados deberían, de algún modo, proporcionar una alternativa o resultar compatibles con el modelo propuesto por Mullen y Losada (1994) y el inhibitorio recomendado por Switkes *et al.* (1988). Otro de los modelos que considera Vimal es el de múltiples mecanismos con excitación e inhibición divisiva (Foley, 1994), que también mantiene la independencia de las vías cromáticas y de luminancia. La inhibición en este último modelo se denomina "divisiva"

porque la respuesta global de cada mecanismo se calcula mediante una fracción cuyo numerador representa las entradas excitatorias y cuyo denominador está formado por una suma de entradas de tipo inhibitorio. Se recomienda finalmente que se sigan realizando experimentos para recoger datos en condiciones que permitan probar la separación o posibles inhibiciones cruzadas entre ambos canales: los resultados de Vimal (1998) no serían incompatibles con un modelo separativo para la zona subumbral de contrastes y frecuencias menores de 4 cpd ni tampoco con un modelo de interacción para la zona supraumbral en todo el rango de frecuencias, aunque para las mayores de 4 cpd en zona subumbral los resultados son confusos y se necesitarían nuevos experimentos.

Como resumen global de las conclusiones extraídas a partir de los experimentos de masking y adaptación, podemos decir que en determinadas condiciones experimentales se pone claramente de manifiesto una interacción entre las vías de cromaticidad y luminancia, pero que la mayoría de expertos consideran favorablemente la hipótesis de independencia de ambas en cuanto a procesado, es decir, que ambas cuentan por separado con funciones no lineales de transformación para el contraste y con mecanismos o filtros paso-banda centrados en determinadas frecuencias clave. En todo caso, la interacción se produciría en niveles superiores del procesado de la información visual, en la región cortical.

Como hemos visto a lo largo de estos apartados, la cuestión del estudio de interacciones entre mecanismos visuales dista bastante de estar resuelta y los estudios realizados se han centrado casi en exclusiva en el análisis de las interacciones luminancia-cromaticidad. Casi no se ha tratado la cuestión de interacciones entre los dos mecanismos visuales que se ocupan del procesado del contenido cromático de los estímulos. Como veremos en el capítulo siguiente, esta cuestión ha sido abordada sólo mediante otra técnica alternativa a las dos que hemos revisado en este capítulo, a la que dedicaremos un amplio apartado, pues va a ser una de las que utilizaremos en el desarrollo de nuestro trabajo. Esta técnica se conoce como *sumación subumbral*.

2.6. SIGNIFICADO Y APLICACIONES DE LA CSF .

Volvemos de nuevo, para finalizar, a considerar la CSF, tanto en cromaticidad como en luminancia, en cuanto a qué nos enseña sobre el sistema visual humano. Trataremos también de explicar en qué casos puede resultar de bastante utilidad para el diagnóstico precoz y

seguimiento de la evolución de determinadas patologías neurales. En este campo la CSF en luminancia ha sido estudiada con mucha mayor extensión, por lo temprano de su obtención sobre todo, y por la relativa facilidad de diseño de los tests estándar para su medida. Como veremos en el capítulo III, la CSF en cromaticidad también tiene un enorme potencial en cuanto a sus aplicaciones en este campo, aunque existen muchos menos trabajos que se ocupen de ella, fundamentalmente por lo reciente de su obtención, que como veremos no estuvo exenta de polémica.

2.6.1. Importancia para el estudio global del sistema visual.

Una de las principales capacidades que presenta el sistema visual humano es el reconocimiento de los objetos que forman las diferentes escenas iluminadas, la separación de los mismos de su entorno y su identificación local en particular. Para ello, puede recurrir a dos estrategias: distinguir parámetros propios del objeto o bien distinguir cambios en la luz que los ilumina. Esta segunda estrategia es, sin embargo, muy desaconsejable si pensamos que las diferencias en el nivel de iluminación pueden variar en proporción incluso de $10^9:1$, por ejemplo entre una noche oscura y un mediodía de invierno con nieve. Así que desarrollar la capacidad de distinguir variaciones en un rango tan extenso con la suficiente precisión sería enormemente "caro" desde un punto de vista de organización neuronal, si bien los mecanismos de adaptación visual ayudan en ocasiones. Por eso el sistema visual escoge la vía más inteligente y se centra en las características propias de los objetos. Por ejemplo, su capacidad para reflejar en mayor o menor medida la luz incidente hará que aparezcan más o menos oscuros que su entorno; de aquí que un factor clave sean estas diferencias de luminosidad que nos llevan de inmediato a pensar en un sistema sensible a contrastes en luminancia y no a variaciones en el nivel absoluto de luz de la escena. También, considerando un mismo iluminante, el color de los objetos depende de sus características en cuanto a las longitudes de onda que reflejen (o transmitan) con preferencia sobre las otras que forman el espectro visible. Para distinguir un objeto de otro en determinadas condiciones de iluminación puede resultar fundamental, como explicamos al inicio del capítulo, que el sistema visual pueda procesar variaciones de color de unas partes a otras de la escena. De aquí resulta inmediato pensar en el concepto de contraste cromático.

Ahora bien, la CSF tanto en cromaticidad como en luminancia es mucho más que el procesado de contraste, incluye también, como hemos resaltado antes, la frecuencia espacial,

formando ambos conceptos una unidad completa. Entonces, ¿qué ventajas tiene, en esta tarea de reconocimiento de objetos, filtrar las bajas frecuencias espaciales en luminancia? Bastantes, si pensamos que el "fondo" de las escenas, o sea la información menos relevante para el sistema que pretende identificar los distintos objetos que las componen, resulta casi siempre de características bastante uniformes espacialmente. Generalmente se trata de un trozo de escena grande con pocas variaciones, lo que en términos de frecuencia espacial se puede expresar como que tiene un elevado contenido en bajas frecuencias. La mayor parte de los objetos presentan, sin embargo, variaciones de luminosidad en determinadas zonas que hacen que predomine el rango medio de frecuencias en su composición espacial, y es precisamente en este rango donde el sistema visual resulta más sensible.

Del mismo modo podríamos plantearnos, ¿qué utilidad tiene que se filtren las altas frecuencias para objetos de color y que se perciban mejor las bajas frecuencias? En cuanto al filtrado de altas frecuencias, resulta bastante conveniente para el sistema visual, pues el efecto de la aberración cromática resulta mucho más notorio y afecta en mayor medida a la calidad de la imagen para este rango de frecuencias, aunque el contenido en frecuencias altas para las escenas naturales sea bastante significativo (Párraga, Breistaff, Troscianko y Moorehead, 1998). Sin embargo, y de acuerdo con estos autores, pueden existir dos razones por las cuales resulta interesante para el sistema visual descartar la información en altas frecuencias en color, además de la ya citada de la corrección de aberración cromática: su valor irrelevante en tareas visuales primarias (cambios locales de color no ayudan en la identificación de objetos, sino que ésta se guía más por propiedades globales) y el "cuello de botella" que el sistema visual presenta en el nervio óptico, de forma que conviene optimizar al máximo el tipo de información que se transmite al siguiente nivel pues el número de neuronas resulta insuficiente para procesar toda la información que se recoge en la retina.

En cuanto a la transmisión preferente de la zona de bajas frecuencias en color, De Valois y De Valois (1990) proponen el considerar que resulta muy útil para evitar confusión en el sistema visual. Imaginemos, por ejemplo, un hombre bastante grande con una camisa caqui debajo de un árbol, de modo que la sombra de una rama cae sobre su pecho y se expande sobre toda su anchura. Para un sujeto que lo estuviera observando a un par de metros, la presencia de la sombra en el pecho, una vez procesada a través del canal de luminancia, podría sugerir que el hombre se encontraba dividido en dos, pues la variación de luminancia de la camisa ofrecería una clara división en dos partes. Sin embargo, el color caqui de la misma se mantiene tanto en

la zona de sombra como en la más luminosa, y aunque la apariencia del color no sea exactamente la misma en ambas zonas, sí basta para poder identificar la camisa (y, por tanto, el cuerpo del hombre) como un solo objeto. Este ejemplo nos indica que interesa bastante poseer una sensibilidad elevada para objetos grandes y coloreados, o sea, transmitir con preferencia la información en bajas frecuencias cromáticas.

Vemos entonces que a partir de la CSF tanto en luminancia como en cromaticidad se pueden conocer algunas características de gran interés del sistema visual y de cómo éste se enfrenta a las escenas habituales, normalmente bastante complejas.

2.6.2. Aplicaciones de la CSF en luminancia para el diagnóstico y estudio de la evolución de determinadas patologías.

Veremos a continuación algunos ejemplos de cómo se ha utilizado la medida de la CSF en luminancia para obtener información y desarrollar un seguimiento de sujetos afectados de patologías visuales o de origen neurológico con síntomas visuales.

En sujetos con disfunciones binoculares, el uso de redes sinusoidales para detectar pérdidas de capacidad visual lleva a resultados de gran interés y tiene, por un lado, la ventaja entre otras de ser cuantitativo, de forma que podemos controlar la evolución del sujeto con mayores garantías, y, por otro, es extensivo, de forma que si por alguna causa ajena al experimentador el sujeto no colabora adecuadamente en alguna de sus respuestas, el resto de las mismas bastará para dar una idea de su situación real. Una de las disfunciones binoculares más frecuentes es la ambliopía. Suele producirse como consecuencia de una diferencia de estado refractivo entre ambos ojos (anisometropía) que impide la fusión, o de un estrabismo, que ocasiona supresión de una de las imágenes y, por tanto, falta de uso de las vías corticales de uno de los ojos en etapas clave del desarrollo de la visión. Como consecuencia de esto último, aún cuando se corrige el estrabismo en muchos casos el ojo no recupera visión: es lo que se llama comúnmente "ojo vago" y técnicamente ambliopía.

En la figura 2.25 podemos ver las CSF en luminancia obtenidas para ambos tipos de ambliopes, junto con la razón de la sensibilidad de la media de sujetos normales y la de un ambliope de cada tipo para cada frecuencia espacial (Vision and visual dysfunction, tomo 10, pag. 212-215). La pérdida se produce sobre todo en la zona de altas frecuencias, que afectaría a

la agudeza visual del sujeto en mayor medida, pero lo interesante de la curva es que nos proporciona una mayor cantidad de información sobre las habilidades en visión espacial del sujeto y, en este sentido, resulta mucho más completa.

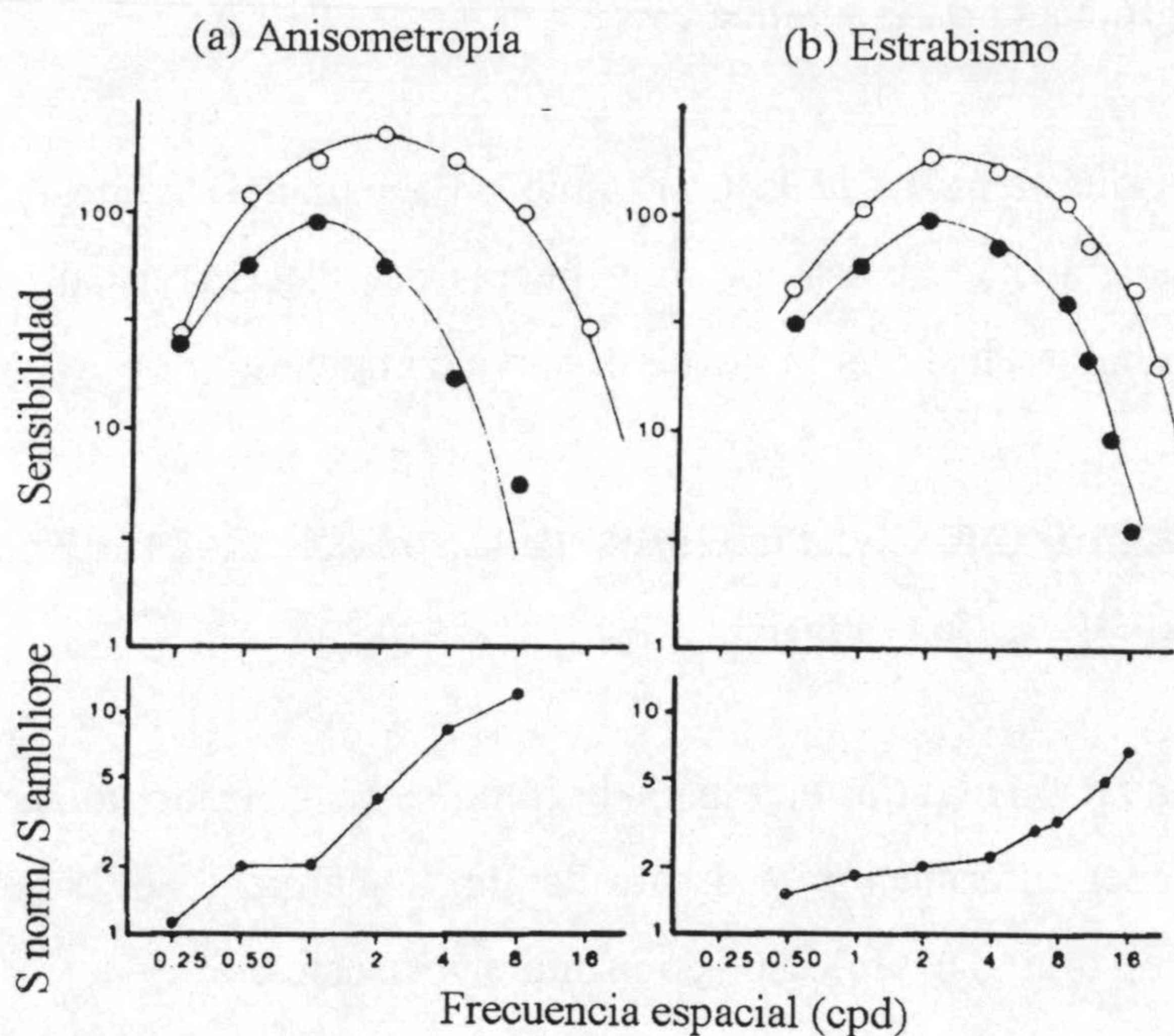


Figura 2.25. CSF y funciones de variación correspondientes para observadores con ambliopía consecuencia de una anisometropía (a) y de un estrabismo (b).

En cuanto a patologías de tipo neuronal, los estudios desarrollados se han centrado fundamentalmente en la Enfermedad de Parkinson, lesiones corticales (para revisión, ver Vision and Visual Dysfunction, tomo 10, capítulos 8 y 10) y en mayor medida en Esclerosis Múltiple, por ser ésta última una patología cuyo índice de incidencia ha aumentado bastante en las últimas décadas. Se han producido importantes avances en cuanto a los criterios y técnicas de diagnóstico, aunque continúa sin encontrarse una solución clínica eficaz para la misma. Como veremos en los próximos capítulos, parte de nuestro estudio se centrará sobre sujetos afectados por esta patología, por lo que revisaremos la bibliografía relativa a estudios de visión sobre pacientes de Esclerosis Múltiple con especial atención. Además, se ha incluido un apéndice que resume datos de interés en relación a las características de esta patología.

Desde que Riklan (1972) observó que varios pacientes de la Enfermedad de Parkinson tenían una mayor frecuencia crítica de fusión, ha habido bastantes estudios dedicados a la función visual en casos de Parkinson, que al principio se creía que afectaba casi en exclusiva a

las funciones motoras. La enfermedad se debe a que existe un déficit de neuronas de tipo dopamínico (que contienen dopamina como neurotransmisor) y a raíz de los estudios realizados en este tipo de pacientes se ha concluido que esta sustancia juega un papel bastante específico

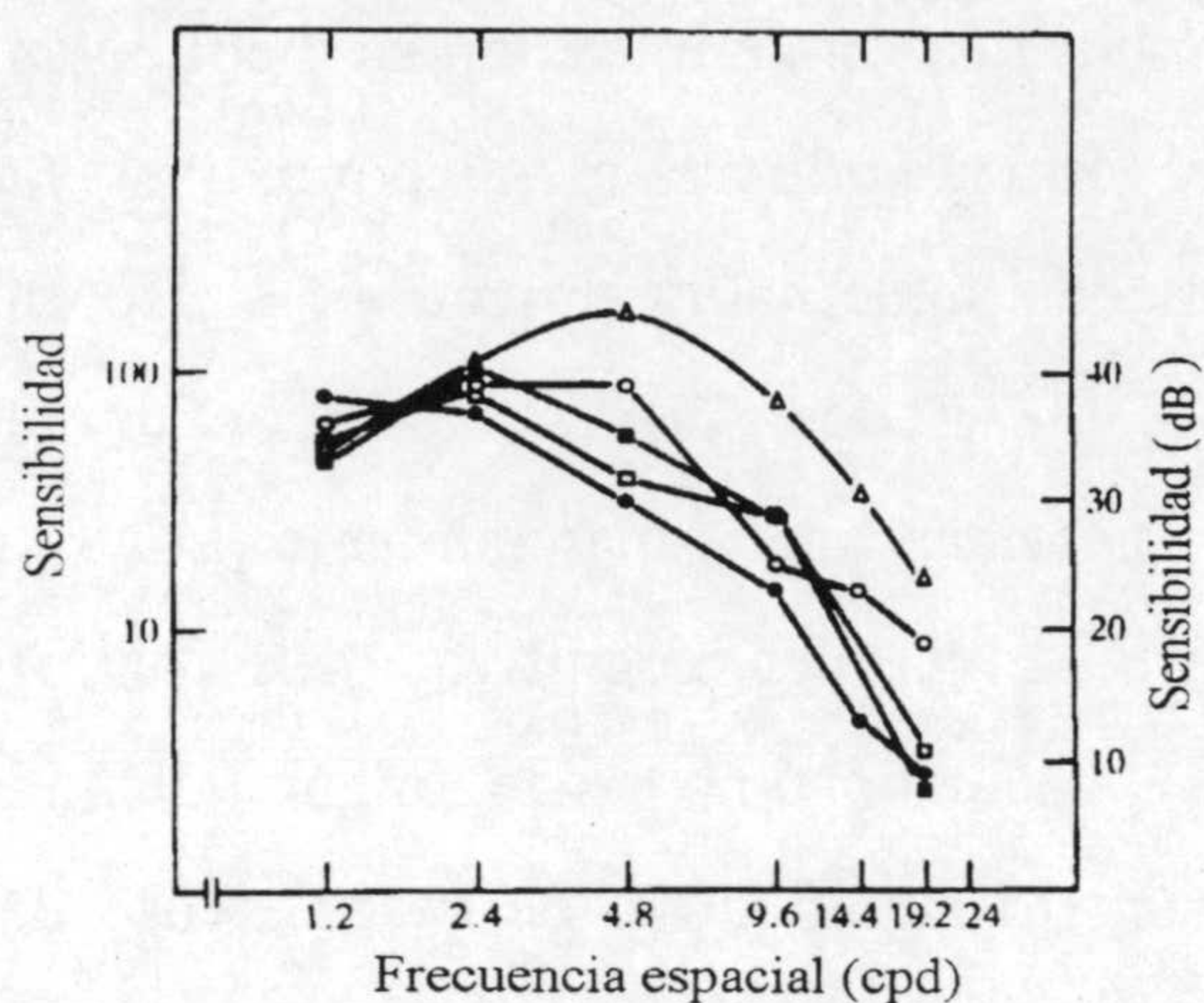


Figura 2.26. CSF para un grupo de observadores afectados de Parkinson y su comparación con un grupo de control sano (Bodis-Wollner, Marx, Mitra, Bobak, Mylin y Yahr, 1987).

en particular en visión foveal. En la figura 2.26 se puede ver que, para los pacientes de Parkinson, las CSF en luminancia dejan de ser paso-banda para transmitir con preferencia las bajas frecuencias. Este cambio singular en la forma de la CSF llevó a Bodis-Wollner *et al.*(1987) a proponer que la falta de dopamina provocaba cambios en la estructura del campo receptivo celular, alterando la estructura centro-periferia del mismo.

En cuanto a las lesiones corticales, la principal manifestación es una pérdida de visión en determinadas zonas del campo visual, que varía considerablemente según los casos en cuanto a extensión y profundidad. Los estudios realizados revelan que, en algunos casos, se mantiene la habilidad de percibir tests en movimiento, aunque no de describirlos (se ven como una sombra sin contornos claros), o incluso de señalar la presencia de estímulos en la zona "ciega" del campo visual. La recuperación de capacidad visual después de traumatismos o heridas de arma de fuego es también muy variable según los casos. Los estudios realizados sobre capacidades espacio-temporales señalan que se producen pérdidas significativas para altas frecuencias espaciales.

Por último, revisamos algunos de los estudios de CSF realizados sobre pacientes de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica. Ambas patologías están bastante relacionadas, pues la pérdida de mielina (factor desencadenante de los síntomas en Esclerosis Múltiple) si se produce en el nervio óptico puede ocasionar inflamaciones del mismo, de forma que en un 50% de casos (Congia, Mellino, Porcella, Borghero y Cannas, 1993) la neuritis óptica resulta no ser otra cosa que la manifestación inicial de Esclerosis Múltiple (MS). En estos casos, cuando la MS empieza con pérdidas de tipo sensorial, algunos estudios predicen un pronóstico con mejores perspectivas (Uría, Menes, Calatayud y Arribas, 1994).

Como indicamos antes, la Esclerosis Múltiple se relaciona con la destrucción parcial de las capas de mielina que protegen al sistema nervioso central, lo que dificulta y en muchos casos impide la transmisión del impulso nervioso. Las *placas* de desmielinización se distribuyen en principio aleatoriamente en la materia blanca (o sea, formada principalmente por axones) tanto del cerebro como de la médula espinal. La enfermedad sigue habitualmente un típico curso remitente-recidivante* que se manifiesta en procesos agudos (*brotos*) seguidos de fases tranquilas en las que se recuperan las capacidades perdidas total o parcialmente. Los brotes pueden afectar a funciones muy variadas, de movilidad, visuales, cognitivas o de control de procesos fisiológicos (Schapiro y Langer, 1994). En la actualidad no existe ningún tratamiento capaz de eliminar la enfermedad aunque en un número significativo de casos el uso de la proteína *Interferón β* consigue una reducción en la frecuencia y virulencia de los ataques y permite a los pacientes llevar una vida bastante normal, siempre con la vigilancia médica pertinente. También se ha experimentado con bloqueantes del canal de potasio, como la 4-aminopiridina, que actúa restableciendo temporalmente la conducción nerviosa en las zonas desmielinizadas (Davis, Stefoski y Rush, 1990). Respecto de las técnicas de diagnóstico, la introducción de las técnicas de resonancia magnética permiten localizar las placas; importante avance, dado que para diagnosticar con suficiente seguridad que se trata de Esclerosis Múltiple, es necesaria la presencia de dos o más placas en el sistema nervioso central (Vision and Visual Dysfunction, tomo 10, pag. 239).

Un síntoma muy característico de la Esclerosis Múltiple es el llamado "fenómeno de Unthoff", que consiste en pérdida de facultades tras realizar ejercicio físico. Se relaciona con un factor característico en bastantes casos de MS, que es la dependencia del estado general del paciente con la temperatura corporal: si ésta aumenta (como después de hacer ejercicio) la transmisión nerviosa se ve dificultada, mientras que si disminuye (después de un baño frío) los síntomas registran una mejoría significativa (Regan, Silver y Murray, 1977a).

Tras esta introducción sobre datos generales que conciernen a la patología (remitimos al Apéndice para una información más detallada sobre la misma), pasamos a describir las

* Término médico que significa que el progreso de la enfermedad no es continuo, sino en fases agudas seguidas de períodos de mejora. Para información adicional, ver el Apéndice.

anomalías encontradas en la CSF en luminancia para distintos grupos de pacientes. Estas anomalías pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, como se muestra en la figura 2.27.

- 1) Pérdidas de sensibilidad en la zona de bajas frecuencias, que generalmente se extiende a las medias frecuencias también (figura 2.27 a).
- 2) Pérdidas de sensibilidad en la zona de medias frecuencias, resultando las muy bajas y altas con valores normales (figura 2.27 b).
- 3) Pérdidas de sensibilidad en la zona de altas frecuencias (figura 2.27 c).
- 4) Pérdidas de sensibilidad globales en todas las frecuencias (figura 2.27 d).

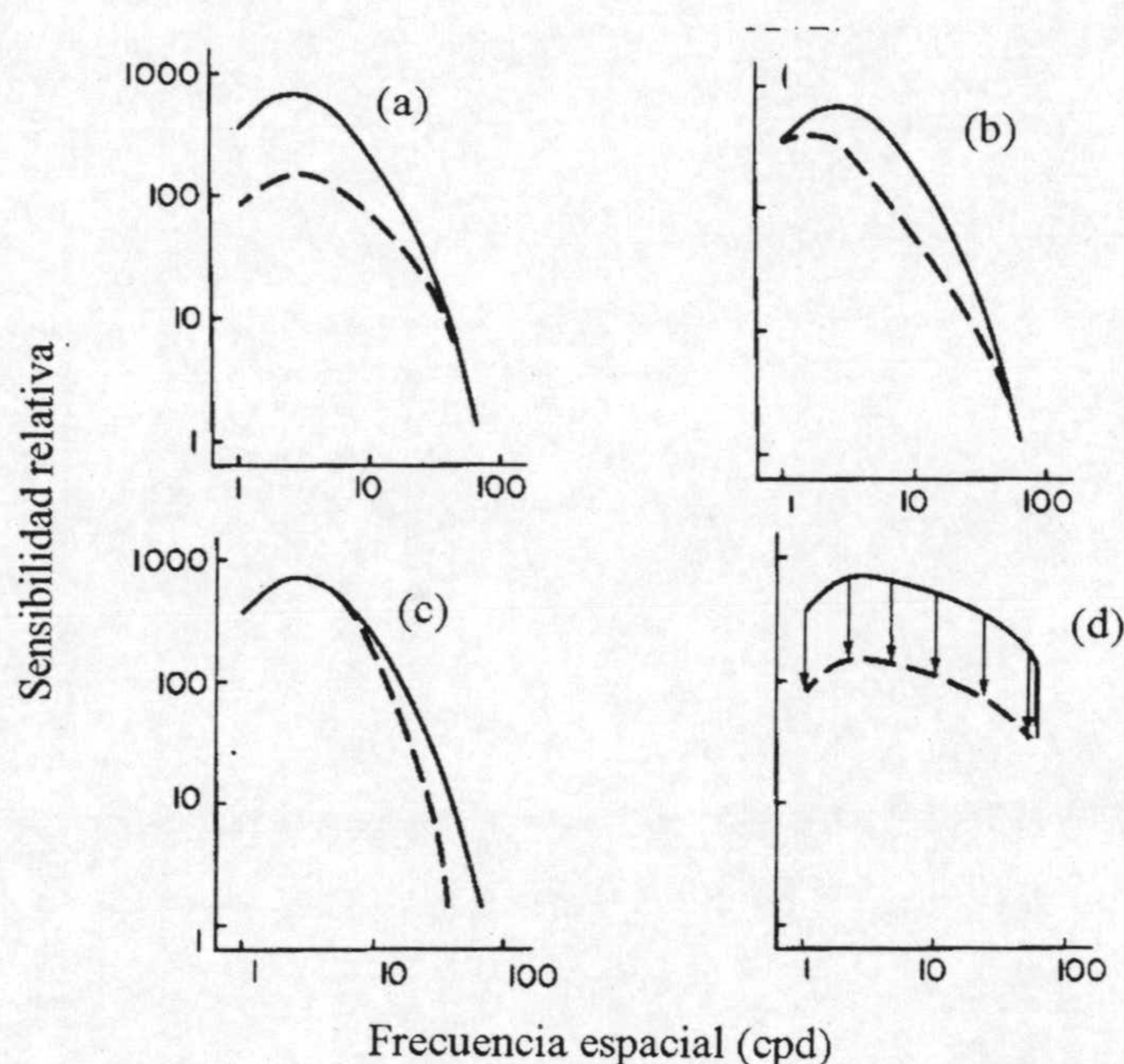


Figura 2.27. Anomalías en la CSF en luminancia encontradas para afectados de MS. Las líneas continuas representan la CSF para un grupo de control de observadores sanos (Vision and Visual Dysfunction, tomo 10, pag.239-240).

En los casos en que se registran pérdidas para las altas frecuencias, es predecible que la agudeza visual de los sujetos se vea resentida también, pero en los casos reflejados en la figura 2.27 (a) y (b), la percepción del detalle fino (que es lo que evalúa la agudeza visual) se conserva intacta, mientras que hay una importante disminución de sensibilidad para el resto de frecuencias. Esto precisamente hace interesante la medida de la CSF, pues la pérdida de facultades visuales quedaría oculta si se realiza la exploración habitual que consiste en la medida de la agudeza visual. Por eso algunos autores hablan de "pérdidas visuales escondidas" (Regan, Silver y Murray, 1977b). De los cuatro tipos de anomalías que se muestran en la figura

2.27, ninguno sería enteramente atribuible a una baja agudeza visual resultado, por ejemplo, de una mala corrección de errores refractivos, pues en estos casos la pérdida en la CSF se concentra en la zona de medias y altas frecuencias, respetando siempre las frecuencias más bajas, como estudiaron Regan *et al.* (1977b).

En algunos estudios se utiliza la comparación entre ambos ojos del paciente (Travis y Thompson, 1989; Medjbeur y Tulunay-Keesey, 1985), en los casos en que éste señala que tiene mejor visión o que no ha sufrido episodios de Neuritis Óptica en uno de ellos; este método no implica que se considere el "ojo bueno" como normal, dado que en la mayoría de casos de Neuritis Óptica y Esclerosis Múltiple hay pérdidas visuales más o menos significativas en los dos ojos.

CAPÍTULO III TRABAJOS ANTERIORES

- Contásele con todos los detalles – dijo Oliveira.
 - Oh, una idea general es bastante – dijo Gregorovius.
 - No hay ideas generales. – dijo Oliveira.
- Julio Cortázar. Rayuela.*

3.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo nos centraremos en los trabajos que se ocupan directamente de la CSF cromática, tanto desde un punto de vista teórico como experimental. Nos dedicaremos a tratar, con un poco más de detalle, tres grupos de trabajos que entendemos resultan de especial importancia para el planteamiento del nuestro.

El primer grupo de trabajos se refiere a la medida de la CSF cromática. Aunque haremos especial hincapié en los trabajos que utilizan condiciones estacionarias de presentación (es decir, sin modular temporalmente el estímulo), también nos referiremos más brevemente a algunos de los estudios que miden umbrales de detección para redes cromáticas con modulación espacio-temporal sinusoidal, en las que el efecto visual es de redes espaciales en movimiento.

De lo expuesto en el capítulo anterior sobre el estudio de la interacción entre canales visuales, se desprende que esta cuestión deja muchos aspectos abiertos a nuevas aportaciones. Por ejemplo, los trabajos que comentamos tratan siempre de la interacción cromaticidad-luminancia, pero no se ocupan de la posible interacción entre los dos canales cromáticos. Este es un aspecto que ha sido abordado, como veremos, sólo en un estudio hasta la fecha que utiliza la técnica de *sumación subumbral*. Este procedimiento se aplicó en primera instancia al estudio de la interacción cromaticidad-luminancia, como las técnicas de enmascaramiento y adaptación cuyos resultados analizamos en el capítulo II. A los resultados obtenidos mediante la técnica de sumación subumbral dedicaremos el segundo grupo de trabajos analizados en este capítulo. Dicha técnica consiste en medir el umbral de detección para redes combinadas, de modo que sobre la base de un determinado contraste de nivel subumbral en uno de los canales se va

añadiendo contraste correspondiente al otro canal hasta que se perciba el estímulo y viceversa. Repitiendo el proceso para distintos "pedestales" de contraste, se obtienen funciones que representan el contraste umbral del estímulo combinado en cada uno de los canales para cada condición de medida y que permiten poner a prueba las diferentes hipótesis de interacción entre canales. Para el caso de interacciones cromaticidad-luminancia, los trabajos realizados mediante esta técnica pueden enmarcarse fundamentalmente en dos corrientes: aquellos que abogan por una independencia de procesado y los que abogan por una interacción lineal que supondría una vía común de procesado. Como veremos, los resultados de ambas corrientes llevan a conclusiones bastante diferentes entre sí.

El tercer grupo de trabajos se ocupa de los estudios que utilizan distintos tests de visión del color y de CSF cromática en pacientes de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica, tanto de tipo psicofísico como electrofisiológico. Estos estudios son bastante recientes, lo que refleja el interés que despierta actualmente este argumento.

El análisis para ambos grupos se realizará por orden cronológico, pues entendemos que resulta más claro para dar coherencia a la exposición.

3.2. ANÁLISIS DE LA CSF CROMÁTICA, CON Y SIN MODULACIÓN

TEMPORAL.

El mérito de ser pionero en el campo de la visión de redes con modulación sinusoidal cromática corresponde en justicia a Schade (1958). En su estudio se obtuvieron resultados en cuanto a la forma de la CSF cromática que contrastan muy claramente con todo el resto de trabajos posteriores sobre el tema, pues las funciones que construyó muestran un marcado carácter paso-banda, similar al de la CSF en luminancia.

Estos resultados se dieron por buenos hasta que nueve años más tarde apareció el trabajo de Van der Horst, De Weert y Bouman (1967) en el que se utilizaron redes cuadradas con modulación cromática. El sistema para generar los estímulos se basaba en láminas de vidrio con franjas espejadas alternadas. Veamos con más detalle un esquema del dispositivo utilizado (figura 3.1). En las franjas espejadas G se refleja la luz de la fuente L_0 , que pasa a través de un colimador y después por un filtro interferencial F_0 , que determina la longitud de onda que los

autores llaman "de referencia". A través de las franjas transparentes, el sujeto ve una mezcla de dos luces con filtros interferenciales F_1 y F_2 conseguida mediante la lámina semiespejada M . Así, por ejemplo, para la longitud de onda de referencia de 625 nm se usan luces de mezcla de 525 y 660 nm. El elemento A en la figura 3.1, formado, presumiblemente (porque no lo especifican con claridad los autores), por dos polarizadores, tiene la función de controlar la proporción relativa de L_1 y L_2 en la mezcla que se presenta al observador. De este modo, el color de las franjas transparentes puede variar desde el de referencia hasta los dos extremos marcados por las longitudes de onda que se mezclan, y la tarea del observador consiste en ajustar las proporciones de L_1 y L_2 mediante A hasta que no sea capaz de percibir las franjas.

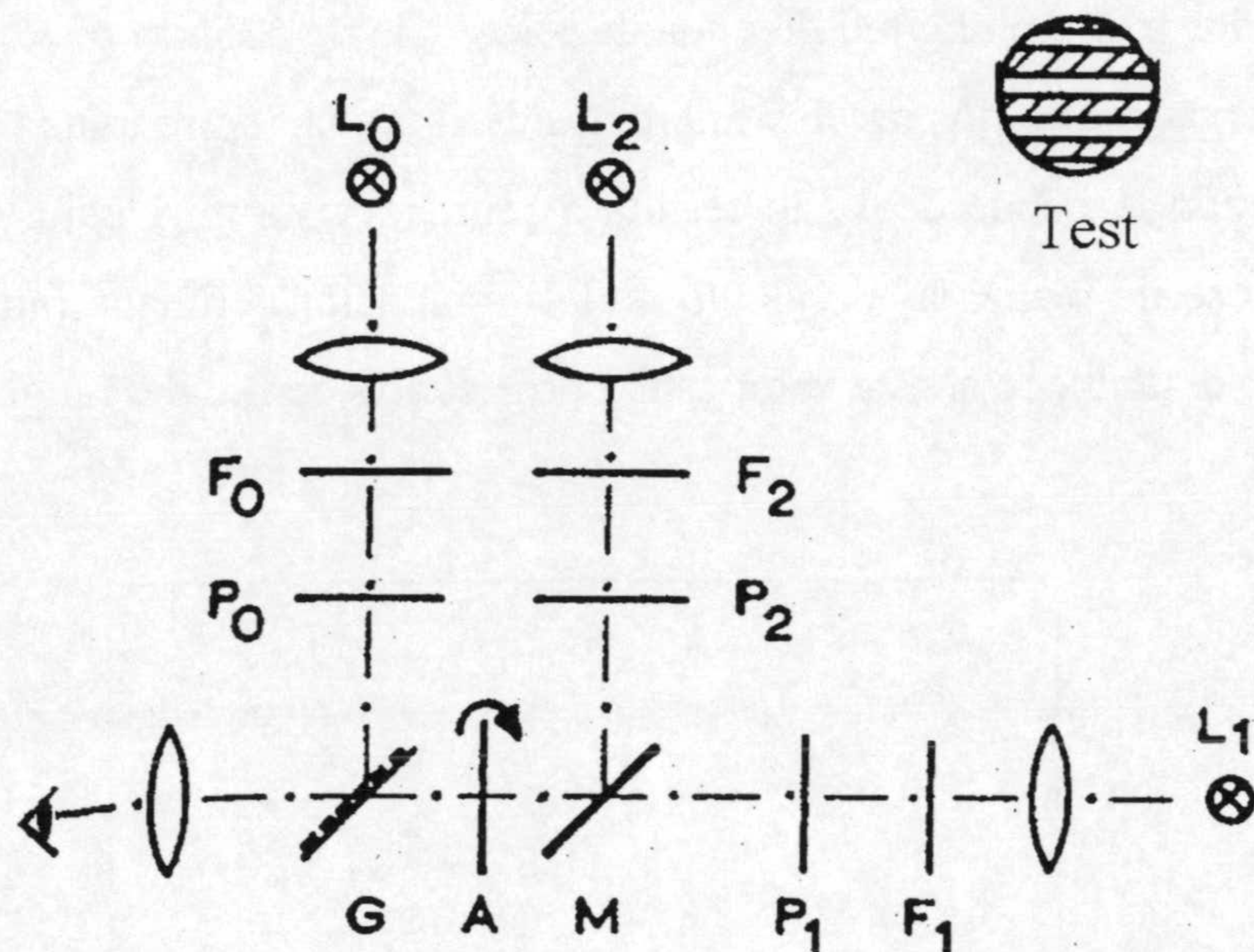


Figura 3.1. Esquema del dispositivo experimental de Van der Horst *et al.* (1967).

La definición de contraste cromático que utilizan estos autores viene muy condicionada por las características de su dispositivo experimental. Por una parte, definen dos magnitudes llamadas R/G e Y/B en función de la captura fotónica por unidad de área y tiempo en los tres tipos de conos. El que utilicen una u otra magnitud depende esencialmente de que el estímulo de referencia tenga tonalidad predominante roja o verde (entonces utilizan R/G) o bien amarilla o azul (entonces usan Y/B).

Para nuestro ejemplo de antes, la longitud de referencia es 625 nm, por lo que se utiliza R/G y, con la curva que relaciona R/G con la longitud de onda, se obtienen los valores para L_0 , L_1 y L_2 , que se nombran como R_0/G_0 , R_1/G_1 y R_2/G_2 . A partir de ellos, definen el contraste umbral en

función del ángulo que rota el analizador A del dispositivo cuando el observador señala el umbral de percepción. Como es lógico, el umbral estará definido para dos ángulos de rotación, pues la mezcla puede realizarse aumentando la proporción de L_1 con respecto a L_2 o viceversa. Se definen entonces dos magnitudes intermedias R_α/G_α y R_β/G_β , dadas por:

$$\frac{R_\alpha}{G_\alpha} = \frac{R_1 \text{sen}^2 \alpha + R_2 \text{sen}^2 \alpha}{G_1 \text{sen}^2 \alpha + G_2 \text{sen}^2 \alpha} \quad (1)$$

y, análogamente, R_β/G_β . Con ambas se calcula, finalmente, el contraste umbral:

$$\frac{\Delta R/G}{R_o/G_o} = \frac{G_o}{R_o} \left[\frac{R_\alpha}{G_\alpha} - \frac{R_\beta}{G_\beta} \right] \quad (2)$$

Las láminas de franjas espejadas disponían de frecuencias espaciales de 0,4 a 9 cpd. Los resultados obtenidos para la longitud de onda de referencia de 625 nm pueden verse en la figura 3.2 para dos observadores y dos niveles diferentes de iluminación retiniana de 3500 y 19 td. El nivel de iluminación retiniana de 19 td resulta a primera vista muy bajo, pero los autores no especifican cómo se ha realizado el cálculo de la iluminación retiniana (aunque sí el diámetro pupilar utilizado), ni tampoco si este valor está o no incluido dentro del rango fotópico.

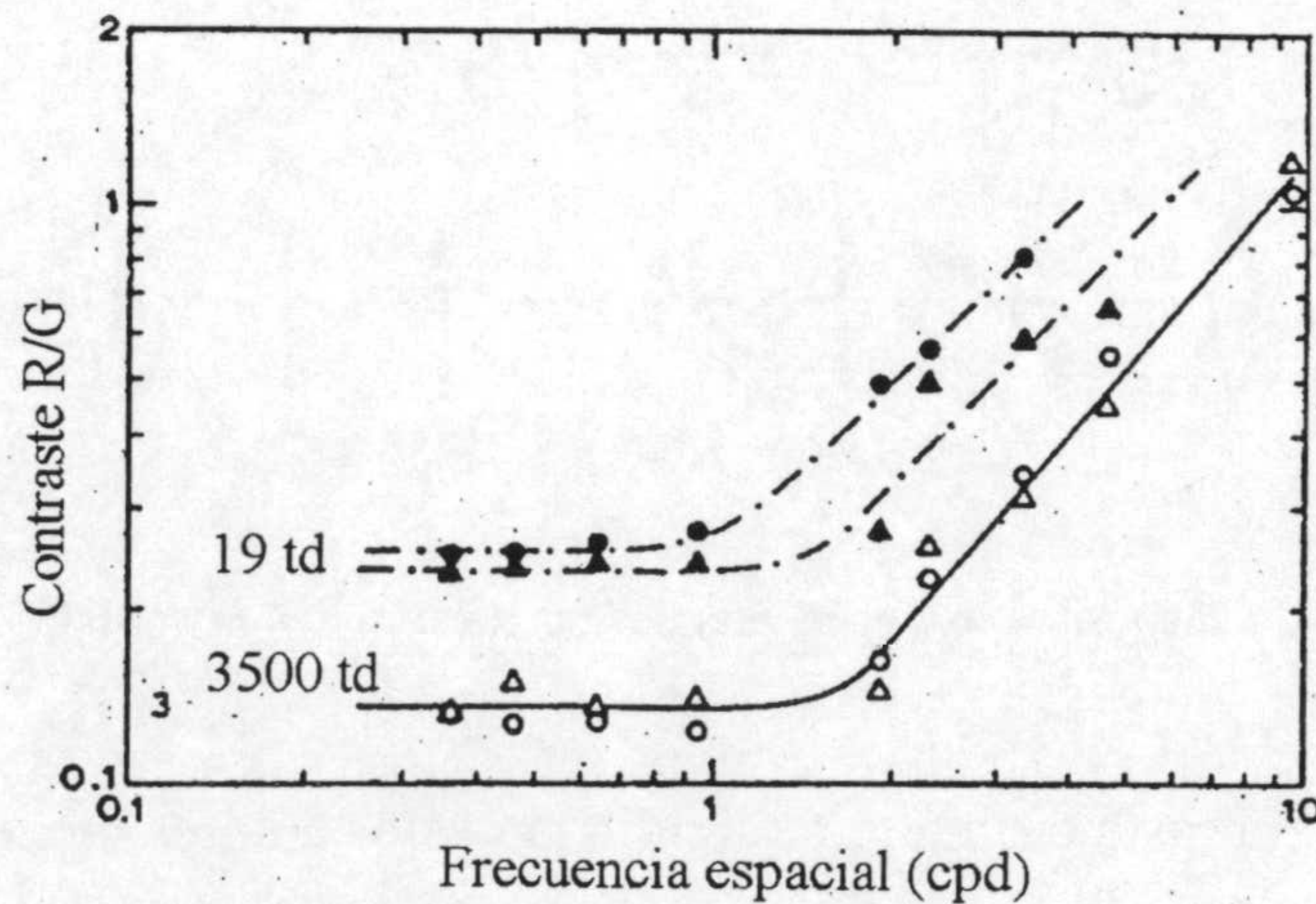


Figura 3.2. Resultados de Van der Horst *et al.* (1967) para sus dos observadores. Cada sujeto se representa mediante un símbolo (triángulo y círculo). La longitud de onda de referencia es de 625 nm; se muestran las CSF para dos niveles de iluminación retiniana (pupila artificial de 2 mm).

Aunque se representa directamente el contraste umbral y no su inversa, como suele ser habitual, se aprecia claramente que las curvas resultan de tipo paso-baja y no paso-banda como señaló Schade. La comparación directa, sin embargo, no sería muy correcta, dado que se trata de diferentes tipos de estímulos y las redes cuadradas son bastante más complejas, desde el punto de vista de su contenido en frecuencias, que las sinusoidales. Así que estos autores optan por medir

la curva de sensibilidad con el mismo dispositivo para redes cuadradas en luminancia, resultando paso-banda muy claramente para niveles de iluminancia retiniana altos (3500 td).

De todas formas, dos de los autores (Van der Horst y Bouman, 1969) deciden cambiar de dispositivo para generar redes sinusoidales y confirmar la forma paso baja de la CSF para estímulos cromáticos, al mismo tiempo que estudian el efecto de variar la frecuencia temporal sobre las curvas. El dispositivo que utilizan Van der Horst y Bouman consiste en un monitor color de televisión al que acoplan un oscilador en el amplificador de señal vídeo, de forma que se pueden generar en pantalla redes sinusoidales de variación cromática y moverlas con una cierta velocidad para variar la frecuencia temporal de los estímulos. Éstos se encuentran en el diagrama CIE 1931 situados sobre las líneas que se muestran en la figura 3.3, en torno a dos puntos de referencia: el equienergético (por el que se hacen pasar dos líneas, coincidentes con las de confusión tritán B-yy y protán R-bg), y el amarillo de coordenadas de cromaticidad (0.38, 0.52), por el que pasa la línea de confusión (que puede ser protán o deután, según dicen los autores) mostrada en la figura como RG.

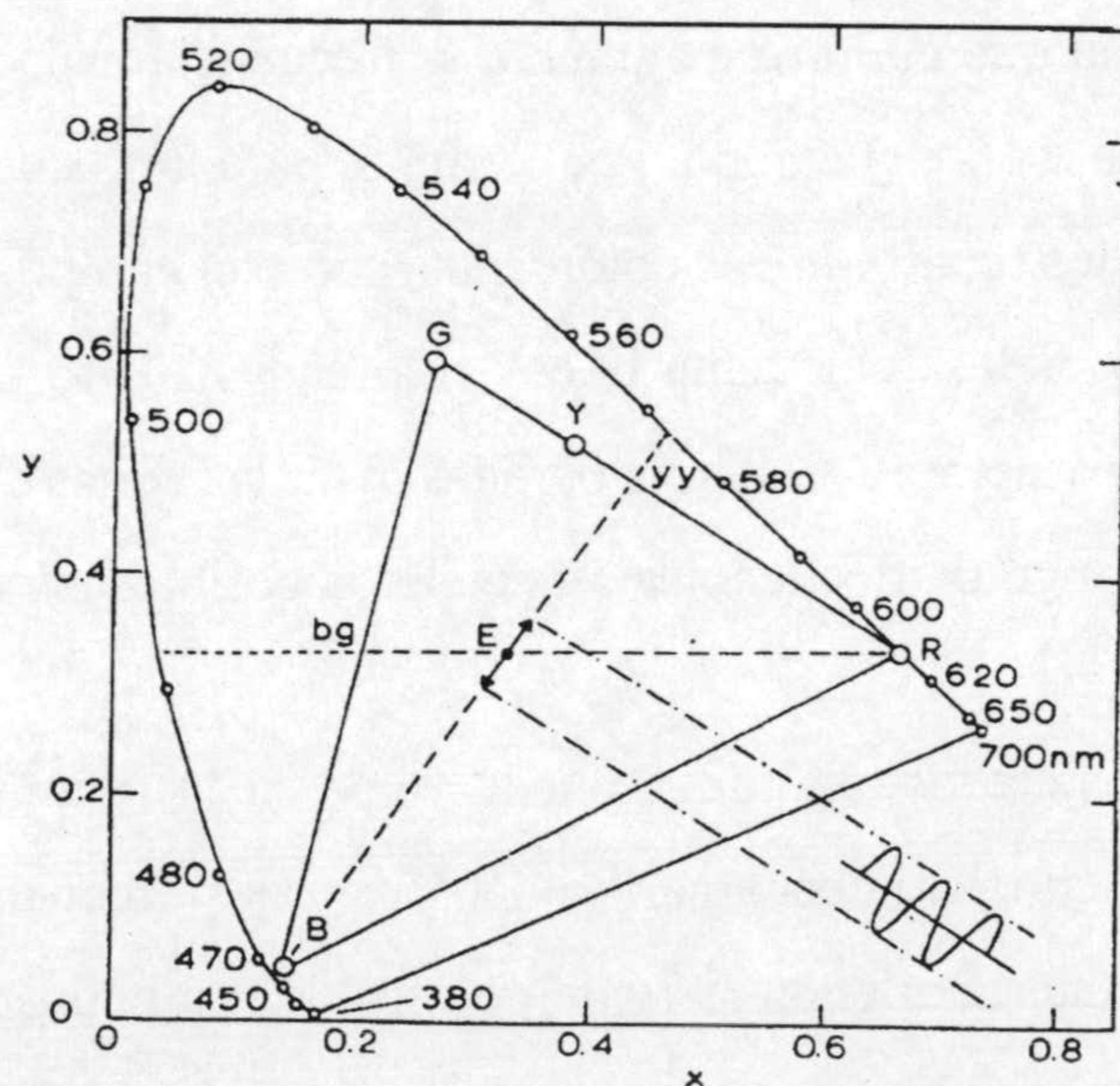


Figura 3.3. Líneas (R-bg y B-yy) utilizadas para construir las redes cromáticas en el trabajo de Van der Horst y Bouman (1969), en el diagrama CIE 1931. También se muestra triángulo RGB de primarios del monitor.

Como ya comentamos, el cambio de dispositivo obliga a un cambio en la definición de contraste cromático con respecto al trabajo con redes cuadradas, pues la definición que hemos explicado resultaba totalmente dependiente de las características del dispositivo generador de estímulos. La nueva definición que construyen estos autores se hace en función de la *pureza*

colorimétrica en cada línea; para un punto de coordenadas de cromaticidad (x,y) , sobre una línea determinada, el contraste cromático ΔC se define como:

$$\Delta C = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2} \quad (3)$$

donde (x_o, y_o) son las coordenadas de cromaticidad del estímulo de referencia correspondiente a la línea. Con esta definición, vemos que el contraste cromático no queda normalizado (no varía entre 0 y 1), con lo cual sobre la curva se pierde el valor de referencia unidad para la sensibilidad mínima, importante a la hora de estimar la frecuencia de corte. Otro posible inconveniente (aunque como veremos en la mayoría de casos es inevitable) es que los valores de contraste quedan limitados por las posibilidades de presentación de estímulos del monitor color, que dentro del diagrama CIE 1931 quedan restringidas al triángulo formado por las coordenadas de cromaticidad de los fósforos rojo, verde y azul. Así pues, lo máximo que nos podamos alejar en cada línea estará arbitrariamente limitado y nunca se alcanzará el límite máximo teórico que supondría el lugar espectral del diagrama de cromaticidad.

Respecto a la presentación de estímulos, ésta se realiza trabajando siempre con un campo constante de $1,4^\circ$, de forma que conforme aumenta la frecuencia espacial van apareciendo cada vez mayor número de líneas sobre el campo. Por ejemplo, para la frecuencia menor utilizada (0,7 cpd) aparecen sólo dos ciclos (cuatro líneas coloreadas) sobre el campo, mientras que para la más alta (18 cpd) aparecen 25 ciclos (cincuenta líneas coloreadas). Esto tiene la ventaja de que la zona de retina estimulada es siempre la misma para las distintas zonas de la curva, pero limita, en mucha mayor medida, el rango de frecuencias espaciales accesibles para el experimento.

Un ejemplo de los resultados obtenidos puede verse en la figura 3.4, para el estímulo de referencia equienergético con la línea amarillo-azul y varias frecuencias temporales. En la discusión, los autores señalan la diferencia evidente con los resultados obtenidos por Schade en 1958 y no se observa el efecto de decrecimiento del umbral cuando se mueven las redes, algo que otros estudios habían mostrado en el caso de curvas análogas medidas para redes en luminancia. También hacen referencia al menor ancho de banda de la CSF cromática en comparación con la de luminancia, incluso la anchura de las curvas decrece conforme crece la frecuencia espacial.

La definición de contraste cromático utilizada por estos autores hace difícil precisar la frecuencia de corte en las curvas, pues no hay un valor de contraste máximo de referencia igual para todas las líneas. Pero, en general, puede observarse que la caída de la curva se produce aproximadamente desde 3-4 cpd hasta 18 cpd. En el trabajo no se hace ninguna referencia a la corrección de la aberración cromática, por lo que entendemos que en principio no se tiene en cuenta, aunque en un estudio anterior (Van der Horst, 1969) con el mismo dispositivo sí se menciona un sistema rudimentario de corrección con una sola lente.

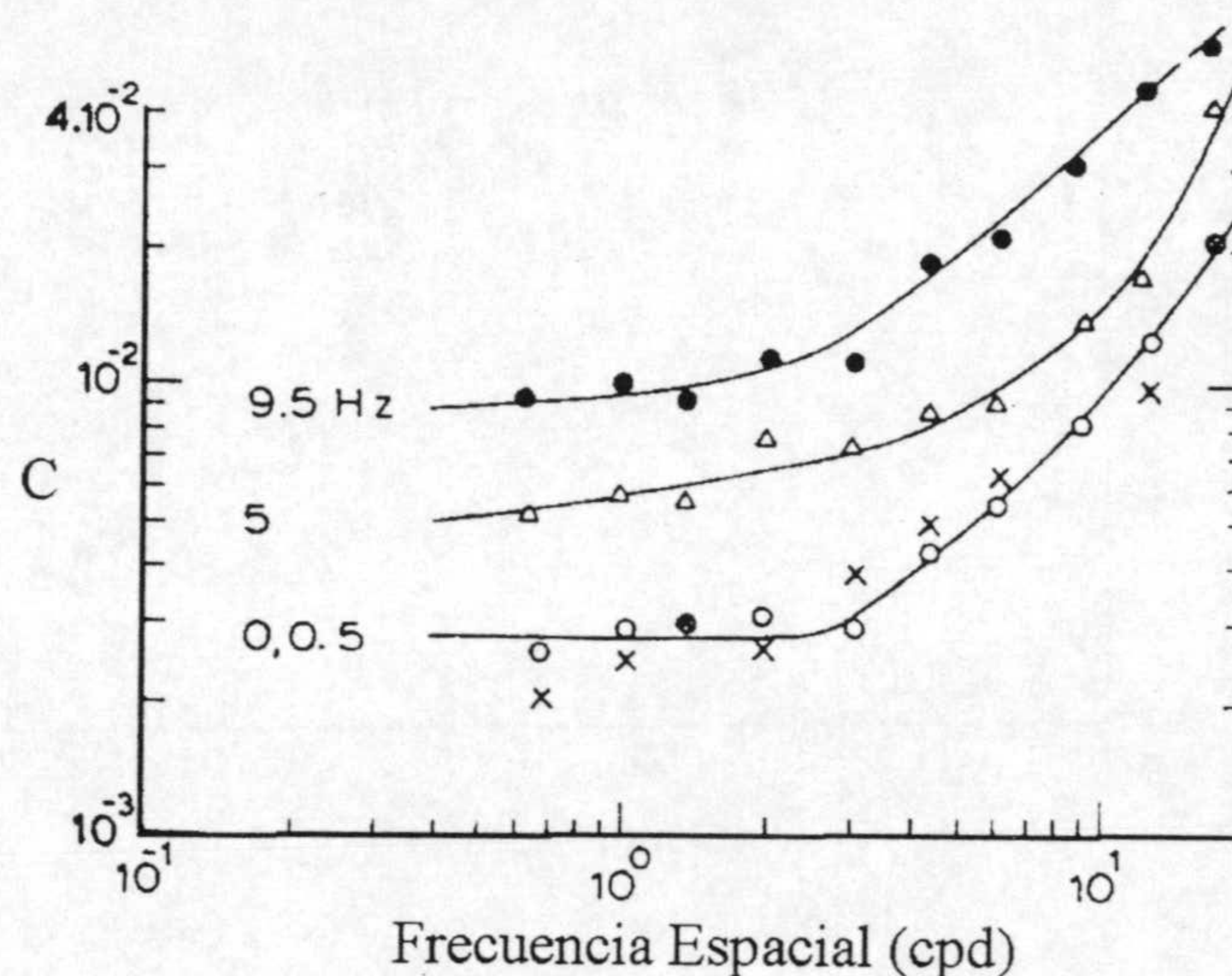


Figura 3.4. Resultados de Van der Horst y Bouman (1969) para la línea amarillo-azul y tres frecuencias temporales.

La confirmación definitiva de la forma paso-baja de la CSF cromática se produce en una carta al editor de Granger y Heurtley (1973). De nuevo el sistema generador de estímulos es un monitor color de televisión con oscilador acoplado, que utilizan para generar redes en la línea rojo-verde que marcan los fósforos del monitor. Una novedad con respecto al trabajo de Van der Horst y Bouman (1969) es que el observador se sitúa a dos distancias diferentes del monitor, 1 y 4 m, de forma que el tamaño de campo varía de $3^\circ \times 2,5^\circ$ (4 m, para frecuencias de 0,7, 1,0 y el rango de 2 a 20 cpd, con seis observadores) a $12^\circ \times 8^\circ$ (1 m, para las frecuencias 0,125, 0,3, 0,5 y 1,25 cpd, con dos observadores). La razón de este cambio es que para las frecuencias más bajas, el número de ciclos presentado era demasiado pequeño con el campo disponible de 3° . En un estudio posterior, Savoy y McCann (1975) demostraron que el número de ciclos presentado para frecuencias menores de 3 cpd influye decisivamente sobre la visibilidad si resulta ser menor de 3 ciclos completos, por lo que Granger y Heurtley aún tenían que haber ampliado más el tamaño de campo para conseguir la suficiente fiabilidad en sus medidas.

El contraste cromático utilizado por estos autores se define en función de la ganancia del oscilador acoplado al monitor y las curvas de sensibilidad se normalizan, de forma que los valores máximos de sensibilidad son siempre la unidad. Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 3.5. En ella se representan también los resultados normalizados de Van der Horst y Bouman (1969), que coinciden esencialmente con los de Granger y Heurtley.

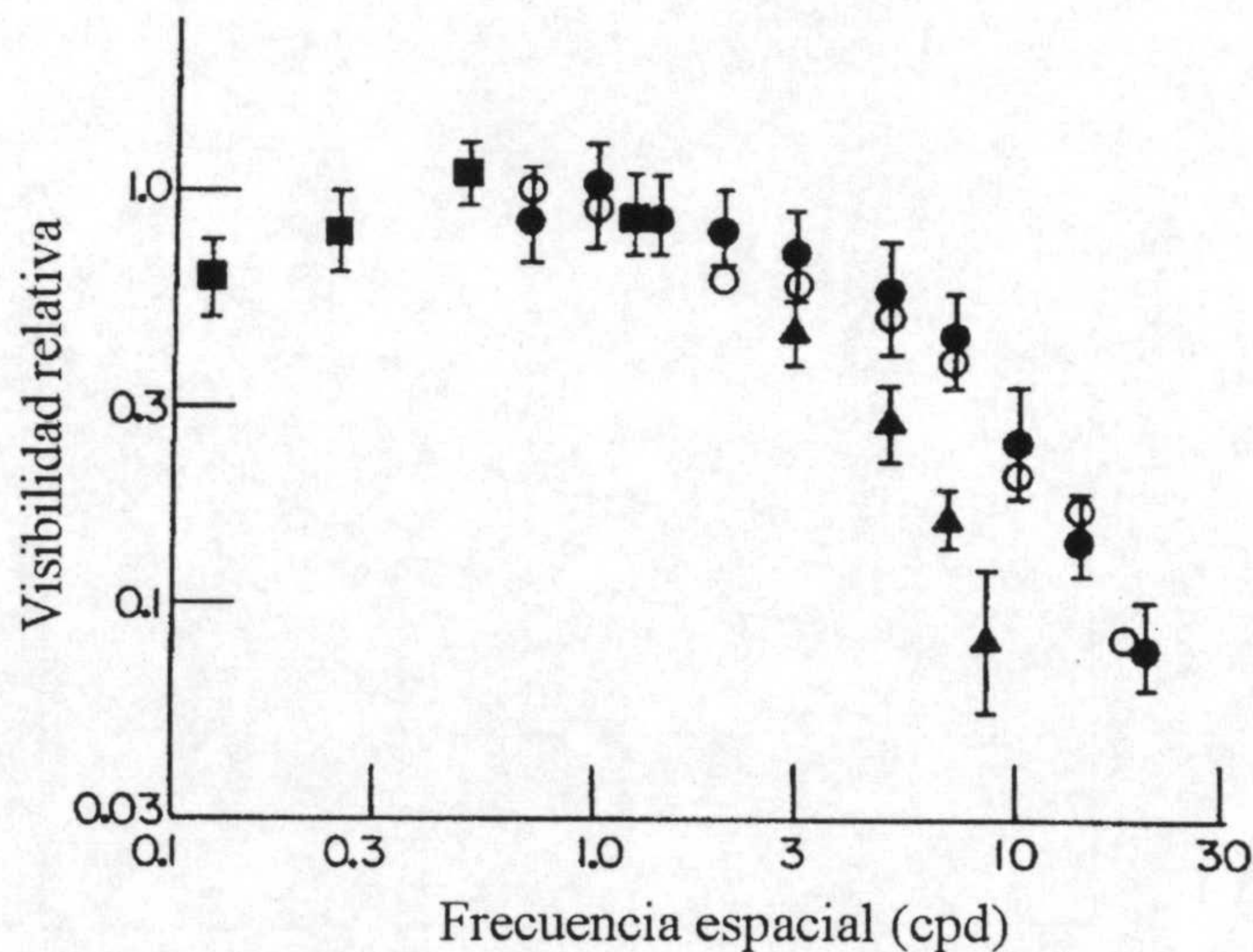


Figura 3.5. Resultados de Granger y Heurtley (1973). Los cuadrados y círculos rellenos representan los umbrales obtenidos con el criterio de detección, los triángulos los umbrales obtenidos con el criterio de percepción de color en la red, y los círculos abiertos, los resultados de Van der Horst y Bouman (1969).

Granger y Heurtley no corrigen tampoco la aberración cromática, por lo que obtienen valores de sensibilidad relativamente altos para frecuencias superiores a 10 cpd. Sin embargo, comentan que la apariencia de las redes a partir de 3 cpd resulta más parecida a la de redes en luminancia amarillo-negro (monocromáticas amarillas) que a redes con variación en cromaticidad, lo que, en bastante medida, es resultado de los efectos de aberraciones y difracción (el tamaño de pupila es muy pequeño, de 2 mm). Otros autores (De Valois y De Valois, 1990) consideran además que podría influir, en la zona de altas frecuencias, la respuesta de las células corticales llamadas "complejas", que aunque no son selectivas al color en el sentido de que no responden preferencialmente a un estímulo rojo o a uno verde, sí son capaces de dar respuesta a redes en cromaticidad. Esto explicaría por qué la apariencia de redes cromáticas de altas frecuencias (aun con aberraciones corregidas y efectos despreciables de difracción) es extraña en el sentido de que no se percibe claramente sensación de color. Granger y Heurtley (1973) realizaron la prueba de pedir a sus observadores que no sólo detectasen la red, sino que

determinasen el umbral de contraste para el cual podían percibir sensación de color en la misma. Los resultados se muestran con triángulos en la figura 3.5, puede observarse que con este criterio de umbral la frecuencia de corte disminuye considerablemente, situándose en torno a 10 cpd. También decrece en bastante medida el ancho de banda de la CSF. Por la necesaria brevedad del trabajo, los resultados de Granger y Heurtley dejan bastantes cuestiones sin resolver, aunque su principal objetivo de confirmar el carácter paso-baja de la CSF cromática queda adecuadamente cumplido; el trabajo de Schade queda ya en solitario como único defensor de la tesis de características comunes para las CSF en luminancia y cromaticidad.

En los años siguientes, la investigación se centra más en los aspectos temporales en conjunción con los espaciales, siguiendo la línea abierta por Van der Horst y Bouman (1969). Kelly (1974, 1983) estudia las características de los distintos tipos de conos en el procesado de redes en movimiento, Kelly (1974), y del sistema visual globalmente, construyendo una superficie umbral espacio-temporal para redes sinusoidales rojo-verde (Kelly, 1983). Utiliza un sistema para control y compensación automática de los movimientos oculares, especialmente importante para impedir posibles interferencias en la percepción de las frecuencias temporales, pero que hace imposible la medida de umbrales para estímulos estacionarios. Encuentran que la velocidad de percepción óptima es distinta para redes rojo-verde que para las de luminancia, lo que sugiere que las células nerviosas involucradas en ambos tipos de tareas tienen características diferentes. Por otra parte, utilizando un modelo que predice con buena aproximación la forma de la superficie espacio-temporal para luminancia, basado en las características de las células de tipo X (pero cambiando la entrada de forma que se sumen las funciones de respuesta para centro y periferia del campo receptivo), se obtiene también una aproximación no demasiado mala de la forma de la superficie espacio-temporal cromática, para frecuencias por encima de 0,2 Hz. Tanto dicha superficie como la predicha por este tipo de modelo pueden verse en la figura 3.6.

Las discrepancias que se observan entre predicción y resultados experimentales se atribuyen a que los datos de tipo psicofísico son mucho más complejos que los fisiológicos, pues engloban a todas las células involucradas en la percepción cromática y no necesariamente tienen que ser exclusivamente de tipo X, con lo que habría diferentes tipos de campos receptivos contribuyendo a la respuesta experimental.

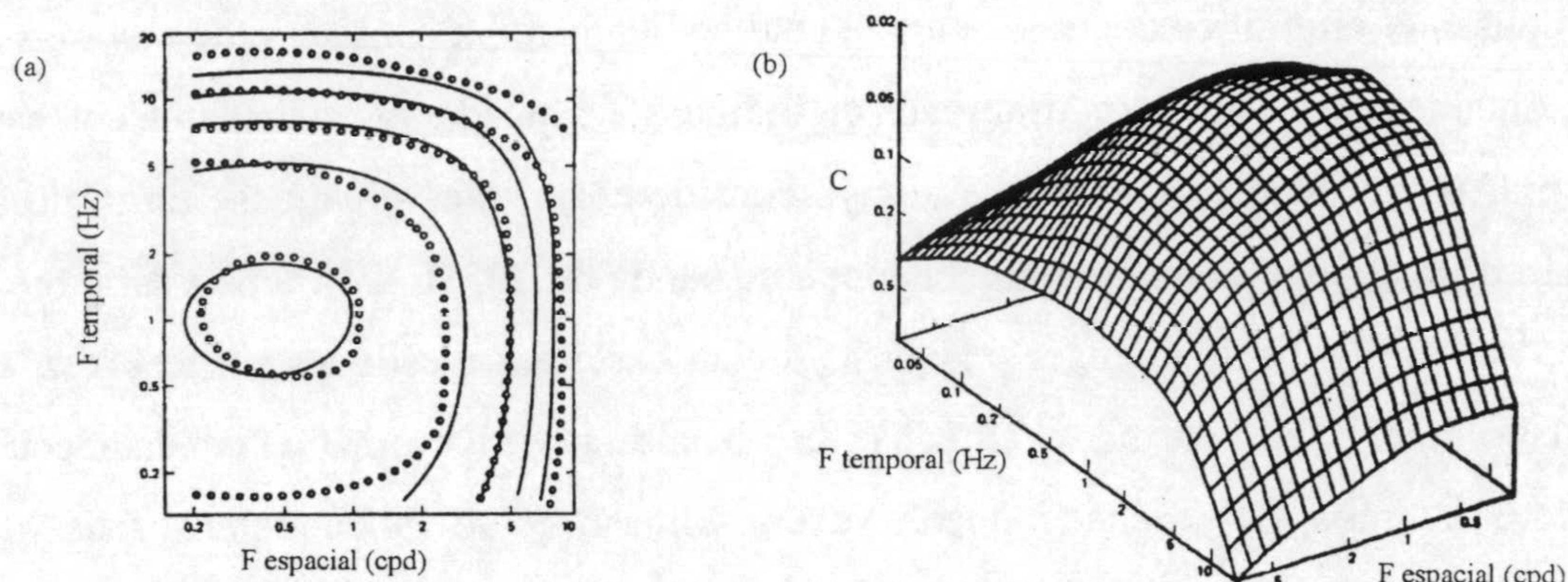


Figura 3.6. (a) Predicciones sobre las curvas de igual sensibilidad para redes rojo-verde isoluminantes con el modelo basado en el que se elaboró a partir de respuestas a modulaciones en luminancia. (b) Superficie umbral espacio-temporal para redes rojo-verde isoluminantes (Kelly, 1983).

Poco después se produce una contribución decisiva en el estudio de la CSF cromática, con medidas completas para redes rojo-verde y amarillo-azul (Mullen, 1985). Comentaremos más en profundidad este trabajo, pues desde su aparición se ha convertido en referencia obligada en el campo de la visión espacial del color, tanto por su carácter exhaustivo como por la técnica innovadora de presentación de las redes y corrección de aberraciones que explicamos a continuación. El dispositivo experimental puede verse esquematizado en la figura 3.7. Las líneas onduladas marcadas con los números 1 y 2 en la figura representan dos monitores monocromos (de fósforo blanco P4) en los que se generan independientemente dos redes sinusoidales en luminancia en oposición de fase. Delante de cada uno, se coloca un filtro de densidad neutra y un filtro interferencial que da la longitud de onda preferencial de los colores que formarán la red cromática: 526 y 602 nm para las redes rojo-verde, 470 y 577 nm para las redes amarillo-azul. Los haces de luz procedentes de los monitores llegan a una lámina semiespejada o separadora de haces (DH en la figura), donde se combinan como explicamos en el capítulo II para formar la red cromática. Después se sitúa un telescopio Zeiss de tres aumentos, que permite aumentar o disminuir el campo de visión en el rango de $2,2^\circ$ a $23,5^\circ$. Esto supone la utilización de tres tamaños de campo diferentes (aumentado, disminuido y sin telescopio) para el rango de frecuencias espaciales que se mide, que va de 0,17 a 6 cpd.

La ventaja de trabajar con dos monitores independientes es que se puede compensar de una forma bastante directa la aberración cromática tanto longitudinal como transversal. Para corregir la aberración longitudinal, Mullen utiliza lentes situadas en frente de uno de los monitores (de -1 Dp para el monitor con el filtro azul para redes amarillo-azul y -0.5 Dp para el monitor con el

filtro verde para redes rojo-verde), que modifica en función del uso del telescopio, pues cuando éste actúa como reductor de campo las correcciones que se necesitan son mayores, situándolas en el monitor con el filtro amarillo (filtro rojo para las redes rojo-verde).

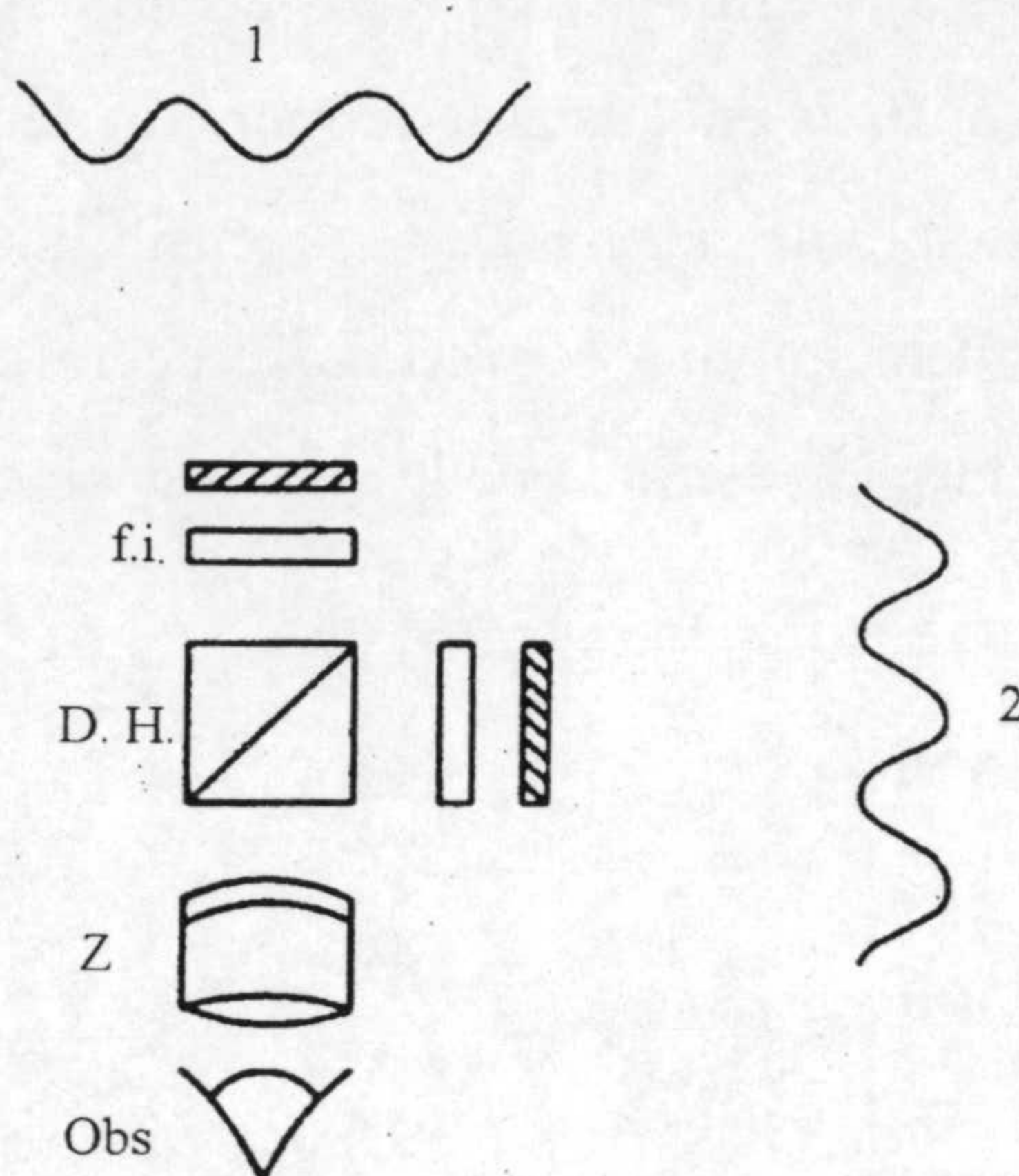


Figura 3.7. Esquema del dispositivo experimental utilizado en el trabajo de Mullen (1985).

En cuanto a la aberración transversal, el sistema utilizado implica generar redes con ligeras diferencias en su frecuencia espacial, para compensar exactamente el diferente aumento que produce el ojo para redes en los colores de cada uno de los filtros. El ajuste de estas diferencias en frecuencia espacial se midió utilizando redes cuadradas; el solapamiento que se da si queda algo de aberración cromática transversal genera barras brillantes muy fácilmente perceptibles, de forma que se modificó la frecuencia espacial de uno de los monitores hasta que estas barras desaparecían a juicio del observador. Los efectos de difracción no se tomaron en consideración, ya que no se midieron frecuencias mayores de 6 cpd (Van der Horst *et al.*, 1967). Las redes se presentaron con una frecuencia temporal de 0,4 Hz, zona de máxima sensibilidad de los canales cromáticos según el estudio de Kelly (1983), y el método experimental utilizado para medir el umbral de detección de las redes fue el llamado de *escalera simple*. Consiste en partir de un valor de contraste seleccionado aleatoriamente, y disminuir o aumentar gradualmente el contraste (según el valor inicial se sitúe por encima o por debajo del umbral del observador) hasta que el observador ya no sea capaz de percibir (o comience a percibir) la red. Este proceso de variar el nivel de contraste para pasar de percepción a no percepción o viceversa se repite varias veces, y el umbral se obtiene como media de los últimos valores límite de la serie. Explicaremos este procedimiento con más detalle en capítulos posteriores, dado que los detalles

del utilizado por Mullen (1985) no se especifican en su artículo, sino que nos remite a una referencia de carácter general sobre el método de escalera.

El método escogido para asegurar el correcto aislamiento de los canales cromáticos con respecto al de luminancia consistía en ajustar la proporción de los dos colores de la red cromática para cada frecuencia espacial, de forma que la sensibilidad fuera un extremo para dicha proporción, es decir, que fuera mínima o máxima respecto al resto de sensibilidades medidas para las distintas proporciones. Un ejemplo de las gráficas obtenidas puede verse en la figura 3.8.

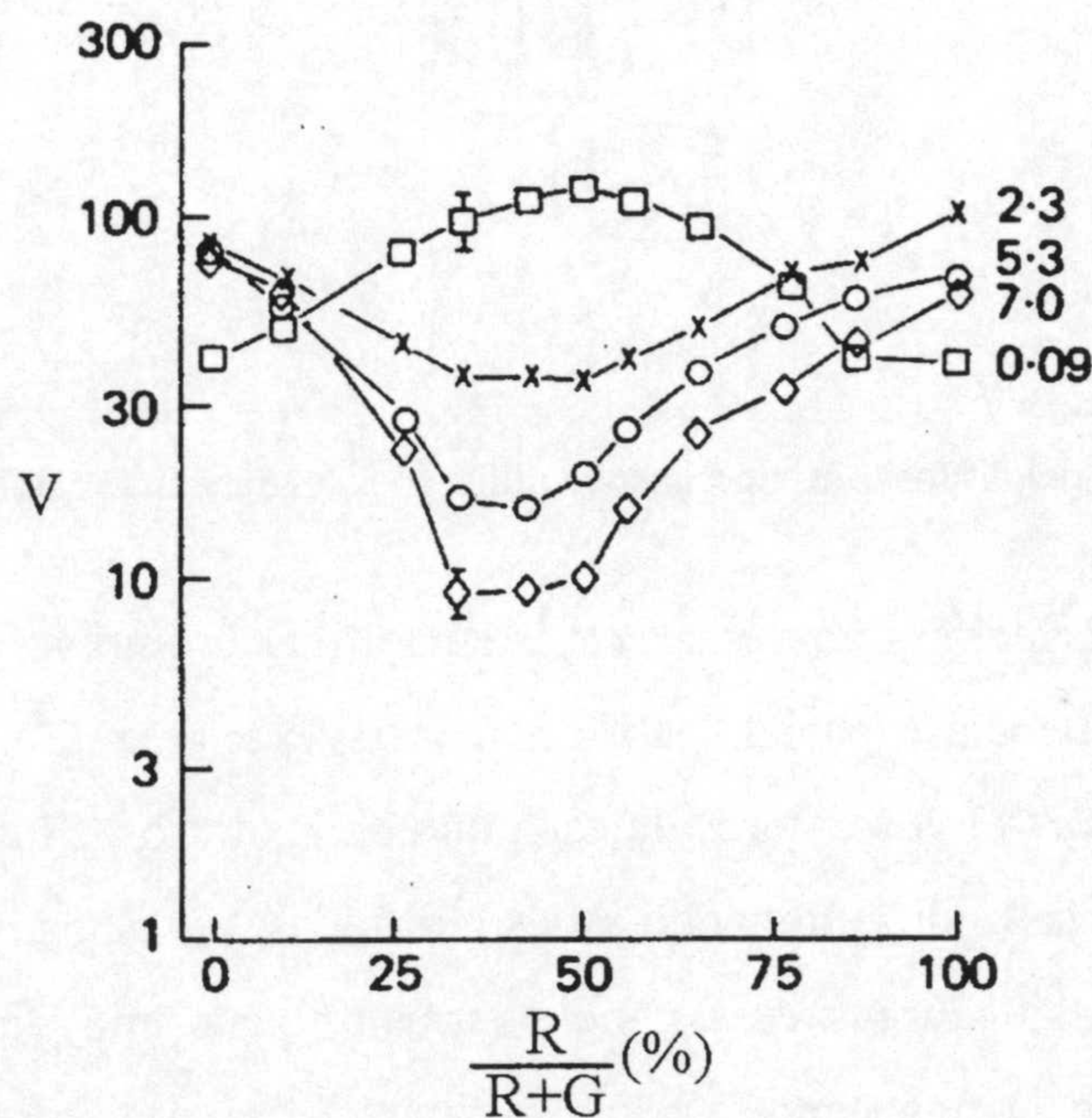


Figura 3.8. Umbrales de detección para distintas frecuencias en función de la proporción de rojo y verde de las componentes de la red, según Mullen (1985).

Aunque la proporción de rojo y verde varíe, en todos los casos se mantiene la suma de las dos luminancias en 15 cd/m^2 para las redes rojo-verde. Para el otro caso, amarillo-azul, la suma de las luminancias es mucho menor, de $2,1 \text{ cd/m}^2$. Como puede deducirse de la figura 3.8, las proporciones de ambos colores variaban según la frecuencia espacial de la red.

En cuanto al contraste cromático, como en otros aspectos del trabajo, Mullen optó por una definición innovadora, que después será utilizada en bastantes trabajos con redes cromáticas (Switkes *et al.*, 1988; Webster, De Valois y Switkes, 1990). El contraste cromático se define en base al contraste en luminancia (tipo Michelson estándar) de cada una de las redes monocromas

que se generan independientemente, imponiendo la condición de que ambas tengan el mismo contraste en luminancia, aunque no la misma luminancia media, como hemos visto en la figura 3.8. Como destaca Mullen, este procedimiento tiene la ventaja de que utiliza la misma escala de contraste que las redes en luminancia, por lo que en principio facilita la comparación directa de ambas CSFs. Sin embargo, este último extremo ha sido discutido posteriormente (Vimal, 1998), argumentando que una misma escala de medida no significa necesariamente que las magnitudes sean directamente comparables como señales visuales.

En cuanto a los resultados, podemos ver las CSF para ambos tipos de redes cromáticas en la figura 3.9. Estas curvas suponen, por un lado, la confirmación definitiva del carácter paso-baja de las CSF en cromaticidad y, por otro, la primera determinación, con aberraciones perfectamente corregidas, de la frecuencia de corte para redes cromáticas. Como ya dijimos antes, el valor de frecuencia espacial más alto presentado a los observadores es de 6 cpd, por lo que la frecuencia de corte, que resulta claramente mayor, se determina por extrapolación, resultando estimada en 11 cpd para las redes amarillo-azul y entre 11 y 12 cpd para las redes rojo-verde. La sensibilidad para la red rojo-verde resulta bastante mayor que la obtenida para la red amarillo-azul, aunque esto no se aprecie tanto en la figura, porque se utiliza escala logarítmica.

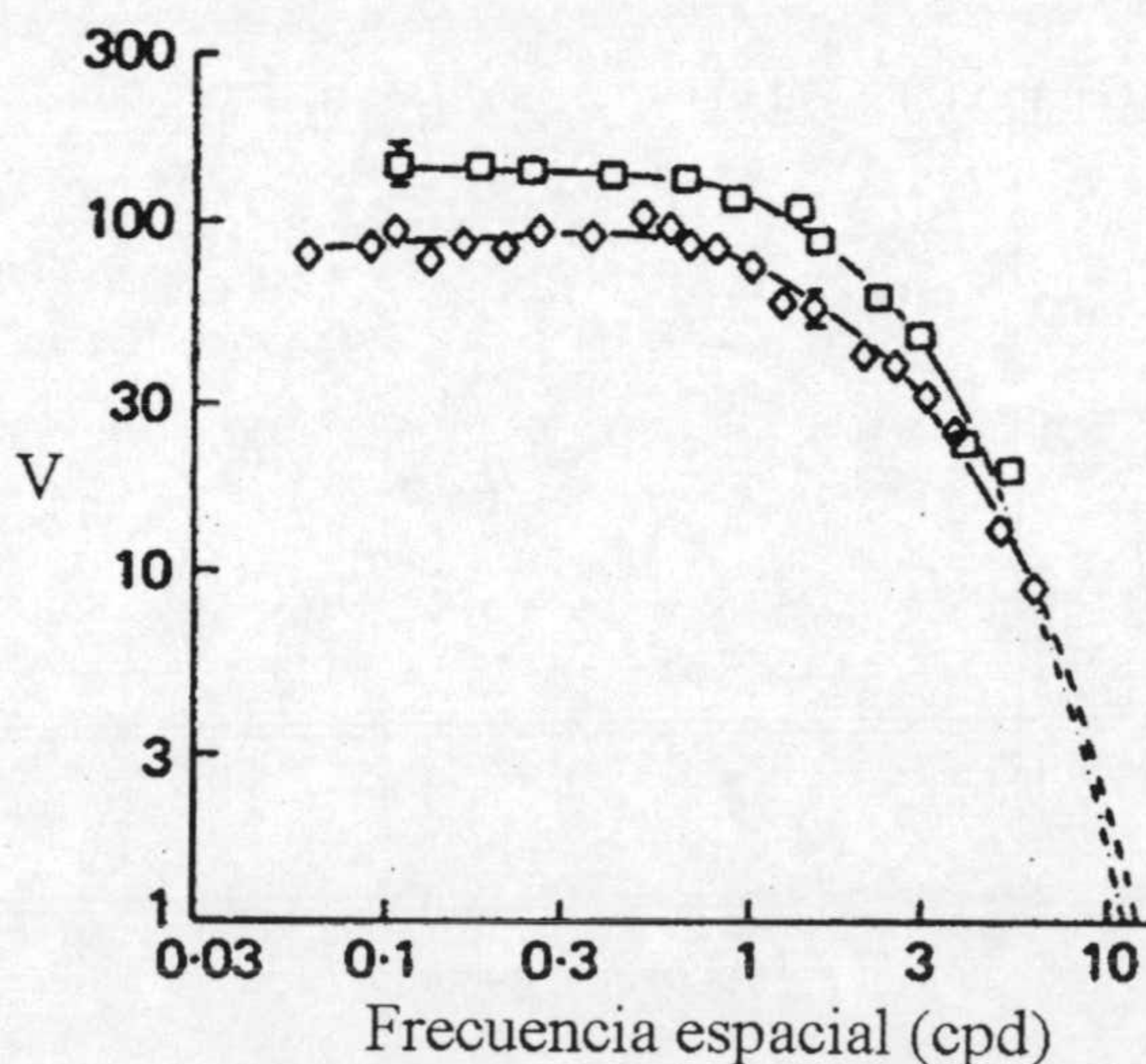


Figura 3.9. CSF para redes rojo-verde (cuadrados) y amarillo-azul (rombos) obtenidas por Mullen (1985). Las prolongaciones hasta el valor unidad de visibilidad dan idea de los valores de frecuencia de corte estimados.

La comparación con los resultados para redes en luminancia se realiza (figura 3.10) con redes monocromáticas de uno de los colores utilizados para generar la red cromática. Así, la CSF para la red rojo-verde se compara con la CSF medida para una red monocromática verde. En la

figura se indican también los tamaños de campo utilizados para los distintos rangos de frecuencias. A los tres tamaños que mencionamos al describir el dispositivo experimental, se añade un cuarto para la zona de altas frecuencias de la red monocroma. Si aceptamos el razonamiento de Mullen sobre las escalas iguales de contraste, hay dos diferencias interesantes que resaltar entre ambas CSFs: el máximo de sensibilidad, que es mayor para la CSF en luminancia y se sitúa en torno a 2 cpd, y la mayor agudeza visual (o sea, frecuencia de corte) que se estima por extrapolación para las redes en luminancia. A parte se encuentra carácter paso-baja de la CSF cromática frente al paso-banda de la CSF en luminancia, que ya hemos destacado en bastantes ocasiones. La agudeza visual obtenida está en torno a 30 cpd para la red verde en luminancia de la figura, valor bastante bajo si lo comparamos con el estándar de 50-60 cpd, pero, como comenta Mullen, hay que tener en cuenta que se trabaja a luminancia media no muy alta y esto influye sobre la agudeza visual. En los trabajos anteriores, las agudezas visuales para redes cromáticas resultaban mucho mayores, en torno a 20-30 cpd para Van der Horst y Bouman (1969) o incluso 50 cpd para Schade (1958), la misma que en luminancia, lo que constituye una muestra de la importancia que adquiere una corrección adecuada de las aberraciones cromáticas si se quiere estudiar la zona de altas frecuencias y en especial la agudeza visual para redes cromáticas.

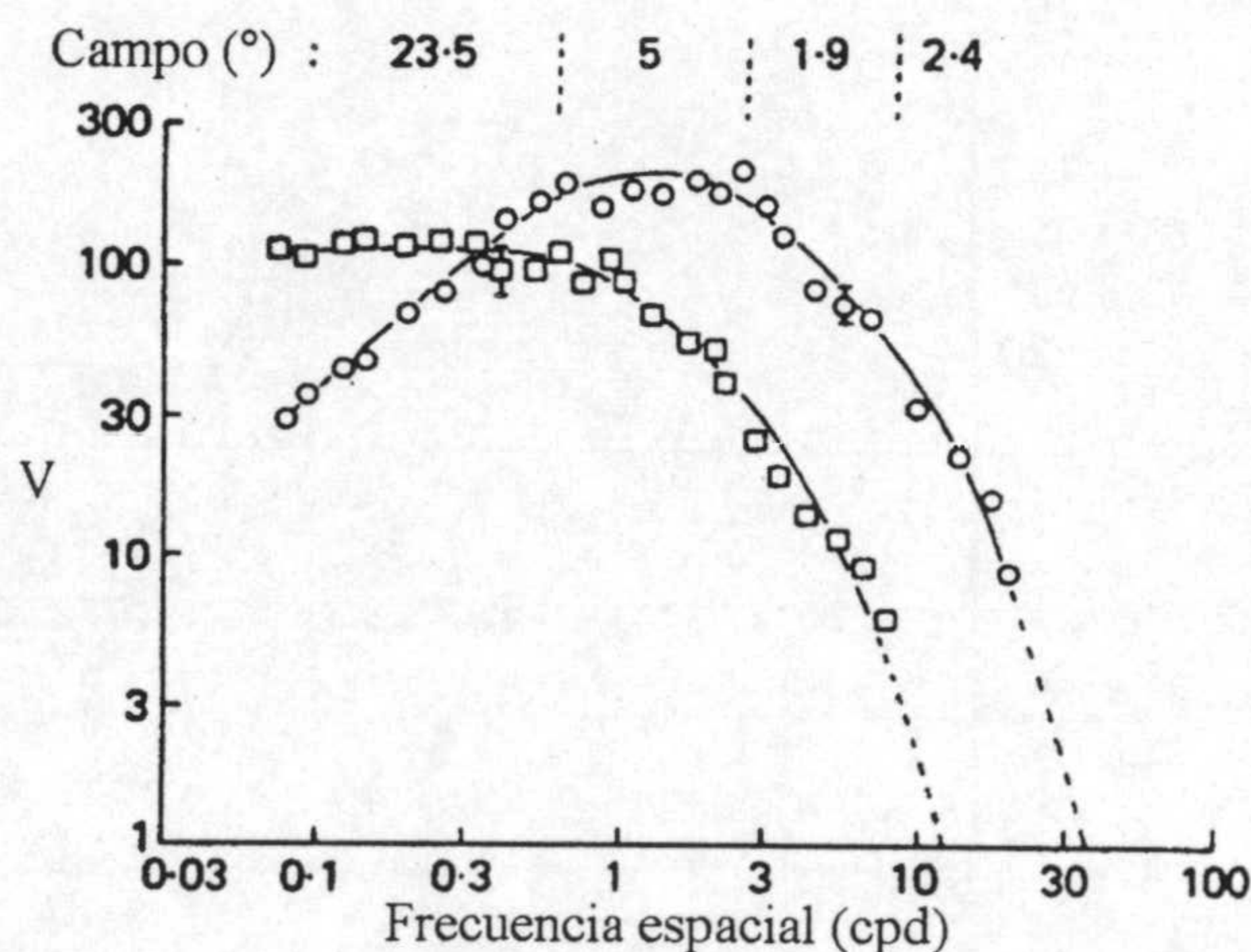


Figura 3.10. Comparación de resultados para redes rojo-verde (cuadrados) y verde en luminancia (círculos), según los resultados de Mullen (1985).

En la discusión de resultados, Mullen menciona que la sensibilidad varía según las combinaciones de colores escogidas para formar la red, aunque en su opinión para otra pareja cualquiera de estímulos de color extremos tendería a disminuir, porque las longitudes de onda utilizadas están próximas a los máximos de sensibilidad espectral de los distintos mecanismos

ponentes (Sperling y Harwerth, 1971; Hurvich y Jameson, 1955). También destaca el hecho de que las sensibilidades relativas cromaticidad-luminancia cambien con la frecuencia espacial, lo que debería ser tenido en cuenta para los siguientes estudios incluso de carácter fisiológico y no sólo psicofísico. Si se calculan las respuestas de los tres tipos de conos a partir de las funciones de sensibilidad espectral propuestas por Smith y Pokorny (1975), resulta que la modulación individual de los conos, necesaria para llegar al umbral en frecuencias espaciales bajas, es mucho menor para las redes cromáticas que para las redes en luminancia, lo que según Mullen se debería enteramente a las fases post-receptorales del procesado de ambos tipos de estímulos.

Como últimos exponentes de este grupo de trabajos, destacamos dos estudios de tipo teórico. Rohaly y Buchsbaum (1988) utilizan precisamente los resultados experimentales de Mullen (1985) para ajustar los coeficientes de las funciones de respuesta espacial de dos hipotéticos mecanismos antagónicos, que se suman cuando el estímulo es una red en luminancia y se restan cuando se les presenta una red cromática. La señal de entrada queda descrita según dos funciones $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$ de distribución cromática del estímulo, que se combinan, añadiéndose al mismo tiempo la modulación espacial, de forma que la señal depende de λ , la frecuencia espacial ω_0 y la variable espacial x :

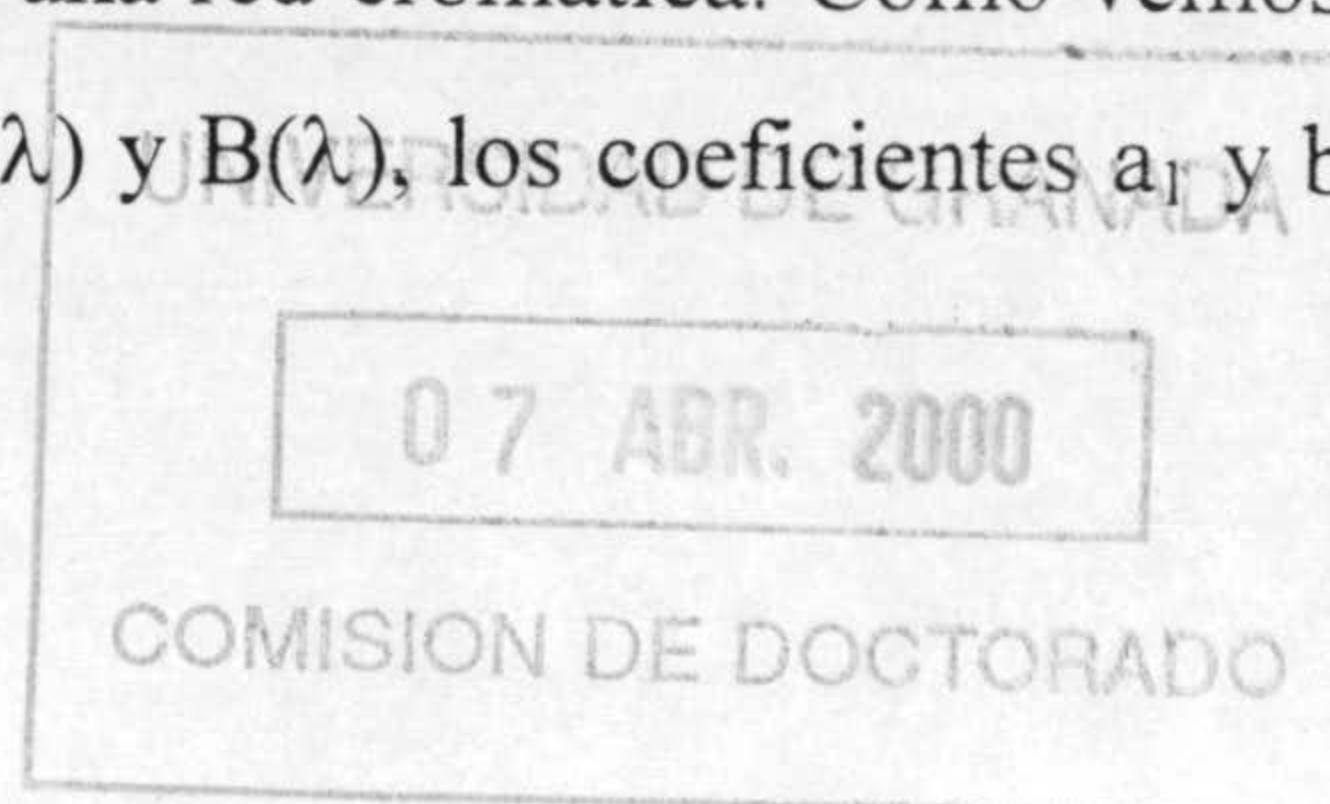
$$S(x, \lambda, \omega_0) = [A(\lambda) \pm B(\lambda)] [1 + \cos(\omega_0 x)]. \quad (4)$$

En la expresión anterior, $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$ se suman (signo "+") si las redes son en luminancia, y se restan (signo "-") si las redes son cromáticas, de un modo similar a como explicábamos el procedimiento habitual para construir una red cromática sumando en oposición de fase (signo menos en la combinación) dos distribuciones espaciales de diferente cromaticidad.

La respuesta a cada tipo de señal de los mecanismos antagónicos M_1 y M_2 viene dada por:

$$\begin{aligned} R_L &= (a_1 + b_1) M_1(\omega_0, \lambda) - (a_2 + b_2) M_2(\omega_0, \lambda) \\ R_c &= (a_1 - b_1) M_1(\omega_0, \lambda) - (a_2 - b_2) M_2(\omega_0, \lambda) \end{aligned} \quad (5)$$

donde R_L es la respuesta a una red en luminancia y R_c a una red cromática. Como vemos, dado que la señal en luminancia se obtiene como suma de $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$, los coeficientes a_1 y b_1 (que



representan la respuesta de M_1 a $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$) se suman y lo mismo sucede para el otro mecanismo oponente. De un modo análogo se opera para obtener R_c .

Las funciones de respuesta espacial de los mecanismos oponentes (M_1 y M_2) se suponen con forma Gaussiana, con coeficientes ajustados según la función de respuesta del campo receptivo de células de tipo X rojo-verde, o sea, sobre la base de datos de tipo fisiológico. En cambio, los coeficientes a_i , que determinan la respuesta a las distintas señales, se obtuvieron por ajuste a los datos experimentales psicofísicos de Mullen (1985) para la CSF rojo-verde y en luminancia verde que mostramos en la figura 3.10. Dado que las respuestas a cromaticidad y luminancia se construyen ambas combinando los mismos mecanismos, se trata de un canal capaz de procesar en común las señales de ambos tipos, basado en células de un tipo muy concreto. Sin embargo, el modelo no incluye ni la influencia de la intensidad de la señal (nivel de luminancia del estímulo) sobre la respuesta del sistema, ni tampoco una forma de combinación de la información proporcionada por las células de los mecanismos hipotéticos propuestos; dicha combinación constituiría la parte "cortical" del procesado de la información espacial.

Otra aproximación teórica de bastante más entidad (aunque también considerablemente más compleja) es la que aportan Kingdom y Mullen (1995), en la que parten del mismo tipo de células que Rohaly y Buchsbaum (1988) con oponencia cromática y selectividad espacial. Pero

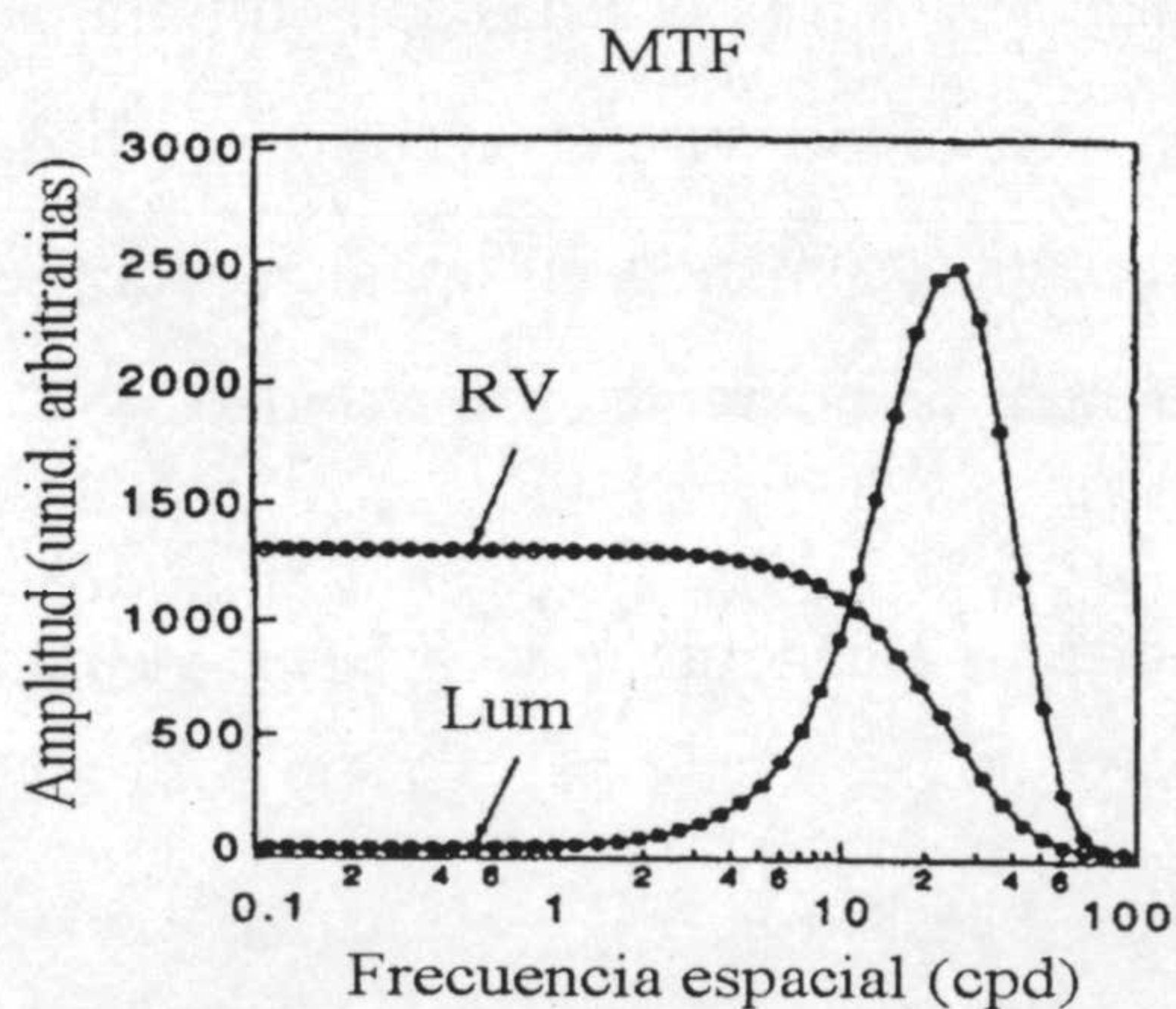


Figura 3.11. MTF calculada a partir de las funciones de respuesta a luminancia modulación rojo-verde de las células utilizada como base en el trabajo de Kingdom y Mullen (1995).

Kingdom y Mullen optan por un análisis que incluye el cálculo de la función de transferencia de modulación (MTF) a partir de las funciones de respuesta del campo receptivo a redes en luminancia y cromáticas de diferentes frecuencias. El resultado de este cálculo puede verse en la figura 3.11; la forma de las MTF recuerda bastante a la de las CSF respectivas. A partir de la información proporcionada por las distintas unidades celulares, el sistema debe implementar un procedimiento para separar la parte correspondiente a contraste en luminancia de la de contraste cromático, es

decir un "demultiplexado" de la señal de entrada. Entre los distintos modelos que se han propuesto para realizar la separación de luminancia y cromaticidad, los autores destacan el de unión (o "consorcio", del inglés pooling) de campos receptivos adyacentes, de forma que las unidades así formadas se organizan según un criterio que selecciona las células cuyo centro del campo receptivo recibe entradas del mismo signo y tipo de cono.

Un esquema de este sistema organizativo puede verse en la figura 3.12. Calculando las curvas de respuesta de tales unidades, se obtiene una predominancia muy clara de las bajas frecuencias espaciales y la señal de color (figura 3.12). Pero queda por aclarar el proceso de extracción de la información en luminancia.

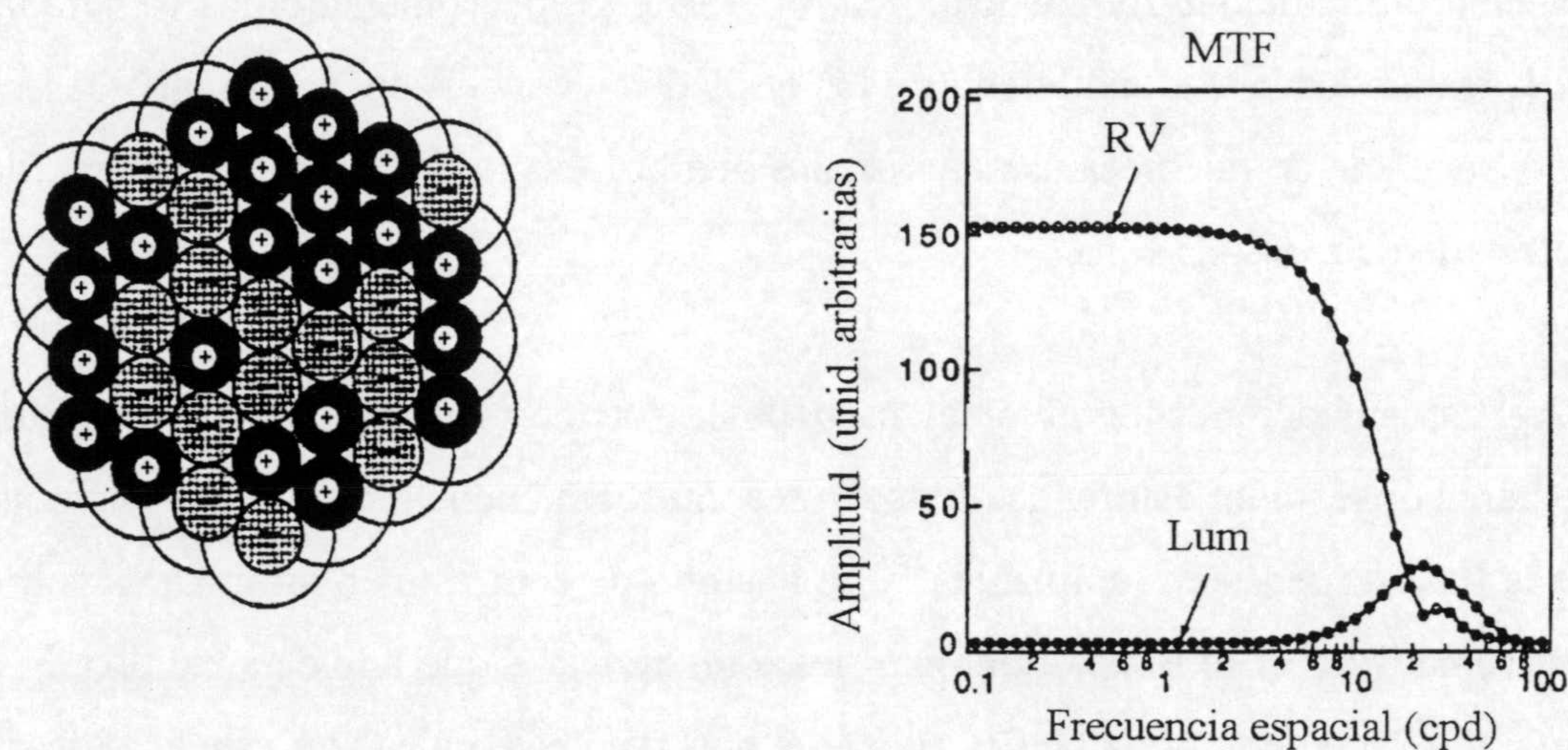


Figura 3.12. Esquema del sistema de pooling para demultiplexado (izquierda). Las células cuyo centro da respuesta de igual signo a un estímulo determinado se agrupan, amplificándose así la respuesta a redes cromáticas. MTF (derecha) para estímulos modulados en luminancia y en cromaticidad rojo-verde para una agrupación de células ordenadas según se muestra a la izquierda. Este sistema de agrupación sería un método posible de demultiplexado para separar la respuesta en color de la de luminancia.

Otra alternativa es la propuesta por Martínez-Uriegas (1990). Por medio de unidades compuestas por líneas alternadas de conos con entrada positiva y negativa al centro del campo receptivo y organizadas con una orientación determinada, se consigue una respuesta significativa para luminancia. La respuesta se da siempre que las líneas contengan células con entradas aleatorias de distintos tipos de conos; si las líneas son selectivas (con células que tienen entradas de un solo tipo de cono, por ej. M o L), la respuesta para cromaticidad predomina bastante más sobre la respuesta a luminancia. A pesar de lo elegante y elaborado de este modelo, este tipo de

organización no basta para explicar el grado de demultiplexado que presenta el sistema visual, dado que tendrá que ser completado con los posteriores procesos a nivel cortical.

3.3. SUMACIÓN SUBUMBRAL PARA CROMATICIDAD Y LUMINANCIA.

El procedimiento de sumación subumbral (Graham, 1989) se encuadra, como ya hemos comentado, dentro de las técnicas que se han aplicado con el objetivo de caracterizar las posibles interacciones entre los diferentes canales visuales. Dichas interacciones han sido estudiadas en la inmensa mayoría de los casos para luminancia-cromaticidad, y, como veremos, sólo en una ocasión para los dos canales cromáticos entre sí. Comenzando por los estudios que tratan la interacción cromaticidad-luminancia, dentro de este grupo comentaremos tres trabajos, uno de ellos de resultados bastante diferentes a los otros dos y conclusiones en franco desacuerdo sobre la independencia de los mecanismos visuales que procesan luminancia y cromaticidad en tareas de detección de redes.

Aplicar sumación subumbral al caso de la interacción cromaticidad-luminancia supone presentar al observador estímulos mixtos, o sea, que contienen un añadido de contraste cromático sobre la base de redes en luminancia, o un añadido de contraste en luminancia sobre la base de redes cromáticas. El término subumbral hace referencia a que ambos añadidos de contraste se sitúan por debajo del umbral de detección del observador. La idea equivale a colocar un *pedestal* de contraste subumbral fijo sobre el estímulo y medir el umbral del estímulo mezcla. Por ejemplo, se puede colocar una red rojo-verde de contraste 0,2 veces el umbral de detección para redes cromáticas y ver qué contraste en luminancia hace falta para que se perciba el estímulo, o viceversa (colocar una red en luminancia de contraste Michelson 0,2 veces el umbral de detección y ver qué contraste cromático necesitamos para detectar el estímulo). Este tipo de procedimiento se aplicó en primera instancia a redes en luminancia con la idea de estudiar la interacción entre los mecanismos sensibles a determinadas frecuencias clave. Se fijaba un pedestal de contraste subumbral para una determinada frecuencia y se medía el umbral para redes de otra frecuencia próxima y, por repetición del proceso, se construían las funciones de sensibilidad de los mecanismos similares, a las obtenidas por adaptación cruzada o masking de frecuencia variable. En el caso de la interacción cromaticidad-luminancia se trabaja siempre a frecuencia fija, pues el factor clave que diferencia a los dos mecanismos involucrados no es la frecuencia espacial del estímulo, sino su contenido en cromaticidad o luminancia. La finalidad de

variar la frecuencia espacial será únicamente la de estudiar la posible variación del carácter de la interacción con los parámetros que condicionan el estímulo.

El primer estudio que aplica el sistema de sumación subumbral para redes combinadas en cromaticidad y luminancia es el de Gur y Akri (1992). Los autores parten de la hipótesis de que el sistema visual "necesita" la información en luminancia para funcionar con un rendimiento aceptable o, dicho de otra forma, que los estímulos isoluminantes no son adecuados para estudiar la contribución de los canales cromáticos a las distintas tareas visuales. Como ejemplos, menciona la disminución de rendimiento visual en la percepción de forma, movimiento y estereopsis que se da cuando se imponen condiciones de isoluminancia. Lo que plantean Gur y Akri en términos de vías de procesado es que hay una parte importante de la información visual que se procesa por medio de un canal que funciona para luminancia y cromaticidad conjuntamente, de forma que en isoluminancia no sería efectivo.

Para probar esta hipótesis, proponen, previamente a la aplicación de la técnica de sumación subumbral, medir el umbral para redes cromáticas rojo-verde con contenido en luminancia y compararlo con los correspondientes a redes cromáticas isoluminantes rojo-verde y a redes en luminancia. Estudian seis frecuencias espaciales desde 0,31 a 20,4 cpd; no corrigen las aberraciones cromáticas, pues argumentan que los puntos extremos de la línea rojo-verde tienen longitudes de onda dominantes no muy alejadas y, en todo caso, la influencia de las aberraciones sería significativa para las tres últimas frecuencias y las conclusiones se mantienen para todos los casos.

Gur y Akri aportan una nueva definición de contraste cromático a la ya bastante larga lista de las existentes. En su caso, el contraste cromático queda definido en función de las luminancias de los cañones rojo y verde del monitor CRT color que utilizan para generar las redes, de la siguiente forma:

$$C_c = \left| \frac{R_{max}}{R_{max} + G_{max}} - \frac{R_{min}}{R_{min} + G_{min}} \right| \quad (6)$$

donde R_{max} y G_{max} son las luminancias de los cañones rojo y verde respectivamente para uno de los extremos de cada ciclo en la red, y R_{min} y G_{min} son las luminancias de los cañones rojo y

verde para el otro extremo del ciclo. El contraste en luminancia, que es tipo Michelson estándar, queda en función de las luminancias de los cañones como:

$$C_L = \frac{(R_{max} + G_{max}) - (R_{min} + G_{min})}{(R_{max} + G_{max}) + (R_{min} + G_{min})} \quad (7)$$

Un ejemplo de los resultados obtenidos en esta primera parte del trabajo puede verse en la figura 3.13. En ordenadas, se representa el tanto por ciento de aciertos en la tarea de detección en función del contraste en luminancia o cromático, con pedestal fijo cromático o de luminancia respectivamente, para una frecuencia determinada. En la zona de bajos contrastes de las curvas (subumbral) resulta muy claro que el umbral es mucho más bajo (tanto por ciento de aciertos más elevado) para la curva combinada de cromaticidad y luminancia que para la suma de ambas consideradas independientemente.

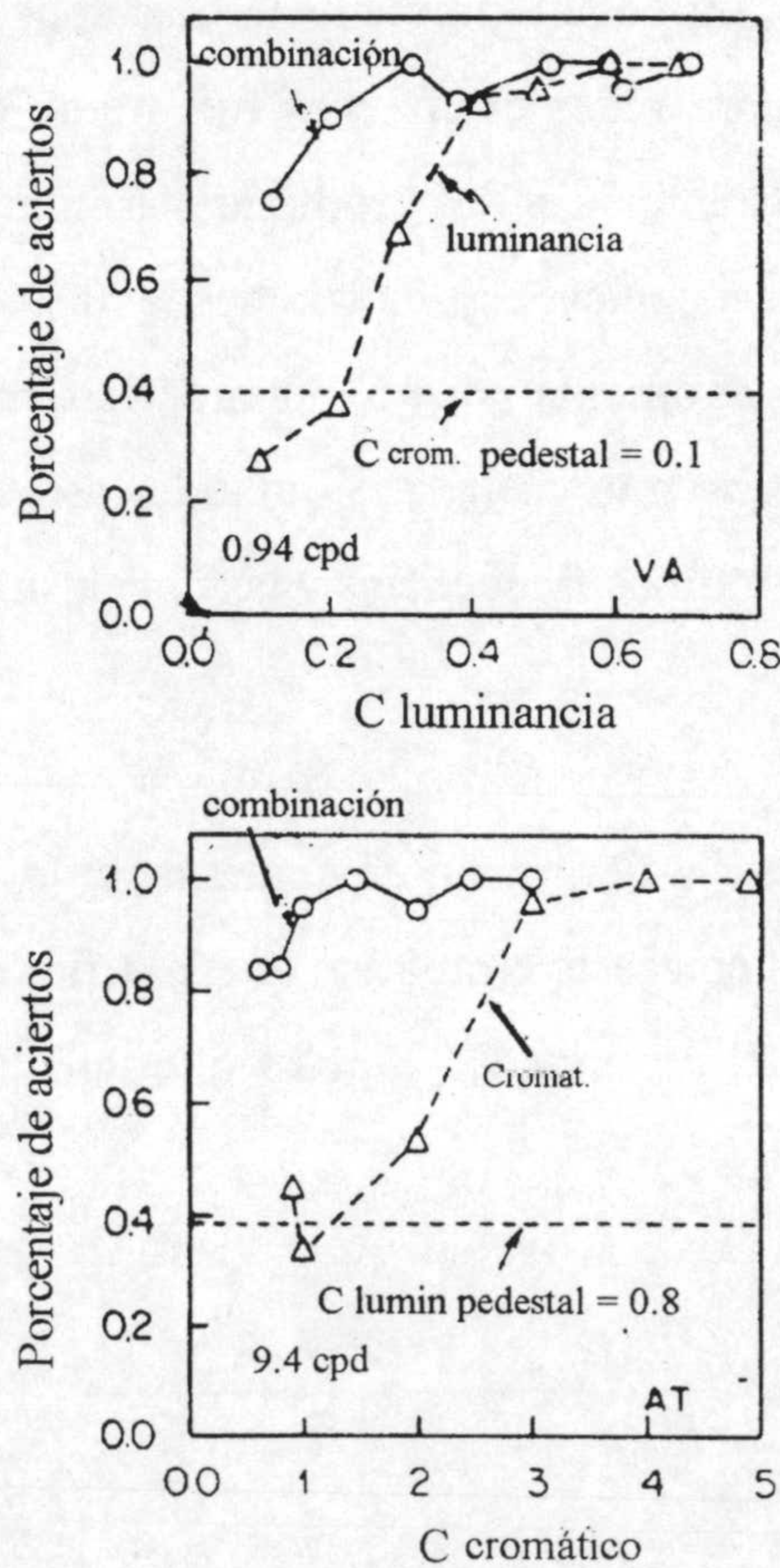


Figura 3.13. Resultados de Gur y Akri (1992) para redes en luminancia con pedestal de contraste cromático (gráfica superior) y de contraste en luminancia (gráfica inferior).

Un segundo grupo de resultados se deriva de la aplicación de la técnica de sumación subumbral, representándose las nubes de puntos umbral para las redes combinadas. En abscisas, se coloca el contraste en luminancia en unidades relativas al umbral; en ordenadas, el contraste cromático también en escala relativa al umbral cromático correspondiente. Por ejemplo, si colocamos un pedestal de contraste cromático de 0,1 veces el umbral, y tenemos que añadir 0,7 veces el umbral de contraste en luminancia hasta que el observador alcanza el umbral de detección, sobre la representación el punto correspondiente sería el (0,7; 0,1). Varias de las nubes de puntos obtenidas por Gur y Akri (1992) pueden verse en la figura 3.14. Las curvas dibujadas sobre las figuras constituyen una forma de estudiar el grado existente de sumación entre umbrales siguiendo el modelo de Quick (1974) que explicaremos con más detalle posteriormente. Por ahora, diremos que el valor de la constante de ajuste K determina el grado de interacción de los sistemas involucrados, de forma que si éstos son independientes se obtiene para K un valor de 2 o superior. Un valor de K de 2 indicaría una forma de umbral de tipo circular, como la obtenida para los contornos de discriminación cromática (Romero, García, Jiménez del Barco e Hita, 1993) si escalamos los ejes de las elipses en unidades umbral. Sin embargo, si sucede que, como encuentran Gur y Akri, hay una vía común de procesamiento para ambos sistemas, el valor de K sería de la unidad o próximo a ella, implicando sumación lineal de respuestas en luminancia y cromaticidad.

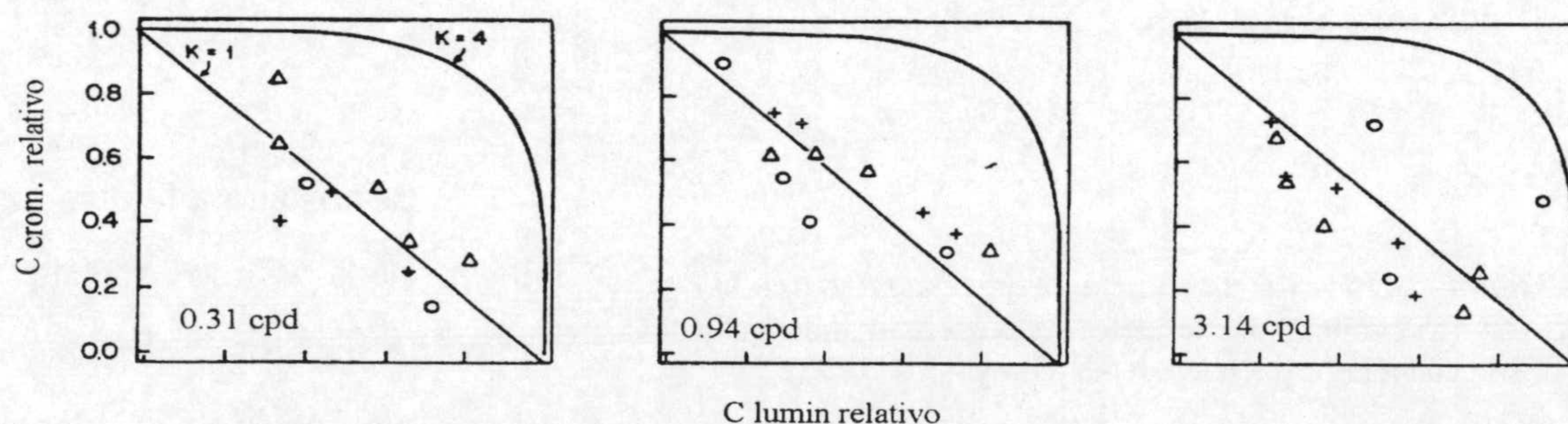


Figura 3.14. Umbrales de detección de estímulos combinados en luminancia y rojo-verde, en unidades umbral para cromaticidad (ordenadas) y luminancia (abscisas), para tres frecuencias espaciales diferentes. Las líneas representan las predicciones que darían modelos de sumación lineal ($K=1$) y casi-independencia de procesamiento ($K=4$), Gur y Akri (1992).

Además, estos autores realizan una prueba adicional de la hipótesis (contraria a la suya) de independencia de vías de procesamiento, que consiste en normalizar las curvas de tanto por cierto de aciertos, interpretando así las medidas de umbral como de probabilidad de detección del estímulo. Si hay independencia de procesamiento, a partir de las probabilidades de detección en

cromaticidad y luminancia puede predecirse la probabilidad de detección del estímulo combinado, según la fórmula:

$$P(\text{comb}) = P(\text{lum}) + P(\text{crom}) - P(\text{lum}) * P(\text{crom}) \quad (8)$$

Si se representan los resultados normalizados de umbral de la red combinada para un pedestal fijo de 0.1 veces el contraste umbral en cromaticidad, junto con las predicciones obtenidas por la fórmula anterior, se obtienen curvas como las que se muestran en la figura 3.15, donde podemos ver claramente que la predicción calculada en base a la independencia de procesamiento queda bastante por debajo de los resultados experimentales para la zona subumbral de bajos contrastes.

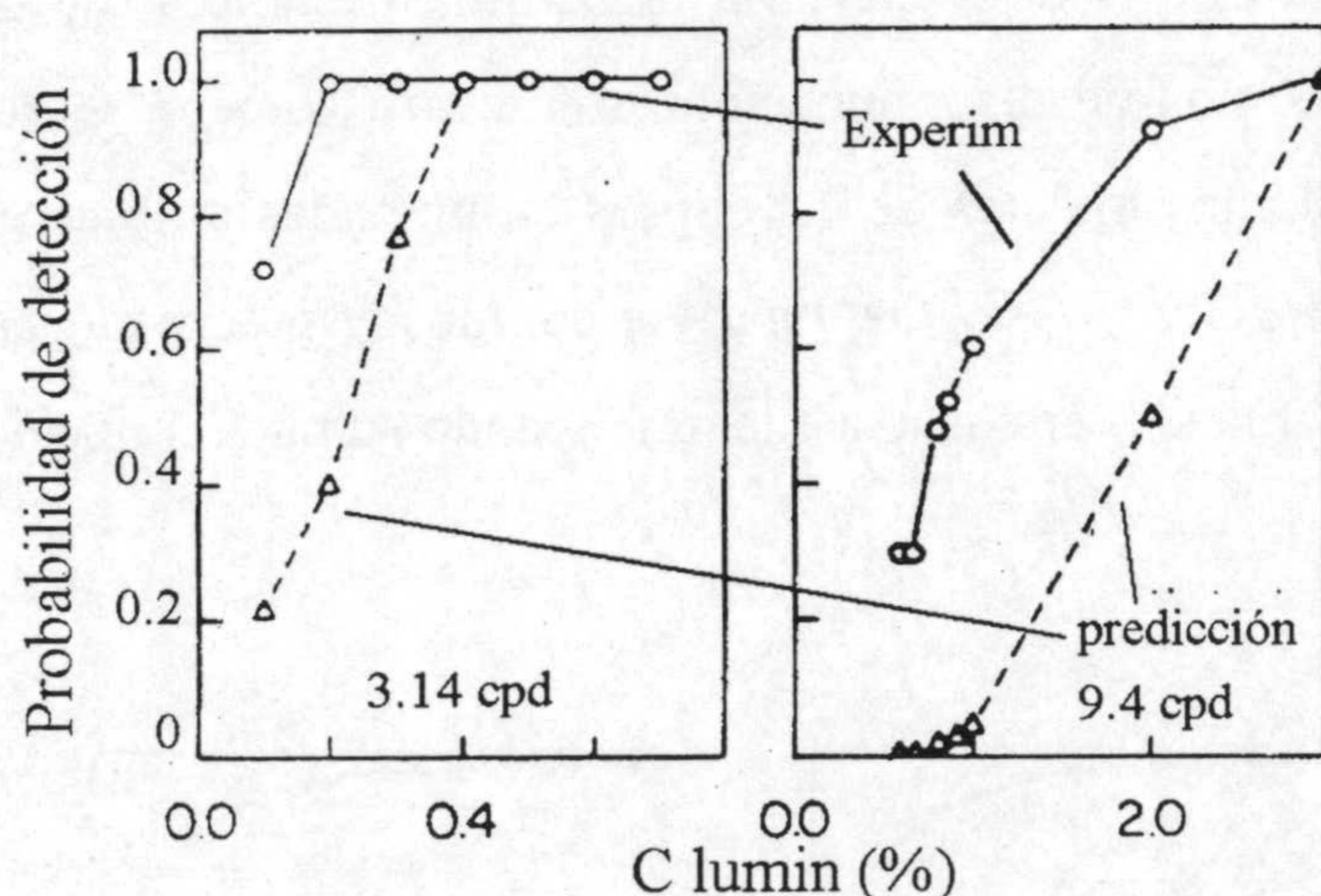


Figura 3.15. Resultados experimentales (círculos) predicción (triángulos) del modelo de procesamiento independiente para dos frecuencias espaciales, según Gur y Akri (1992).

Las conclusiones que se extraen de los resultados de Gur y Akri (1992) se muestran rotundamente a favor de la hipótesis de no independencia de los mecanismos que procesan información espacial en cromaticidad y luminancia en el sistema visual.

Veamos ahora la otra cara de la moneda. Dado que la gran mayoría de los trabajos posteriores de masking y adaptación cruzada parecían apuntar en

sentido contrario (lo que no excluye interacciones puntuales entre ambos mecanismos), el grupo de la doctora Mullen se plantea repetir en su laboratorio los experimentos de Gur y Akri (1992) y ver si el procedimiento de sumación subumbral efectivamente ofrece resultados contrarios a los otros sistemas (por el hecho de trabajar siempre con valores de contraste por debajo del umbral de detección) o bien los apoya.

El trabajo sobre sumación subumbral de Mullen, Cropper y Losada (1997) utiliza como dispositivo dos monitores monocromos y filtros interferenciales para generar redes isoluminantes en la línea rojo-verde definida por un mecanismo que considera oponencia de los conos L y M con pesos iguales (es decir, de tipo L - M); esta línea forma 135° con el eje de abscisas en el espacio de excitación de conos. El sistema de selección de estímulos es igual que el empleado por Mullen y Losada (1994). Sobre estas redes isoluminantes se añaden pedestales de valor fijo de contraste subumbral en luminancia, o bien sobre una red amarilla en luminancia se añaden pedestales fijos de contraste subumbral cromático, exactamente como hicieron Gur y Akri (1992). También se comparte el sistema de análisis, por medio de gráficos de contraste en luminancia frente a contraste cromático y ajuste del parámetro correspondiente según el sistema de análisis de Quick (1974). Las variaciones más significativas son, a parte de la selección de estímulos, el método de medición de umbrales empleado, que es de tipo escalera o "staircase", y la rigurosa corrección de aberraciones por el sistema explicado anteriormente cuando comentamos el estudio de Mullen (1985). Incluso se incorporan variaciones en la presentación del estímulo tendentes a disminuir el efecto de posibles aberraciones residuales, como la envolvente espacial Gaussiana de las redes sinusoidales. La luminancia media se fija en un valor muy similar al empleado por Gur y Akri (1992), 22 cd/m^2 . Las frecuencias espaciales utilizadas son 0,25, 1,0 y 4,0 cpd, y los estímulos se presentan estacionarios o bien oscilando sinusoidalmente a 5 y 9 Hz.

Los resultados para 1 cpd y para unos de los tres observadores que participaron en la experiencia pueden verse en la figura 3.16, los resultados obtenidos por los otros observadores son muy similares. Como puede apreciarse claramente, pues la representación es exactamente la misma que la empleada por Gur y Akri (1992) en la figura 3.14, los resultados de Mullen *et al.* (1997) difieren completamente de los del estudio anterior. Los puntos se concentran en la proximidad de las líneas paralelas a los ejes que pasan por los valores unidad, lo que implica que la predicción de sumación lineal ($K=1$ del modelo de Quick) no resulta nada adecuada para describir los resultados.

Los valores de K para la mayoría de los casos están por encima de cuatro, lo que implica que la forma de la curva sea más bien "cuadrada", o sea, que los pedestales de contraste en luminancia que se añaden tienen muy poco efecto sobre la detección de la red cromática. La conclusión inmediata que se extrae de estos resultados es que las vías de procesamiento en

cromaticidad y luminancia actúan de forma independiente a nivel subumbral. Sobre el porqué de estas discrepancias tan radicales con el trabajo de Gur y Akri (1992), Mullen *et al.* (1997) barajan varias posibilidades en principio, como la no corrección de aberraciones por Gur y Akri, o su diferente definición de contraste. Pero, por un lado, las aberraciones no influyen significativamente sobre los estímulos de baja frecuencia que utilizan Gur y Akri, para los que se mantiene la sumación subumbral y, por otro, haciendo la prueba de representar sus datos umbral utilizando la definición de contraste de Gur y Akri, Mullen y colaboradores no encuentran variaciones de suficiente entidad.

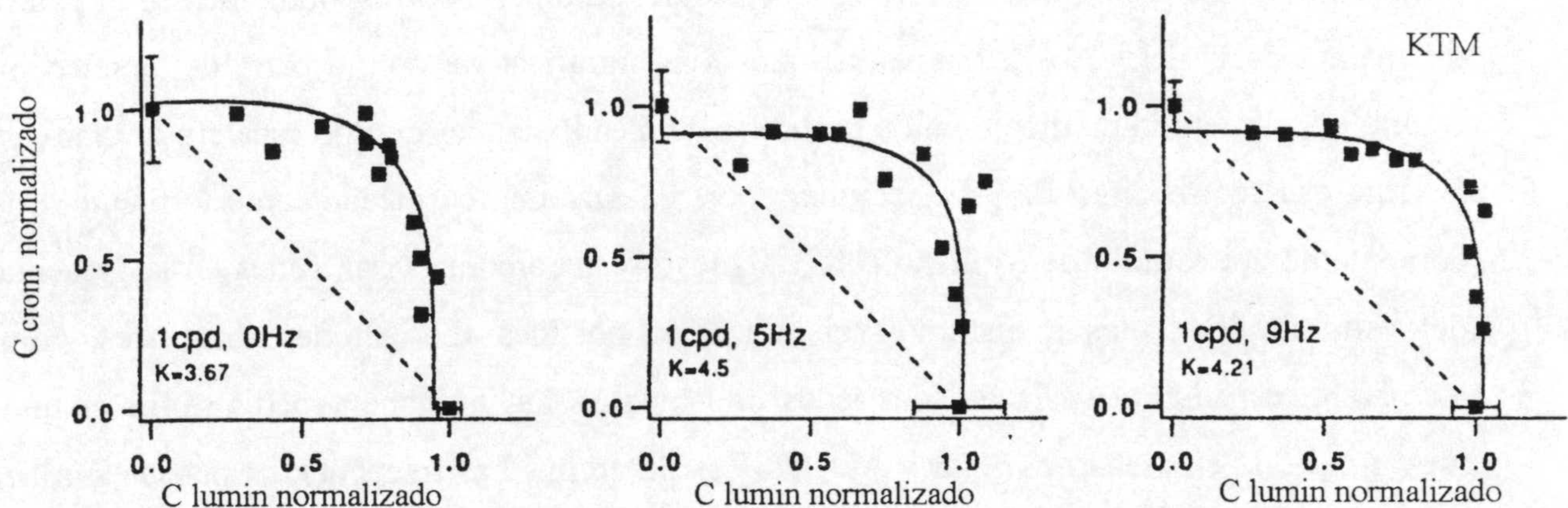


Figura 3.16. Resultados de Mullen *et al.* (1997) para 1 cpd y tres frecuencias temporales. Los valores de K (Quick, 1974) resultan muy próximos o superiores a cuatro, lo que avala la hipótesis de procesamiento independiente de información en cromaticidad y luminancia.

En un trabajo posterior (Mullen y Sankeralli, 1999)*, se amplían los resultados obtenidos para la interacción rojo-verde y luminancia, obteniéndose además las gráficas de umbrales para la interacción amarillo-azul con luminancia, y también, lo que constituye la principal novedad del trabajo, se analiza la interacción entre canales cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul). Los tres grupos de gráficas se obtienen por un doble procedimiento: por un lado, el ya explicado de pedestal de contraste fijo; por otro lado, seleccionando una serie de líneas en un diagrama 3D. Este segundo método tiene como ventaja el que permite muestrear más ampliamente las zonas próximas a contraste unidad en cada eje. El diagrama utilizado en este estudio tiene como ejes los obtenidos por los autores para lograr un aislamiento efectivo de los tres mecanismos,

* Como se verá en el siguiente capítulo, este trabajo coincide en bastantes cosas con uno de los objetivos que nosotros nos habíamos fijado; en la fecha de su aparición ya habíamos realizado las medidas correspondientes, por lo que la comparación de resultados atendiendo a las diferencias en el método experimental supone un enriquecimiento adicional para nuestro trabajo. Consideramos, entonces, a este estudio más como una aportación para la comparación de resultados que como un antecedente propiamente dicho.

determinados según parámetros de proporción de fotorreceptores que variaban un poco para cada uno de los tres observadores utilizados. Este procedimiento se conoce como *isoluminancia nominal*. Para uno de los tres observadores, se realizaron además determinaciones de isoluminancia por la técnica del mínimo movimiento (Anstis y Cavanagh, 1983).

Un ejemplo de los resultados obtenidos para los tres tipos de interacción estudiados se muestra en la figura 3.17. Puede apreciarse que los valores del coeficiente de ajuste K son en general menores que los obtenidos en el anterior estudio, aunque excluyen igualmente la interacción lineal según el modelo de Quick. Esta tendencia a valores menores del parámetro de ajuste se atribuye al efecto de un mejor muestreo de las zonas de alto contraste en cada eje.

La principal aportación de este estudio es extender la conclusión obtenida para la interacción rojo-verde - luminancia a las otras dos combinaciones posibles de mecanismos, rechazando la hipótesis de interacción lineal entre ellos. También supone una confirmación de los resultados obtenidos en el estudio anterior, con lo que el balance global de resultados parece apuntar a que las conclusiones de Gur y Akri (1992) no resultan correctas. En este trabajo, se apunta una explicación a nuestro entender más plausible y que merece un estudio más detallado sobre las razones de esta discrepancia, referida a una posible determinación no correcta de la isoluminancia por parte de Gur y Akri (1992), pues las condiciones espaciales y temporales de los estímulos empleados para la isoluminancia difieren mucho de las de las redes utilizadas para la determinación de umbrales.

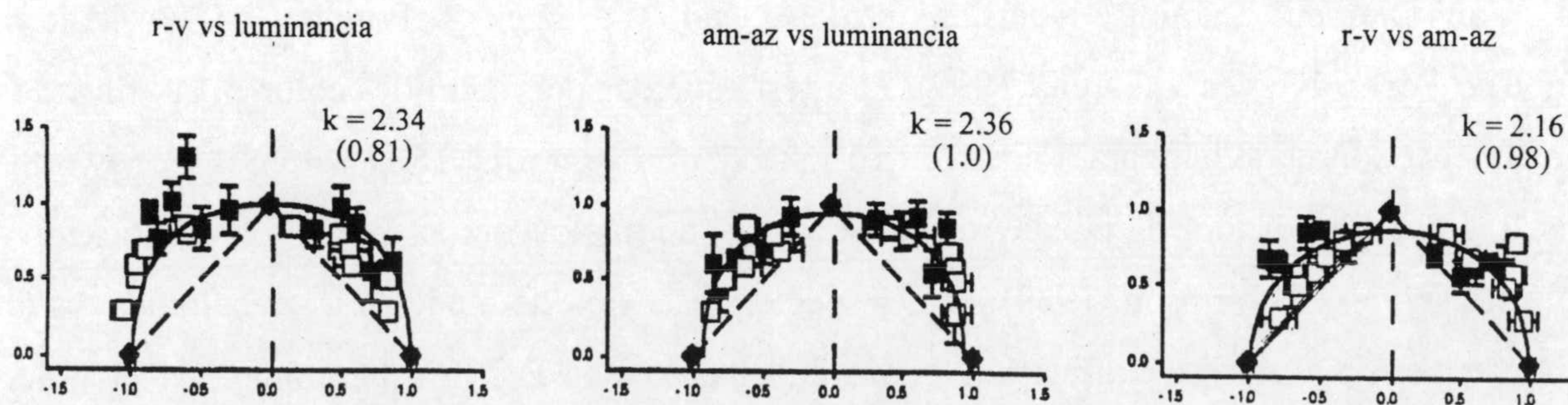


Figura 3.17. Resultados de Mullen y Sankeralli (1999) para uno de los observadores, y las tres posibilidades de interacción entre canales. Se muestran los puntos umbral obtenidos para valores tanto positivos como negativos de contraste, que se halla definido en función de la combinación de valores de excitación de conos para cada canal. En cada gráfica, se indican los valores de coeficiente de ajuste k obtenidos, así como el coeficiente estadístico de validez del ajuste.

Así pues, la cuestión de la sumación subumbral para color en líneas rojo-verde y luminancia queda por el momento en dos a uno, una situación parecida a la que ya comentamos para el carácter paso-baja de la CSF cromática desde que aparecieron los estudios de Schade (1958) y Van der Horst y Bouman (1969), tras la aparición de los resultados de Granger y Heurtley (1973). Sin embargo, en cuanto a la interacción entre canales cromáticos, el estudio de Mullen y Sankeralli (1999) es el único que ha analizado la cuestión a nivel subumbral hasta la fecha.

3.4. APLICACIONES DE TESTS DE VISIÓN DEL COLOR Y DE CSF CROMÁTICA EN ESCLEROSIS MÚLTIPLE.

En el capítulo II, comentamos la importancia de la CSF en luminancia en diversas patologías, entre ellas y de un modo destacado la Esclerosis Múltiple. Como hemos visto en los apartados anteriores, la hipótesis que cuenta con más resultados que la apoyen es la de independencia de los canales cromáticos y de luminancia. Considerando también que una de las consecuencias de la Esclerosis Múltiple es un descenso de velocidad en la transmisión nerviosa, tests de tipo CSF cromática, que aúnan visión del color y visión espacial, se han propuesto recientemente como una alternativa interesante a los de tipo estándar, tanto los que se ocupan de visión del color como los que cubren visión espacial sólo en luminancia.

En los últimos quince años, han surgido una serie de estudios que se ocupan de analizar la afectación de la visión del color en Esclerosis Múltiple y de comparar dicha afectación con la observada para luminancia (Travis y Thompson, 1989; Frederikssen, Larsson, Olesen y Stigsby, 1986; Van Diemen, Lanting, Koetsier, Strijers, van Waalbeck y Polman, 1992; Valero, Bermúdez, Pérez, Nieves y García, 1999). Los test estándar de visión del color más utilizados habitualmente son el de Ishihara, Farnsworth 15 standard, L'Anthony 15 Desaturé o Farnsworth-Munsell 100 Hue. Además, puede recurrirse a los anomaloscopios, como el de Pickford-Nicolson (Travis y Thompson, 1989). Con respecto a este tipo de medidas los resultados distan mucho de permitir una generalización como en el caso de la CSF en luminancia: el único acuerdo resulta ser que hay pérdidas de visión del color de tipo adquirido en un número significativo de casos de neuritis óptica y Esclerosis Múltiple, pero éstas pueden ser tanto de tipo amarillo-azul como rojo-verde, o ambas a la vez con distintos grados. Los estudios que intentan comparar las vías cromáticas y la de luminancia con el fin de determinar si alguna de ellas se ve afectada preferentemente en estas patologías tampoco llegan a un acuerdo. Para algunos, la

pérdida es mayor en la vía de luminancia, para otros se ven más afectados los canales cromáticos, y la tercera opinión es que los dos registran pérdidas equivalentes, si bien las discrepancias nunca son en directa oposición porque generalmente, como es habitual, cada grupo de autores realiza experiencias con estímulos y métodos diferentes (para revisión ver Travis y Thompson, 1989).

Contemporáneamente a este grupo de estudios, aunque de forma mucho menos extensiva, se han desarrollado los dos únicos trabajos que utilizan pruebas de tipo psicofísico de CSF cromática en pacientes de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica, que resaltamos separadamente porque, como explicaremos en el capítulo siguiente, pretendemos aportar algunos resultados en este campo concreto. Resaltaremos en primer lugar el trabajo Mullen y Plant (1986), en el que se combinaron redes en luminancia y en cromaticidad de una frecuencia de 1 cpd y en el que participaron pacientes con una historia de Neuritis Óptica unilateral. El método utilizado es muy similar al del trabajo de Mullen (1985), que hemos analizado anteriormente en este capítulo. En el estudio, se compara la visibilidad obtenida para redes rojo-verde, amarillo-azul y en luminancia en aquellos ojos de los pacientes afectados por al menos un episodio de Neuritis Óptica, con la visibilidad obtenida por los ojos no afectados de los mismos pacientes. También se comparan entre sí los resultados obtenidos para redes cromáticas con los de redes en luminancia. Las conclusiones apuntan a que, aun obteniéndose una pérdida relativa a los ojos no afectados de Neuritis para los tres tipos de redes, se observan pérdidas menores en el canal de luminancia, quedando los cromáticos rojo-verde y amarillo-azul afectados por igual.

El segundo trabajo sobre Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica

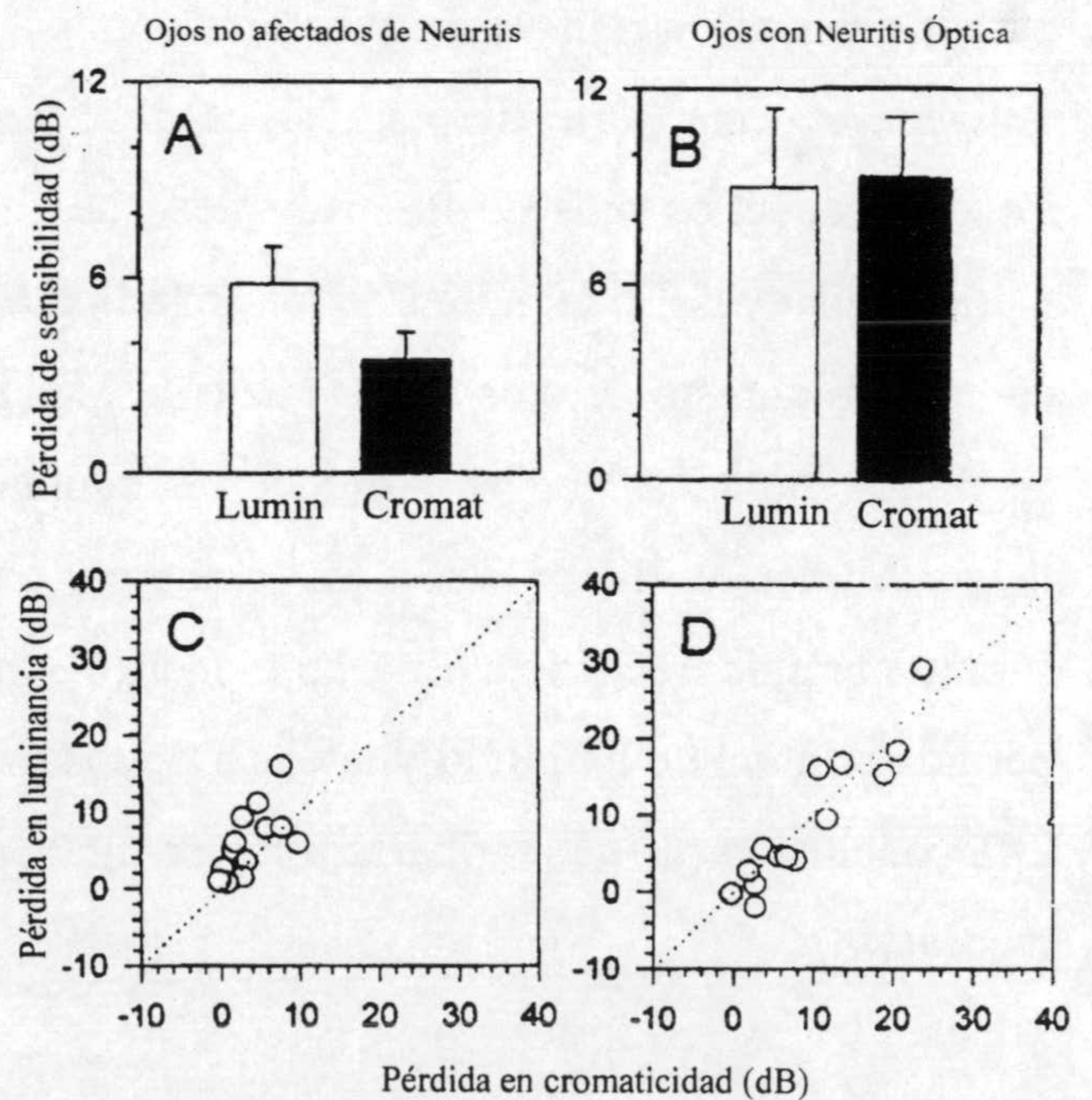


Figura 3.18. Pérdidas de sensibilidad relativas al grupo de control para los pacientes de Esclerosis Múltiple en redes e luminancia y cromaticidad (A y B). Comparación de la pérdidas para redes en luminancia con las obtenidas para red e en cromaticidad (C y D). Las figuras A y C se refieren a ojo no afectados por Neuritis Óptica. Las figuras B y corresponden a ojos que han registrado algún episodio d Neuritis Óptica (Porciatti y Sartucci, 1996).

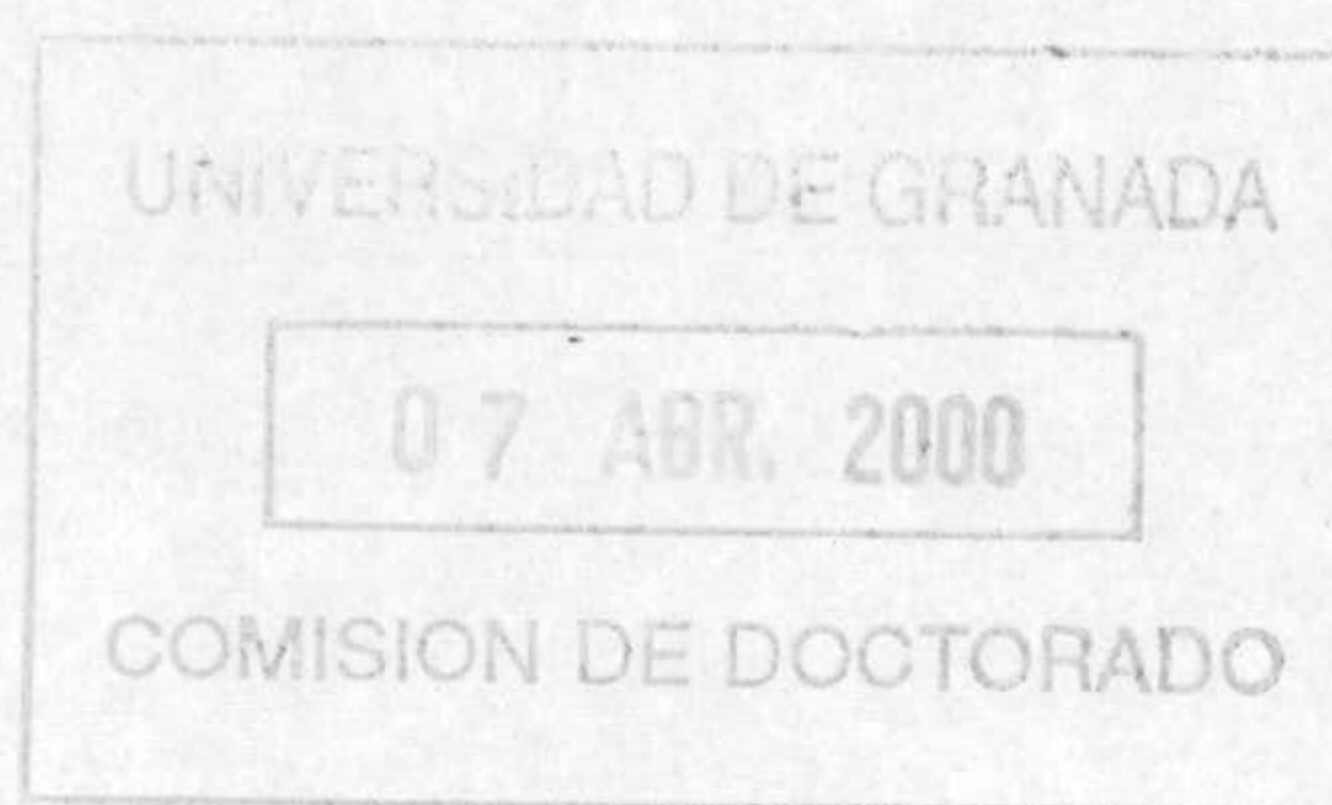
con tests de CSF cromática destacable es el realizado por Porciatti y Sartucci (1996). En dicho trabajo se realiza una comparación entre resultados sobre percepción de redes en luminancia y en cromaticidad rojo-verde, obtenidos por dos métodos muy diferentes. Por una parte, se obtienen los umbrales de detección para diferentes proporciones de rojo y verde, de forma similar al sistema utilizado por Mullen (1985) para determinar la isoluminancia, y por otra parte, se obtienen las respuestas electrofisiológicas para estímulos muy por encima del umbral a nivel de la corteza visual (potenciales visuales evocados o VEPs) y de la retina (electrorretinogramas o PERGs). Además de comparar las pérdidas relativas cromaticidad-luminancia obtenidas por estas dos técnicas, se comparan los resultados del grupo de pacientes de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica con un grupo de control de sujetos que no padecen ninguna de estas patologías.

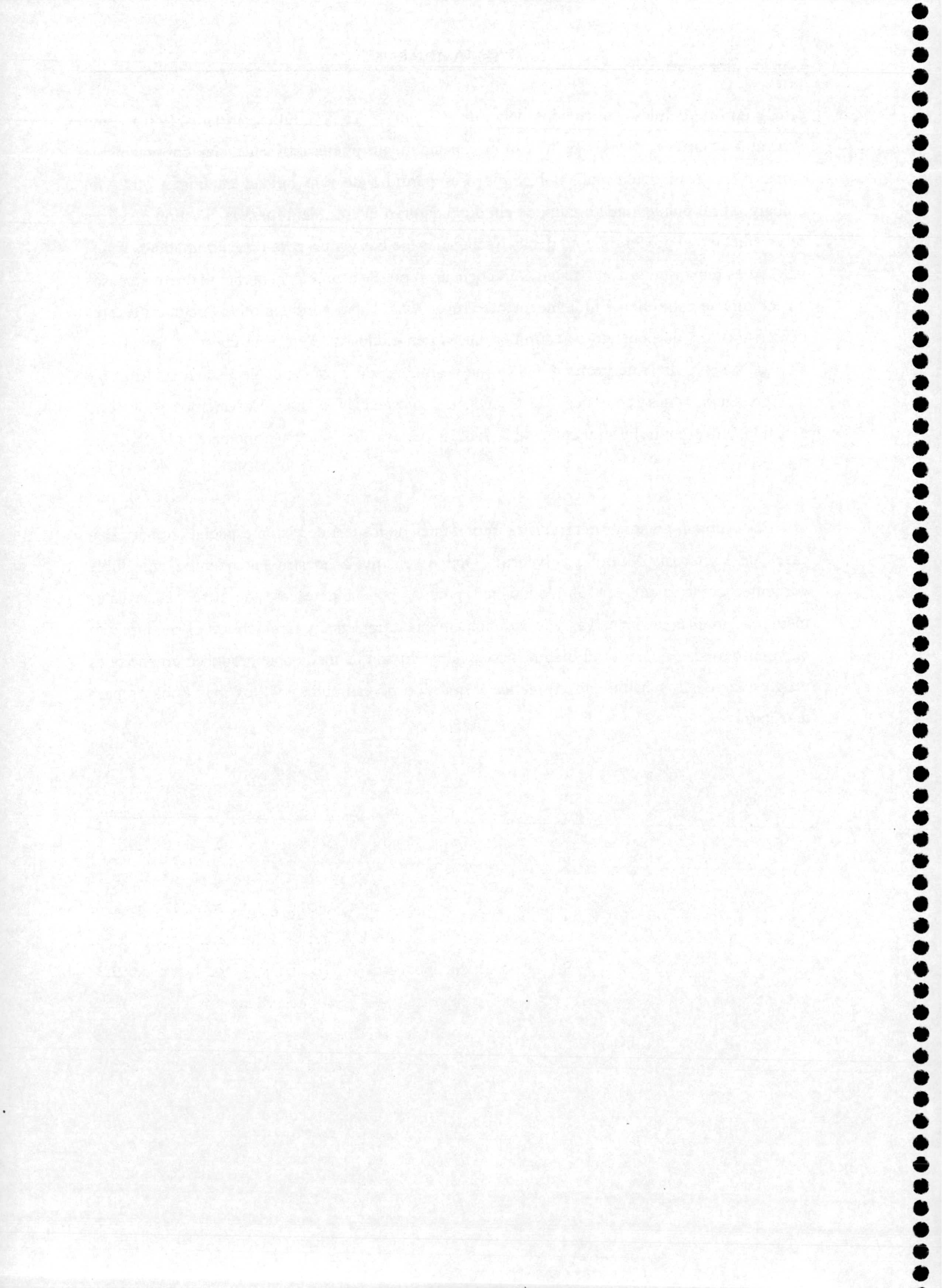
Comentaremos especialmente los resultados obtenidos para las pruebas de tipo psicofísico, que son los más interesantes en relación con nuestro trabajo. En la figura 3.18 podemos ver reflejadas las pérdidas de sensibilidad al contraste (relativas al grupo de control de sujetos normales) tanto para redes en luminancia como en cromaticidad, obtenidas en este segundo caso para la proporción rojo-verde que corresponde al punto de isoluminancia. La frecuencia espacial utilizada en esta parte del estudio es de 1 cpd. Porciatti y Sartucci (1996) consideran por separado aquellos ojos de los pacientes que se han visto afectados por episodios de Neuritis Óptica unilateral. En la parte inferior de la figura, podemos ver que, tanto para este grupo de ojos como para el resto de ojos de los pacientes, las pérdidas de sensibilidad son muy similares para las redes cromáticas que para las redes en luminancia, difiriendo así de las conclusiones a las que llegan Mullen y Plant (1986). Sin embargo, en la segunda parte del trabajo, sobre estímulos supraumbral de frecuencia espacial menor (0,3 cpd), los resultados apuntan a que hay una mayor pérdida relativa de amplitud y latencia de los potenciales evocados para las redes cromáticas, y esta conclusión puede ampliarse a los resultados de los electrorretinogramas, aunque en menor medida.

Los dos únicos estudios de pruebas psicofísicas que hemos encontrado en la bibliografía tienen una característica significativa en común, que es el hecho de utilizar sólo redes de una frecuencia espacial baja. Esto es debido a que los estímulos de baja frecuencia modulados en luminancia se procesan por un tipo de células del núcleo geniculado lateral (LGN) denominadas *magno*, mientras que los estímulos modulados en cromaticidad y aquellos de frecuencia espacial media y alta, tanto en luminancia como en cromaticidad, se procesan por

otro grupo de células geniculadas denominadas *parvo*. Tanto Mullen y Plant (1986) como Porciatti y Sartucci (1996) se muestran especialmente interesados en aislar correctamente ambas vías, para determinar si hay mayores pérdidas de sensibilidad en una u otra. Sin embargo, este planteamiento, aunque sin duda de gran interés, deja fuera la cuestión de cómo se ve afectado el procesamiento de las frecuencias medias y altas para redes cromáticas, y si la pérdida es mayor en la zona de bajas frecuencias o no. Se asume generalmente que para casos en los que se estimulen simultáneamente ambas vías, habrá pérdidas relativamente menores de sensibilidad que cuando se estimula una vía en exclusiva. Pero esta cuestión no ha sido analizada con suficiente profundidad, ni hay estudios sobre pacientes de Esclerosis Múltiple que presenten redes cromáticas de frecuencias intermedias y altas. Volveremos sobre esta cuestión en el capítulo siguiente, dedicado en parte a detallar los principales objetivos de nuestro trabajo.

En resumen, podemos decir que la importancia de los test de visión espacial cromática en casos de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica se sitúa a nuestro entender en una doble vertiente: como ayuda en el diagnóstico precoz, por la detección de pérdidas visuales mediante pruebas no invasivas y lo suficientemente completas; y también en el seguimiento de la enfermedad posterior al diagnóstico, evaluando en qué medida se producen alteraciones progresivas de la sensibilidad cromática y qué tipo de estímulos son los más eficaces para detectarlas.





CAPÍTULO IV PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

-¿De dónde vienes? – le preguntó la Reina – y ¿a dónde vas? Mírame a los ojos, habla con tino y no te pongas a jugar con los dedos.

Lewis Carroll. Alicia a través del espejo.

4.1. PLANTEAMIENTO.

De lo expuesto en los dos capítulos anteriores, se derivan una serie de aspectos abiertos, que son los que han dado origen al presente trabajo de investigación. Concretamente, resaltamos a continuación las cuatro grandes líneas que consideramos de especial relevancia y que nos han motivado de forma significativa en el planteamiento de nuestro trabajo:

- 1) En primer lugar, los resultados sobre CSF cromática han sido obtenidos en condiciones experimentales muy diferentes, sobre todo en cuanto a nivel de luminancia de los estímulos y método experimental. Además, hay muchos menos datos sobre CSF en líneas amarillo-azul comparados con los que encontramos para líneas rojo-verde. Estas razones justifican el que no sea en absoluto superflua la aportación de nuevas medidas experimentales de CSF cromática, aunque éstas no se centren sobre aspectos resueltos en los estudios anteriores, como el carácter paso-baja de la curva. Otro aspecto importante se refiere al hecho de que para la CSF en luminancia existen bastantes trabajos que estudian la influencia de diversos parámetros experimentales sobre la forma de la curva en general o sobre el umbral de detección para un determinado grupo de frecuencias: tamaño de campo, nivel de luminancia (Patel, 1966), excentricidad del estímulo (Daitch y Green, 1969; Rovamo, Virsu y Nasanen, 1978), orientación de las redes (Campbell y Kulikowski, 1966), etc. Sin embargo, existen muy pocos paralelos a estos trabajos para la CSF cromática. Entendemos que esto supone una laguna importante, especialmente para los dos parámetros básicos de tamaño de campo y nivel de luminancia, por las siguientes razones.

(A) En los trabajos anteriores en los que se determina la CSF cromática para líneas rojo-verde, amarillo-azul o ambas (Granger y Heurtley, 1973; Mullen, 1985), se recurre al sistema de variar el tamaño de campo presentado al observador para garantizar un suficiente número de ciclos en toda la banda de frecuencias. En ninguno de estos trabajos se pone en cuestión que el tamaño de campo escogido pudiera influenciar los resultados obtenidos, según el fenómeno de sumación espacial tan bien conocido y estudiado para estímulos de luminancia uniforme y para redes sinusoidales en luminancia. El único estudio que hemos encontrado sobre el tema para redes cromáticas (Noorlander, Heuts y Koederink, 1980), se limita a tamaños de campo inferiores a dos grados y encuentra sumación espacial para este rango de tamaños de estímulo. Además, en este estudio se utilizan frecuencias espaciales inferiores a 1 cpd, con lo que el número de ciclos presentado sería insuficiente (Mullen, 1985). Así pues, la influencia de variar el tamaño de campo a partir de dos grados no ha sido suficientemente abordada para redes cromáticas.

(B) En cuanto al nivel de luminancia de los estímulos que se presentan al observador, tampoco se contempla específicamente su influencia sobre el umbral de detección, lo que sería de especial interés a la hora de comparar resultados entre distintos estudios, que no siempre seleccionan el mismo nivel medio de luminancia para las redes cromáticas. Sólo en el trabajo de Van der Horst *et al.* (1967) se presentan resultados para cuatro niveles de iluminación retiniana, 0,1, 1,5, 19 y 3500 td, obteniéndose una mayor sensibilidad progresiva conforme se aumenta el nivel de iluminación retiniana, y un aumento del ancho de banda. Con estos niveles de iluminación retiniana, y teniendo en cuenta que el diámetro pupilar es de 2 mm, se deja sin cubrir la zona baja e intermedia de luminancia dentro del fotópico, y no se investiga si las conclusiones sobre la variación de sensibilidad pueden extrapolarse a condiciones de trabajo con pupila natural. Sin embargo, se indica con carácter general que la visibilidad mejora siempre que se aumente el nivel de luminancia media de las redes cromáticas, tal y como sucede para redes en luminancia. En el estudio posterior de 1969, vuelven a utilizar varios niveles de iluminación retiniana, pero el máximo es de 160 td (aproximadamente $12,7 \text{ cd/m}^2$), con lo que sigue sin estudiarse a fondo la zona de niveles intermedios-altos de luminancia.

- 2) En los trabajos que hemos revisado sobre CSF cromática, se observa una preferencia muy destacable hacia las líneas de tipo rojo-verde y bastante menor hacia las de tipo amarillo-azul. Esto resulta lógico, si se centra la cuestión en el procesado de información espacial por los dos canales oponentes cromáticos del sistema visual que postulan los modelos de visión del color y que hasta el momento han funcionado con suficiente eficacia para describir umbrales de discriminación, diferencias percibidas de color y otros aspectos de la visión del color. Sin embargo, resulta curioso pensar que sólo en una ocasión (desarrollada simultáneamente a nuestro trabajo) haya surgido la idea de investigar cómo se comporta el sistema visual cuando no se estimula solamente uno de los canales oponentes, sino que ambos actúan a la vez sobre la percepción de un mismo estímulo. Esto supone, en el caso concreto de la CSF cromática que nos ocupa, trabajar con líneas que no sean puramente ni rojo-verde ni amarillo-azul según un modelo determinado, sino intermedias, de forma que tanto uno como el otro de los canales oponentes respondan simultáneamente. Esto puede ser interesante, esencialmente, para determinar si el umbral construido de esta manera da alguna indicación sobre una posible interacción entre los canales oponentes en el procesado espacial. Es un esquema similar al utilizado por Gur y Akri (1992) en la primera parte de su trabajo, para la interacción en su caso entre cromaticidad y luminancia. Si los umbrales resultan bastante mayores de lo que cabe esperar, o bastante menores, o varían las conclusiones si se comparan en términos de excitación del canal rojo-verde o amarillo-azul, tendríamos una base para pensar que el comportamiento de ambos canales no resulta ser tan independiente como desde hace mucho tiempo se ha dado por sentado, tal y como defienden Mullen y Sankeralli (1999).

- 3) En cuanto a la polémica sobre las discrepancias de resultados entre Gur y Akri y el grupo de la Dra. Mullen, sería interesante indagar sobre si la razón que proponen para explicarlas, en relación a que la fotometría de parpadeo no resulta conveniente como método de determinación de la isoluminancia, es efectivamente correcta. Para ello, bastaría con utilizar fotometría de parpadeo en vez de mínimo movimiento para aislar, por ejemplo, los canales cromáticos y estudiar su interacción por medio de sumación subumbral. Si el aislamiento de ambos mecanismos no es adecuado, obtendríamos resultados similares a los de Gur y Akri para rojo-verde y luminancia.

Además, este experimento puede servir para estudiar de forma alternativa la cuestión de la interacción entre canales cromáticos, y comparar las conclusiones obtenidas por este método y por el apuntado en el apartado anterior.

- 4) En cuanto a las aplicaciones de la CSF, que tratamos en el capítulo II, entendemos que sería de gran interés aportar un estudio complementario a los que ya existen sobre el modo en que se ven afectados los umbrales de detección de redes cromáticas en pacientes de Esclerosis Múltiple y Neuritis Óptica, con diferentes fases de la enfermedad y períodos de inicio también diversos. De este modo se podría establecer la posible ventaja de utilizar un test de CSF cromática en el marco clínico para detectar alteraciones de la función visual en estas patologías. Como ya señalamos, tanto el sistema de percepción del color como la percepción espacial se ven significativamente alterados por ellas, aunque los resultados aportados por los diferentes estudios existentes distan mucho de llegar a un acuerdo en cuanto a cuál de los tres mecanismos visuales resulta estar más afectado en las distintas tareas visuales propuestas.

4.2. OBJETIVOS.

Todo el planteamiento anterior hace que nos fijemos cuatro grandes objetivos generales que, a su vez, exigen la consecución de otros más específicos. Todos ellos los exponemos a continuación.

1) Obtener resultados de CSF cromática en ejes rojo-verde y amarillo-azul para un rango de frecuencias en la zona baja-intermedia, y estudiar la influencia que pueden tener sobre la visibilidad el tamaño de campo utilizado y el nivel de luminancia media de las redes cromáticas. Para conseguir este objetivo, será también necesario:

- Elaborar una definición de contraste cromático adecuada que permita trabajar cómodamente con un modelo de visión del color, que sea normalizada y se adapte las limitaciones y características de nuestro dispositivo experimental.

- Poner a punto el método experimental con el que se realizarán las medidas, escogido razonadamente de forma que resulte suficientemente fiable sin alargar excesivamente las sesiones de medida, incluyendo también la determinación de la isoluminancia para cada uno de los observadores que colaboren en el experimento.
- Poner a punto el dispositivo experimental mediante el cual se generarán los estímulos que se presentan a los observadores, según el método experimental elegido. Este dispositivo debe ser lo suficientemente versátil como para permitir los cambios en las condiciones experimentales necesarios en las distintas partes del trabajo, y resultar bastante cómodo para los observadores e investigadores. Además, debe ser fiable en la reproducción de los estímulos de color.
- Elegir las líneas para la medida de umbrales de detección de redes cromáticas y, una vez medidos éstos en los ejes cardinales rojo-verde y amarillo-azul, comparar nuestros resultados con los de los estudios anteriores.
- Escoger los valores de campo y niveles de luminancia que se presentarán a los observadores, en función de los que se han utilizado en estudios anteriores que asumen la invariancia del nivel de visibilidad con el tamaño de campo, y de la zona de luminancias que no ha sido estudiada con anterioridad.

2) Obtener la CSF cromática para ejes intermedios y extraer las conclusiones oportunas a partir de los resultados sobre el funcionamiento de la actuación conjunta de los dos canales cromáticos en el procesado de información espacial. Y unido a ello, si este sistema resulta efectivamente válido para el estudio de la interacción entre canales cromáticos.

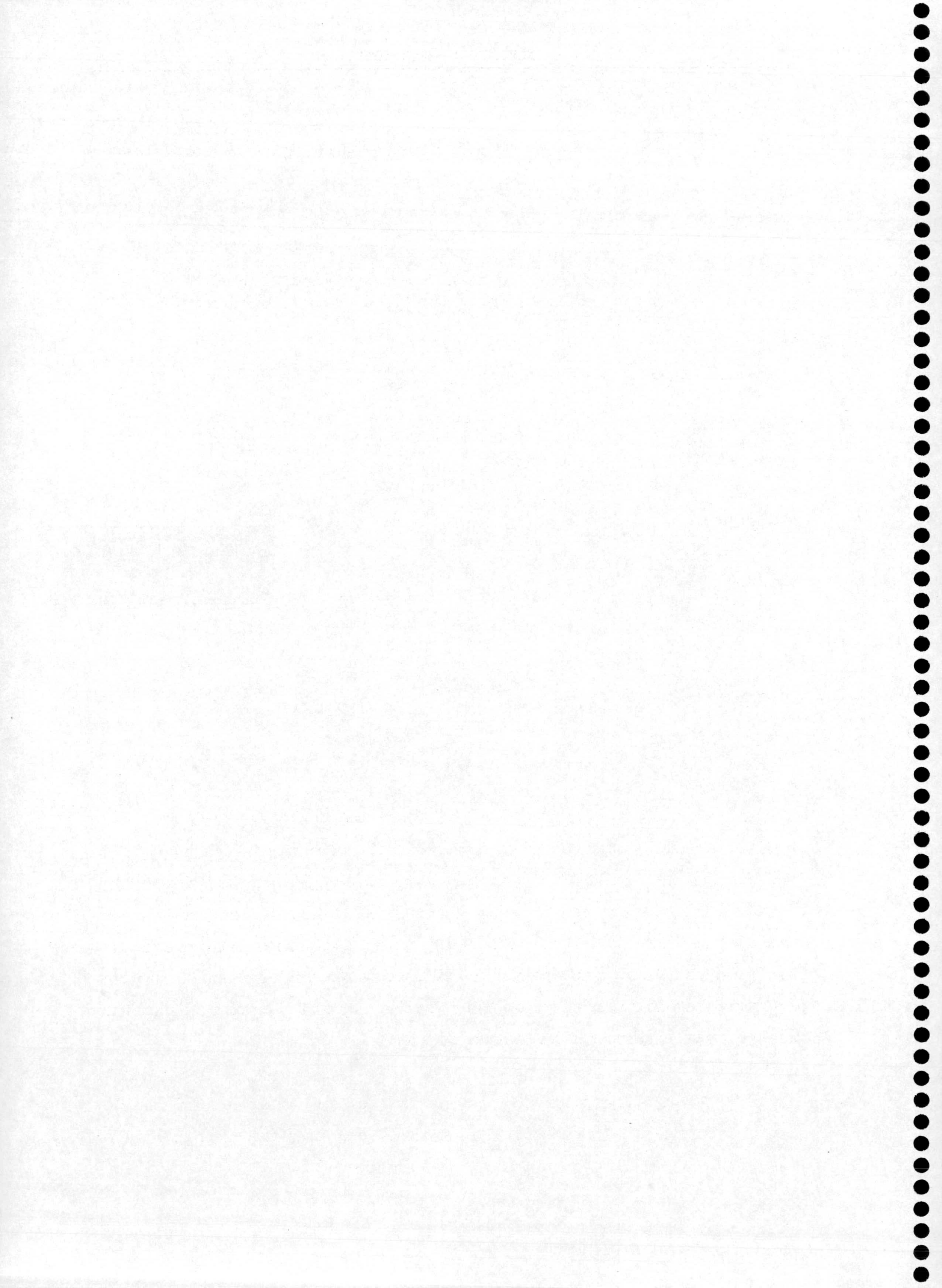
3) Estudiar la interacción del canal rojo-verde con el amarillo-azul mediante el procedimiento de sumación subumbral para estímulos estacionarios de varias frecuencias espaciales, utilizando la fotometría de parpadeo para determinar la isoluminancia, y comparar resultados con los estudios de Mullen *et al.* (1997) y Mullen y Sankeralli (1999), aportando nuestra contribución al por qué de los resultados discrepantes de estos autores con Gur y Akri (1992).

4) Estudiar las características de la respuesta a un test psicofísico de CSF cromática de un grupo amplio de pacientes de Esclerosis Múltiple, estableciendo comparaciones con un grupo de control de sujetos normales. Hay que considerar las especiales circunstancias que conlleva trabajar con pacientes de estas patologías, en cuanto a que son sujetos que se fatigan con facilidad y cuya disponibilidad de tiempo para realizar el estudio es muy limitada, además de las variaciones de su estado general a lo largo del tiempo y entre los distintos sujetos, que en la mayoría de casos induce la enfermedad. Para conseguir este objetivo será necesario:

- Elaborar un método experimental que combine, por las razones antes indicadas, los requisitos de rapidez y fiabilidad aceptable, además de facilidad de realización, porque los observadores serán por lo general inexpertos en pruebas de tipo psicofísico.
- Seleccionar un conjunto lo más reducido posible de frecuencias espaciales, que permita obtener datos sobre visibilidad en la zona baja, intermedia y alta de frecuencias.
- Caracterizar a la población de pacientes, sometiéndolos a otras pruebas estándar de visión del color, CSF en luminancia, A.V. y campimetría, con el fin de conocer el estado general de cada uno de ellos en cuanto a su función visual, y también comparar la sensibilidad de estas pruebas de uso extendido con la nuestra de CSF cromática a la hora de detectar pérdidas visuales.
- Obtener un “estándar” de normalidad para la prueba con el que comparar los resultados de los pacientes, pasando el test a un grupo de sujetos normales de similares características, en cuanto a edad, al de pacientes.

Una vez explicado el planteamiento general y objetivos del trabajo, pasamos ya a concretar las características del dispositivo experimental que utilizamos para la realización del mismo.

Material y Método.



CAPÍTULO V

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Es un golo, tru folo y tru recolo,
tapical palireca buva bonas,
las jasillas matacias en el molo.
Fernado Arrabal.Soneto.

5.1. INTRODUCCIÓN.

Tradicionalmente la obtención de estímulos de color en colorimetría diferencial y estudios de visión del color se ha realizado a través de distintos tipos de colorímetros visuales (tipo Donaldson, Wright, etc.). Estos instrumentos permiten obtener una gran gama de colores por mezcla aditiva de luces cuasi-monocromáticas, obtenidas mediante sistemas de prismas o bien por medio de filtros interferenciales. Aunque estos dispositivos tienen sin duda una gran utilidad, por la fiabilidad y reproducibilidad en la generación de estímulos, presentan el inconveniente de ser dispositivos totalmente mecánicos y en general diseñados para un tipo concreto de experiencias. Si bien hoy en día puede dotárseles de un ordenador que permite un cierto grado de automatización, en cuanto a la toma de medidas sobre todo, su puesta a punto sigue siendo un proceso bastante lento y complejo. Sin embargo, no resultan adecuados para generar distribuciones espaciales de cromaticidad, que serán el tipo de estímulos con los que vamos a trabajar.

Como alternativa ya consolidada a este tipo de dispositivos, surge la utilización de los monitores CRT color (abreviatura del inglés *Cathode Ray Tube*). Son bastante limitados todavía en cuanto a la gama de colores disponible (en el mejor de los casos 16,7 millones de colores, frente a los más de 30 millones que ofrecen los colorímetros convencionales). Pero su facilidad de manejo a través de programas informáticos les da una alta versatilidad a la hora de su puesta a punto y en el diseño de distintos tipos de experiencias, en particular en cuanto a modulación tanto espacial como temporal de los estímulos cromáticos.

En la bibliografía relacionada con la visión espacial del color, el monitor CRT ha sido el dispositivo experimental utilizado en todas las ocasiones en las que se requería la generación de

redes sinusoidales (Schade, 1958; Van der Horst y Bouman, 1969; Granger y Heurtley, 1973) y en todos los trabajos posteriores a los citados. La razón fundamental es la complejidad de los estímulos empleados, lo que hace prácticamente indispensable contar con un elemento de control auxiliar (generalmente una tarjeta gráfica o controlador de Vídeo) con el software apropiado para que su gestión resulte cómoda para el usuario. Además, las características de los monitores CRT color disponibles en la actualidad, en cuanto a la gradación cromática accesible y el grado de uniformidad a lo largo del campo de presentación, hacen que este dispositivo sea el mejor adaptado a las necesidades de este tipo de experiencias. Por tanto, constituirá el elemento fundamental de nuestro dispositivo experimental.

A continuación, describimos tanto el dispositivo utilizado para la presentación de estímulos, como el procedimiento seguido para su completa puesta a punto.

El dispositivo experimental, cuyo esquema puede verse en la figura 5.1, consta de un monitor CRT, utilizado como monitor de presentación de estímulos, con la parte externa de la pantalla recubierta de negro, para evitar luces parásitas en las inmediaciones del estímulo.

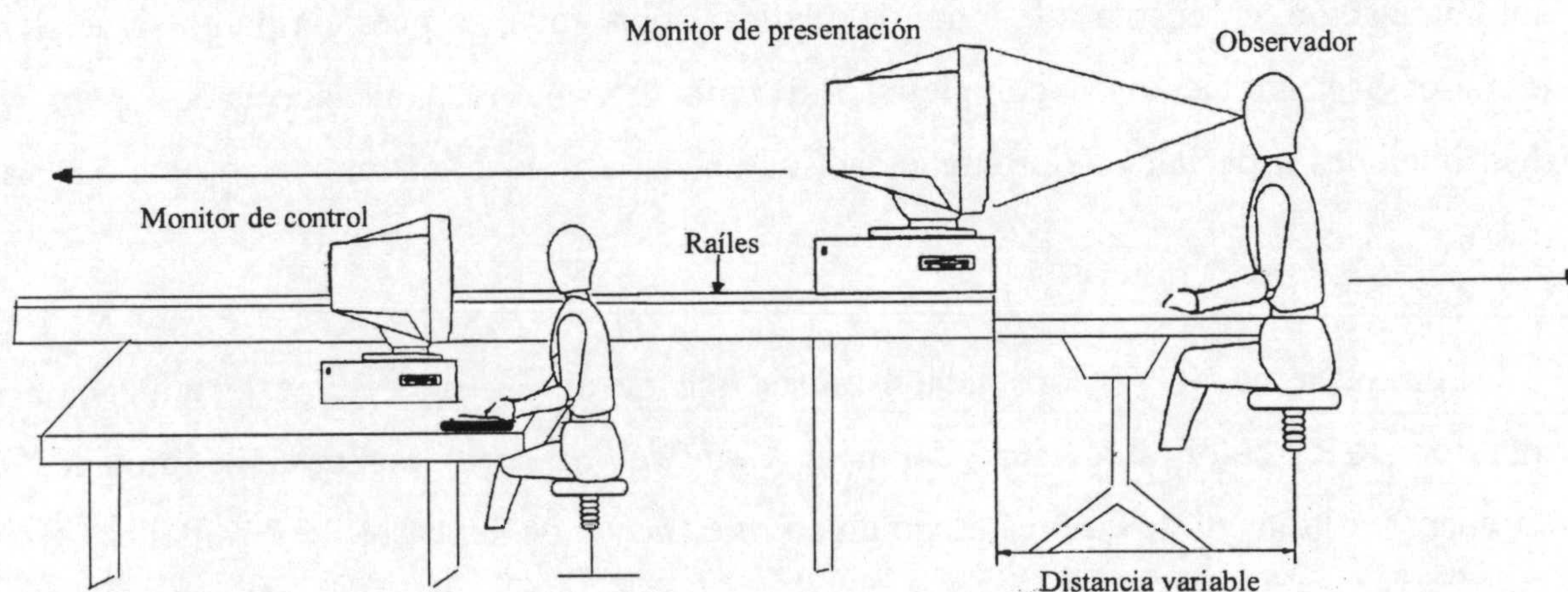


Figura 5.1. Esquema de la disposición de los elementos del dispositivo, observador y controlador durante el desarrollo de las sesiones.

El monitor se encuentra situado sobre una mesa de laboratorio provista de raíles de madera, que sirven para modificar la distancia del monitor al observador (en el desarrollo de las diferentes fases, trabajamos con varias distancias de observación); además, el observador puede ser alejado de la mesa con raíles, permitiendo más disponibilidad en el rango de distancias. La

cabeza del observador se sitúa en posición fija mediante una mentonera acoplada a una mesita auxiliar, que se desplaza también convenientemente cuando resulta necesario alejar al observador del monitor. El control de las sesiones experimentales no está en manos del observador, sino que es ejercido por el experimentador desde un monitor auxiliar o monitor de control.

Dentro del esquema global del sistema productor de estímulos, podemos agrupar sus elementos en dos categorías: el soporte físico o hardware y el soporte lógico o software. Respecto del soporte físico, es necesaria una puesta a punto que se compone de dos etapas, una primera donde se fijan unas suposiciones de calibración dadas, y una segunda etapa en la que se aplica propiamente un método de calibración sobre la base de las suposiciones anteriores.

5.2. SISTEMA PRODUCTOR DE ESTÍMULOS.

Se compone de dos unidades fundamentales, un monitor CRT Color de máscara de sombra y un controlador de vídeo o tarjeta gráfica. Estudiaremos a continuación no sólo las características de estos dispositivos, sino también los elementos físicos y lógicos que los controlan.

5.2.1. Características generales de los dispositivos CRT Color.

Estos dispositivos están compuestos esencialmente de tres CRT que coexisten en el mismo tubo y que producen tres imágenes, una de cada color. Por simplicidad, empezaremos estudiando las características de los dispositivos CRT Monocromo.

Su funcionamiento es el mismo que el utilizado en un aparato de televisión en blanco y negro (Foley y Van Dam, 1982), y se basa en la excitación de una capa de fósforo por medio de un haz de electrones acelerados. En la figura 5.2 se puede observar cómo el haz de electrones, una vez que han sido emitidos por el cañón y acelerados a través de un fuerte voltaje, se focaliza sobre la pantalla que está recubierta por una capa de fósforo. Al golpear el haz de electrones en la pantalla, parte de su energía cinética es transferida a los electrones de los átomos de fósforo, pasando éstos a un nivel excitado de mayor energía. Una vez que estos átomos decaen a su nivel fundamental, la energía emitida es irradiada en forma de luz (fenómeno de fosforescencia, si es emitida por los electrones más estables), lo que hace posible visualizar un pequeño punto en la pantalla (píxel). La intensidad de este punto de luz sigue una distribución de tipo Gaussiano, por

lo que no tiene bordes nítidos, de ahí que se defina usualmente su tamaño como el diámetro para el cual la intensidad es el 50% del máximo central.

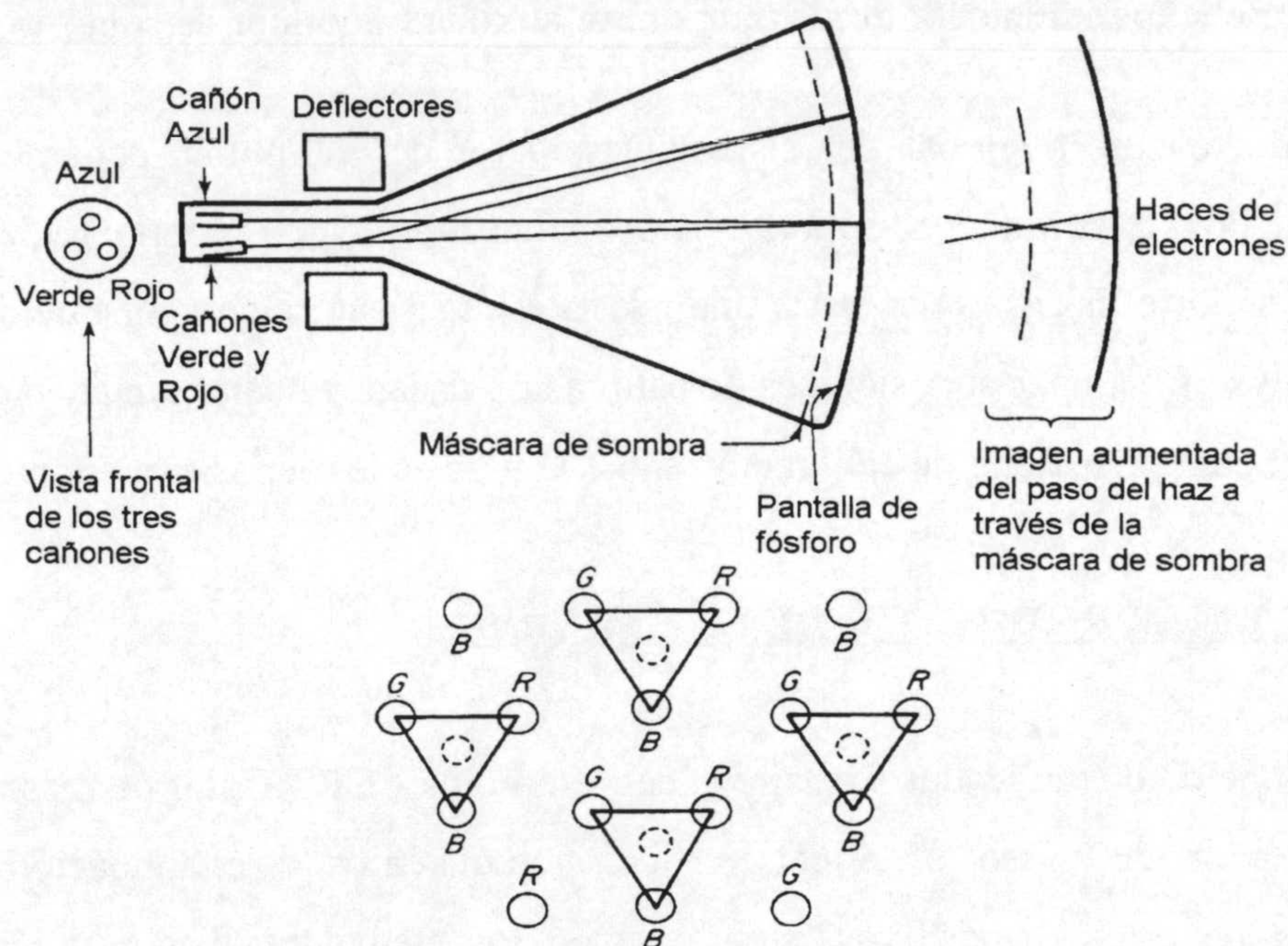


Figura 5.2. Disposición de las tríadas de fósforos en relación con la máscara de sombra y la pantalla del tubo CRT, en un monitor CRT color.

La observación de ese punto de luz va a depender también en gran medida de la persistencia del fósforo, entendida ésta como el tiempo que tarda la fosforescencia en decaer al 10% de su salida inicial, ya que la luz emitida por el mismo decae exponencialmente con el tiempo. Debido a esto, la imagen debe ser "refrescada" muchas veces por segundo, de modo que el observador integre los pulsos de luz que provienen de cada pixel y pueda percibir una imagen estable y sin parpadeos. La frecuencia de refresco vertical se define como el número de veces por segundo que la imagen es redibujada en la pantalla, y suele oscilar en torno a los 80-100 Hz. Otro parámetro característico es la frecuencia de barrido horizontal, que es el número de líneas por segundo que el dispositivo CRT es capaz de presentar. Respecto a las formas de barrido, los modos más extendidos son el *entrelazado* y el *no entrelazado*. En el primero, se muestran las líneas pares y a continuación las impares, una vez que se vuelve a la posición inicial; en el barrido no entrelazado, todas las líneas del monitor se muestran en secuencia en toda la pantalla.

Veamos ahora las características de los monitores CRT Color. Tanto éstos como los aparatos de televisión utilizan el tubo de máscara de sombra (Foley y Van Dam, 1982; Spronson,

1983). En ellos cabe destacar dos características básicas: la capa de fósforo y la propia máscara de sombra. La superficie cubierta por la capa de fósforo está constituida por tríadas de fósforo azul, verde y rojo; estas tríadas son tan pequeñas que el observador las percibe como una mezcla aditiva a una cierta distancia de la pantalla. La máscara de sombra consiste en una placa delgada de metal perforada con numerosos agujeros y situada a corta distancia de la pantalla. Como se observa en la figura 5.3, la máscara está alineada de tal forma que cada uno de los tres haces de electrones sólo alcanza un componente de la tríada de fósforos, con lo que se puede conseguir una excitación selectiva de los mismos.

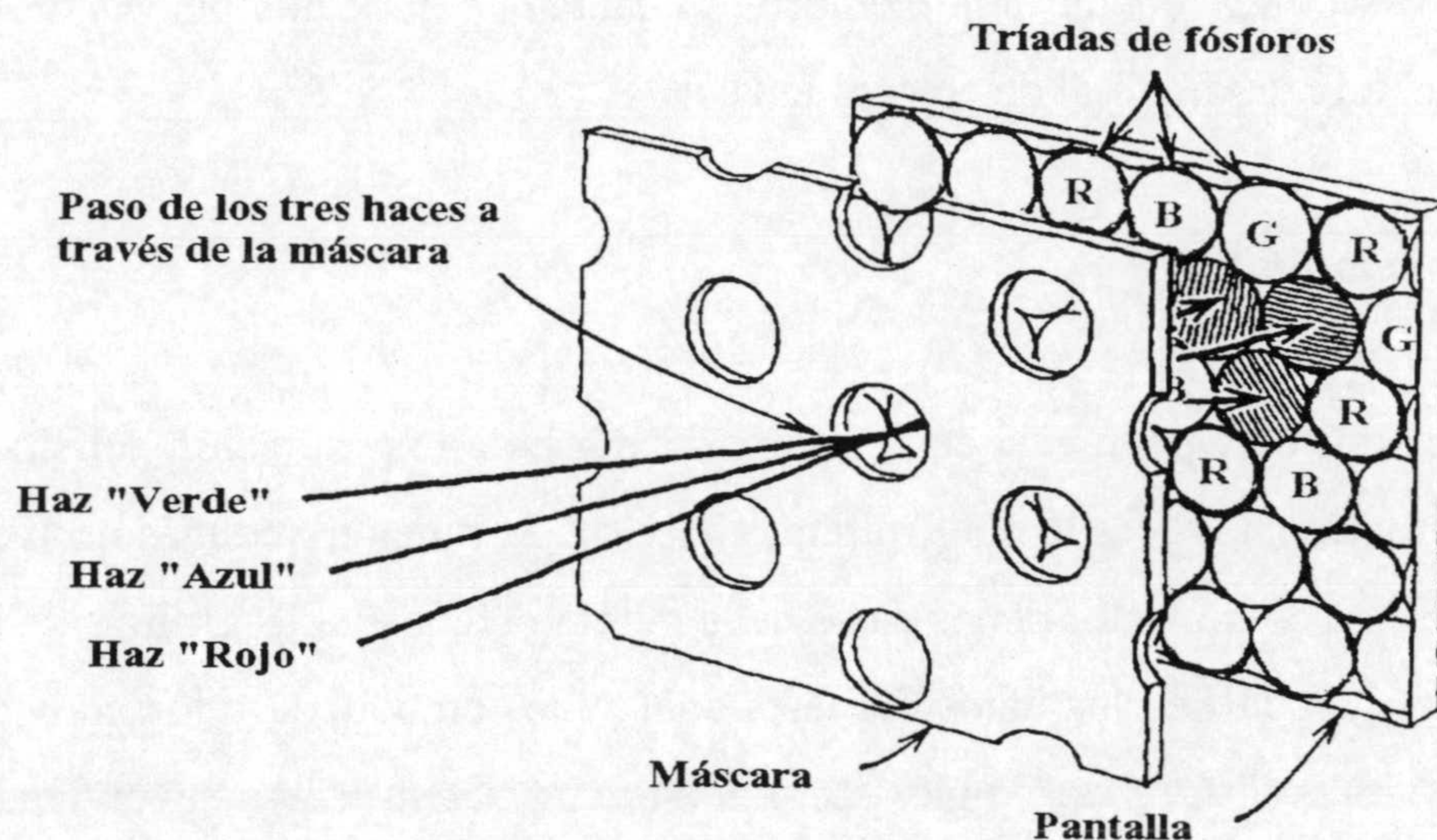


Figura 5.3. Esquema de la excitación selectiva de fósforos a través de la máscara de sombra.

A la distancia entre las tríadas se denomina *dot-pitch*, y supone una gran limitación en cuanto a la resolución y luminosidad del CRT debido a los problemas derivados de la focalización exacta en el centro del agujero de la máscara. Asimismo, se limita la calidad de la imagen, pues si los electrones provenientes de un cañón dado no golpean el fósforo de color adecuado se producen pérdidas de saturación en aquella.

Veamos a continuación cuál es el proceso de generación de gráficos en un ordenador. Las entradas a un CRT Color consisten en tres señales, una controlando cada cañón, que son creadas independientemente por tres canales en el subsistema gráfico del ordenador (Travis, 1991). Los componentes más destacados del proceso son la memoria de pantalla y el controlador de vídeo.

- *Memoria de pantalla.*

La memoria de pantalla es una sección de alta velocidad de la memoria del ordenador que contiene la descripción digitalizada de una página completa. Dado que a cada localización en dicha memoria le corresponde un pixel en la pantalla en la misma posición, la resolución espacial de la imagen está limitada por la memoria de pantalla. Para el caso de una memoria de pantalla capaz de representar color, y considerando el caso más simple en el que cada cañón sólo pudiese estar encendido o apagado (1 bit de información), el sistema sería capaz de representar 2^3 colores por pixel; la memoria de pantalla sería un plano con tres bits de profundidad, uno por cada cañón. En el caso más general, una memoria de pantalla con N bits por cañón podría obtener para cada píxel un número total de colores igual a 2^{3N} ($2^N \times 2^N \times 2^N$).

- *Controlador de vídeo.*

El controlador de vídeo actúa como temporizador para la generación del sincronismo tanto vertical como horizontal. Desde nuestro punto de vista, la función que más nos interesa de él es aquella que realiza como lector de los datos de la memoria de pantalla. Utilizando las direcciones del controlador, decodifica los datos digitales contenidos en aquella y los convierte en valores analógicos (valores DAC, del inglés *Digital Analog Converter*), devolviendo las señales resultantes de cromaticidad y luminancia, junto con las señales de barrido, al monitor CRT.

La utilización de la tabla de consulta del controlador de vídeo es uno de los pasos fundamentales para la presentación de colores en el monitor CRT, pues de esta forma se evitan los lentos procesos de reescritura de planos de imagen en la memoria de pantalla (un plano por cada bit que controla el cañón). Según este procedimiento, el valor que se lee en la memoria de pantalla se utiliza como índice en las tres tablas de consulta, una por cada cañón, el valor correspondiente a este índice es el que se pasa al DAC y después al cañón correspondiente; un ejemplo de este proceso lo podemos ver en la figura 5.4. De esta forma, se ahorra memoria de pantalla y se aceleran los cambios de color. Con este sistema, si M es el número de planos que contiene la memoria de pantalla, el número de colores visualizados simultáneamente en la misma será 2^M , de los 2^{3N} disponibles en total para la paleta, donde N es el número de bits de que consta cada entrada en la tabla de consulta de cada cañón.

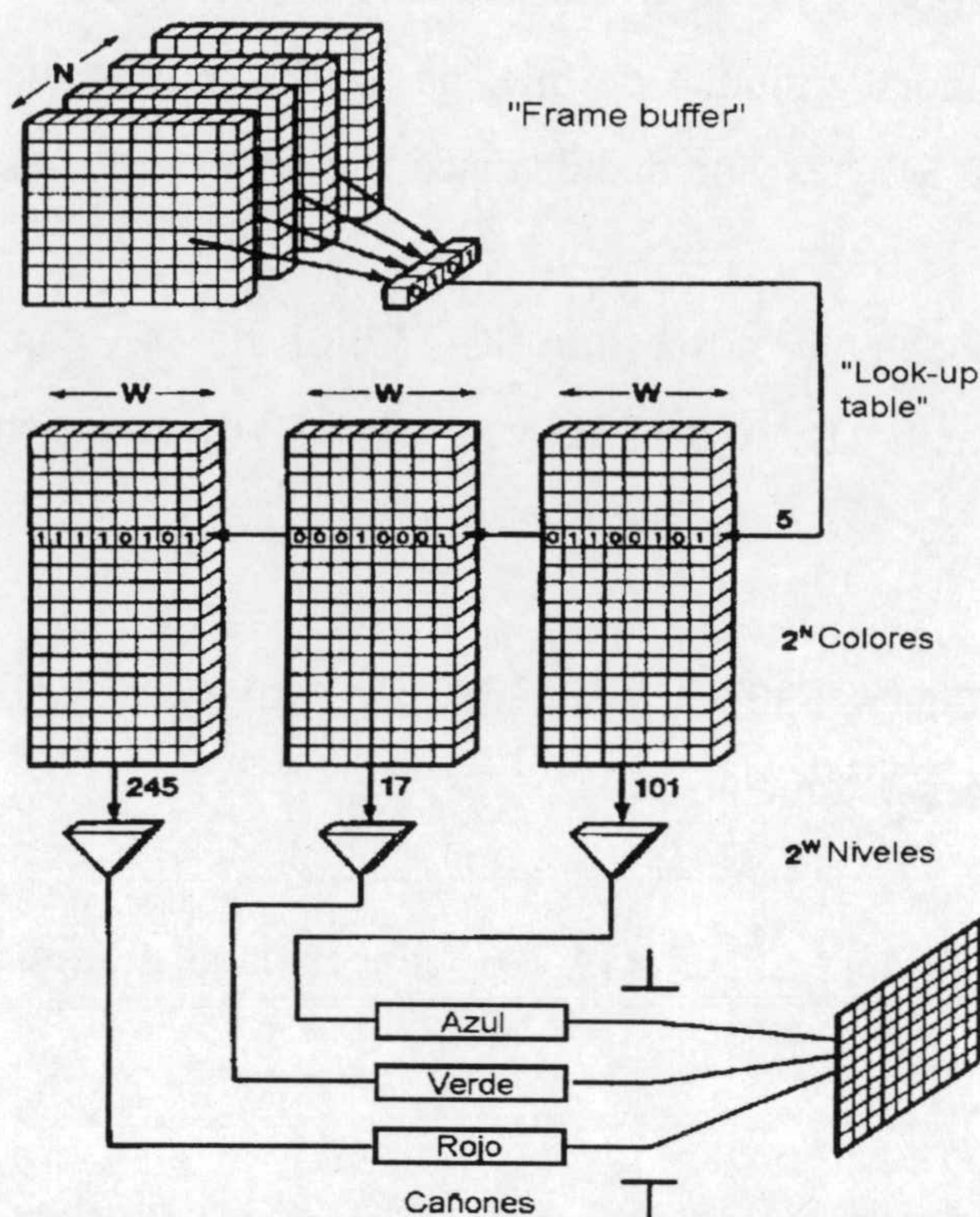


Figura 5.4. Representación del uso que hace el controlador de vídeo de los valores almacenados en la tabla de consulta (LUT).

5.2.2. Descripción general del sistema de producción de estímulos.

El hardware utilizado para el desarrollo de las sesiones experimentales estaba constituido por los siguientes elementos:

- Monitor color Sony modelo CPD17SF2 de 17", con las siguientes características:

CRT con pantalla cuadrada plana y antideslumbramiento;

Barrido automático de frecuencia entre 31 y 65 Hz en la horizontal;

Barrido automático de frecuencia entre 50 y 120 Hz en la vertical;

Compatibilidad total con adaptadores gráficos IBM;

Resolución máxima de 1280 x 1024 puntos por línea (ppl) en modo estándar IBM;

Ajuste automático de la geometría de la imagen;

Dot-pitch de 0,25 mm.

Temperatura de color variable de 5000-9300 K.

- Unidad central de procesado (CPU) que dispone de los siguientes elementos principales: microprocesador Pentium I de Intel de 32 bits y velocidad de reloj de 133 MHz, memoria base RAM de 32 Mbytes y unidad de disco fijo de 1 Gbytes real.

- Monitor auxiliar de control Samtron SC-439PSL de 14", con frecuencia de barrido de 31,47 a 37,88 Hz horizontal, y de 56 a 87 Hz vertical; 0,39 de dot-pitch y resolución máxima de 1024 x 768 ppl.

- Ratón Genius GM - F302 a modo de dispositivo señalador y configurado para su utilización con tres botones de función.

- Tarjeta gráfica Trident SuperVGA 4.0, conectada al monitor de control Samtron SC-439PSL.

- Tarjeta gráfica VSG2/3 versión 4.02 de Cambridge Research Systems, con generador de redes acoplado DSP (del inglés *Digital Signal Processor*, o procesador de señales digitales) modelo TMS320C25, que se utiliza en la generación de los estímulos para las experiencias. Esta tarjeta gráfica controla el monitor de presentación de estímulos Sony CPD17SF2. Sus características más destacables son la versatilidad que ofrece para crear diferentes distribuciones espaciales (sinusoidal, Gaussiana, cuadrada, trapezoidal, etc) y la resolución de 14 bits por cañón.

Unido a estos elementos de soporte físico, se hace necesario disponer de una serie de programas que nos ayuden a controlar cada uno de dichos elementos. Dentro del software utilizado, distinguimos dos grupos:

- Sistema operativo: Windows 95 versión 4.0, que coordinaba el acceso a los programas de presentación de estímulos y su seguimiento a través del monitor de control y su correspondiente tarjeta de vídeo estándar.
- Software de presentación de estímulos y cálculo posterior con los datos obtenidos, desarrollado en lenguaje PASCAL de Borland, versión 7.0 para DOS. El programa para el desarrollo de las sesiones constaba en parte de una serie de instrucciones específicas para la tarjeta gráfica VSG2/3 DSP, cuya traducción se llevaba a cabo

posteriormente por un proceso interno controlado por el software que proporcionaba la propia tarjeta. Era, pues, necesario que el lenguaje de programación utilizado fuese compatible con las librerías proporcionadas por la tarjeta. Por ejemplo, la instrucción “*setspatialfrequency(1.0, estímulo)*”, dentro de la librería preparada para PASCAL 7.0 por los creadores de la tarjeta gráfica, asignaba una frecuencia espacial de 1.0 cpd al estímulo que iba a ser presentado. El control de cálculo de la correspondiente distribución sinusoidal sobre la pantalla y de transformación de unidades según la distancia a la que se situase el observador corría a cargo enteramente del procesador de la tarjeta, mediante un proceso ajeno al programa en PASCAL. El proceso de puesta a punto del monitor de presentación se desarrollaba enteramente bajo entorno DOS mediante programas específicos incluidos en el software de instalación de la VSG2/3, como explicamos a continuación.

5.3. PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO.

Este proceso tenía como finalidad asegurar que los estímulos presentados en el monitor controlado por la tarjeta VSG2/3 DSP ofrecieran las suficientes garantías de reproducibilidad y fiabilidad, en cuanto a que el color pedido a la tarjeta y el medido posteriormente sobre el monitor fueran lo bastante iguales como para excluir una posible influencia sobre los resultados experimentales. Para describir este proceso de puesta a punto, lo dividiremos en las dos partes siguientes:

5.3.1. Configuración del monitor Sony CSD17SF2 para la tarjeta VSG2/3 DSP.

Antes de comenzar a comunicar instrucciones a la tarjeta gráfica mediante los programas elaborados al efecto, es necesario ajustar una serie de parámetros del monitor, que informen al software de la tarjeta sobre las características propias del mismo, en especial en cuanto a sincronización y resolución con la que queremos trabajar. Este proceso sólo es necesario realizarlo una sola vez, al iniciar el uso de la tarjeta. Se lleva a cabo mediante el programa CONFIG proporcionado por la tarjeta bajo entorno DOS. En la figura 5.5 podemos ver los diferentes parámetros ajustados para nuestro monitor de presentación.

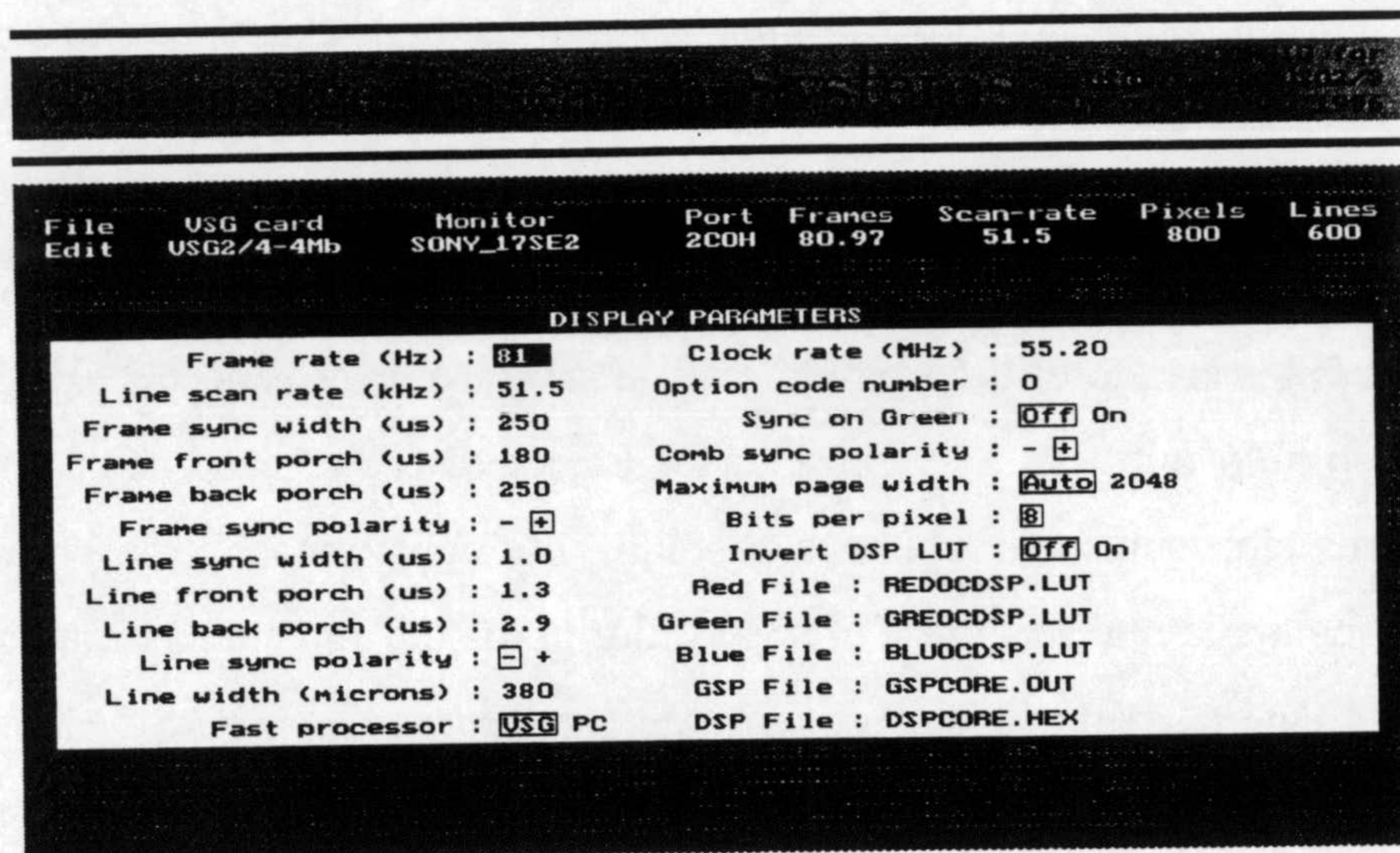


Figura 5.5. Datos de configuración del monitor de presentación de estímulos introducidos en el programa CONFIG de la tarjeta VSG2/3.

Los tres parámetros de mayor relevancia, ya que controlan la resolución del display, son:

- **Frame Rate** o frecuencia de refresco.
- **Line Scan Rate** o frecuencia de barrido vertical.
- **Clock Rate** o velocidad de reloj, parámetro propio de la tarjeta e independiente de las especificaciones del monitor en cuanto a sincronizado. Se refiere a la velocidad de producción de pixeles por parte de la tarjeta para mostrarlos en el monitor, siendo el rango accesible para la VSG2/3 de 10 a 140 MHz.

Ajustando estos tres valores clave, conseguimos una resolución en pantalla de 800x600, pues con mayores resoluciones encontramos que el valor de frecuencia de refresco descendía considerablemente, lo que para parte de nuestras medidas no resultaba adecuado, pues una frecuencia de refresco demasiado baja sería un factor limitante de bastante importancia. La frecuencia de refresco determina la rapidez con que el monitor puede cambiar el estímulo, a parte de servir para contrarrestar la atenuación temporal de los fósforos. En nuestro caso, quedó fijada en 81 Hz.

Tras ajustar la resolución, ajustamos los parámetros de centrado de imagen (*frame front porch*, *frame back porch*, *line front porch* y *line back porch*), y los de sincronización de monitor y tarjeta (*frame sync width* y *line sync width*). El resto de valores numéricos fueron los que proporcionaba el software de la tarjeta tras un proceso de reconocimiento automático de las características del monitor.

En la figura 5.5 también podemos ver que se hace referencia a los ficheros de calibrado de cada uno de los cañones, cuyo nombre figura en los apartados *Red File*, *Green File* y *Blue File* (ficheros rojo, verde y azul, respectivamente). El proceso de construcción de los mismos constituye la segunda parte de la puesta a punto de nuestro dispositivo experimental.

5.3.2. Calibrado del monitor de presentación.

Se realiza también dentro del programa CONFIG y tiene como finalidad proporcionar al software de la tarjeta una serie de datos medidos de luminancia en pantalla para una serie de valores DAC (o de voltaje) de cada cañón. Con estos datos, el programa confecciona las tablas de calibrado, que le permiten calcular qué salida de voltaje debe enviar a cada uno de los cañones para obtener un color dado en un pixel concreto o conjunto de pixeles de la pantalla.

Este proceso es denominado *Corrección Gamma* por los fabricantes de la tarjeta gráfica. Es necesario realizarlo porque en los monitores CRT existentes en la actualidad se da la circunstancia de que la luminancia medida en pantalla no es proporcional al voltaje de cada cañón. En el calibrado recomendado por los ingenieros de Cambridge Research, se parte de la base de que la luminancia de salida resulta proporcional a una potencia de dicho voltaje, según la siguiente expresión:

$$L = L_0 + k \cdot (V - V_0)^\gamma \quad (1)$$

donde L es la luminancia para un valor dado de voltaje, L_0 y V_0 son los valores de luminancia y voltaje, respectivamente, para el *background* o fondo de pantalla, y k y γ son constantes del modelo de ajuste. Si mediante un número suficiente de datos de luminancia de salida medidos para unos determinados valores de voltaje conseguimos un ajuste de los parámetros de la curva (L_0 , V_0 , k y γ), se podrá entonces fácilmente obtener el valor de voltaje necesario para una determinada luminancia de salida en cada cañón.

El número de medidas necesario para realizar el ajuste en cada cañón es por defecto de 64 en el programa de calibrado de la tarjeta. El proceso consiste entonces en presentar 64 estímulos en pantalla correspondientes a determinados valores de voltaje, que van del mínimo al máximo

accesible para el cañón, en nuestro caso en escala lineal, aunque también se ofrece la posibilidad de escala logarítmica. Las medidas fueron realizadas con un espectrorradiómetro de la casa Topcon, modelo SR-1. Con este instrumento, las medidas fotométricas absolutas quedan determinadas con un error del 4 %, mientras que el margen de error asociado a la medida de coordenadas de cromaticidad ($\pm 0,003$) sólo queda especificado respecto del iluminante A. Las medidas se realizaron con campo de 2° , situando el espectrorradiómetro a 0,75 m de la pantalla y dirigido perpendicularmente sobre el centro de la misma.

Previamente a la toma de medidas, se fijaron unas condiciones estables del funcionamiento del monitor, seleccionando unos niveles determinados en los mandos de brillo y contraste que asegurasen un suficiente nivel de luminancia en el cañón azul, de aproximadamente 10 cd/m^2 cuando la salida de voltaje era máxima. La selección del nivel de brillo es siempre una cuestión de compromiso, pues, por un lado, si el nivel de brillo es muy elevado se rompe la aditividad de los fósforos, vital para una correcta reproducción del color; por otro lado, si el brillo ajustado es muy bajo, los valores de luminancia máximos accesibles para el monitor están muy restringidos. La figura 5.6 muestra los valores de radiancia espectral medidos con el espectrorradiómetro para cada uno de los cañones.

Una vez introducidas todas las medidas para un cañón determinado, el programa de calibrado realiza un ajuste de la curva Gamma correspondiente, mostrando en pantalla los parámetros de ajuste junto con los datos experimentales y la curva correspondiente al ajuste realizado, como puede verse en la figura 5.7.

Si se considera aceptable el ajuste realizado, se pasa entonces a especificar las coordenadas de cromaticidad del fósforo correspondiente, y con estos datos y los de la curva ajustada el programa confecciona un fichero de calibrado (con la extensión .LUT, del inglés *Look-Up Table*, tabla de búsqueda), que utilizará el software de la tarjeta siempre que se deba presentar un estímulo en pantalla. Veamos con un poco más de detalle la estructura de los ficheros de calibrado para la tarjeta DSP. Si el ajuste no es de suficiente calidad, se vuelven a tomar las medidas de luminancia.

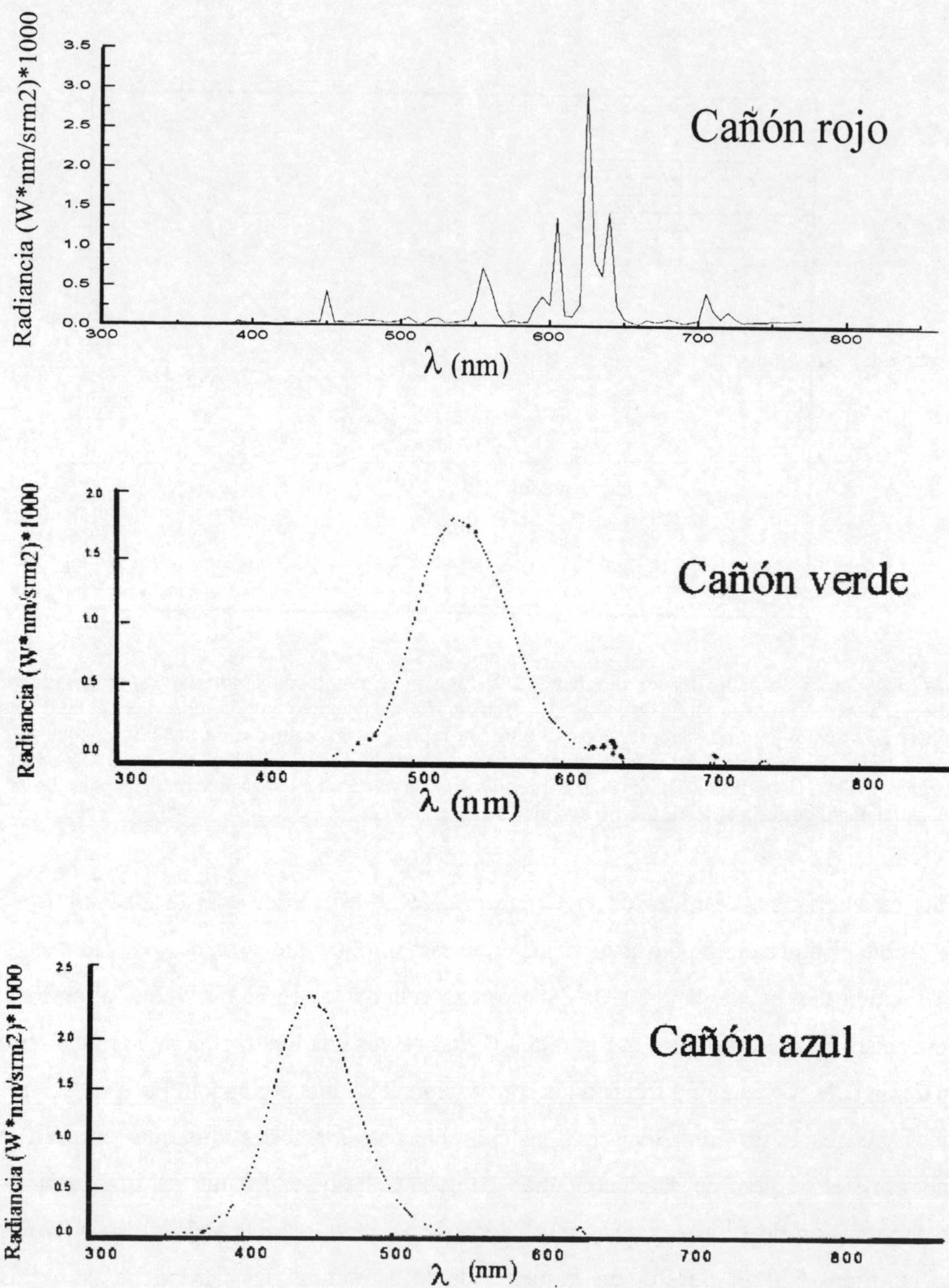


Figura 5.6. Curvas de radiancia espectral de los tres cañones del monitor de presentación, obtenidos a máxima luminancia para cada uno de ellos.

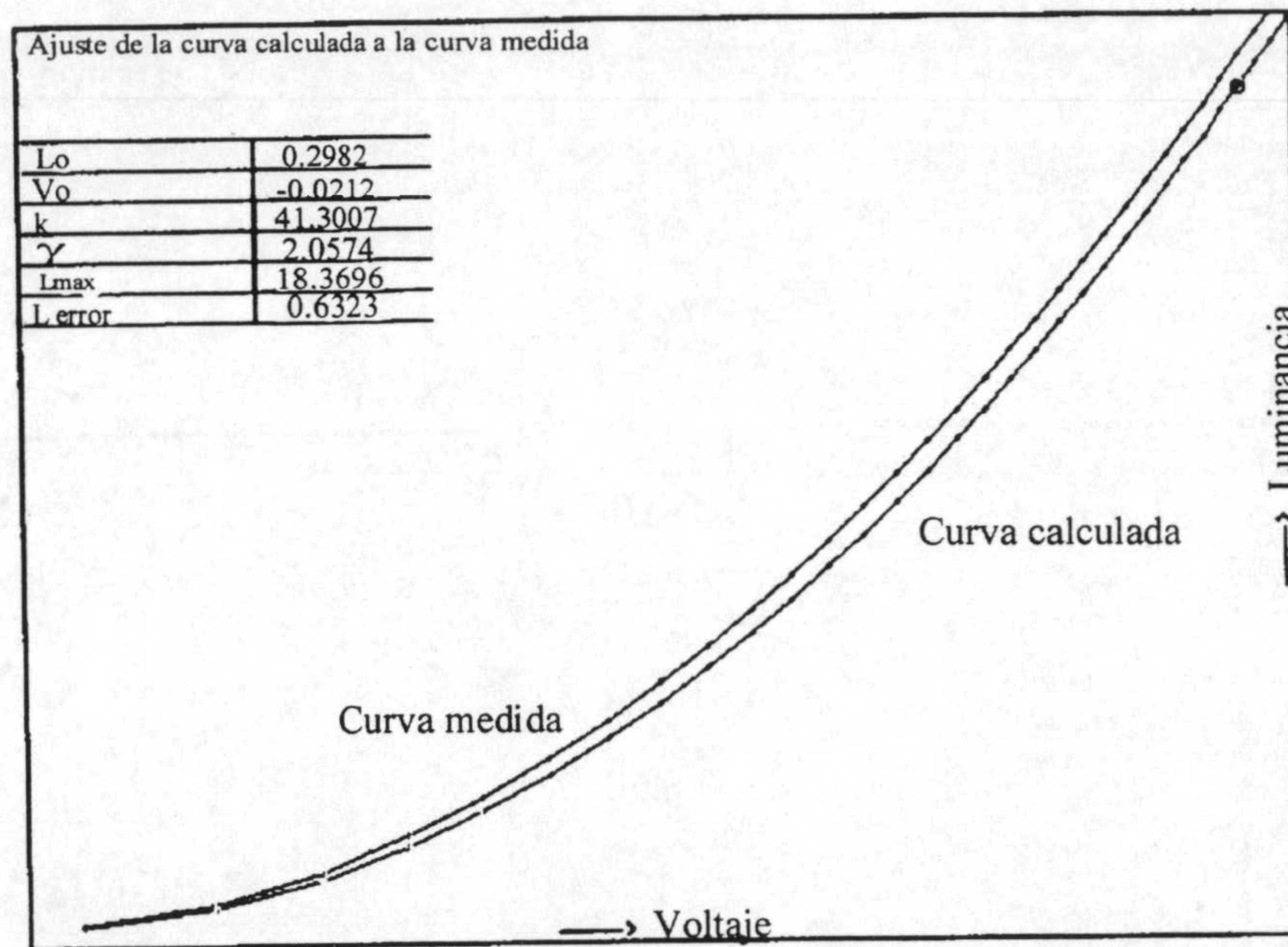


Figura 5.7. Curva ajustada por el programa CONFIG y curva medida con un espectrorradiómetro, correspondientes a un determinado cañón de un monitor estándar. En este ejemplo proporcionado por el fabricante de la tarjeta VSG 2/3, vemos que no siempre la curva ajustada reproduce exactamente la medida, aunque el error máximo que se comete en la aproximación es pequeño en términos relativos (de 0,63 cd/m^2 sobre unas 16-18 cd/m^2). Si éste error máximo estuviera localizado en la parte inferior de la curva, resultaría más preocupante, pues los valores de luminancia del punto correspondiente al error serían bastante menores.

En las características técnicas de la tarjeta gráfica se especifica que la DSP trabaja con DACs de 14 bits. En principio podría suponerse que esto implica que el número de datos en cada fichero de calibrado es de $2^{14} = 16.384$, correspondiente a 16.384 niveles diferentes de luminancia accesibles al cañón. En la figura 5.8 podemos ver una ilustración de la mucho mayor precisión de un DAC de este tipo frente a los convencionales 8 bits por cañón. Pero en la DSP las necesidades de respuesta inmediata del sistema en presentaciones dinámicas hacen muy conveniente que el número de datos contenido en cada fichero sea menor, así que se optó por mantener la precisión de 14 bits en cada uno de los datos, pero incluir en el fichero 4.096 datos (2^{12}). En la figura 5.9 se muestra un esquema de la estructura del fichero de datos .LUT, organizado en forma bipolar.

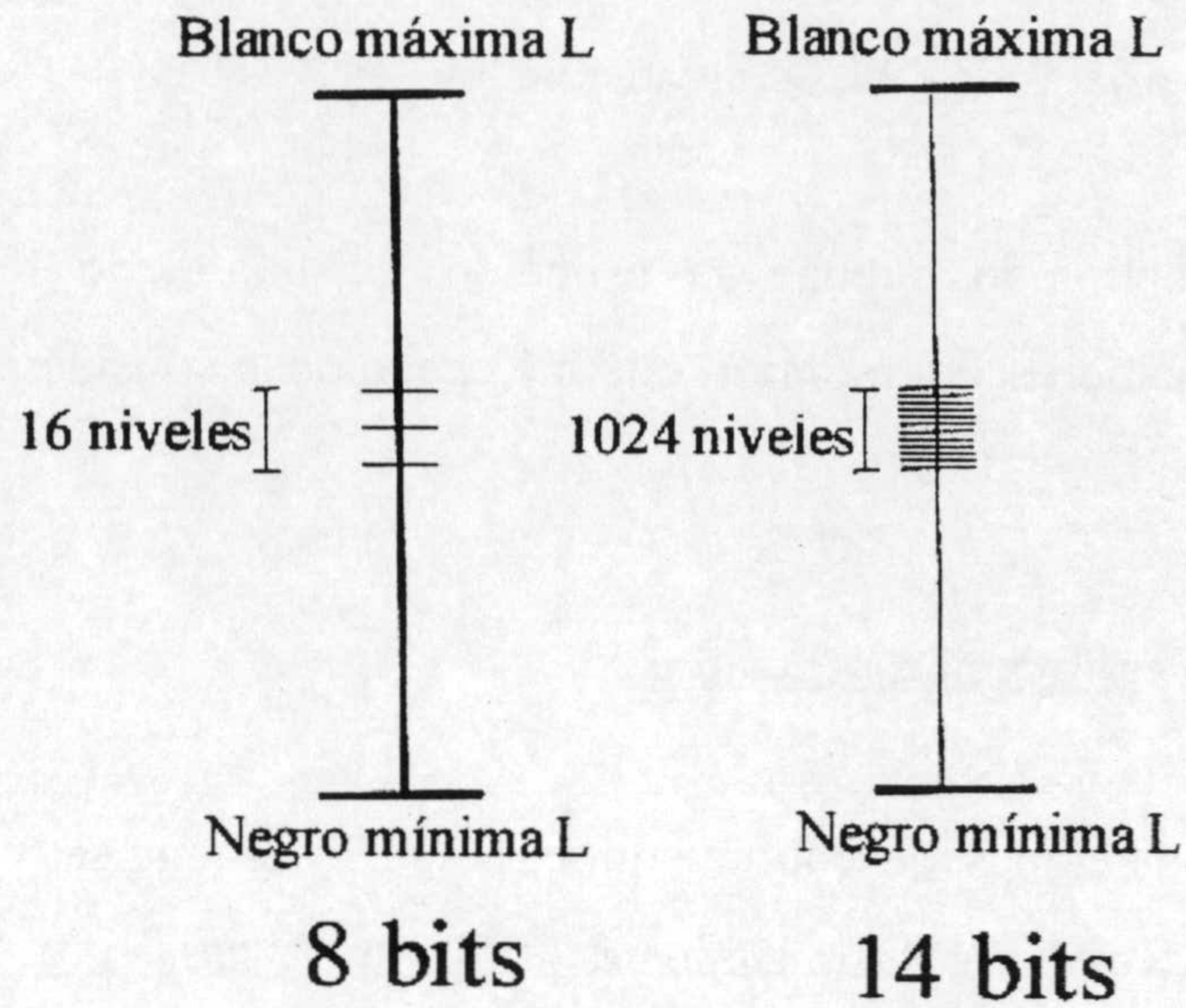


Figura 5.8. En un cañón de 8 bits, la zona señalada en el esquema contendría 16 niveles de luminancia (o de voltaje del cañón), de los 256 posibles. En un cañón de 14 bits, la misma zona de variación de luminancia contendría 1024 niveles de luminancia de los 16384 posibles, con lo que la precisión en la escala disponible de valores es mucho mayor, aunque el valor mínimo posible de luminancia y el máximo sean los mismos que para el cañón de 8 bits.

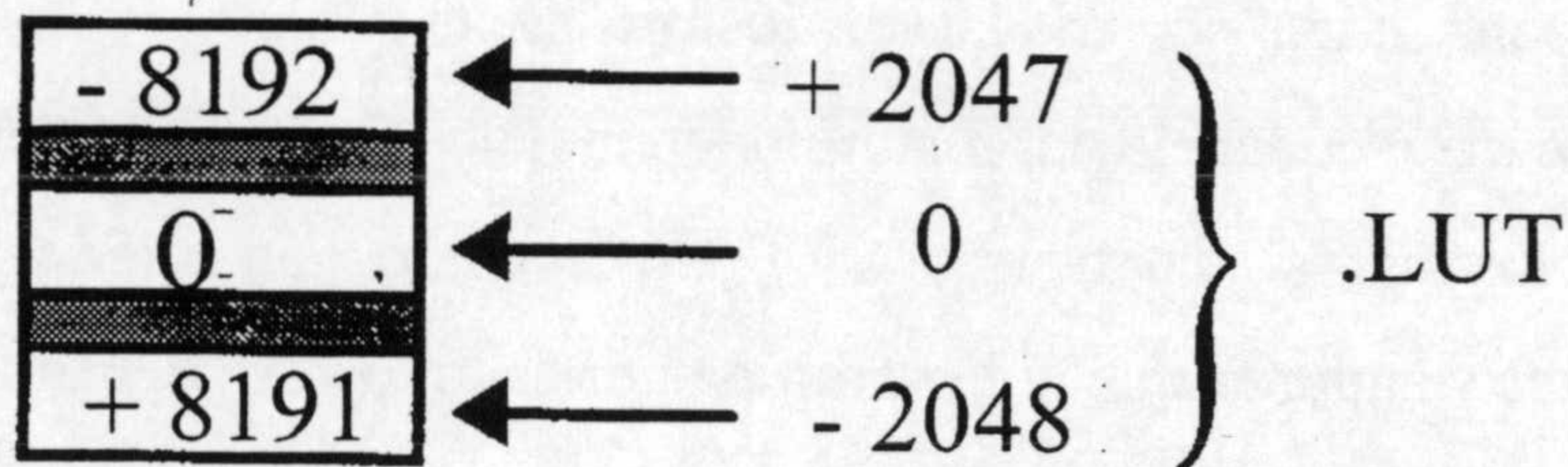


Figura 5.9. Cada uno de los 4096 datos (organizados de - 2048 a 2047) del fichero de calibrado .LUT tiene una precisión de 14 bits, es decir, podría adoptar un valor de entre 16384 posibles, organizados también bipolarmente (de -8192 a 8191).

Una vez realizado el calibrado de los tres cañones del monitor como se ha explicado, para presentar un determinado estímulo en pantalla bastaba escoger un espacio de color de entre los accesibles al software de la tarjeta (en nuestro caso, CIE 1931) y especificar a través del programa de presentación las coordenadas de cromaticidad de dicho estímulo. El mecanismo interno de control de la tarjeta se encargaba entonces de calcular los valores de luminancia correspondientes a cada cañón a partir de las coordenadas de cromaticidad, y con las tablas de consulta determinaba el voltaje de salida adecuado para obtener el estímulo en cuestión, sin que

el usuario tuviera acceso en ningún momento a los valores DAC utilizados, como suele ser común si se trabaja con tarjetas de 8 bits convencionales.

Este método de calibrado supone la asunción de una serie de hipótesis sobre el comportamiento de los cañones del monitor, que merece la pena considerar con un poco más de detalle.

5.3.3. Hipótesis de calibración utilizadas.

Dentro de las suposiciones de calibración que suelen escogerse, recomendadas por los trabajos de Cowan y Rowel (1986), Brainard (1989) y Lucassen y Walraven (1990), los fabricantes de la tarjeta gráfica utilizada han adoptado las siguientes en el método seguido para el calibrado del monitor de presentación:

- *Independencia del fósforo.*

Ya se ha comentado que una de las características de los dispositivos CRT Color es la capa de fósforo, constituida por tríadas de fósforo azul, verde y rojo. Según esto, a través de la suposición de independencia del fósforo o independencia de los cañones (Cowan y Rowel, 1986) es posible imaginar al dispositivo CRT Color como constituido por tres CRT Monocromo independientes y suponer que la luz emitida por cada fósforo depende únicamente de los valores de entrada para dicho fósforo (Brainard, 1989).

- *Constancia de los fósforos.*

Dado que la luz emitida por el monitor en una localización determinada queda caracterizada por su curva de distribución espectral (señal de color), la suposición de constancia de los fósforos admite que dicha señal de color es siempre combinación lineal de las tres distribuciones espectrales de energía asociadas a los tres tipos de fósforos. Una segunda implicación de esta suposición es que la distribución espectral relativa de energía emitida por los fósforos no varía con la estimulación del fósforo, o bien que la cromaticidad del fósforo se mantiene constante para todos los valores de voltaje accesibles al monitor.

- *Independencia espacial y factor de escala simple.*

La hipótesis de independencia espacial implica que la emisión espectral de los fósforos primarios no tiene dependencia con la localización en la pantalla, sino que depende sólo de los valores seleccionados para un determinado punto.

Sin embargo, los monitores CRT no son espacialmente uniformes, de modo que para valores iguales de entrada se producen en la salida valores distintos de intensidad en los distintos puntos de la pantalla. La suposición de factor de escala simple implica que la única diferencia entre las relaciones entrada-salida en un punto dado (x, y) de la pantalla y el centro de la misma, es un factor de escala $k(x, y)$ que es el mismo para los tres fósforos.

- *Estabilidad temporal.*

Se entiende por estabilidad temporal la eliminación de la dependencia con el tiempo de la emisión espectral de los fósforos primarios. Es decir, implícitamente se admite que las medidas asociadas al proceso de calibración mantendrán su validez durante un cierto período de tiempo. Por medio del análisis de diferencias de color es posible evaluar cuándo es necesario realizar un nuevo calibrado. En los monitores nuevos, el proceso de cambio de la emisión espectral de los fósforos es mucho más rápido que si el monitor lleva cierto tiempo en uso, por lo que antes de realizar el primer calibrado es conveniente mantener el monitor con un uso regular durante dos meses aproximadamente, con lo que nos aseguramos que la validez del calibrado sea lo bastante duradera. En nuestro caso, se llevó a cabo este proceso de envejecimiento previo y se encontró que era necesario volver a calibrar aproximadamente cada 4 meses, lo cual supuso realizar un total de cinco calibrados en el transcurso de las medidas.

De todas las que hemos citado, la hipótesis más controvertida es la de la constancia de los fósforos (Jiménez del Barco, Díaz, Jiménez y Rubiño, 1995). Para controlar en cierta medida que el calibrado ofrecido por los fabricantes de la tarjeta VSG2/3 DSG tuviera las suficientes garantías de calidad, realizamos una prueba al final de cada calibrado, consistente en presentar una serie de estímulos de color ocupando toda la pantalla, y medir sus coordenadas de cromaticidad con el espectrorradiómetro. Estos estímulos correspondían al equienergético y a un extremo de cada una de las líneas en el espacio CIE 1931 que empleamos a lo largo del

desarrollo de las medidas, como explicaremos en el capítulo siguiente. En la tabla 5.1 podemos ver un ejemplo de los resultados obtenidos para uno de los calibrados realizados, que indican que los valores pedidos al monitor estaban suficientemente próximos a los medidos tras la presentación, considerando el error asociado al espectrorradiómetro.

(x, y, Y) pedidos	(x, y, Y) medidos
(0,333; 0,333; 21,50)	(0,336; 0,336; 21,66)
(0,266; 0,558; 22,00)	(0,268; 0,560; 22,15)
(0,237; 0,382; 21,50)	(0,238; 0,381; 21,79)
(0,394; 0,460; 22,00)	(0,397; 0,464; 22,25)
(0,484; 0,391; 21,50)	(0,486; 0,394; 21,71)

Tabla 5.1. Valores pedidos al programa de presentación, junto con los medidos con el espectrorradiómetro una vez presentado el estímulo.

Así pues, para el nivel de luminancia medio al que trabajamos, encontramos que el calibrado recomendado por Cambridge Research tiene la suficiente fiabilidad.

En cuanto a las coordenadas de cromaticidad medidas para los tres fósforos del monitor en su nivel máximo de luminancia, damos a continuación en la tabla 5.2 varios ejemplos de tres calibrados distintos.

Calibrado	Rojo (x, y)	Verde (x, y)	Azul (x, y)
Mayo 1998	(0,625; 0,345)	(0,277; 0,603)	(0,153; 0,065)
Octubre 1998	(0,626; 0,342)	(0,273; 0,599)	(0,152; 0,060)
Febrero 1999	(0,626; 0,342)	(0,273; 0,598)	(0,153; 0,061)

Tabla 5.2. Coordenadas de cromaticidad de los fósforos del monitor obtenidas para tres calibrados del mismo.

Una vez detalladas las características de nuestro dispositivo experimental y el método seguido para su puesta a punto, explicaremos en el siguiente capítulo el método experimental utilizado para la toma de medidas y tratamiento de los datos obtenidos.

CAPÍTULO VI MÉTODO EXPERIMENTAL

Dentro de nosotros hay algo que no tiene nombre,
esa cosa es lo que somos.

José Saramago. Ensayo sobre la ceguera.

6.1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de este capítulo describiremos los estímulos presentados a los observadores y el sistema de cálculo de umbrales que hemos utilizado en las experiencias con sujetos normales. Los aspectos paralelos referidos a la parte de resultados obtenidos por un grupo de pacientes de Esclerosis Múltiple serán explicados en el capítulo IX.

En una primera parte, explicamos los puntos de partida teóricos y los procedimientos de cálculo que hemos empleado para definir los estímulos en cuanto a sus coordenadas de cromaticidad y también, dado que se trata de redes cromáticas, las líneas a lo largo de las cuales se varía la cromaticidad.

Una vez caracterizados los estímulos, en una segunda parte, describiremos el procedimiento experimental de determinación de umbrales de percepción de las redes cromáticas, y también las condiciones experimentales en las cuales se llevaron a cabo las medidas, incluyendo algunos parámetros característicos de los estímulos, como el nivel de luminancia y el tiempo de exposición.

6.2. SELECCIÓN DE LOS ESTÍMULOS DE COLOR.

6.2.1. Descripción colorimétrica básica.

Dado que uno de nuestros objetivos es estudiar el comportamiento de los canales o mecanismos neurales involucrados en la visión del color en el procesado de información espacial, es preciso contar con un modelo de visión del color que describa adecuadamente los citados mecanismos. Los modelos de visión del color que se han desarrollado en los últimos años (Boynton, 1986; Guth, 1991; De Valois y De Valois, 1993) coinciden en el planteamiento de las

dos primeras fases del procesado visual, que conciernen a la etapa receptoral y a la de mecanismos oponentes y de luminancia. Las mayores diferencias se dan en la etapa posterior, que se refiere al procesado cortical de las respuestas de los mecanismos visuales. El modelo de Guth (1991) introduce un término no lineal en esta fase, mientras que el modelo de De Valois y De Valois la divide a su vez en dos etapas. Estos dos modelos resultan apropiados en especial para describir experiencias relacionadas con la discriminación cromática, para lo cual introducen una serie de factores de cálculo en las diferentes fases, con coeficientes ajustados de forma que se reproduzcan suficientemente bien los umbrales de discriminación. Nuestro objetivo era obtener un sistema relativamente sencillo para calcular la excitación de los mecanismos de visión del color y a partir de ellos las coordenadas de cromaticidad correspondientes a cada valor de excitación. Por esta razón la opción mejor resulta la de un modelo que no introduzca demasiada complicación en los cálculos ni un número elevado de etapas. De los tres a los que nos hemos referido, el más apropiado desde este punto de vista, y además muy consolidado en la literatura del tema, es el de Boynton (Boynton, 1986).

El modelo de Boynton introduce una primera etapa en la que se involucran de forma directa las funciones de sensibilidad espectral de los tres tipos de mecanismos fotorreceptores (L, M y S). Estas funciones son las derivadas por Smith y Pokorny (1975), que mostramos normalizadas en la figura 6.1.

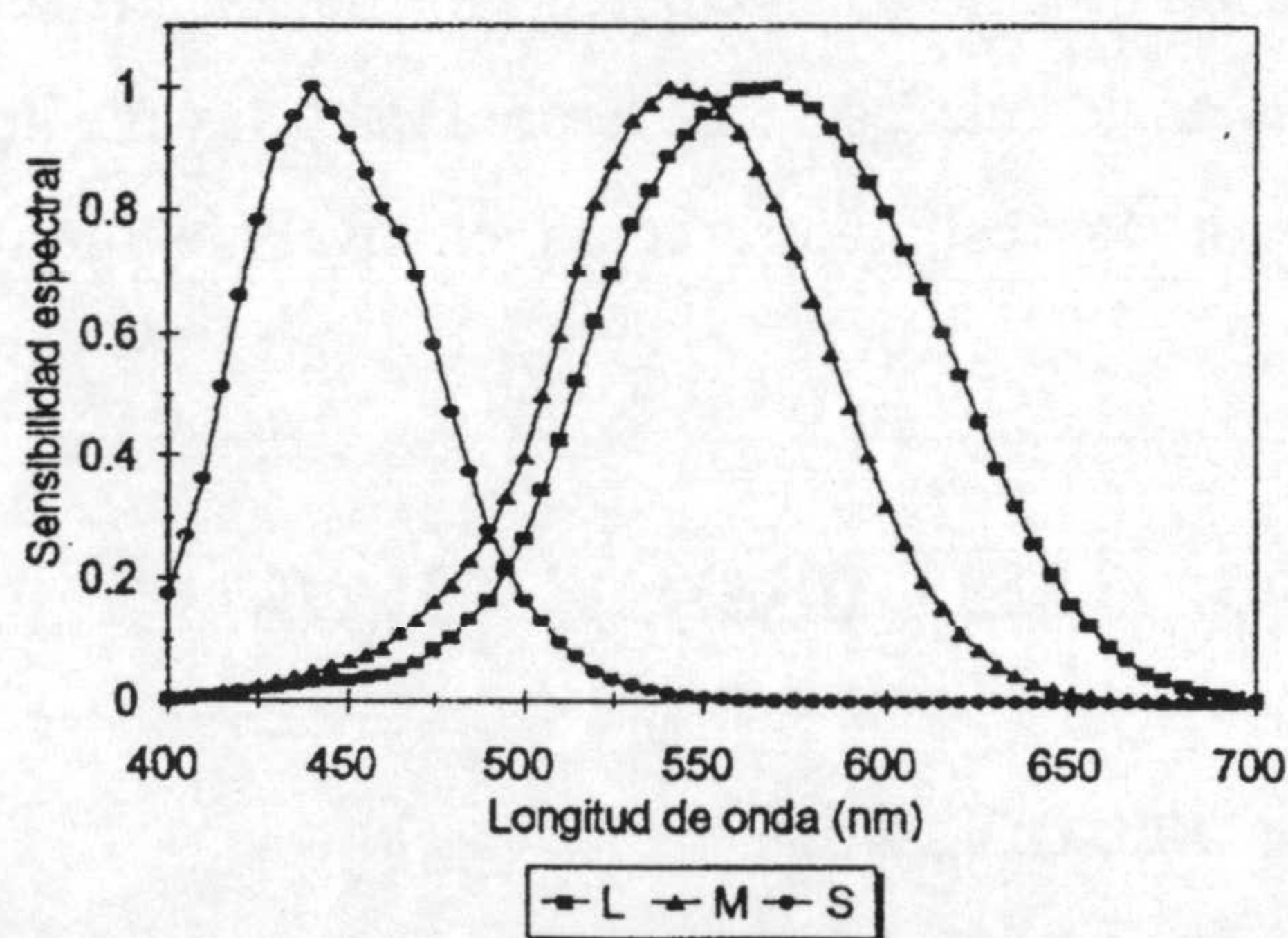


Figura 6.1. Funciones de sensibilidad espectral normalizadas de los tres tipos de conos, según Smith y Pokorny (1975).

Según el modelo de Boynton, las señales generadas por los tres tipos de conos se combinan en una segunda etapa del proceso visual para dar tres canales o mecanismos bien diferenciados:

canal de luminancia (acromático), canal rojo-verde y canal amarillo-azul (cromáticos). Los canales quedan especificados en función de las respuestas dadas por los conos de la siguiente manera:

- Canal de luminancia: definido por la señal $L + M$.
- Canal rojo-verde o r-g: se obtiene como combinación oponente de las señales dadas por los conos con máxima sensibilidad en las largas y medias longitudes de onda, $L - 2M$.
- Canal amarillo-azul o y-b: alimentado por la combinación oponente $(L + M) - S$. En nuestro caso, dado que se trata sólo de una cuestión de criterio de signos y nos resulta más cómodo, adoptamos la versión del canal amarillo-azul con signo opuesto, es decir, $S - (L+M)$, que llamaremos b-y.

Un esquema de los diferentes mecanismos se muestra en la figura 6.2. De esta forma, cuando el valor de excitación del cono L supera el valor $2M$, el canal r-g dará una respuesta o salida positiva, que será interpretada en un punto posterior del procesado visual como sensación asociada al color *rojo*. Si este canal genera a su salida un valor negativo, la señal será interpretada como *verde*. En la figura 6.2, se observa también la existencia de una contribución de los conos S al canal r-g, indicada por la línea discontinua, aunque su influencia es muy pequeña y de hecho no se tiene en cuenta a la hora de cuantificar la respuesta de este canal.

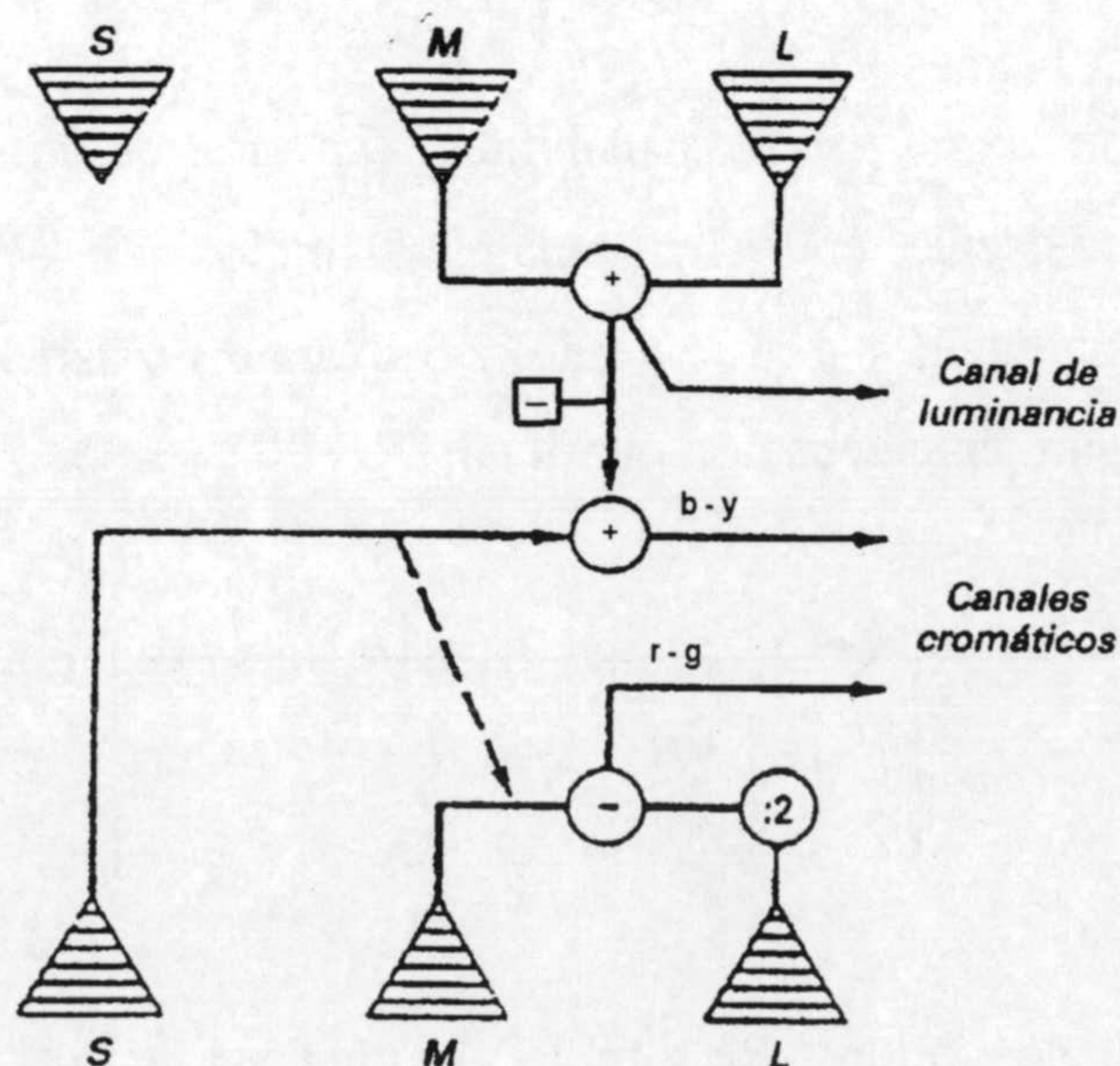


Figura 6.2. Esquema del modelo basado en el de Boynton (1986) que utilizamos en nuestras experiencias.

El canal amarillo-azul, según la modificación de signos explicada anteriormente, compara la señal generada por la excitación del cono S, con signo positivo, con la señal asociada a la suma (L + M), de signo negativo. De este modo, cuando los conos S son poco estimulados, como es el caso en el procesamiento de estímulos espectrales en las largas y medias longitudes de onda, este canal da a su salida un valor negativo, que es interpretado por el sistema visual como sensación asociada al *amarillo*. Si en cambio los conos S son altamente estimulados, caso de estímulos espectrales en las cortas longitudes de onda, el canal amarillo-azul generará una señal positiva que será interpretada como *azul*. El tono que finalmente se asignaría a un estímulo de color vendría dado entonces por la comparación relativa entre las señales generadas por los dos canales cromáticos.

El canal de luminancia se considera que no recibe contribución de los conos S, y genera su señal a partir de la suma de las respuestas proporcionadas por los conos L y M.

Las respuestas L, M y S generadas por los sistemas de conos se calculan, para un estímulo de radiancia espectral R_λ a partir de las expresiones:

$$\begin{aligned} L &= \int_{\text{vis}} R_\lambda L_\lambda d\lambda \\ M &= \int_{\text{vis}} R_\lambda M_\lambda d\lambda \\ S &= \int_{\text{vis}} R_\lambda S_\lambda d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

donde L_λ , M_λ y S_λ son las curvas de sensibilidad espectral de conos propuestas por Smith y Pokorny (1975). La relación entre los canales definidos por el modelo de Boynton, que denotaremos **lum** (luminancia), **r-g** (rojo-verde) y **b-y** (amarillo-azul), con los valores triestímulo puede resumirse en la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,008 & 2,1417 & 0,2119 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1,0001 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{lum} \\ \text{r-g} \\ \text{y-b} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde (X', Y', Z') son los valores triestímulo calculados a partir de las funciones de mezcla modificadas por Judd (1951). Esta ecuación se obtiene de multiplicar la matriz 3x3 que relaciona los valores triestímulo (X', Y', Z') con los valores de excitación de conos (L, M y S, expresados en cd/m^2) por la que relaciona éstos últimos con (lum, r-g, b-y), en base a la definición de las

respuestas de los tres mecanismos que hemos detallado antes. Esta ecuación matricial permite pasar de cualquier terna de valores de excitación de canales a los correspondientes valores triestímulo (X', Y', Z'). A partir de los valores triestímulo podemos calcular las correspondientes coordenadas de cromaticidad de Judd (x_j, y_j), según muestra la ecuación siguiente.

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{X'}{X' + Y' + Z'} \\ y_j &= \frac{Y'}{X' + Y' + Z'} \end{aligned} \quad (3)$$

Como nuestro dispositivo experimental nos permite trabajar en el espacio CIE 1931, el último paso que debemos realizar es la transformación de las coordenadas de cromaticidad de Judd en las CIE 1931, mediante las ecuaciones que relacionan (x_j, y_j) con (x, y) del diagrama CIE 1931 (Wyszecky y Stiles, p. 826, 1982). Obtenemos así los valores de coordenadas de cromaticidad que proporcionaremos como entrada al programa de generación de estímulos.

También nos interesa para los cálculos iniciales poder realizar la transformación a la inversa, es decir, pasar de coordenadas CIE 1931 (x, y, Y) a valores de excitación de canales (lum, r-g, b-y). Esta transformación inversa es bastante sencilla una vez conocida la anterior, pues basta recorrer a la inversa los mismos pasos; así, a partir de las coordenadas CIE 1931 obtendríamos las correspondientes de Judd (1951) aplicando la transformación inversa, y los valores triestímulo, operando del modo siguiente:

$$\begin{aligned} X' &= x_j \cdot \frac{Y}{y_j} \\ Z' &= \frac{Y}{y_j} - X_j - Y \end{aligned} \quad (4)$$

A partir de estos valores triestímulo (X', Y', Z'), con $Y' = Y$, basta invertir la matriz de la ecuación de cambio ya detallada antes, y obtendremos los correspondientes valores de excitación de canales (lum, r-g, b-y).

6.2.2. Definición de contraste cromático.

En el capítulo III, dedicado a la revisión de los trabajos más relevantes sobre visión espacial con redes cromáticas, explicamos algunas de las definiciones de contraste cromático adoptadas por los distintos grupos de autores. Nuestra selección de estímulos, condicionada por la elección del modelo de Boynton, requiere una definición de contraste cromático nueva, puesto que las utilizadas en los estudios anteriores estaban diseñadas para responder a las condiciones experimentales propias de cada uno de los trabajos.

A la hora de elaborar dicha definición, partiremos de dos líneas de trabajo que se cruzan en el equienergético en el espacio de representación del color (espacio de excitación de canales), líneas que consideramos clave o básicas en nuestro planteamiento previo de las experiencias: la rojo-verde o de excitación amarillo-azul constante (en el nivel calculado para el estímulo equienergético, a luminancia constante en el canal b-y, según las transformaciones explicadas anteriormente), y la amarillo-azul o de excitación rojo-verde constante (en el nivel correspondiente del canal r-g para el equienergético). Según el modelo de Boynton, si nos movemos con luminancia constante en estas líneas estaríamos aislando uno de los canales cromáticos que intervienen en el procesado visual. En la figura 6.3, se han representado estas líneas en el diagrama de excitación de canales y en el diagrama de cromaticidad CIE 1931. En este último espacio, las líneas las hemos obtenido ajustando por mínimos cuadrados una serie de 50 puntos en cada una de ellas, obtenidos primero en el diagrama de excitación de canales y posteriormente en el CIE 1931, mediante el proceso que explicamos en el apartado anterior.

Es interesante señalar que las ecuaciones sobre el diagrama CIE 1931 de estas dos líneas son muy similares a las correspondientes propuestas por Boynton (1986), que se obtienen uniendo el equienergético con los puntos de confusión deután (1,0) y tritán (0,175, 0) respectivamente. Boynton (1986) ya señala una pequeña diferencia entre las líneas de confusión que propone y las propuestas por la CIE (Wyszecky y Stiles, 1982), debido a que Boynton utiliza las funciones de mezcla modificadas de Judd (1951), diferencia que considera despreciable en la zona central del diagrama. El hecho de calcular las líneas rojo-verde y amarillo-azul por un procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados en vez de tomar directamente las propuestas por Boynton sirve de corroboración adicional de nuestro procedimiento de cálculo. A continuación mostramos las ecuaciones correspondientes a cada una de estas líneas sobre el CIE 1931.

- Línea r-g: $y = -0,508x + 0,503$
- Línea r-g Boynton (1986): $y = -0,5x + 0,5$
- Línea b-y: $y = 2,109x - 0,370$
- Línea tritán Boynton (1986): $y = 2,105x - 0,369$

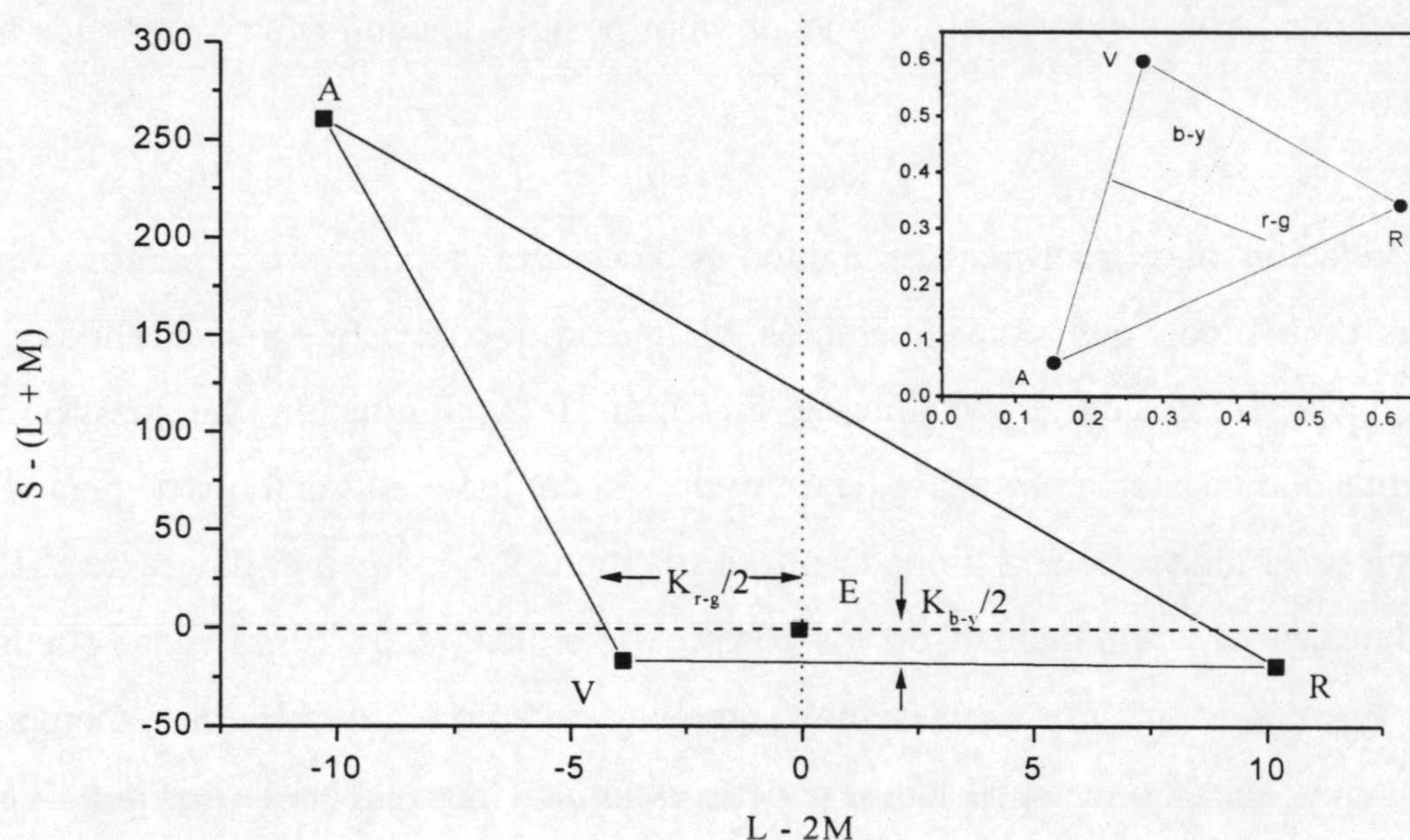


Figura 6.3. Líneas base (rojo-verde y amarillo-azul) en el diagrama de excitación de canales y en el diagrama CIE 1931 (figura interna), con el triángulo formado por los fósforos (rojo, verde y azul) del monitor. Los puntos de corte de ambas líneas con el triángulo determinan los valores de las constantes que forman parte de la definición de contraste cromático, según se explica con posterioridad. La excitación de los canales está expresada en cd/m^2 .

Definiremos un contraste cromático en cada uno de los ejes en función de la excitación del canal correspondiente, pero sin realizar después ninguna operación para intentar obtener una cantidad única a partir de ambos contrastes cromáticos. Por tanto, los mantendremos siempre, en principio, por separado. Si nos planteamos trabajar con una línea cualquiera que pase por el equienergético, que no sea la rojo-verde o la amarillo-azul, una pareja de puntos en esta línea tendría asociados dos contrastes cromáticos, uno para cada eje en el espacio de excitación de canales. Hemos preferido mantener esta separación porque así evitamos realizar cálculos combinando magnitudes correspondientes a canales distintos, que en principio no resultan

comparables, por lo que no sería coherente obtener un valor combinado a partir de los contrastes cromáticos de ambos canales.

Además de esto, entendemos que el contraste debe cumplir dos requisitos para resultar lo más intuitivo posible: el primero, estar normalizado a la unidad, de forma que a los puntos de máximo contraste les corresponda dicho valor unidad en cada eje; el segundo, que al equienergético le corresponda un valor cero de contraste, pues cuanto más próximos estén dos puntos de una línea dada al mismo, más difícil resultará distinguir la red que los tenga por extremos y, por tanto, es lógico que el menor valor posible de contraste corresponda al estímulo acromático.

Con relación al primer requerimiento, es necesario delimitar los puntos sobre ambos diagramas cromáticos que consideraremos de máximo contraste en cada línea. Para ello, debemos tener en cuenta especialmente el factor de la limitación de nuestro dispositivo experimental como sistema productor de estímulos. El conjunto más extenso de puntos que podía generar nuestro monitor estaba limitado por el triángulo formado en el diagrama CIE 1931 por las coordenadas de cromaticidad de los fósforos excitados al máximo. Esto supone que en cualquier línea en la que nos moviésemos sobre el diagrama (en nuestro caso siempre pasando por el equienergético), nunca podríamos generar estímulos más allá de los dos puntos de corte de dicha línea con el triángulo de los fósforos excitados al nivel de luminancia de trabajo. Este factor de arbitrariedad en la definición de contraste, aunque en algunos trabajos no se explicita (tal es el caso de los estudios de Losada y Mullen (1994) y Mullen y Losada (1994)), siempre está presente cuando se trabaja con monitores CRT Color como generadores de estímulos. Así pues, en nuestros dos ejes base las parejas de puntos de corte de las líneas r-g y b-y con las líneas del triángulo de los fósforos deben tener contraste unidad.

Respecto al segundo requerimiento, surge otra cuestión importante en la definición de contraste: es interesante obtener una definición que resulte centrada en el equienergético en el diagrama de excitación de canales, o sea, que a un lado y a otro de la línea se recorra la misma distancia en excitación. Esto condiciona, dada la falta de simetría de las líneas que conforman el triángulo de los fósforos con el equienergético (éste no es equidistante de los dos puntos de corte con el triángulo para ninguno de los dos ejes), que sólo aprovechemos completamente las posibilidades del dispositivo en uno de los extremos de cada eje, el que alcance el triángulo con

un menor valor de excitación del canal correspondiente. En la figura 6.3, se señala con flechas el extremo de cada línea que llega al triángulo de fósforos con menor valor de excitación.

Con estas premisas (normalización a la unidad y simetría con respecto al equienergético), la definición de contraste adoptaría la siguiente fórmula general:

$$C_i = \frac{Ex_{i1} - Ex_{i2}}{K_i} \quad (5)$$

$$K_i = 2(E_{exi} - E_{eqi})$$

donde Ex_{i1} y Ex_{i2} son los valores de excitación del canal i correspondiente para la pareja de puntos de la línea r-g o b-y para la cual se calcula el contraste, y K_i es la constante que se introduce para cumplir el requisito de normalización. Como mostramos en la figura 6.3, esta constante se calcula como el doble de la diferencia de excitación del canal i entre el equienergético (E_{eqi} en la ecuación 5) y el punto extremo de la línea que corta al triángulo con el menor valor de excitación de canal i (E_{exi} en la ecuación 5). El otro punto extremo de la línea queda de esta forma también determinado, dado el requisito de simetría que le exigimos a la definición de contraste cromático. Con esta definición, podemos comprobar que en los puntos extremos de cada línea toma el valor unidad (pues entonces $Ex_{i1} - Ex_{i2}$ es igual a K_i), y también que si los dos extremos coinciden con el equienergético, el contraste toma valor cero. De la definición y del hecho de que los valores de excitación pueden ser tanto positivos como negativos, se desprende que el contraste cromático puede adoptar valores negativos. A modo de ejemplo, se incluyen en la figura 6.4 dos redes cromáticas de diferente contraste. Puede observarse que se percibe con bastante menos claridad la red de menor contraste.

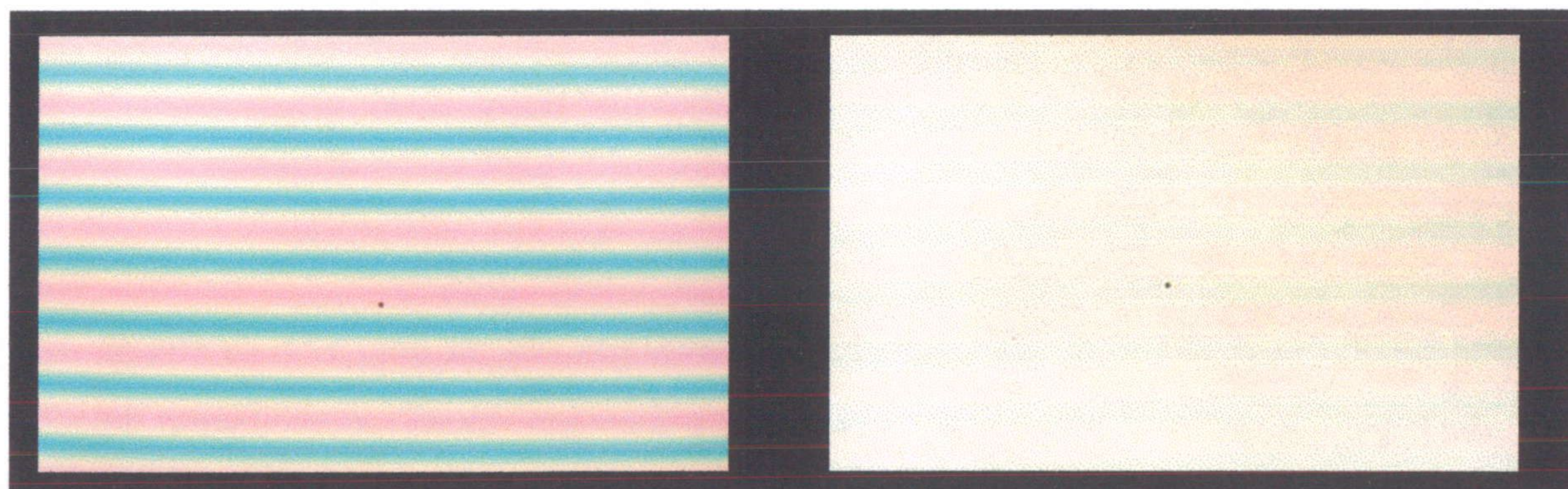


Figura 6.4. Ejemplos de redes cromáticas rojo-verde de contraste unidad (izquierda) y 0,3 (derecha).

6.2.3. Líneas intermedias. Condicionantes sobre la definición de contraste.

En el planteamiento de nuestras experiencias hacíamos referencia al propósito de estudiar la sensibilidad al contraste en líneas que excitasen a la vez ambos canales cromáticos, con un doble propósito:

- Obtener las curvas de sensibilidad al contraste en un rango de frecuencias para varias de estas líneas.
- Ver si a partir de ellas puede extraerse información sobre la posible interacción entre ambos canales a nivel subumbral.

Para llevar a la práctica el primer objetivo, necesitábamos un criterio para escoger unas determinadas líneas entre todas las posibles. Nos pareció razonable tomar inicialmente las dos líneas para las cuales en cada uno de sus puntos se verificaran las dos siguientes condiciones sobre el contraste cromático:

Línea 1: $C_{r-g} = C_{b-y}$

Línea 2: $C_{r-g} = - C_{b-y}$

De esta forma, ya que cada punto de la línea estimula simultáneamente los dos canales cromáticos, podemos estudiar los efectos sobre la sensibilidad r-g de añadir la misma cantidad de contraste b-y, y también, de igual manera, los efectos sobre la sensibilidad b-y de añadir contraste r-g en la misma proporción en cuanto a valores numéricos. El hecho de añadir iguales cantidades de contraste cromático no implica que sobre el diagrama de excitación de canales (ver figura 6.5) nos estemos moviendo en una de las bisectrices (es decir, que trabajemos con estímulos que exciten en la misma cuantía el canal r-g que el b-y), puesto que en la definición de contraste interviene la constante normalizadora K_i que adopta un valor distinto para el canal r-g que para el b-y.

Para calcular la ecuación de las líneas, bastaba entonces asignar una serie de 50 valores de contraste cromático iguales r-g e b-y de 0 a 1, y determinar los valores de excitación de ambos canales para los dos puntos correspondientes a cada pareja de valores de contraste. Esto se realiza a partir de la ecuación (5), tanto para r-g como para b-y, teniendo en cuenta que la definición del mismo es simétrica con respecto al equienergético. Así pues, para calcular los dos

valores de excitación correspondientes se utiliza la siguiente expresión, particularizando para cada canal en su caso:

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{i1} &= \text{Ex}_{\text{eqi}} + K_i \cdot C_i \\ \text{Ex}_{i2} &= \text{Ex}_{\text{eqi}} - K_i \cdot C_i \end{aligned} \quad (6)$$

Una vez que hemos calculado los valores de excitación de r-g y b-y para cada pareja de puntos, basta ajustar por mínimos cuadrados para obtener la ecuación de cada línea en el diagrama de excitación de canales. Posteriormente, se obtienen los puntos correspondientes en el diagrama CIE 1931 y se vuelve a ajustar por mínimos cuadrados. Las ecuaciones de las rectas en ambos diagramas se muestran a continuación, así como las gráficas también en ambos espacios (figura 6.5).

Línea 1 (Excitación de canales):	$b-y = 3,732 \cdot (r-g) - 0,609$
Línea 1 (CIE 1931):	$y = -3,331x + 1,443$
Línea 2 (Excitación de canales):	$b-y = -3,732 \cdot (r-g) - 1,094$
Línea 2 (CIE 1931):	$y = 0,386x + 0,205$

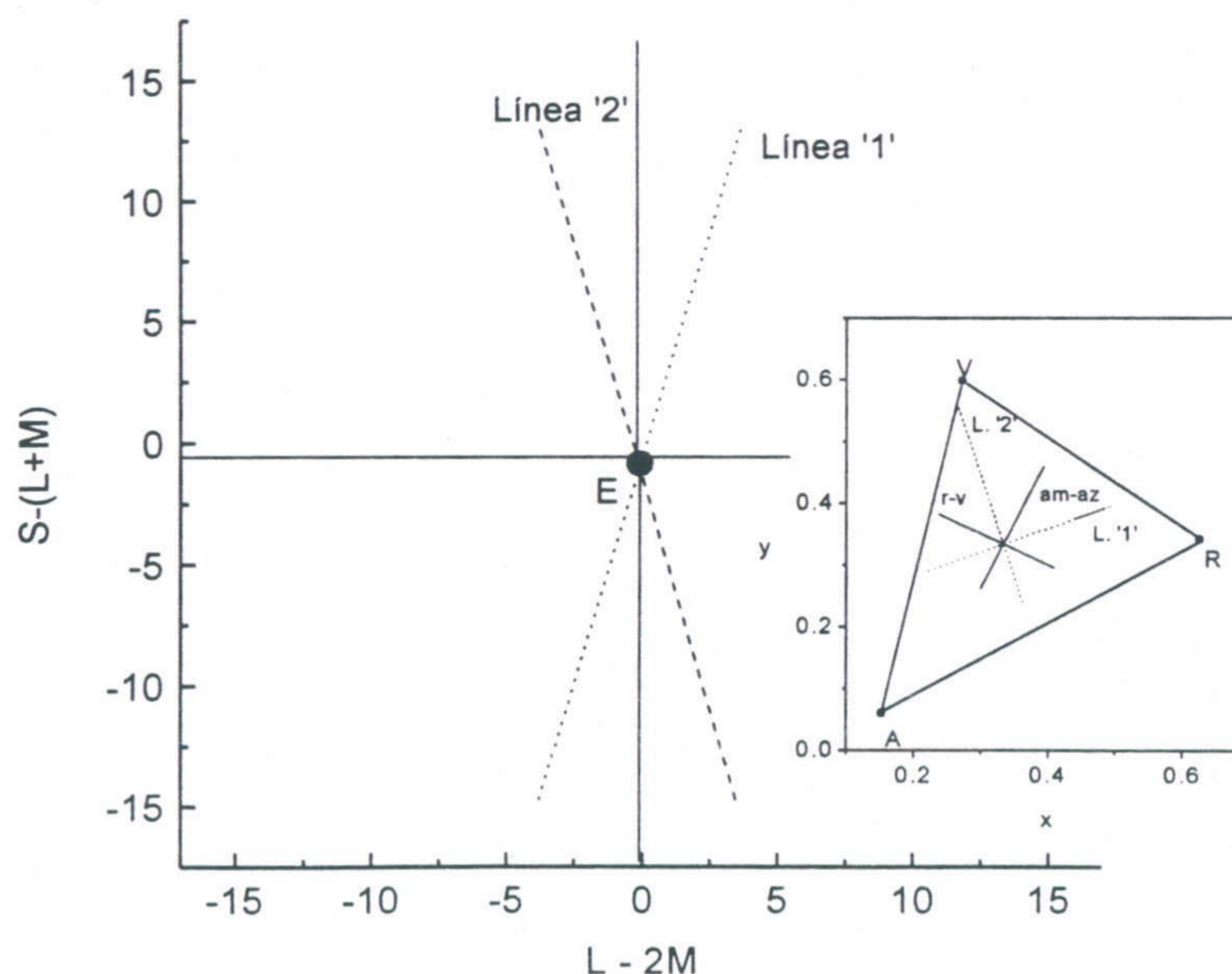


Figura 6.5. Líneas intermedias y de referencia en el diagrama de excitación de conos y en el diagrama CIE 1931 (figura interna). La excitación de canales se expresa en cd/m^2 .

En la figura 6.5 es interesante resaltar el hecho de que la línea 1 llega a cortar el triángulo de fósforos para un valor de contraste menor que el resto de líneas, lo que condicionó el que tuvieran que reducirse adicionalmente los valores extremos de excitación accesibles para ambos canales, con el fin de mantener el requisito de normalización en la definición de contraste. Esto solamente supone cambiar las constantes K_i de la ecuación (5) por otras de valor un poco menor, que denotaremos K'_i . Así pues, la definición de contraste queda de la siguiente forma:

$$C_i = \frac{Ex_{i1} - Ex_{i2}}{K'_i} \quad (7)$$

Los valores de K'_i para los dos canales son entonces:

$$K'_{r-g} = 7,52 \text{ cd/m}^2.$$

$$K'_{b-y} = 28,07 \text{ cd/m}^2.$$

En la figura 6.5, realizada en base a esta nueva definición de contraste, podemos ver que de hecho sólo la línea 1 llega a cortar el triángulo de fósforos, y los extremos de contraste unidad de las otras tres líneas se sitúan dentro del triángulo pero sin rozar los lados.

Para la parte aplicada del proyecto, por razones de conveniencia, esta definición de contraste se ve modificada como explicaremos en el capítulo correspondiente a la presentación de los resultados obtenidos.

Como ejemplo de los estímulos utilizados en las cuatro líneas citadas, presentamos en la figura 6.6 cuatro redes cromáticas de frecuencia 1,0 cpd y contraste unidad, cada una correspondiente a una línea de las utilizadas para medir la CSF. Como puede apreciarse en la figura, la orientación de las redes es siempre fija en horizontal, lo cual estaba motivado por las especiales características del sistema generador de estímulos sinusoidales de nuestro controlador de gráficos. Dado que la orientación de las redes puede influir sobre los valores de sensibilidad obtenidos (Campbell y Kulikowski, 1966), resulta más adecuado fijar este parámetro cuando se trata de determinar umbrales de detección de redes cromáticas.

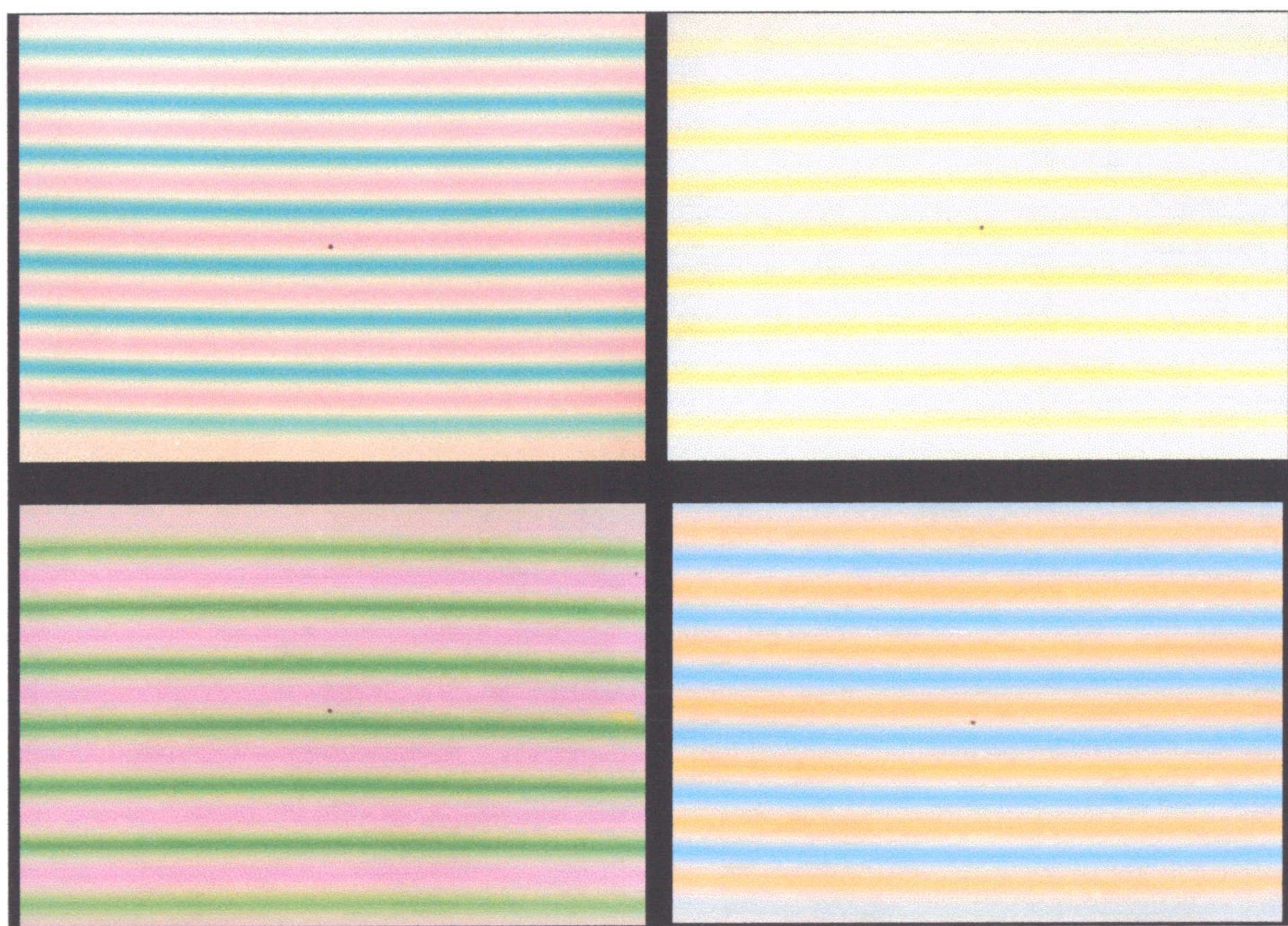


Figura 6.6. Ejemplos de redes sinusoidales de frecuencia 1,0 cpd y contraste unidad para el eje rojo-verde (arriba izquierda), amarillo-azul (arriba derecha), línea '1' (abajo izquierda) y línea '2' (abajo derecha).

6.2.4. Selección de estímulos para la técnica de sumación subumbral.

En cuanto a la parte de sumación subumbral, el procedimiento para la obtención de los estímulos de color es similar, teniendo en cuenta que ya no debemos imponer una determinada relación fija entre los contrastes correspondientes a ambos canales. El procedimiento a seguir para aplicar esta técnica implica que se combinan cantidades variables de contraste subumbral de cada uno de los canales cromáticos, es decir, partimos de una serie de pedestales fijos por debajo del umbral de detección en uno de los canales y vamos añadiendo contraste en el otro canal al estímulo hasta que éste sea percibido por el observador. Una diferencia importante con respecto la técnica de determinación de CSF es que se utilizan unidades umbral de contraste, de forma que es necesario previamente determinar los umbrales de sensibilidad de cada canal, y luego reescalar todos los valores de contraste que se utilicen como estímulos.

Así pues, previamente fijamos una serie de pedestales subumbral fijos para cada canal (en nuestro caso ocho valores entre 0 y 0,9 en unidades umbral), y calculamos los valores de excitación (mediante la ecuación 6) y las coordenadas de cromaticidad correspondientes de una

serie de parejas de puntos con cada pedestal, que resultan de combinar el pedestal con un rango variable de contrastes en el otro canal que va de 0 a 1,5 en unidades umbral. Por ejemplo, tomamos un valor de 0,2 unidades umbral como pedestal r-g, y luego vamos calculando un conjunto de 26 parejas de puntos, comenzando por un valor 0 de contraste b-y y aumentando cada vez en 0,06 unidades umbral b-y, hasta alcanzar 1,5 unidades umbral. El observador determina qué valor de contraste b-y es necesario añadir a 0,2 unidades umbral r-g para que pueda percibir la red.

6.3. DETERMINACIÓN DE LA ISOLUMINANCIA.

Dado que pretendemos trabajar estimulando exclusivamente los canales cromáticos, es esencial aislarlos adecuadamente, es decir, garantizar que no se estimula el canal de luminancia en ninguno de los estímulos que presentemos a los observadores. Para conseguirlo, existen varios métodos que se han utilizado en trabajos sobre sensibilidad al contraste cromático, como el de fotometría de parpadeo heterocromática (**HFP** en siglas inglesas) utilizado, por ejemplo, por Van der Horst y Bouman (1969), Granger y Heurtley (1973) y Gur y Akri (1992). Consiste en presentar con una frecuencia temporal entre 10 y 20 Hz dos estímulos alternados, uno el equienergético de referencia y otro uno de los colores que forman la pareja cuya isoluminancia se quiere determinar. Variando la luminancia del estímulo de color respecto del blanco, se llega a una sensación mínima de parpadeo. Se anota entonces la luminancia del color y se procede de igual modo con el otro color de la pareja. Asumiendo que las igualaciones heterocromáticas son transitivas, los dos valores medidos de luminancia para la pareja de colores serían entonces su correspondiente razón de isoluminancia.

Mullen (1985) utiliza un procedimiento bastante más complejo, que supone determinar los umbrales para un conjunto de proporciones rojo-verde variables para cada frecuencia y seleccionar aquella proporción que de un umbral de sensibilidad menor. El mismo procedimiento se sigue para el otro canal, con proporciones variables esta vez de amarillo y azul.

En los trabajos más recientes, el grupo de la Dra. Mullen se decanta por el método de mínimo movimiento percibido (Mullen *et al.*, 1997; Mullen y Sankeralli, 1999). Este sistema consiste en presentar una red de contraste determinado en movimiento continuo, y variar la luminancia de los puntos que conforman los extremos hasta que el sujeto percibe una sensación mínima de movimiento de la red (Anstis y Cavanagh, 1983). Tiene la ventaja de que las

condiciones espaciales y temporales del estímulo que se usa para determinar isoluminancia pueden asimilarse a las del experimento. Si en el experimento se utilizan redes estáticas, se determina la isoluminancia con redes en movimiento lento, de unos 4Hz (recordemos que mover una red es equivalente a hacerla parpadear con una determinada frecuencia temporal).

En nuestro caso, utilizamos el método más clásico de fotometría de parpadeo heterocromática, para el que el blanco de referencia (equienergético en nuestra experiencia) juega un papel importante, cosa que nos parecía interesante, pues también en nuestro experimento todas las líneas se organizan en torno al mismo. La frecuencia temporal escogida fue de 20 Hz, y para tomar las medidas de cada pareja de puntos se procedió de la siguiente forma:

- 1) Se fijó un nivel de luminancia de $21,50 \text{ cd/m}^2$ para el equienergético (sobre el por qué de este nivel trataremos más adelante).
- 2) Para el primer punto de la pareja, se fijó un nivel de luminancia de partida por debajo del de referencia (de $18,50 \text{ cd/m}^2$ para la primera medida, luego se variaba aleatoriamente), y se midió tres veces el valor de luminancia para el que se percibía el mínimo parpadeo. A la media de las tres medidas la denotamos por L_1 .
- 3) Se fijó un nivel de luminancia por encima del de referencia (de $24,50 \text{ cd/m}^2$ para la primera medida, luego se variaba al azar), y se tomaron tres medidas del valor de mínima percepción de parpadeo. A la media de las tres medidas la denotamos por L_2 .
- 4) A partir de estos dos valores, que marcan el intervalo de percepción de mínimo parpadeo, la isoluminancia para el punto dado se calcula como la media de L_1 y L_2 .
- 5) Se realiza el mismo procedimiento para el otro punto de la pareja.

Al realizar las medidas de isoluminancia, comprobamos que bastaba con tomar seis parejas de puntos para cada línea, pues conforme el contraste disminuía, la isoluminancia tendía progresivamente a alcanzarse para valores cada vez más próximos al nivel de referencia ($21,50 \text{ cd/m}^2$). A partir de un contraste cromático de aproximadamente 0,09 en r-g, b-y o ambos, según la línea de que se trate, ambos extremos de la red se veían como isoluminantes para el nivel de referencia. El procedimiento que adoptamos fue entonces el de determinar la isoluminancia para estos seis puntos (de contrastes: 1,0; 0,85; 0,6; 0,4; 0,2; 0,09) y si efectivamente para 0,09 se alcanzaba en ambos puntos un nivel de referencia, para el resto de puntos de contraste inferior de la línea se mantenía éste y para los puntos de contraste superior se calculaba la isoluminancia

interpolando a partir de las cinco medidas experimentales. El resultado más significativo, según nuestro punto de vista, es el que se refiere a que se alcanza la isoluminancia en condiciones de equiluminancia para un cierto rango de contrastes, que posteriormente veremos que cubre toda la zona de umbrales para los distintos observadores. Esto resulta bastante lógico si pensamos que de otro modo (es decir, con valores distantes de la luminancia de referencia para los dos extremos de la red), cuando el contraste del estímulo fuera lo bastante bajo para que no se percibiese diferencia de color, la detección de la red se basaría entonces en variaciones percibidas de luminancia y no de cromaticidad.

6.4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL.

En la elección de un método experimental entendemos que deben resultar prioritarios una serie de factores, que detallamos a continuación por orden de importancia creciente:

- Suficiente eficacia, es decir, que permita obtener un número razonable de umbrales por sesión sin que ésta se alargue excesivamente, pues entonces la fatiga del observador sería un factor importante en cuanto a que bajaría el rendimiento significativamente hacia el final de la sesión.
- Fiabilidad, aunque este concepto adquiere un carácter muy relativo para las medidas de tipo psicofísico, en las que es inevitable una variabilidad inherente a los cambios en las condiciones del observador durante el período que dure la toma de medidas, como estados de ánimo variables, calidad del sueño la noche anterior a la medida, etc. El impacto sobre los resultados de esta variabilidad puede minimizarse tomando las medidas en diferentes días y a distintas horas, promediando así las distintas condiciones del observador. Entendemos entonces que basta con que el método nos proporcione para la mayoría de las condiciones experimentales un error estándar aceptable sin tener que realizar un número muy elevado de medidas (de 3 a 6 sería suficiente).
- Imposibilidad de control por parte del observador del desarrollo de la sesión, es decir, que el sujeto no sea nunca capaz de seguir el progreso de sus respuestas que conduce a la determinación del umbral, ni que éste quede determinado en base a criterios fijados por el propio sujeto, como sucede por ejemplo en las experiencias de discriminación cromática con campo bipartito y método 2 AFC (elección forzosa entre dos alternativas), en las que el sujeto dice si las

dos mitades del campo son iguales o no según su propio criterio (Boynton y Kambe, 1980). En el extremo opuesto está el método desarrollado por Krauskopf y Gegenfurtner (1992), en el que se presentan al sujeto cuatro círculos de los que sólo uno contiene un estímulo distinto del resto, su tarea consiste entonces en localizar el estímulo diferente o bien, en caso de que no sea capaz de apreciar diferencia, señalar una de las cuatro posiciones al azar.

En vista de las consideraciones anteriores, hemos optado por un método que denotamos "*triple escalera entrelazada con doble elección forzosa (2 AFC) temporal*". Consiste en presentar al sujeto una serie de estímulos correspondientes a tres determinaciones de umbral diferentes (por ejemplo, tres frecuencias espaciales diferentes) de forma entrelazada, es decir alternando aleatoriamente las presentaciones de las frecuencias, así el sujeto es incapaz de seguir el desarrollo de una concreta de las tres medidas. La segunda parte del nombre del método, "2 AFC temporal", hace referencia al sistema utilizado para obtener la respuesta del sujeto: se presentan siempre dos estímulos en dos intervalos de tiempo uno a continuación del otro; uno de los estímulos es una red cromática, y el otro un fondo equienergético uniforme. Se pide al sujeto que señale en qué intervalo de tiempo se ha presentado la red (que cambia aleatoriamente de intervalo en cada presentación), si en el primero o en el segundo, y que responda al azar si no ha sido capaz de detectar la red.

Como puede deducirse también de la denominación del método, el sistema para determinar la posición del umbral es el ya clásico y de amplísimo uso llamado de escalera o "staircase" (Cornsweet, 1962), que se basa en ir variando los estímulos que se presentan al sujeto según las respuestas que proporciona. Se parte de un estímulo determinado (preferentemente en la zona que consideremos supraumbral a priori), y si efectivamente el sujeto va dando respuestas acertadas, se va acercando el estímulo al de referencia (en nuestro caso, disminuyendo el contraste cromático) hasta que el sujeto comienza a dar respuestas incorrectas; en este punto, se vuelve a alejar el estímulo del de referencia hasta que el sujeto vuelva a acertar en la tarea, y el proceso se repite un número determinado de veces que cambia con las diversas variantes del método. A los puntos de cambio de tendencia, es decir, aquellos en los que el sujeto pasa de acertar a dar respuestas equivocadas o viceversa, se les denota "reversals" o puntos de inversión. El umbral se obtiene como la media de un número determinado de puntos de inversión. El procedimiento más utilizado (Mullen *et al.*, 1997; Mullen y Sankeralli (1999)) consiste en obtener un número total de 8 puntos de inversión, y determinar el umbral como la media de los últimos cuatro obtenidos.

En nuestro caso, esto supondría alargar bastante la duración de las sesiones, y dado que hemos observado en sesiones experimentales previas de prueba del método que la mayor variación de valores suele producirse en los dos primeros puntos de inversión, hemos optado por obtener un total de 6 puntos de inversión por cada escalera, y calcular el umbral como la media de los valores de contraste correspondientes a los cuatro últimos puntos. Para las medidas de umbral de CSF cromática, se realizan dos determinaciones de umbral para cada frecuencia, representándose en la curva la media de ambas medidas.

Otra cuestión importante es el peso diferente que debe darse a las respuestas acertadas frente a las equivocadas, o dicho de otro modo, sabemos que cuando el sujeto da una respuesta equivocada es siempre porque no ha sido capaz de detectar el estímulo para diferenciarlo del de referencia; pero debemos asegurarnos de que cuando acierta es porque de verdad ha sido capaz de discriminar el estímulo y no por una cuestión de fortuna en la elección de las alternativas posibles. Por eso, cuando el sujeto da una respuesta acertada, en la siguiente presentación correspondiente a la escalera de que se trate se vuelve a presentar otra vez el mismo estímulo, y exigimos siempre dos aciertos seguidos para considerar la respuesta como válida.

El estudio posterior de las escaleras obtenidas para los tres estímulos que se presentan en cada sesión permite también apreciar si se han producido efectos de cansancio hacia el final de la misma, pues en ese caso los puntos de inversión finales se situarían a niveles bastante por encima del resto. Aquellas medidas para las que se apreciaron estos efectos fueron repetidas en otras sesiones posteriores, obteniéndose de nuevo toda la escalera completa. En la figura 6.6 se muestran dos ejemplos de escaleras obtenidas a lo largo de la toma de medidas. Puede observarse que en ordenadas aparecen valores enteros, que corresponden al orden del punto que se presenta en el fichero que contiene los diferentes valores de coordenadas de cromaticidad y el ajuste de isoluminancia para los distintos valores de contraste (50 en total) de la línea en cuestión. Posteriormente, a partir de los valores enteros obtenidos como resultado directo de la toma de medidas, se calculaban los correspondientes valores de contraste, interpolando linealmente cuando el valor obtenido como media de los últimos cuatro reversals no resultaba entero.

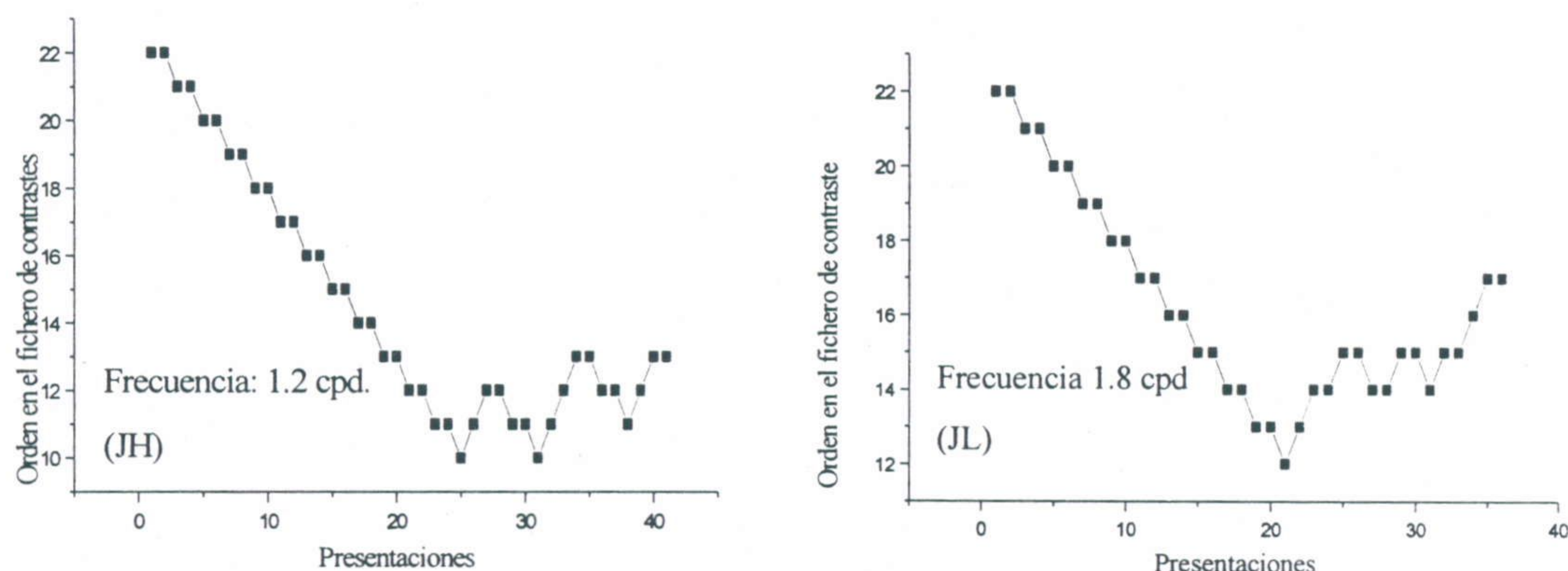


Figura 6.6. Ejemplos de escaleras de contraste obtenidas durante el desarrollo de las sesiones de medida. En la parte de la derecha de la figura, puede verse el efecto de elevación del umbral debido probablemente a fatiga temporal del observador.

Para la parte aplicada del trabajo, dado que trabajamos con pacientes de Esclerosis Múltiple sujetos a síntomas que disminuyen su capacidad de resistencia y concentración, resulta deseable que las medidas se desarrollen en un período de tiempo lo más corto posible y con un número de sesiones lo más reducido posible. Por esta razón, hemos implementado un método más rápido, que describimos en el capítulo IX.

6.4.1. Observadores.

Para la parte del trabajo relativa a CSF cromática y sumación subumbral, que supone la realización de un número muy elevado de sesiones experimentales y un grado bastante elevado de especialización de los observadores, hemos optado por dos integrantes del Departamento de Óptica. Ambos tenían una extensa experiencia en la realización de medidas de determinación de umbrales e igualaciones colorimétricas, y muy amablemente se prestaron a ponerse a nuestra disposición para realizar la larga serie de medidas. Durante el período de envejecimiento del monitor, ambos realizaron una serie de sesiones de entrenamiento para asegurar que no se produjesen variaciones en los umbrales debidas al efecto de mejora por aprendizaje. Dos observadores es el número más frecuentemente utilizado en experiencias psicofísicas de visión del color (Ronchi, 1963), dado que como en nuestro caso es corriente que la duración de las medidas se prolongue bastantes meses y que los observadores deban realizar un número elevado de sesiones. Cuando es de especial interés valorar la variabilidad que se produce dentro de un grupo de observadores se utiliza un número mayor (García, Romero, García-Beltrán y Jiménez,

1993). En los estudios sobre experiencias con redes cromáticas que hemos revisado, se utilizan generalmente dos o tres sujetos. Nuestros dos observadores, ambos varones, que llamaremos JH y JL, tenían visión normal del color según los tests estándar de Ishihara, Farnsworth 15 y L'Anthony Desaturé 15. En el caso de JL (30 años), la ametropía presente estaba corregida durante el desarrollo de las medidas experimentales. JH (27 años) es emétrope.

En cambio, para la parte aplicada del trabajo, las pruebas realizadas fueron bastante más cortas y resultaba necesario obtener datos de un número suficiente de sujetos como para poder realizar un estudio estadístico de los resultados. Por estas razones, el número de observadores utilizados tanto para el grupo de control como para los pacientes es considerablemente mayor. Las características de ambos grupos se explican detalladamente en el capítulo IX.

6.4.2. Frecuencias espaciales utilizadas.

El rango de frecuencias espaciales para el que hemos obtenido medidas de umbrales de sensibilidad va desde 1,0 a 4,0 cpd, en pasos de 0,2 cpd. La frecuencia menor vino determinada por el tamaño menor de campo utilizado, de forma que al menos dos ciclos pudiesen ser visibles en la pantalla.

En cuanto a la frecuencia más alta utilizada, para seleccionar el valor de 4,0 cpd tuvimos en cuenta la consideración de que, ya que hemos optado por no corregir las aberraciones cromáticas, carecía de sentido utilizar frecuencias espaciales altas, pues para las frecuencias altas se registra la mayor influencia sobre la visibilidad de los efectos provocados por las aberraciones cromáticas. De este modo, en nuestras condiciones experimentales se hubiera obtenido una frecuencia de corte mucho más elevada de la obtenida en dispositivos que corrigen aberraciones cromáticas. Hemos decidido entonces restringir nuestro rango de frecuencias hasta la zona media (4,0 cpd). Hasta 2 cpd (Flitcroft, 1989) se considera que la influencia de la aberración cromática es despreciable en los valores de sensibilidad umbral obtenidos. Por tanto, en las primeras cinco frecuencias de cada CSF obtenida, las medidas no se han visto influenciadas por la no corrección de aberraciones, y podrán compararse directamente con otros resultados obtenidos sobre sensibilidad al contraste cromático en los que sí se ha tenido en cuenta la corrección de aberraciones cromáticas. En la zona de 2 a 4 cpd, según Flitcroft sí habría influencia sobre las respuestas por la no corrección de aberraciones, pero hay que tener en cuenta que nuestros estímulos se hallan en la zona próxima al equienergético y por tanto la variación en cromaticidad es mucho menor de la estudiada por Flitcroft, lo cual resultaría en una menor influencia del

factor de corrección por aberraciones. Discutiremos este aspecto con más extensión en el capítulo VII, tras la presentación de nuestros resultados.

En las medidas de sumación subumbral, hemos trabajado con una frecuencia fija de 0,5 cpd. Con este valor de frecuencia, aseguramos que la zona de la CSF en la que nos movemos es la de máxima sensibilidad, y además que no hay influencia de aberraciones cromáticas. De los estudios sobre sumación subumbral revisados, se aprecia un predominio de las frecuencias espaciales bajas, salvo en Gur y Akri (1992), que utilizan tres frecuencias por encima de 9 cpd. Aunque en los resultados de CSF no hemos apreciado variaciones significativas de sensibilidad cuando se presentan dos ciclos del estímulo en pantalla respecto a cuando se presentan cuatro ciclos, hemos preferido asegurar las condiciones recomendadas a partir del trabajo de Savoy y McCann (1975) y presentar cuatro ciclos completos en pantalla. Esto supone ampliar el tamaño de campo utilizado, como explicaremos en un apartado posterior.

Para la parte aplicada del trabajo, se seleccionaron tres frecuencias, con el fin de no alargar mucho las medidas por la reducida disponibilidad de tiempo de los sujetos. Escogimos un valor en la zona de bajas frecuencias (1 cpd), uno en la zona de medias frecuencias (4 cpd) y otro en la zona de altas frecuencias (12 cpd).

En la figura 6.7 presentamos tres estímulos de contraste unidad y frecuencias 1,0, 4,0 y 12,0 cpd, para la línea rojo-verde. Puede apreciarse el efecto de incrementar el número de ciclos por grado de ángulo visual, que hace que las zonas de gradación cromática vayan siendo cada vez más estrechas.

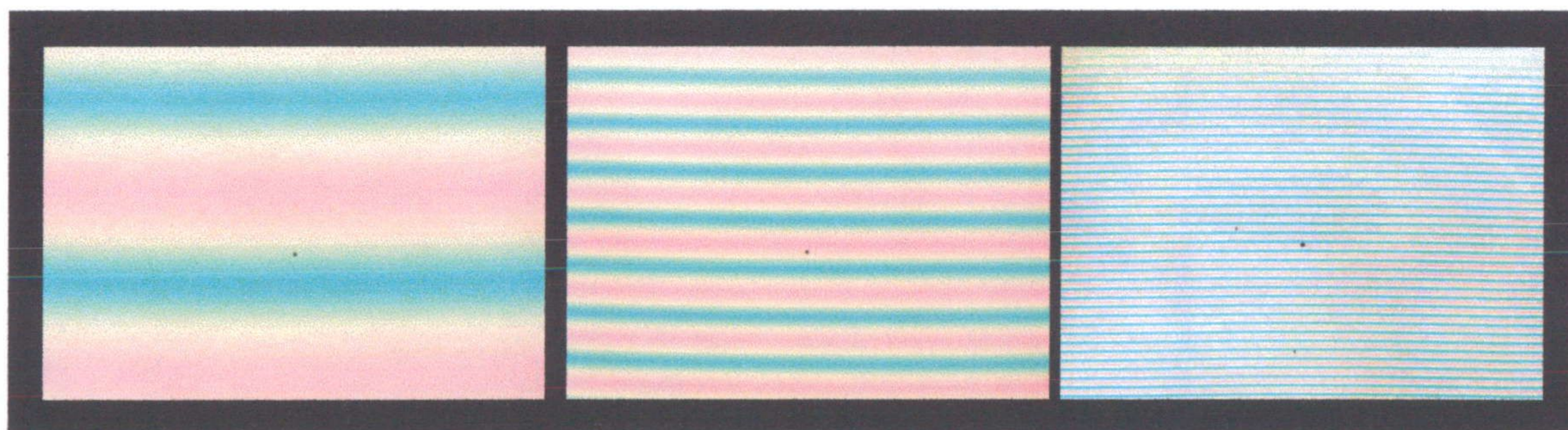


Figura 6.7. Redes cromáticas rojo-verde de contraste unidad y frecuencias 1,0 cpd (izquierda), 4,0 cpd (centro), y 12,0cpd (derecha).

6.4.3. Cabina de observación.

La toma de medidas experimentales tenía lugar según el esquema del dispositivo experimental mostrado en la figura 5.1. El observador se situaba a una distancia determinada de la pantalla del monitor de presentación (de 587 cm para las medidas de CSF y las de la parte aplicada, y de 168 cm para las de sumación subumbral). La posición de la cabeza quedaba fijada por una mentonera con apoyo frontal y ocluidores laterales incorporados, que permitía también el ajuste en altura del mentón para adaptarse a los diferentes sujetos. La mentonera estaba fijada sobre una mesita auxiliar, de la altura apropiada para que la línea visual del observador pudiera hacerse coincidir con el centro de la pantalla del monitor de presentación. En las sesiones que requerían pupila artificial (medidas de CSF cromática, con el fin de poder calcular con exactitud la iluminación retiniana para la comparación con otros estudios) se situaba también sobre esta mesita un banco óptico, sobre el que iba sujeto un jinetillo acoplado a una pinza que sostenía el diafragma que hacía las veces de pupila artificial.

El monitor de presentación se situaba a su vez en una segunda mesa auxiliar alargada y dotada de rieles y plataforma móvil sobre ruedas, para permitir el ajuste preciso de las dos distancias utilizadas. Junto a la mesa con el monitor de presentación, se situaba otra segunda mesa auxiliar que contenía el PC de control de las sesiones, con un segundo monitor sobre el que iban apareciendo en tiempo real los números de fichero correspondientes a cada estímulo que se presentaba y también la respuesta correcta (si el estímulo aparecía en el primer intervalo temporal o en el segundo). A través de este PC, el experimentador iniciaba las sesiones y durante su desarrollo iba tecleando las respuestas comunicadas por el observador.

6.4.4. Parámetros visuales.

a) Nivel de luminancia de los estímulos.

Este parámetro no adopta siempre el mismo valor para todos los estímulos, pues dado que trabajamos en condiciones de isoluminancia, cada pareja de colores extremos de la red tenían fijados sus valores de luminancia en los determinados por el observador en cuestión por el método que ya hemos explicado. En la zona de contraste cromático cercana al umbral, este nivel era siempre el utilizado para el acromático de referencia, de **21,50 cd/m²**, como señalamos en el

apartado relativo a la determinación de la isoluminancia. Este valor de referencia fue escogido porque cumplía tres requisitos importantes:

- Encontrarse en la zona de nivel fotópico, lo que resulta muy interesante dado que se trata de experiencias que involucran mecanismos de visión del color cuya primera etapa está determinada por los conos, que funcionan a pleno rendimiento en condiciones fotópicas. Además, cuando, como en nuestro caso, se van a utilizar tamaños de campo variable y en ocasiones superiores al foveal, el nivel fotópico hace descartar la intrusión de bastones como factor determinante para explicar los resultados.

- En cuanto a las condiciones de reproducibilidad del color del monitor de presentación, el valor de luminancia de referencia aseguraba que se cumpliesen las condiciones de aditividad de los fósforos, y además en el rango de variación de valores de luminancia de los estímulos las hipótesis de calibrado utilizadas resultaban suficientes como para conseguir una diferencia aceptable entre las coordenadas de cromaticidad pedidas al monitor y las que se presentaban en pantalla, como se muestra en el capítulo anterior.

- Por último, resultaba un nivel de luminancia media bastante similar al utilizado en otros trabajos sobre el tema, como Gur y Akri (1992), Mullen *et al.* (1997), Mullen y Sanderalli (1999), lo que nos parecía importante para la comparación entre nuestros resultados y los de estos trabajos.

b) Tamaños de campo.

Las dos distancias de visión utilizadas (587 cm y 168 cm) corresponden, dadas las dimensiones en vertical de la pantalla de nuestro monitor de presentación Sony CPD17SF2, a unos tamaños de campo visual respectivos de $2,3^\circ$ y 8° . El tamaño menor de campo, que se utiliza en la determinación de CSF en las distintas líneas y también para la parte de aplicación, fue escogido para garantizar visión foveal y además un número mínimo de 2,3 ciclos en la frecuencia más baja de las utilizadas. El número de ciclos que se considera normalmente como suficiente para garantizar unos resultados fiables está fijado en 4 ciclos (Savoy y McCann, 1975), que en nuestro caso se garantiza a partir de 1,8 cpd. Sin embargo, hemos preferido priorizar la característica de visión foveal sobre la de número mínimo de ciclos, pues hemos comprobado realizando medidas de prueba que no hay diferencias significativas en nuestras condiciones

experimentales entre el umbral obtenido con 2,3 ciclos y el obtenido con 4 ciclos. El tamaño mayor de campo, de 8° , lo utilizamos para las medidas de sumación subumbral, ya que en este caso los valores de frecuencia espacial son más reducidos, lo que hace más crítica la presentación de un número suficiente de ciclos en pantalla. El efecto de aumentar el tamaño de campo sobre el aspecto de las redes es equivalente a aumentar la frecuencia espacial, de modo que el mismo número de ciclos serían visibles en pantalla para una frecuencia de 1 cpd y campo de $2,3^\circ$ que para una frecuencia de 2 cpd y campo de $1,15^\circ$. Ambos estímulos tendrían el mismo aspecto, pero el tamaño de imagen retiniana para el segundo sería mucho más reducido que para el primero.

c) Adaptación.

Antes de comenzar la sesión, el observador se adaptaba durante cinco minutos a la oscuridad. Con esto garantizábamos que el sujeto se encontrase más relajado y su sistema visual descansado antes de pasar a la toma de medidas. En el inicio de la sesión, se presentaba un fondo uniforme con el equienergético de referencia (de luminancia $21,50 \text{ cd/m}^2$) durante un minuto antes de comenzar la presentación de estímulos, con el fin de evitar el deslumbramiento inicial después de la adaptación a la oscuridad, y al mismo tiempo que el sujeto pudiese recordar bien la apariencia del fondo uniforme para facilitar su tarea de detección de estímulos.

d) Condiciones de visión.

En las medidas de determinación de CSF, se utilizó una pupila artificial de 3 mm de diámetro, colocada inmediatamente delante del ojo (o lente correctora en su caso) del sujeto. Este tamaño constituye el mínimo esperado en sujetos de la edad de los observadores en condiciones de adaptación a la luz (Tunacliffe, 1993). Además, se comprobó que la pupila natural de ambos observadores resultaba mayor de 3 mm tras la adaptación a $21,50 \text{ cd/m}^2$. Las ventajas de la pupila artificial en estas medidas son principalmente dos:

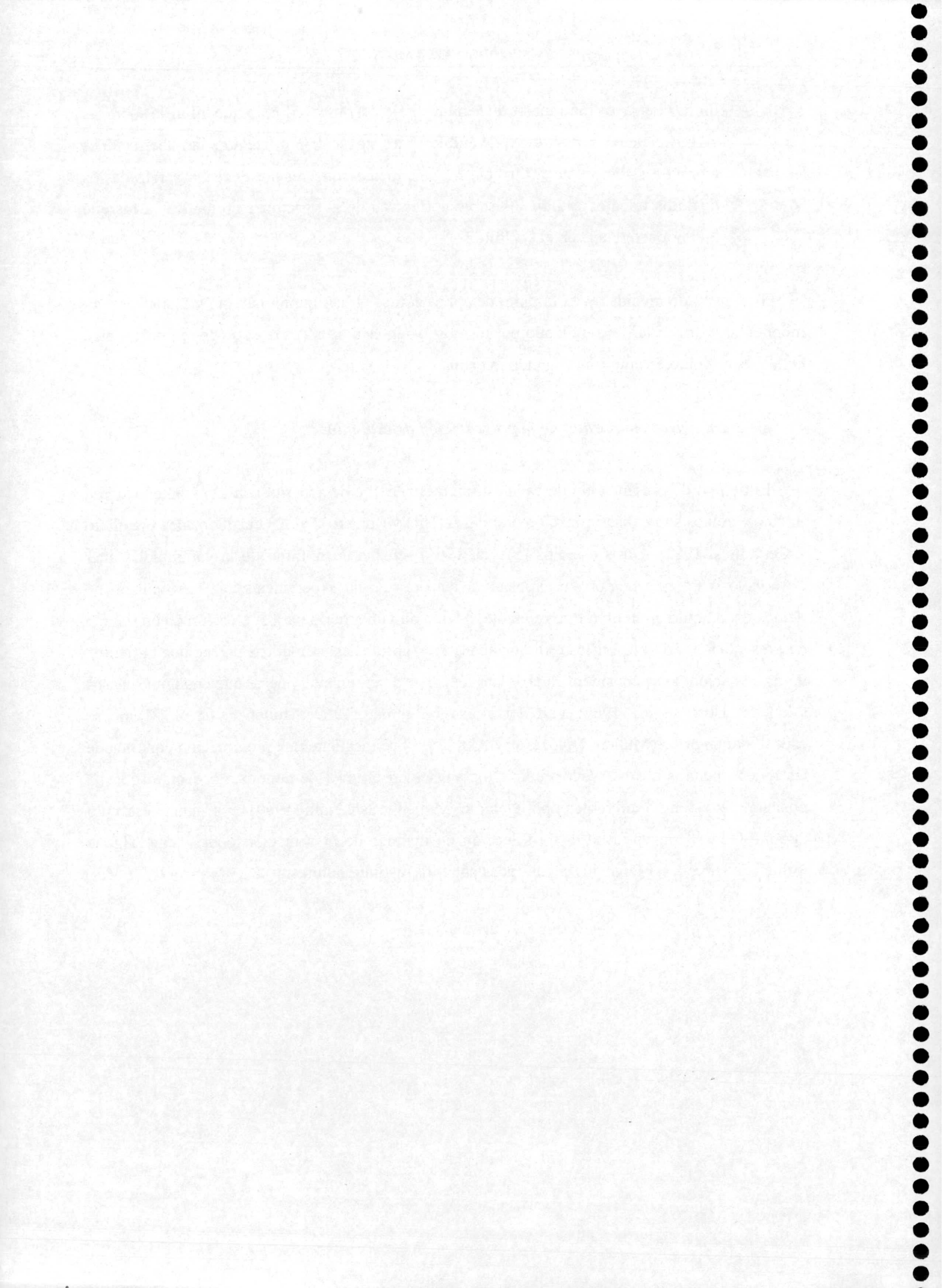
- asegurar un tamaño fijo de pupila para poder expresar los valores de excitación de conos en *trolland* si lo considerábamos necesario, sin tener que recurrir a tablas de cálculo de diámetro pupilar cuya validez puede no estar garantizada para todos los sujetos;

- limitar los rayos marginales que entran al ojo del observador, lo que influiría sobre las altas frecuencias de modo favorable, pues no se han corregido las aberraciones cromáticas. Pero esta influencia no entendemos que resulte decisiva a raíz de los distintos trabajos estudiados sobre corrección de aberraciones cromáticas a los que hicimos referencia en el capítulo II.

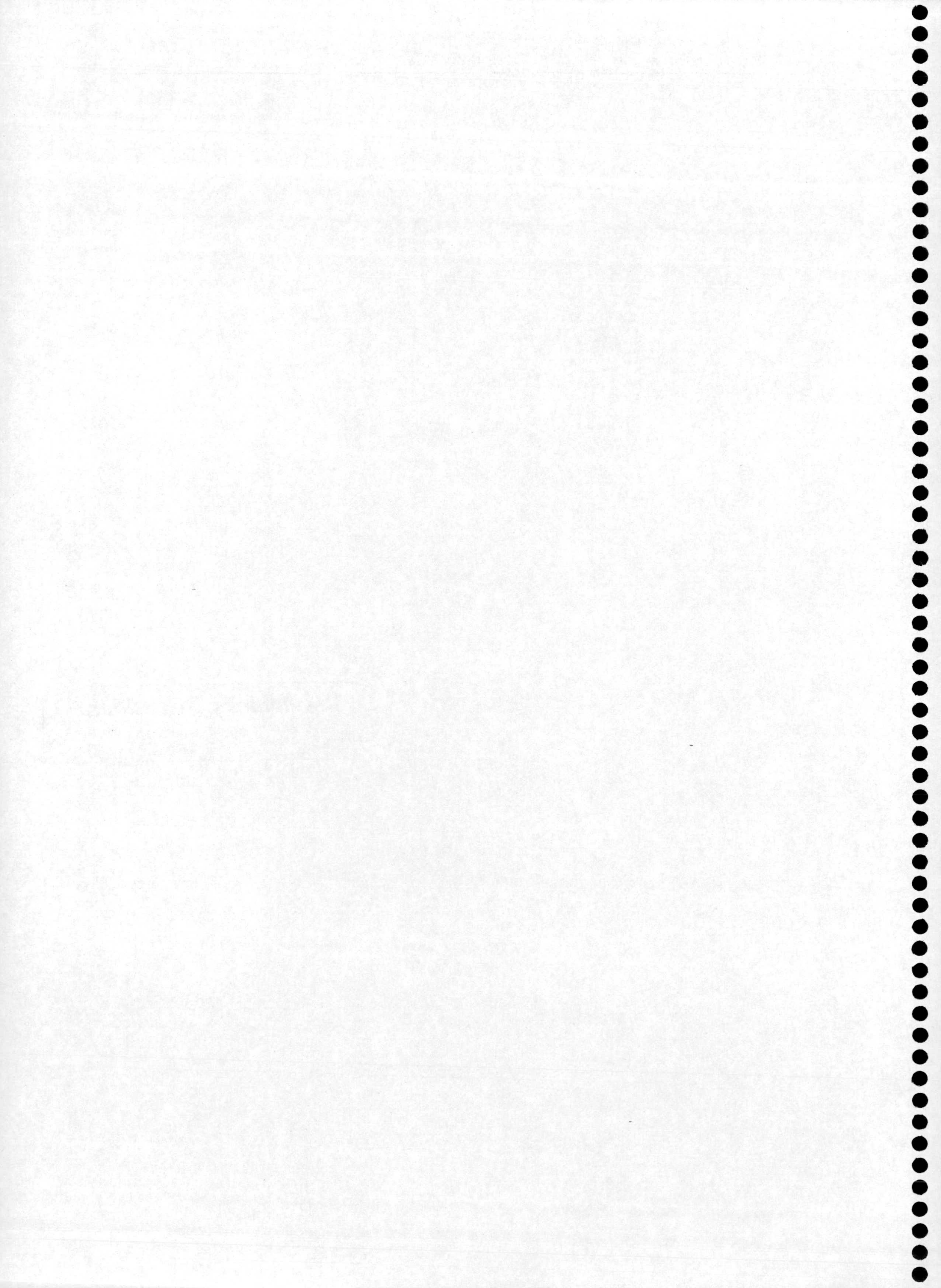
En el resto de medidas y en la parte de aplicación se utiliza pupila natural, y visión central, monocular y directa. El ojo utilizado por los observadores normales era el de preferencia o bien el de menor grado de ametropía cuando la había.

e) Parámetros temporales de la presentación de estímulos.

El tiempo de presentación de cada estímulo era de 1 s, de acuerdo con lo recomendado en trabajos previos sobre discriminación cromática (Hita y Romero, 1981; Hita, González Caballero y Cervantes, 1982). Otros estudios (Siegel, 1964) señalan un mínimo de la variabilidad ínter observador para este tiempo de exposición. Para el tipo de experiencias que nos ocupan, no hemos encontrado en la literatura referente al tema ningún criterio para la elección de un tiempo de presentación óptimo. En los estudios anteriores sobre redes cromáticas parece que el tiempo de presentación no se considera en absoluto un factor determinante, puesto que en algunos casos (Van del Horst *et al.*, 1967; Van der Horst y Bouman, 1969; Mullen *et al.*, 1997) no se especifica, en otros (Mullen, 1985; Gur y Akri, 1992) se mantiene una presentación continua de las redes mientras el observador realiza los ajustes en el nivel de contraste o decide sobre la posición del estímulo diferente y, por ejemplo, Mullen y Sankeralli (1999) presentan el estímulo durante 0,5 s. Esta variedad en la selección de tiempos de presentación podría tener alguna influencia sobre las diferencias encontradas entre los distintos autores.



Resultados y Discusión.



CAPÍTULO VII CSF CROMÁTICA

No se demore más de lo absolutamente necesario, señor. La fiebre detectivesca se convierte en una enfermedad difícil, en circunstancias como éstas.

Wilkie Collins. La Piedra Lunar.

7.1. INTRODUCCIÓN.

En este primer capítulo de exposición y discusión de resultados experimentales, abordaremos los referentes al primer gran objetivo que nos habíamos fijado, es decir, obtener las curvas de sensibilidad al contraste cromático en los dos ejes cardinales rojo-verde y amarillo-azul para ambos observadores.

A continuación, procederemos a su análisis en términos comparativos con respecto a los resultados obtenidos por otros autores. Por último, abordaremos el análisis de la posible influencia que parámetros como el tamaño de campo y el nivel de luminancia, puedan tener sobre la CSF cromática.

7.2. RESULTADOS PARA LOS EJES CARDINALES.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo IV sobre los objetivos del presente trabajo, comenzamos por presentar los resultados correspondientes a la Curva de Sensibilidad al Contraste Cromático (CSF cromática) para los ejes cardinales rojo-verde y amarillo-azul, seleccionados según explicamos en el capítulo VI (ver Figura 6.3), para los dos observadores que participaron en el experimento (JH y JL). Posteriormente, procederemos a su análisis en términos comparativos con respecto a otros resultados anteriores.

Antes de presentar los datos experimentales, explicaremos detalladamente algunos aspectos generales que conciernen al intervalo de error adoptado para las medidas de umbral. En la valoración del intervalo de error asociado a cada medida, debemos tener presente en principio las dos posibles fuentes principales de error en resultados de tipo psicofísico: el relacionado con la variabilidad inherente al observador, y el relacionado con el dispositivo experimental. El error derivado del dispositivo experimental utilizado, que se comenta en el capítulo V, se relaciona

con el sistema de calibrado del monitor en el que se presentan los estímulos. Este sistema incluye la toma de medidas tanto de valores de luminancia como de coordenadas de cromaticidad de los fósforos, mediante un espectrorradiómetro. Como ya señalamos, el intervalo de error asociado a las medidas espectrorradiométricas no lo podemos conocer con exactitud en nuestro caso, pero una estimación razonable es 0,003 en coordenadas de cromaticidad. Calculando las variaciones de contraste cromático (y su inversa, la visibilidad, que se representa en la CSF cromática) a las que daría lugar esta incertidumbre en la zona umbral de los observadores, encontramos que dichas variaciones son mucho menores que las que produce la variabilidad inherente al propio observador (cambios en sus respuestas a lo largo de distintas sesiones), que constituye la segunda fuente de error en nuestras medidas. El criterio de error que hemos adoptado, a la vista de que el error asociado al dispositivo experimental resulta mucho menor que el de tipo psicofísico, es considerar sólo las variaciones de visibilidad inherentes al observador como fuente de error en nuestras medidas. Esto supone que los intervalos de error que se muestran en las figuras de resultados corresponden al denominado *error estándar*, que se calcula como la desviación estándar de las distintas medidas cuya media es el umbral de detección dividida entre la raíz cuadrada del número de muestras. Este número de muestras en nuestro caso es de dos, pues como especificamos en el capítulo VI el valor de visibilidad representado en la curva es la media de dos medidas realizadas por los observadores. Hemos encontrado algunos casos en que las dos medidas realizadas por el observador para una frecuencia dada coincidían, por lo que resultaría entonces que, dado que la desviación estándar es nula, el error asociado al dispositivo sería entonces mayor que el de variabilidad del observador. Pero, como puede verse en las figuras de resultados, esta situación se produjo en muy pocos casos, por lo que hemos preferido mantener la definición de intervalo de error, con el fin de adoptar un criterio uniforme para todos los datos.

7.2.1. Eje rojo-verde.

En la figura 7.1 se muestran los valores de visibilidad (inversa del contraste cromático umbral de percepción de la red) asociados a la CSF cromática obtenida para los dos observadores en el eje cardinal rojo-verde. El intervalo de frecuencias espaciales analizado es de 1,0 a 4,0 cpd, en pasos de 0,2 cpd.

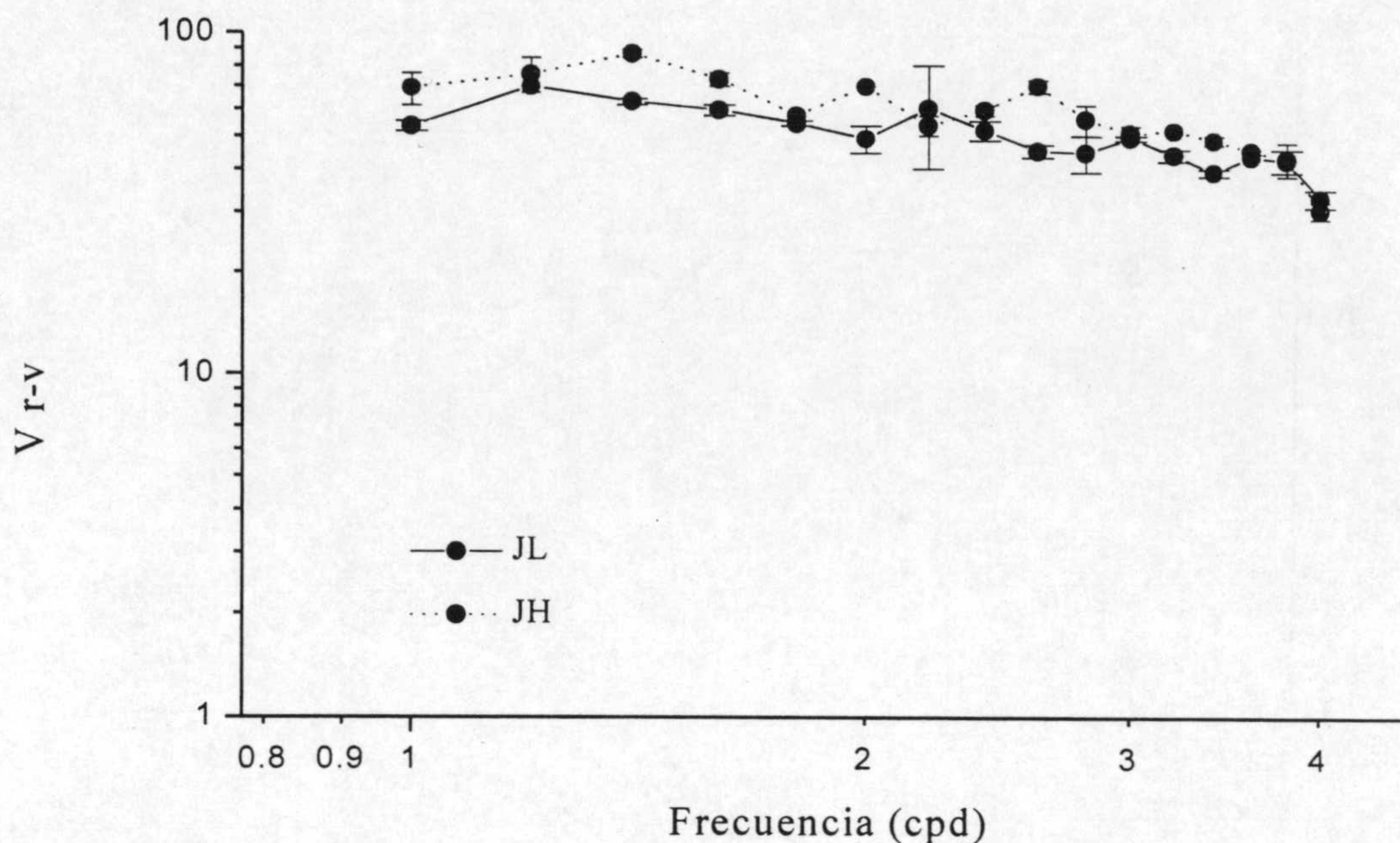


Figura 7.1. CSF cromática rojo-verde para ambos observadores. La figura presenta los valores de visibilidad V , calculada como la inversa del contraste umbral de percepción de la red, en función de la frecuencia (intervalo de 1,0 a 4,0 cpd).

Podemos observar que los resultados de ambos observadores son bastante similares entre sí en cuanto a la forma de la curva y que los valores de visibilidad también son similares, coincidiendo para bastantes de las frecuencias analizadas. Las mayores diferencias se producen en la zona de bajas frecuencias (hasta 2 cpd). El máximo valor de visibilidad es de 86,5 para JH y 69,5 para JL, reflejando la tendencia que puede verse en la figura de mayores valores en general para JH en la zona de bajas frecuencias, donde se obtienen los valores máximos de visibilidad. En cuanto a la forma de la curva, es claramente de tipo paso-baja. Este aspecto lo comentaremos con mayor extensión en el apartado dedicado a la comparación con resultados de otros autores.

7.2.2. Eje amarillo-azul.

En la figura 7.2. presentamos los resultados correspondientes a la CSF cromática obtenida para los dos observadores en el eje cardinal amarillo-azul. De nuevo el intervalo de frecuencias analizado va de 1,0 a 4,0 cpd.

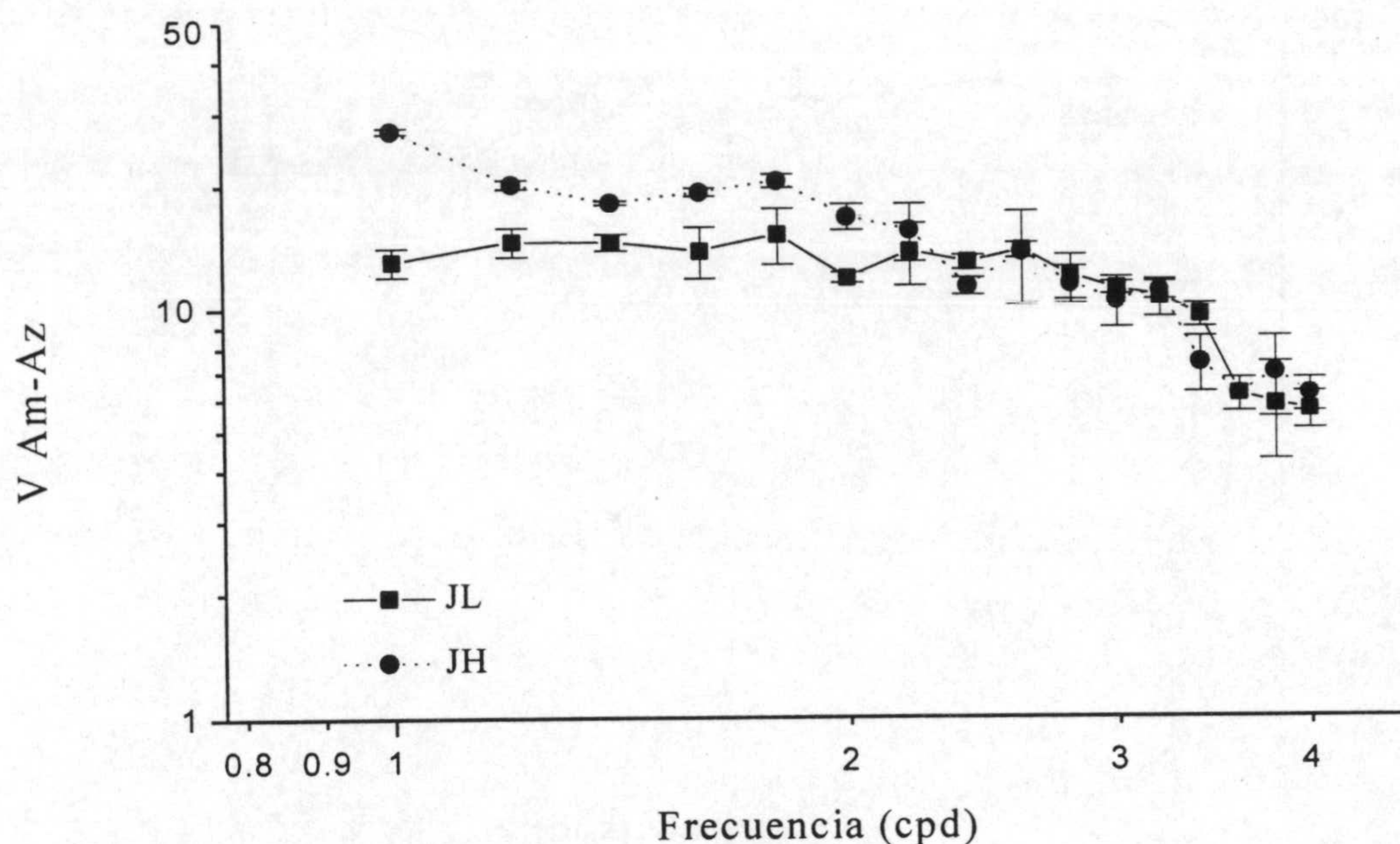


Figura 7.2. CSF cromática amarillo-azul para ambos observadores. La figura presenta los valores de visibilidad V en función de la frecuencia (intervalo de 1,0 a 4,0 cpd).

Las diferencias entre ambos observadores son algo mayores si se compara relativamente con las obtenidas para el eje rojo-verde, en la zona por debajo de 2 cpd. Para frecuencias superiores, se mantienen valores muy similares entre ambos, al igual que sucedía para las curvas rojo-verde. Los valores máximos de visibilidad son de 15,0 y 27,1 para JL y JH respectivamente. De nuevo comprobamos que la forma de la curva es claramente paso-baja en ambos casos.

7.3. COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE OTROS AUTORES.

Para la comparación de nuestros resultados con otros obtenidos por diferentes autores, vamos a establecer una división entre los derivados del estudio de Mullen (1985), por ser referencia obligada en toda la literatura referente al tema, y aquellos resultados obtenidos con anterioridad en otros laboratorios.

Siguiendo un orden cronológico, encontramos que la forma de las curvas CSF cromáticas obtenidas por Van der Horst *et al.* (1967) muestra una tendencia a ser paso-baja en menor medida que las nuestras. La relación entre visibilidad máxima y mínima que obtienen estos autores en el rango 1,0 a 4,0 cpd es aproximadamente de 4,0 para estímulos rojo-verde y 8,0 para

estímulos amarillo-azul. En nuestro caso este parámetro varía entre 1,5 y 2,5. Uno de los factores que pueden haber influido en este último aspecto es la diferente definición de contraste utilizada por Van der Horst y colaboradores, que probablemente amplifique las diferencias de sensibilidad en el rango de frecuencias a partir de 1,0 cpd, y también el hecho de que su sistema generador permitiera sólo producir redes cuadradas y no producir redes sinusoidales, estas últimas mucho más sencillas desde el punto de vista del análisis de Fourier.

Otra diferencia importante se refiere al nivel de iluminación retiniana más elevado que utilizaron, de 3500 td, equivalente aproximadamente a 260 cd/m^2 , valor mucho mayor que el nivel de iluminación retiniana que podríamos alcanzar en nuestras redes. Del estudio de la influencia de este parámetro sobre el nivel de visibilidad de los observadores en nuestras condiciones experimentales nos ocuparemos al final del capítulo.

Los resultados posteriores de Van der Horst y Bouman (1969) tienen bastantes más características en común con el nuestro, ya que el sistema generador es similar y se mantiene un tamaño de campo constante para todas las frecuencias presentadas al observador. Además, no se menciona en absoluto la corrección de la aberración cromática y el centro de color de las líneas rojo-verde y amarillo-azul es también el equienergético. De hecho, si observamos la CSF cromática obtenida para el nivel de iluminación retiniana más próximo al nuestro y la frecuencia de modulación temporal más baja (0,05 Hz; ver figura 3.4), podemos ver que a diferencia con los resultados obtenidos en el estudio de 1967, la caída de visibilidad entre 1,0 y 4,0 cpd es mucho más reducida, aproximadamente de un factor 1,3 para el eje amarillo-azul, y para el eje rojo-verde de aproximadamente 1,5. En este estudio hay que tener en cuenta que se utiliza una definición de contraste diferente al de 1967, basada en la pureza colorimétrica, tal y como se explicó en el capítulo III.

En el estudio de Granger y Heurtley (1973), se presentan resultados para el eje rojo-verde determinado por las coordenadas de cromaticidad de los dos fósforos correspondientes del monitor, de forma que el punto intermedio es un amarillo y no un acromático como en nuestro caso. Los puntos en común con nuestro estudio, en cuanto a los parámetros experimentales, son el sistema generador de estímulos y la no corrección de aberración cromática. Como pudo verse en la figura 3.5, la caída entre 1,0 y 4,0 cpd es muy reducida, de factor 1,3 en visibilidad aproximadamente. De nuevo, la definición de contraste cromático es diferente a todos los trabajos anteriores, quedando la curva expresada en unidades relativas al máximo de visibilidad.

Comparación con los resultados de Mullen (1985).

Desglosamos a continuación las principales diferencias en cuanto al método experimental empleado, que se reflejan a nuestro entender a su vez en las diferencias entre los resultados obtenidos por este estudio y por nuestro trabajo.

En el experimento de Mullen, se evalúa la CSF cromática para un rango de frecuencias que va de 0,17 a 10 cpd, presentando siempre al observador un mínimo de cuatro ciclos. Este factor, unido al límite de resolución de los monitores monocromos que emplea para generar las redes junto con los filtros de color, condiciona el que sea necesario variar el tamaño del campo presentado al observador para las distintas frecuencias. Como explicamos en el capítulo III, se usan cuatro tamaños diferentes de campo, de 1,9 a 23,5 grados.

En nuestro estudio, el rango de frecuencias espaciales es más reducido, de 1,0 a 4,0 cpd, lo que nos permite utilizar un solo tamaño de campo para todas las medidas de umbrales de detección. Como no estudiamos frecuencias superiores a 4 cpd, no resulta posible calcular adecuadamente la frecuencia de corte, aunque esto no supone una desventaja, pues dado que no corregimos las aberraciones cromáticas, cabe esperar que la frecuencia de corte, caso de haber sido obtenida, resultase muy similar a la de la CSF en luminancia, tal y como señala Mullen en su trabajo.

En cuanto a la corrección de la aberración cromática (longitudinal y transversal), este factor deja de ser desdeñable, según algunos autores (Flitcroft, 1989) a partir de 2 cpd. Para frecuencias superiores, la no corrección de aberraciones introduce variaciones aparentes de luminancia que cambian el aspecto de las redes. Este efecto origina el que el umbral no sea determinado exclusivamente por los mecanismos cromáticos, sino que entre en función también el canal de luminancia. Por esta razón, dado que la CSF en luminancia presenta su máximo en la zona de frecuencias entre 2 y 5 cpd (Mullen, 1985), el efecto de la no corrección de aberraciones sobre la CSF cromática sería entonces el de aumentar la visibilidad (con relación a los resultados que se obtendrían con aberraciones corregidas) a partir de 2 cpd. Esto es lo que ocurre efectivamente si comparamos el grupo de resultados obtenidos sin corrección de aberraciones (Van der Horst y Bouman, 1969; Granger y Heurtley, 1973 y los nuestros) con los resultados de Mullen (1985). Si evaluamos la razón de la sensibilidad máxima entre la sensibilidad a 4 cpd en los resultados de Mullen, obtenemos un valor de aproximadamente 3,5 frente al valor máximo de 2,5 para

nuestros resultados y los bastante menores obtenidos por los trabajos anteriores. Este factor podría explicar entonces la diferencia en cuanto a la forma de la CSF cromática que pueden observarse entre nuestros resultados y los de Mullen (1985). De todas formas, debemos tener en cuenta que en nuestro caso la no corrección de aberraciones cromáticas no es un problema de mucha importancia, pues los puntos de la zona umbral de los observadores están situados muy cerca del equienergético para todo el rango de frecuencias estudiado (entre 1,0 y 4,0 cpd).

Examinemos ahora la selección de los estímulos de color. Tal y como señala Mullen, la pareja de colores seleccionados para definir la línea a lo largo de la cual se determina la CSF puede tener influencia sobre los valores de visibilidad máximos obtenidos. En su trabajo, las longitudes de onda de los filtros de color se seleccionan para coincidir con los picos de sensibilidad de las funciones de sensibilidad de los mecanismos visuales oponentes (Sperling & Harwerth, 1971; Hurvich y Jameson, 1955). En nuestro estudio, las líneas se seleccionan en base al modelo de Boynton (1986), como se explica en el capítulo VI. Entendemos que este factor puede ser importante también a la hora de explicar el por qué en nuestros resultados (especialmente para la línea amarillo-azul) se obtienen valores relativamente bajos de visibilidad, aunque hay que tener en cuenta también las diferencias en la definición de contraste entre los dos estudios, que analizaremos a continuación.

Mullen (1985) define el contraste cromático como el contraste en luminancia de cada una de las componentes monocromáticas de la red, que se suman en oposición de fase. Según la tesis que sostiene el trabajo, al tratarse de un contraste en luminancia esto permite la comparación directa de la CSF en cromaticidad con la CSF en luminancia, que se obtiene también en el estudio para una componente de cada red. En nuestro trabajo, el contraste cromático queda definido en base a las respuestas de cada uno de los dos mecanismos o canales involucrados en la percepción del color, tal y como define Boynton (1986). Este tipo de definición impide la comparación directa entre los resultados obtenidos para distintos ejes, pues la definición cambia para cada canal según lo que explicamos en el capítulo VI. No tendría entonces mucho sentido un análisis comparativo que indicase que la visibilidad media rojo-verde es mucho mayor que la amarillo-azul como el que realiza Mullen (1985). Incluso con la definición que utiliza esta autora, a nuestro entender y aunque se usen las mismas "unidades" para cuantificar el contraste cromático en ambos ejes, esto no implica que sean directamente comparables. Los resultados que se obtengan en cuanto a visibilidad vienen fuertemente determinados por la situación de los extremos de las líneas rojo-verde y amarillo-azul. Esto hace que no podamos asegurar que se

estímulo cuantitativamente en la misma medida a ambos canales, por lo que la comparación directa en principio resultaría injusta para el canal que se esté estimulando en menor medida. La determinación del umbral de visibilidad para cada frecuencia sirve entonces como unidad de medida a su vez, como explicaremos con detalle más adelante, aunque ya hicimos referencia a ello al describir el procedimiento de sumación subumbral.

Por último, en cuanto a la determinación de la isoluminancia, el procedimiento utilizado por Mullen se aplica de forma independiente para cada frecuencia. Consiste en variar las proporciones relativas de los dos colores que forman la red y determinar el umbral de visibilidad correspondiente, buscando aquella proporción que suponga un extremo (máximo o mínimo de visibilidad, según la frecuencia). Esta proporción determinada sería el punto de isoluminancia. Para la mayoría de casos se sitúa en el 50-60% de rojo y 45-55% de amarillo, con lo cual la componente roja y la amarilla de las redes tendrían un poco más de luminancia que la verde y la azul respectivamente, manteniéndose siempre fija la luminancia media de las redes y ambas componentes con igual contraste en luminancia. En nuestro caso, el sistema elegido es el de fotometría de parpadeo heterocromática (HFP), utilizado en los estudios de Van der Horst y Bouman (1969) y Granger y Heurtley (1973). Hemos realizado al menos seis igualaciones en cada línea para diferentes valores de contraste cromático, utilizando las mismas igualaciones para todas las frecuencias cuyo umbral se determina. Por tanto, no estamos considerando las variaciones de la razón de isoluminancia con la frecuencia espacial, que en el trabajo de Mullen (1985) son de un 10% aproximadamente, pero en un rango de frecuencias de 0,09 a 7 cpd, con lo cual en nuestro caso es de suponer que sean bastante menores, al limitar las frecuencias analizadas a la zona 1 a 4 cpd. Con una incorrecta o poco adecuada determinación de la isoluminancia, no se conseguiría aislar completamente los canales cromáticos del de luminancia, con lo que las medidas que se realizasen no serían propiamente de CSF cromática. Dado que para todas las frecuencias hemos usado la misma razón de isoluminancia, podemos concluir que no hay efectos relevantes, pues en la parte de bajas frecuencias la curva no registra un crecimiento progresivo de los valores de sensibilidad, como sucedería si hubiese actuado el canal de luminancia debido a una incorrecta determinación de la isoluminancia.

A modo de resumen, podemos señalar que a pesar de todas las diferencias en el método experimental entre ambos trabajos, la conclusión fundamental sobre el carácter paso-baja de la CSF cromática se mantiene con nuestros resultados, lo que nos indica que nuestro método experimental es válido para determinar umbrales de sensibilidad espacial cromática. Sin

embargo, hay dos factores experimentales cuya influencia consideramos interesante estudiar más a fondo: el tamaño de campo y el nivel de luminancia de los estímulos. En cuanto al tamaño de campo, hemos visto que en el estudio de Mullen (1985) se utilizan cinco tamaños de campo diferentes, lo que implica la asunción de que la sensibilidad no cambie significativamente con el tamaño de campo. En cuanto al nivel de luminancia, en los otros estudios se adoptan valores muy altos o muy bajos (Van der Horst *et al.*, 1967; Van der Horst y Bouman, 1969) o con diferentes niveles para rojo-verde y amarillo-azul (Mullen, 1985), por lo que entendemos que resulta también de gran interés estudiar la influencia de este parámetro en nuestras condiciones experimentales.

7.4. INFLUENCIA DE LAS VARIACIONES EN TAMAÑO DE CAMPO SOBRE LA VISIBILIDAD.

Hemos escogido para llevar a cabo esta parte del trabajo el eje cardinal rojo-verde, con cuatro tamaños de campo ($2,3^\circ$; $5,5^\circ$; $8,0^\circ$; 15°) y tres frecuencias espaciales (1,0, 2,0; 3,0 cpd) que, según el trabajo de Vimal (1998), entran dentro de la zona de alta sensibilidad de los tres mecanismos de menor frecuencia de pico. La luminancia media de las redes es de $21,50 \text{ cd/m}^2$, como en las medidas de CSF cromática. El tamaño de campo se varía reduciendo progresivamente la distancia del observador al monitor de presentación, desde los iniciales 5,8 m hasta los 0,86 m en el caso del campo de 15° . Con estos cuatro tamaños de campo, cubrimos un rango similar al utilizado por Mullen (1985), garantizando que se presentan al menos cuatro ciclos al observador, excepto para la frecuencia de 1,0 cpd y campo $2,3^\circ$. Los observadores JL y JH realizaron tres medidas de umbral para cada condición, presentándose los resultados de visibilidad como la media de los tres valores obtenidos. El intervalo de error es, de acuerdo con lo explicado anteriormente para las medidas de CSF cromática, de una desviación estándar.

En la figura 7.3 podemos ver los resultados para los cuatro tamaños de campo y ambos observadores, obtenidos para 1 cpd. Puede apreciarse una tendencia común para ambos observadores, la disminución de visibilidad para el tamaño de campo de 15° con respecto al de 8° , para el que se ha obtenido una mayor visibilidad. En el caso de JH, hay una tendencia más acusada que para JL de crecimiento de visibilidad de $2,3^\circ$ a 8° , lo cual resulta lógico dado que los valores de contraste umbral de JH son bastante menores, por lo que al calcular su inversa (visibilidad), se amplifican las distancias entre los puntos.

UNIVERSIDAD DE GRANADA

07 ABR. 2000

COMISION DE DOCTORADO

En la figura 7.4 presentamos los resultados obtenidos para la frecuencia de 2,0 cpd. La tendencia a disminuir para el tamaño de campo de 15° se mantiene. Para el observador JL aparece de manera un poco más clara el crecimiento de visibilidad en la zona de 2,3° a 8°. El valor más elevado para ambos sujetos sigue siendo el correspondiente a 8°.

En cuanto a la frecuencia 3,0 cpd, podemos ver los resultados en la figura 7.5. Para el observador JL, coinciden básicamente con los de la frecuencia 2,0 cpd. Para JH, la tendencia a disminución de la visibilidad para 15° es más acusada y en cambio la tendencia a crecimiento hasta 8° menos clara que en las otras dos frecuencias.

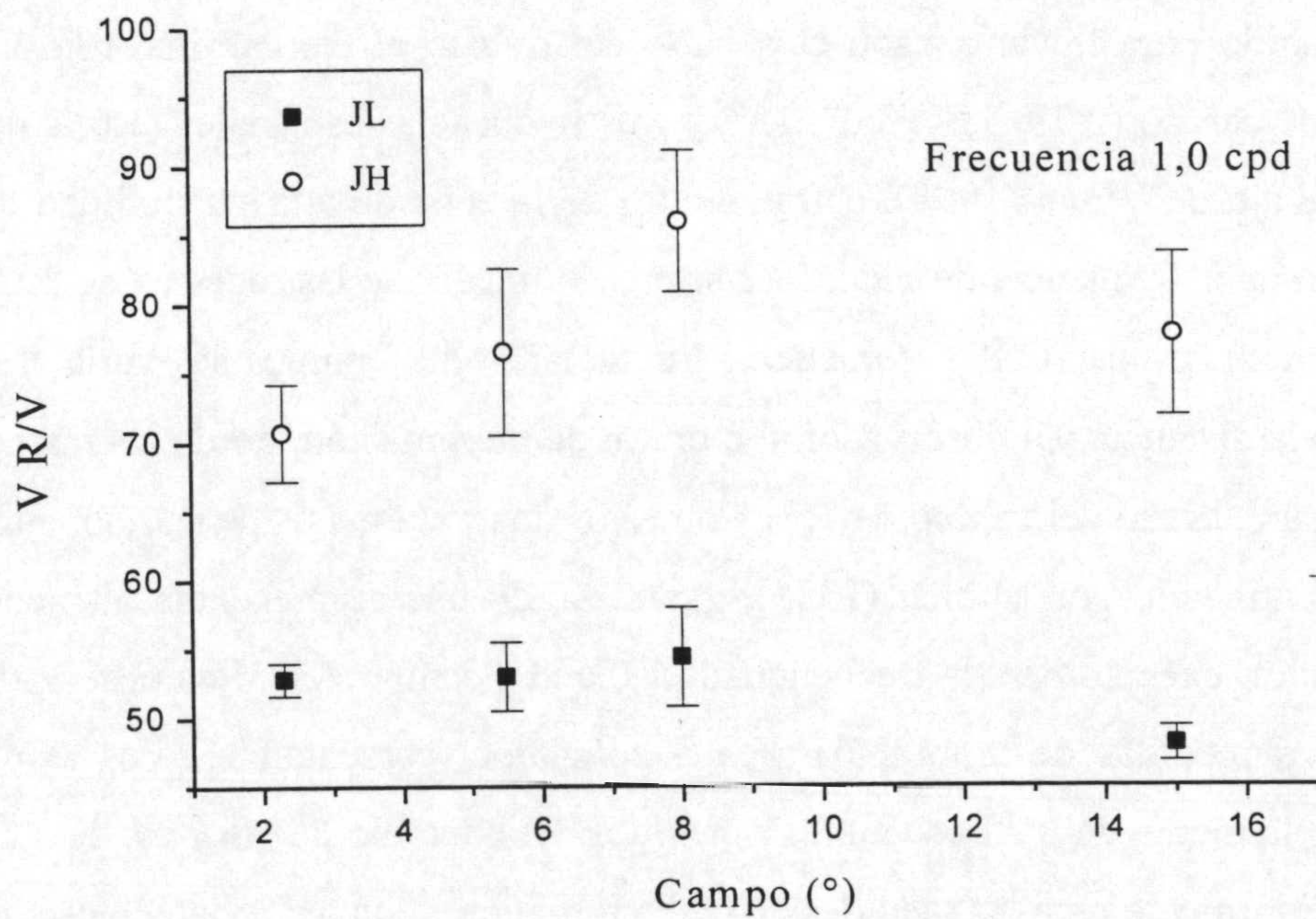


Figura 7.3. Visibilidad obtenida por los dos observadores para la frecuencia 1,0 cpd en la línea rojo-verde, en función del tamaño del campo presentado.

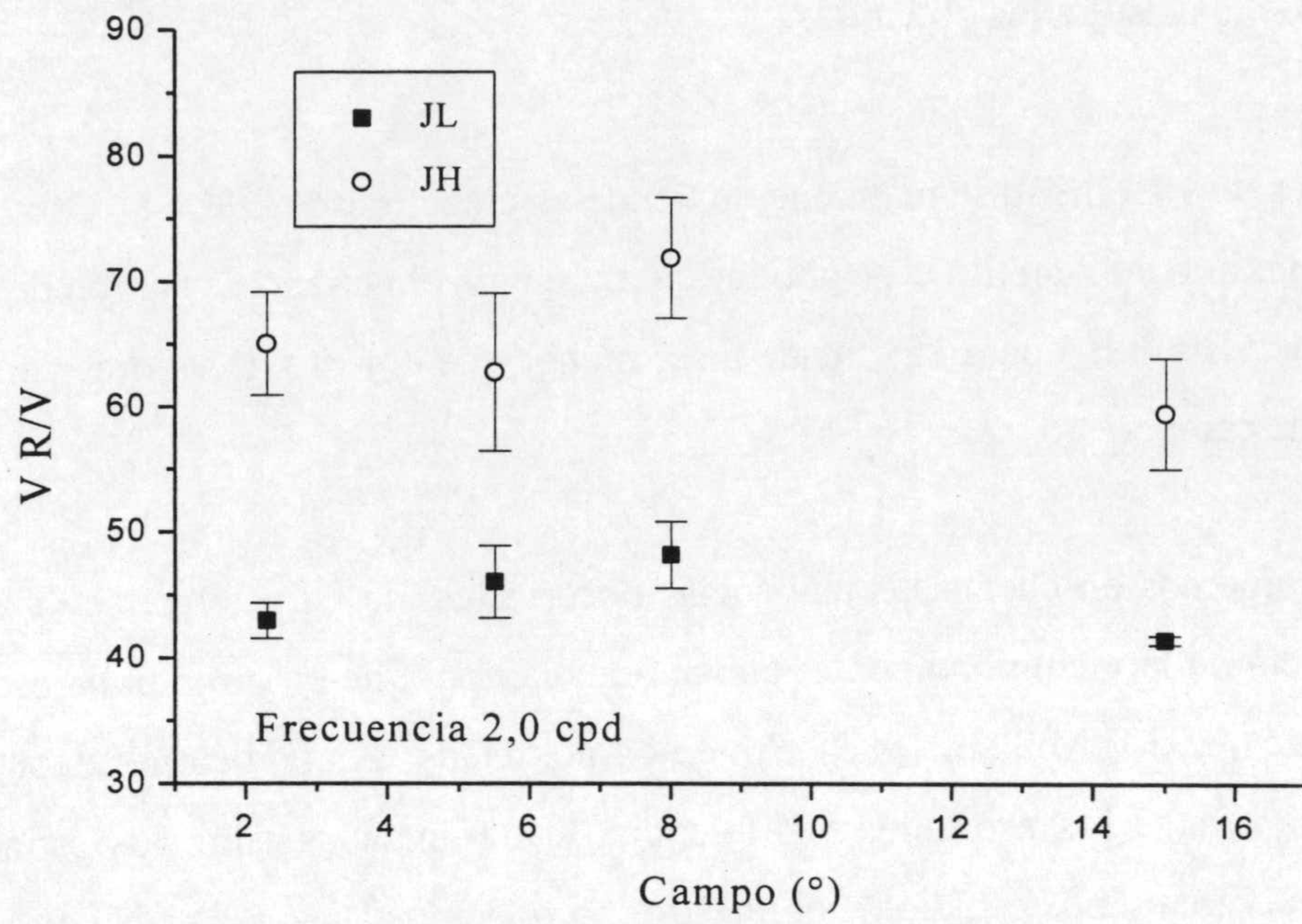


Figura 7.4. Visibilidad obtenida por los dos observadores para la frecuencia 2,0 cpd en la línea rojo-verde, en función del tamaño del campo presentado.

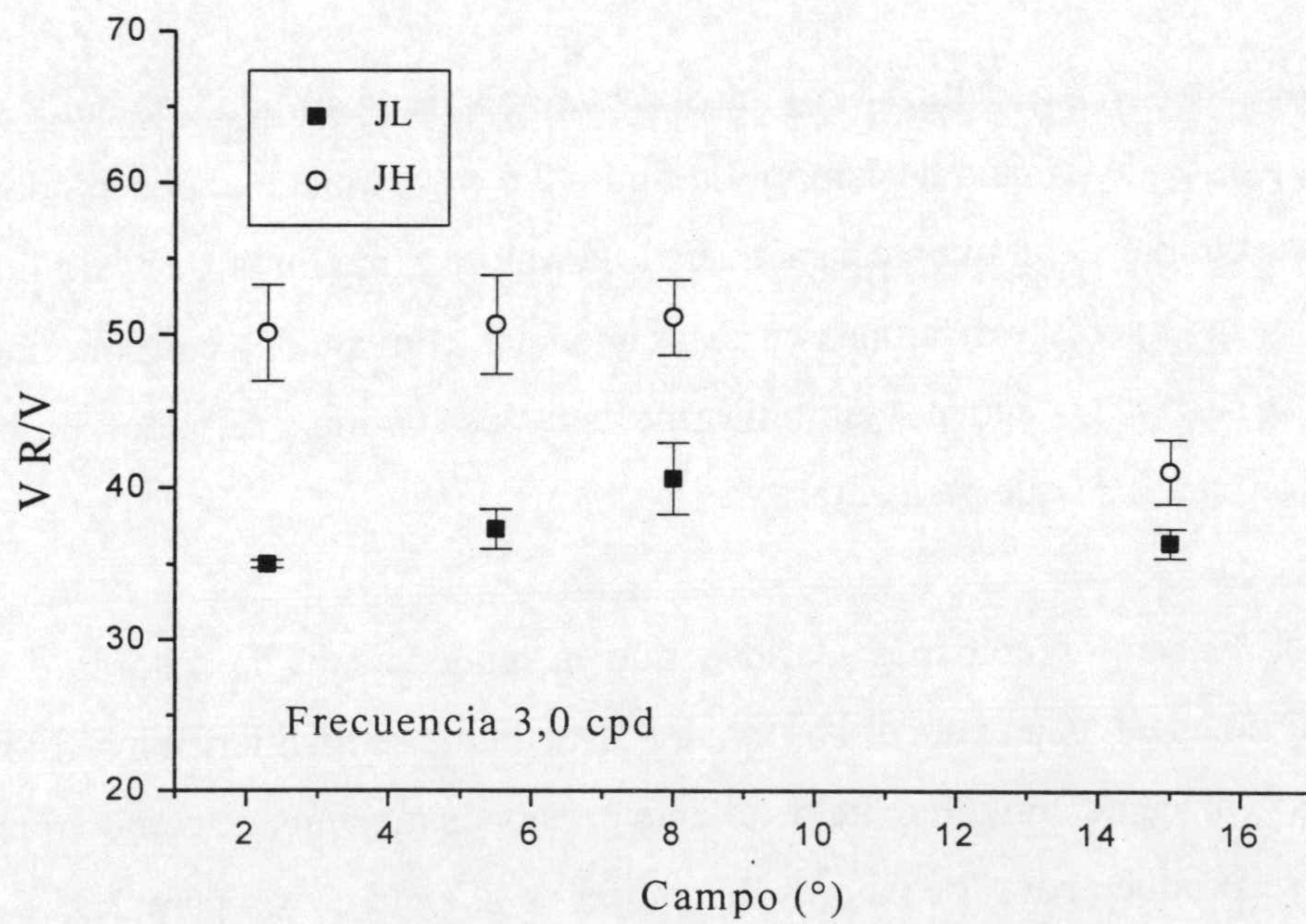


Figura 7.5. Visibilidad obtenida por los dos observadores para la frecuencia 3,0 cpd en la línea rojo-verde, en función del tamaño del campo presentado.

En resumen, considerando las tres frecuencias estudiadas, podemos destacar los siguientes aspectos a partir de los resultados obtenidos:

- 1) Los valores de visibilidad se mantienen o tienden a crecer desde $2,3^\circ$ a 8° .
- 2) El valor máximo de visibilidad se obtiene siempre para el tamaño de campo de 8° .
- 3) El valor de visibilidad para 15° tiende a ser menor que el resto de valores para los otros tamaños de campo.

Así pues, si tenemos en cuenta las tendencias observadas, no parece que se de en nuestro caso una constancia de la visibilidad con el tamaño del campo, que en otros trabajos se supone (Granger y Heurtley, 1973; Mullen, 1985). Sin embargo, dadas las condiciones experimentales diferentes (luminancia de los estímulos y diferencia de luminancias entre los estímulos y el fondo) que se dan entre dichos estudios y el nuestro, no podemos asegurar nada con rotundidad al respecto. Sin embargo, en nuestro caso sí hemos encontrado que se producen variaciones de visibilidad al aumentar el tamaño de campo, lo que da idea de un cierto grado de sumación espacial, por lo que la resolución que hemos adoptado de no variar el tamaño de campo para las medidas en las distintas frecuencias se revela como la mejor que podíamos tomar.

En las figuras 7.6 y 7.7 podemos ver juntos los valores de visibilidad obtenidos en función de la frecuencia, para cada tamaño de campo. La figura 7.6 corresponde al observador JL y la 7.7 a JH. Se observa también claramente la tendencia a valores máximos de visibilidad en 8° y mínimos en 15° y las ligeras variaciones en las tendencias comentadas con anterioridad hacen que la caída entre 1,0 y 3,0 cpd no sea uniforme para los distintos tamaños de campo, sino ligeramente mayor para $2,3^\circ$ que para el resto.

En la figura 7.7 vemos con más claridad que la tendencia hacia valores de visibilidad menores para 15° no es tan clara para el observador JH, aunque se mantienen los valores siempre superiores para 8° y la caída con diferente pendiente para unos tamaños de campo que para otros. La caída mayor se produce para los valores de campo de 8° y 15° y no para $2,3^\circ$ como sucede para JL, pues el valor de visibilidad para la frecuencia 1,0 cpd y este tamaño de campo es notablemente bajo comparado con el resto.

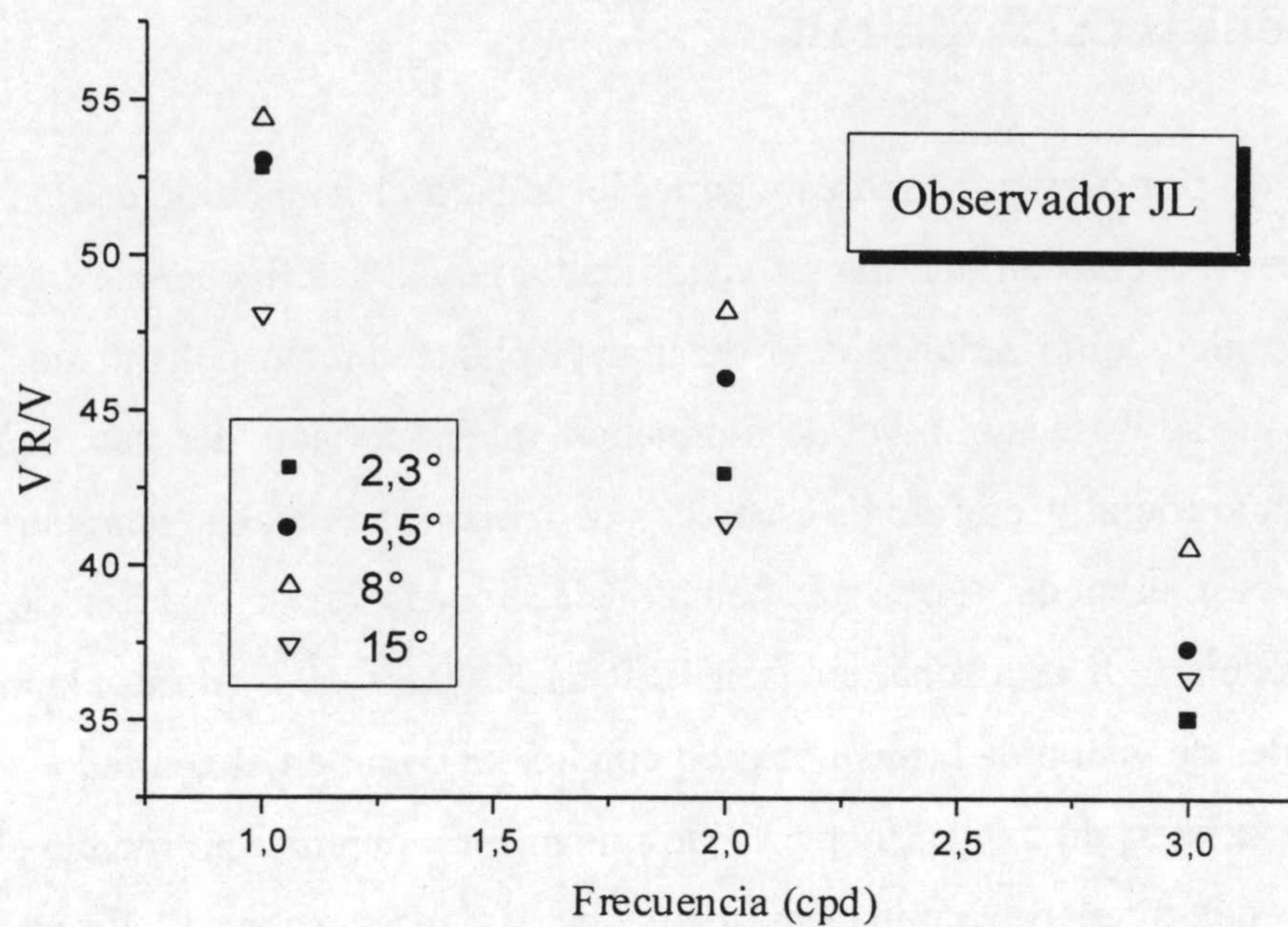


Figura 7.6. Visibilidad obtenida para el observador JL y los distintos tamaños de campo, en la línea rojo-verde, en función de la frecuencia espacial del estímulo.

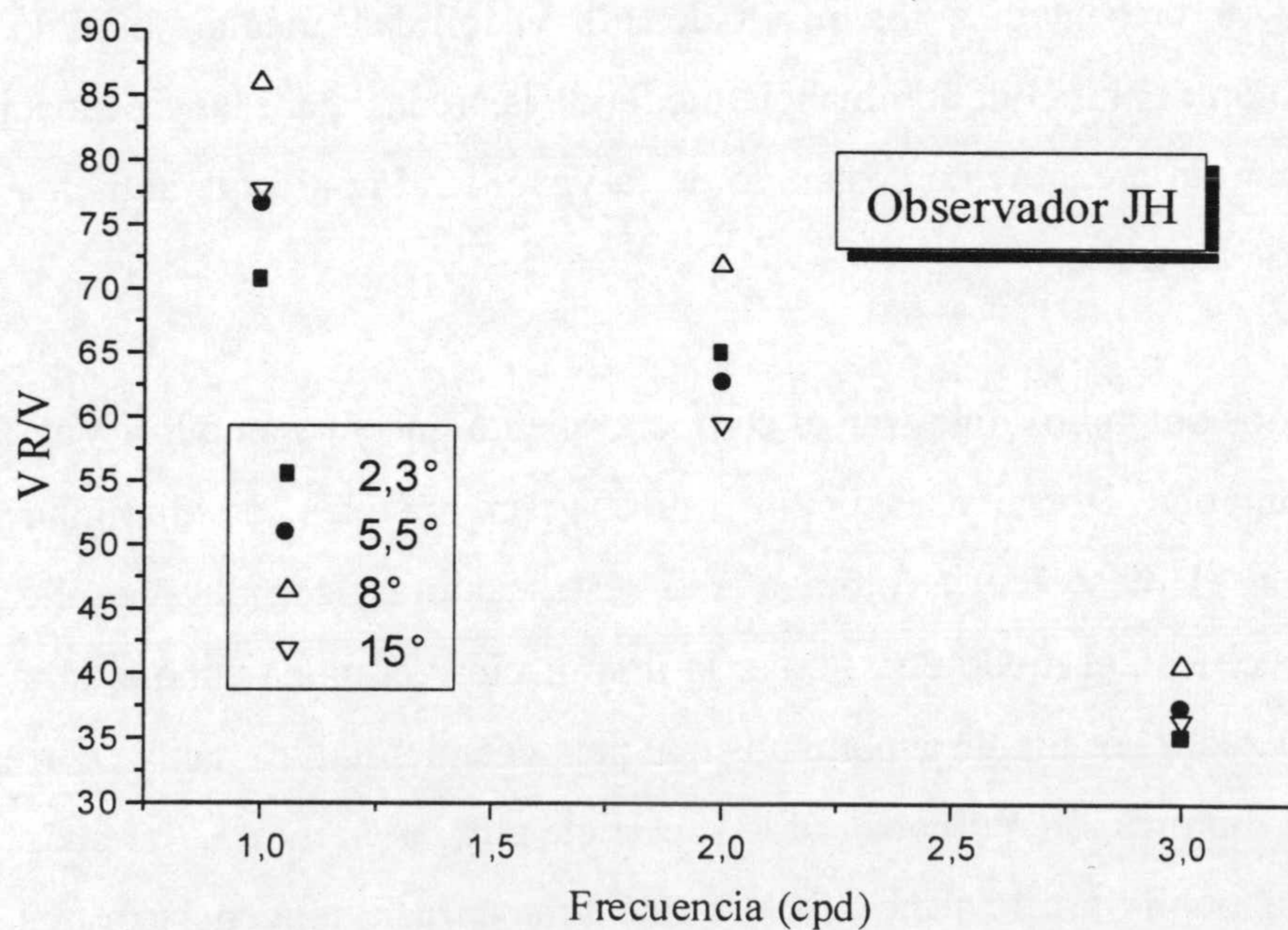


Figura 7.7. Visibilidad obtenida para el observador JH y los distintos tamaños de campo, en la línea rojo-verde, en función de la frecuencia espacial del estímulo.

7.5. INFLUENCIA DE LAS VARIACIONES EN LA LUMINANCIA MEDIA DE LAS REDES SOBRE LA VISIBILIDAD.

Hemos escogido para llevar a cabo esta parte del trabajo el tamaño de campo para el que ambos observadores presentaban una mayor visibilidad en todas las frecuencias, o sea, 8° , y el eje cardinal rojo-verde. Como señalamos al detallar el planteamiento del trabajo, en estudios anteriores, en los que se variaba el nivel de luminancia media de las redes, las medidas fueron tomadas con pupila artificial y los valores escogidos de luminancia dejaban sin cubrir la zona de iluminación fotópica intermedia. Por esto, hemos seleccionado cuatro valores de luminancia media de las redes dentro de esta zona, que son 10,5, 21,5, 40,5 y 60,5 cd/m^2 . Hemos realizado medidas de umbrales de visibilidad (tres por cada condición, como en el apartado anterior) para dos frecuencias espaciales, de 1,0 y 2,0 cpd. Dado que nuestro objetivo no incluía el estudiar la posible influencia del nivel de luminancia media de las redes sobre la forma de la CSF cromática, hemos estudiado dos frecuencias espaciales en exclusiva, lo que no nos permite confirmar o desmentir la tendencia apuntada por los dos estudios anteriores a una disminución del ancho de banda de la CSF conforme aumenta el nivel de luminancia media de las redes.

En la figura 7.8 presentamos los resultados de visibilidad media obtenidos por cada observador en función del nivel de luminancia media de las redes, para las frecuencias de 1,0 y 2,0 cpd. Puede verse un crecimiento sostenido de la visibilidad conforme aumenta el nivel de luminancia media de las redes.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento que ya apuntaron Van der Horst *et al.* (1967) y Van der Horst y Bouman (1969) para niveles de luminancia medios presumiblemente en el mesópico y fotópico alto (estos autores, como ya explicamos en el capítulo III, no especifican el modo de calcular la iluminación retiniana aunque sí el tamaño de pupila artificial utilizado, por lo que suponemos que para calcular la luminancia correspondiente basta con dividir la iluminación retiniana por la superficie pupilar en mm^2). Así pues, parece que el hecho de utilizar pupila artificial no afecta esencialmente a la tendencia de los valores de visibilidad, así como tampoco el resto de diferencias en el método experimental utilizado, por lo que se deduce que esta tendencia (análoga a la que muestran las redes en luminancia, ver capítulo II) puede generalizarse. La tendencia resulta explicable en función del aumento de la potencia de la señal neural con el nivel de luminancia media de los estímulos, que se inicia en la fase receptoral y prolonga su influencia en las fases posteriores del procesado. La mayor potencia

de la señal neural hace que el impulso transmitido sea de mayor amplitud, y también que aumente la razón señal-ruido ulteriormente, con lo que la eficacia de la señal es considerablemente mayor, y el estímulo se percibe con más facilidad.

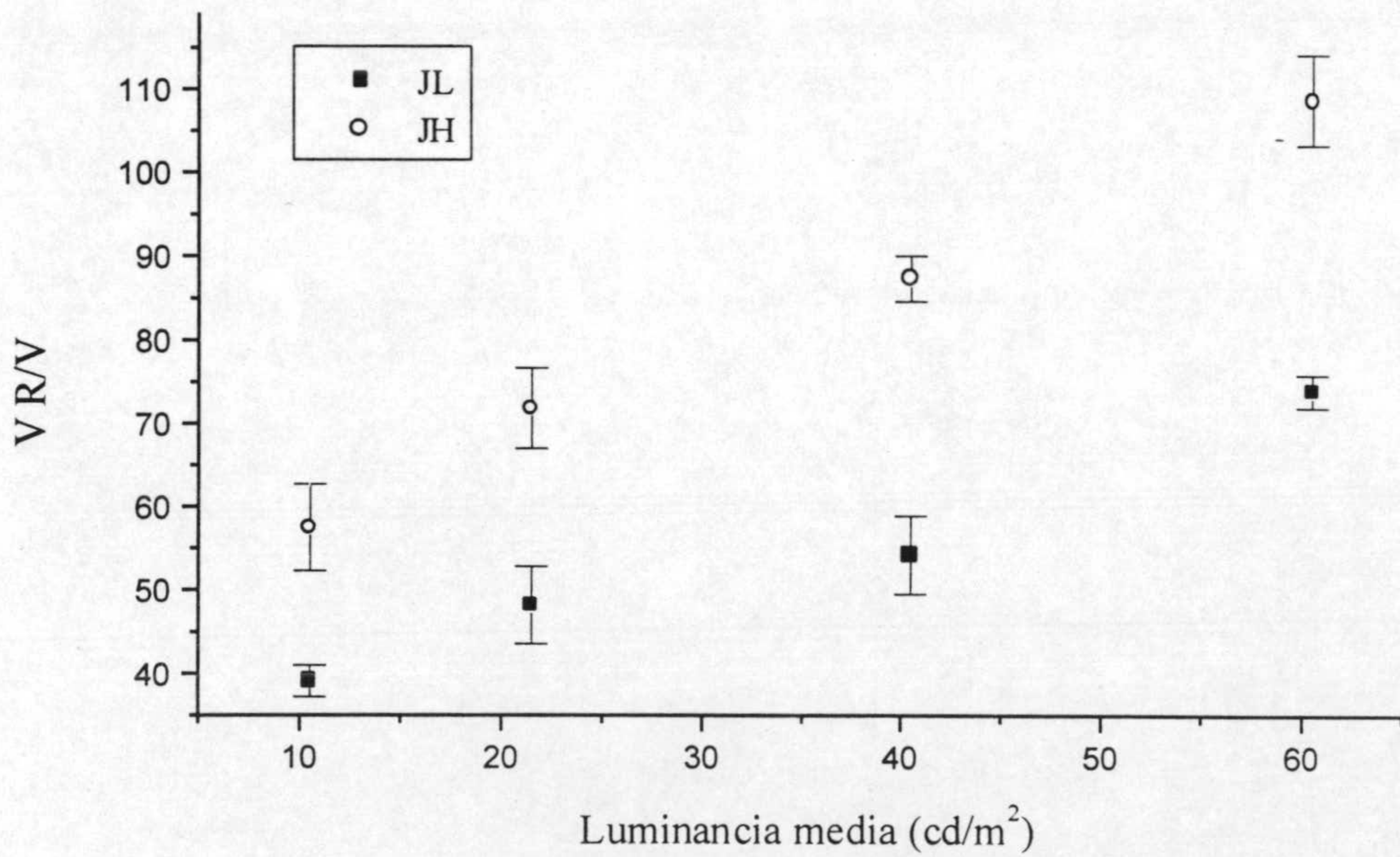
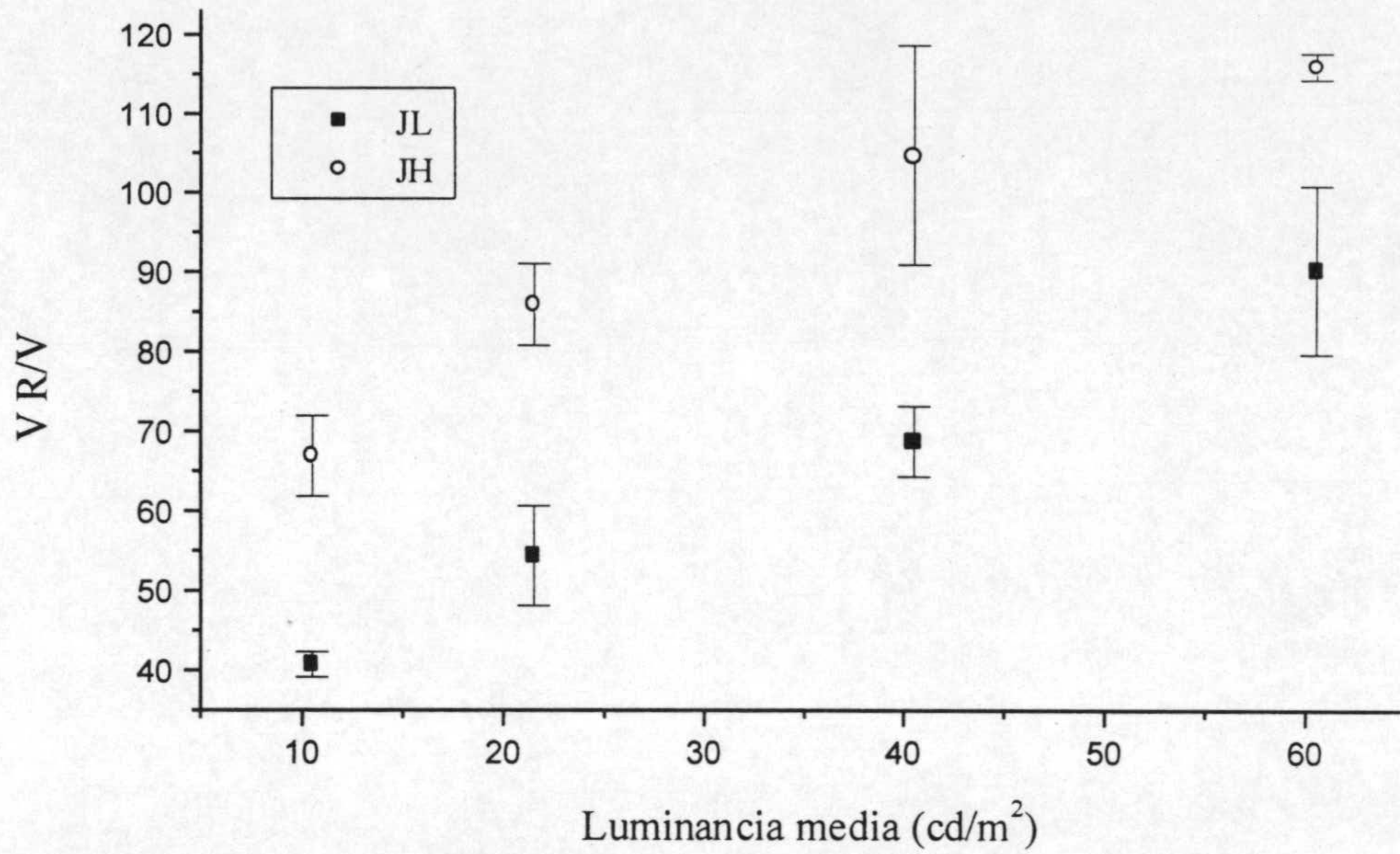
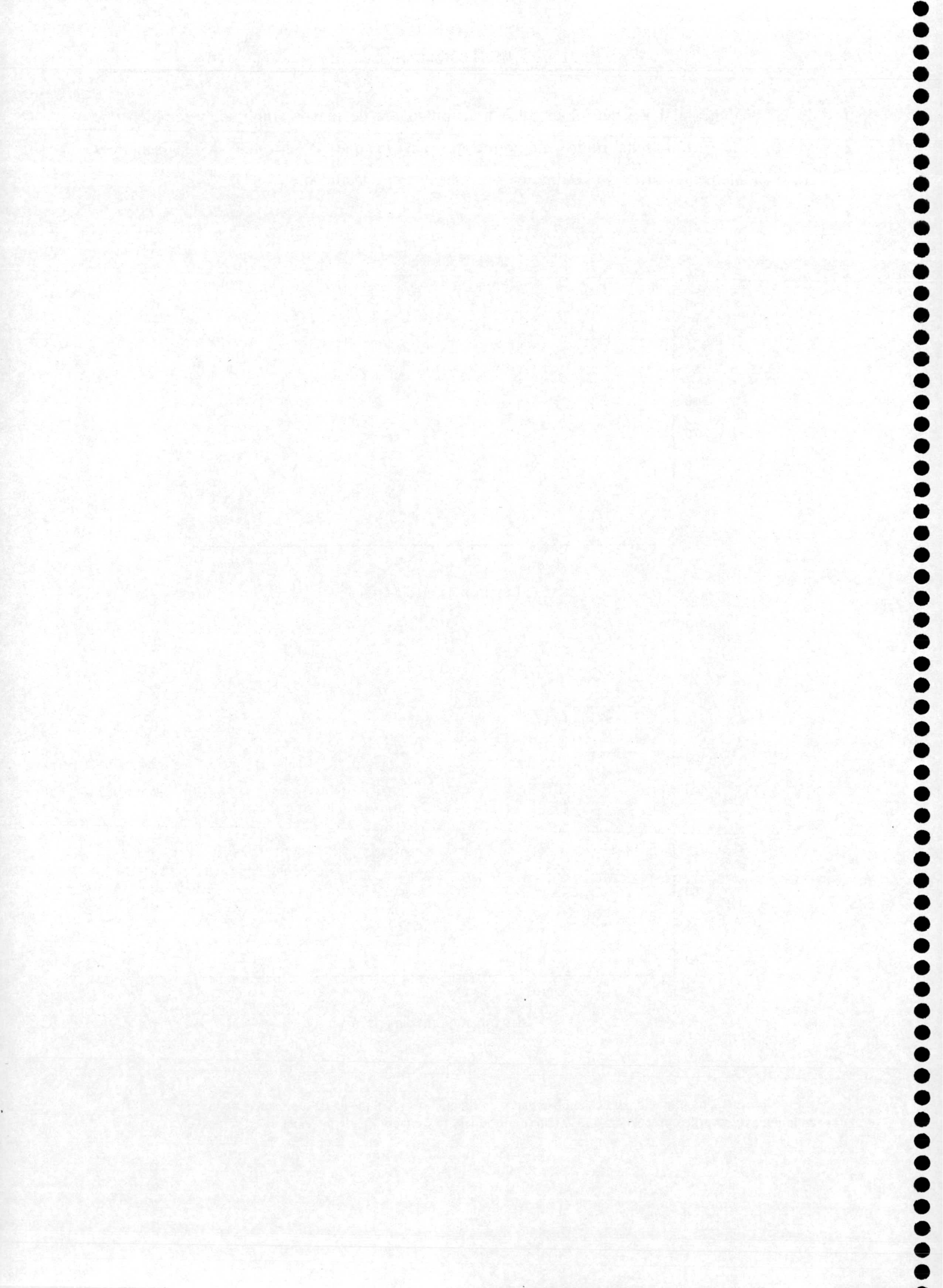


Figura 7.8. Visibilidad para cada observador en función del nivel medio de luminancia de las redes cromáticas en la línea rojo-verde y frecuencia de 1,0 cpd (parte superior) y 2,0 cpd (parte inferior).



CAPÍTULO VIII

POSIBLES INTERACCIONES ENTRE LOS MECANISMOS DE VISIÓN DEL COLOR

Creo, Watson, que estás en presencia de uno de los mayores idiotas de Europa. Merecería que me corriesen a patadas desde aquí a Charing Cross. Pero creo que ya tengo la llave del problema.
Arthur Conan Doyle. El hombre del labio torcido.

8.1. INTRODUCCIÓN.

Tras el análisis en detalle de la CSF cromática en los ejes cardinales, nos planteamos ahora obtener información acerca del comportamiento de los mecanismos de visión del color cuando actúan conjuntamente en una tarea de detección de redes cromáticas. Es decir, intentaremos responder a la pregunta de qué sucede con las respuestas de ambos canales cromáticos (rojo-verde y amarillo-azul) cuando presentamos al observador una red que estimula a los dos simultáneamente. Las posibilidades que quedan abiertas en principio podrían agruparse en dos categorías: las que indiquen *interacción entre dichos mecanismos* o las que sean *compatibles con una hipótesis de independencia*. Dentro de la primera categoría, se situarían, por ejemplo, posibles incrementos o decrementos del umbral de sensibilidad en alguno de los canales cuando los dos actúan conjuntamente. En la segunda categoría, se situarían resultados que no indicasen cambios significativos del umbral para redes situadas en ejes no cardinales.

Otra cuestión interesante que surge a la hora de plantear esta parte del estudio es si habrá algún cambio en la forma de la CSF al utilizar ejes no cardinales. Según explicamos en el capítulo II, los modelos propuestos para explicar la percepción espacial en color sugieren que, de modo análogo a como sucede para redes en luminancia, hay una serie de filtros sintonizados en diferentes bandas de frecuencia y la CSF resulta ser la envolvente de las distintas funciones de sensibilidad de dichos filtros. En el rango de frecuencias en el que nos movemos estarían funcionando varios de estos filtros y cabría pensar que no todos se comportan de igual forma ante un estímulo combinado, lo cual haría que variase la forma de la CSF cromática.

En definitiva, nos proponemos abordar la presentación de los resultados que se derivan de lo propuesto en los objetivos segundo y tercero del capítulo IV. En primer lugar, analizaremos los resultados de CSF en ejes intermedios o no cardinales. Estudiaremos también la posible utilidad de la determinación de la CSF en líneas intermedias para extraer conclusiones sobre la independencia o no de los mecanismos de visión del color y, por último, emplearemos la técnica alternativa de sumación subumbral para dilucidar completamente esta cuestión y aportar nuestra visión de los resultados conflictivos obtenidos para la interacción luminancia-cromaticidad que vimos en el capítulo III.

8.2. RESULTADOS PARA LOS EJES INTERMEDIOS.

Como explicamos en el capítulo VI, los dos ejes que llamamos intermedios o no cardinales están definidos de manera que en ambos se presentan al observador cantidades iguales en valor absoluto de contraste cromático rojo-verde y amarillo-azul. Para la línea intermedia que denominamos '1', la condición que se verifica es:

$$C_{r-v} = C_{am-az}$$

Para la línea intermedia '2', se verifica en cambio que:

$$C_{r-v} = - C_{am-az}$$

La posición de las líneas que definen ambos ejes en el espacio CIE 1931 puede verse en la figura 6.5 del capítulo VI.

8.2.1. Resultados para la línea intermedia '1'.

Este eje, que también podríamos denominar eje *rosa púrpura-verde amarillento* por la cromaticidad de las redes asociadas, queda definido por la condición $C_{r-v} = C_{am-az}$. En la figura 8.1 presentamos la CSF obtenida para este eje por los dos observadores, JL y JH.

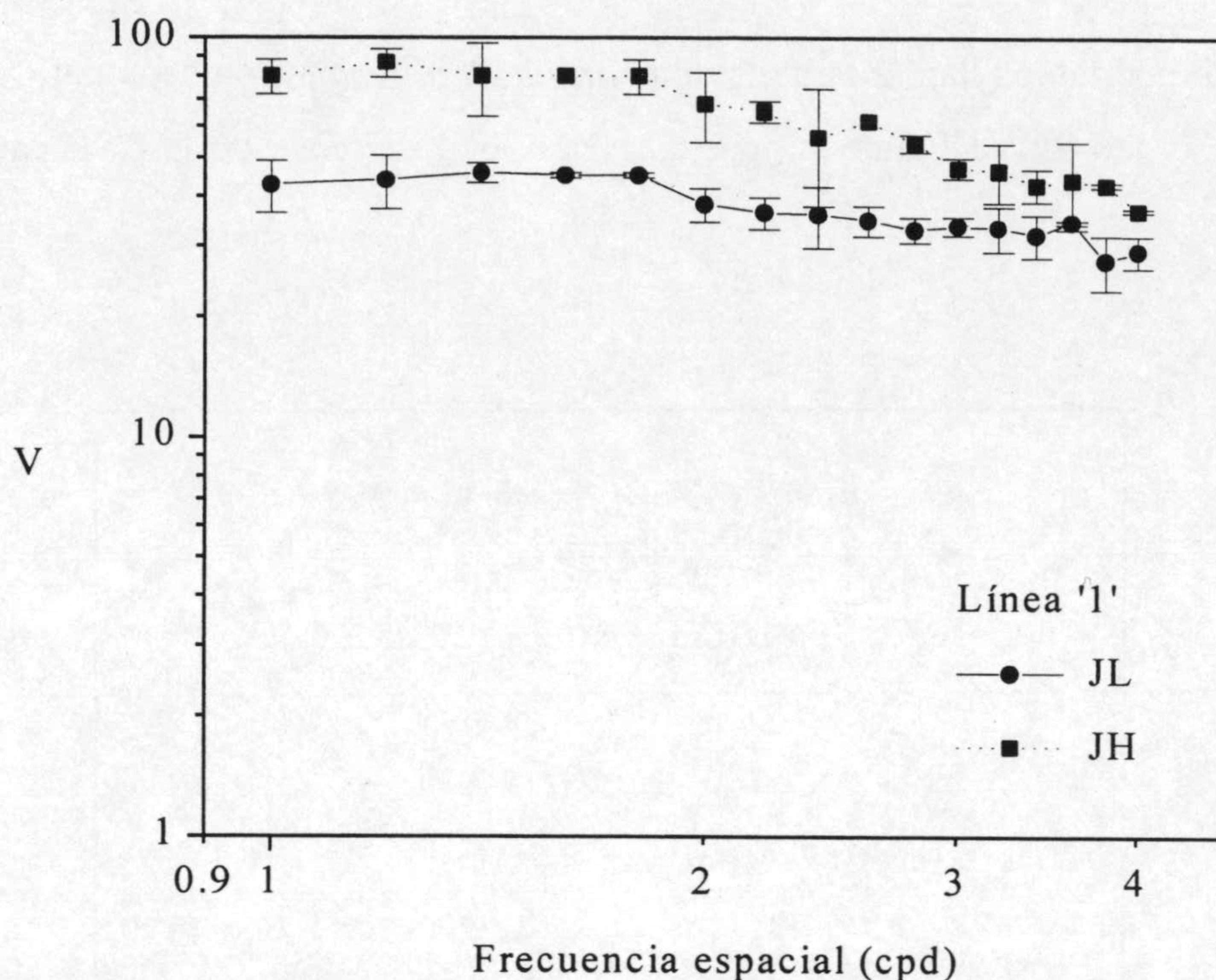


Figura 8.1. CSF cromática en el eje intermedio '1' para ambos observadores.

Nótese que el eje de ordenadas se ha titulado 'V' a secas y no 'V r/v' o 'V am-az' como en el capítulo anterior. Lo hemos hecho así para enfatizar que, dada la definición de la línea '1', ambas visibilidades son exactamente iguales, es decir, el umbral obtenido para la línea sería en principio tanto rojo-verde como amarillo-azul. Volveremos sobre esta cuestión en el apartado dedicado a la comparación con los resultados de las CSF en los ejes cardinales.

La forma de las dos curvas es de tipo paso-baja y el observador JH presenta mayor visibilidad para todo el rango de frecuencias, de forma más clara que en los resultados de la CSF en ejes cardinales. Volveremos a comentar este aspecto más adelante. Los valores máximos de visibilidad son de 86,5 para JH y 45,7 para JL. El factor de caída de la curva (cociente del máximo entre el mínimo de visibilidad) es de 2,3 para JH y 1,5 para JL, en línea también con los resultados obtenidos en los ejes cardinales aunque algo más reducido para JL.

8.2.2. Resultados para la línea intermedia '2'.

Esta línea, que podríamos llamar también eje *naranja-azul turquesa*, queda definida por la condición $C_{r-v} = - C_{am-az}$. En la figura 8.2 pueden verse los resultados de la CSF para ambos observadores.

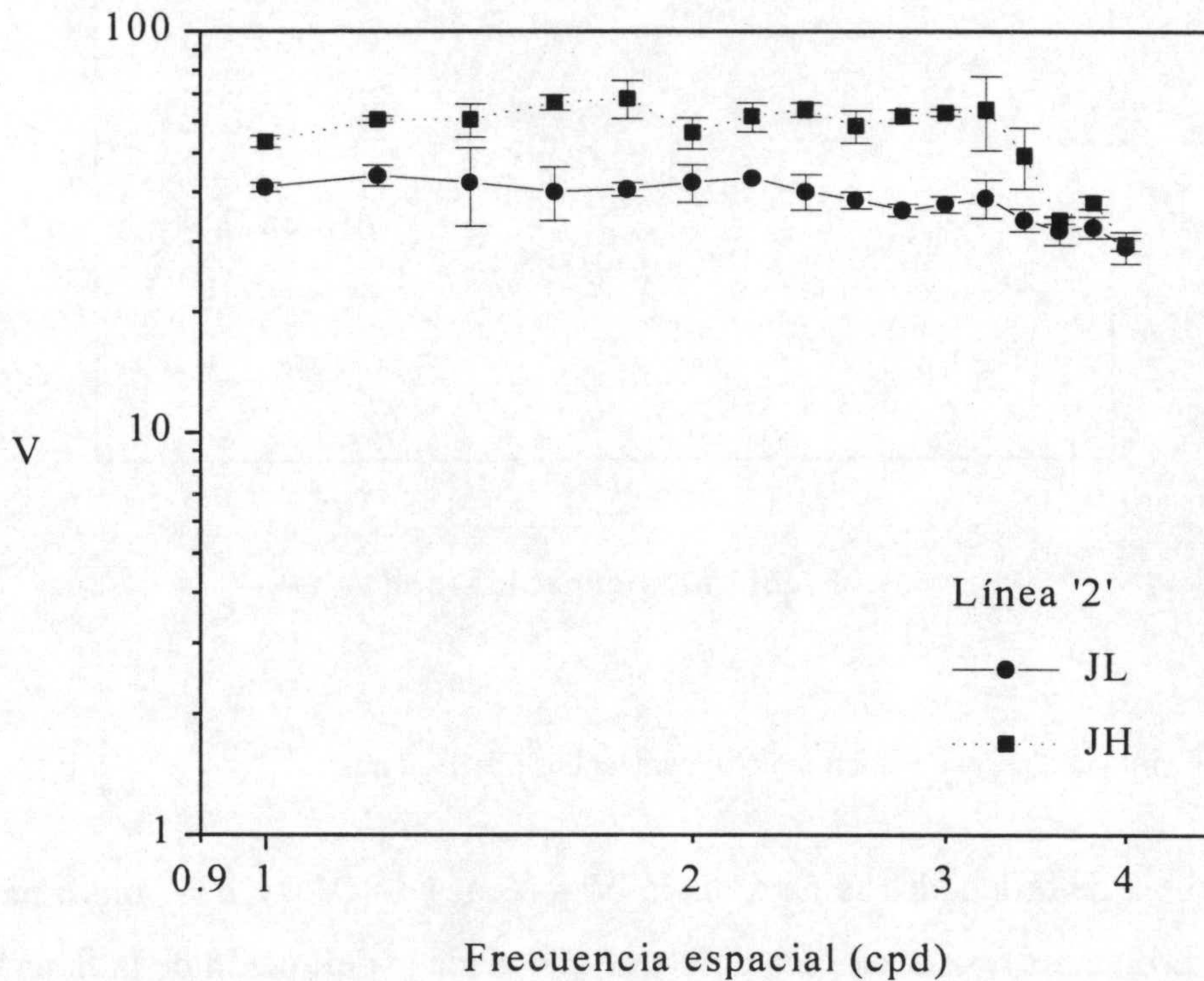


Figura 8.2. CSF cromática en el eje intermedio '2' para ambos observadores.

La tendencia de JH a valores superiores de visibilidad se mantiene. Los valores máximos de visibilidad son de 68,1 para JH y 43,8 para JL, siendo el factor de caída de 2,1 para JH y 1,5 para JL.

Podemos observar que los resultados son similares para ambas líneas intermedias. Esto era de esperar, pues ambas son simétricas en el espacio de excitación de conos. Así pues, la cuantía de la excitación para los mecanismos oponentes rojo-verde y amarillo-azul es también muy similar relativamente, con lo que resulta lógico pensar que el sistema visual responda de forma muy similar a los estímulos en ambas líneas. El hecho de haber realizado la CSF para los dos

ejes nos sirve, adicionalmente, para comprobar esta hipótesis de comportamiento del sistema visual.

8.2.3. Comparación de los resultados con los de los ejes cardinales.

La comparación debemos realizarla en cada uno de los ejes por separado, para ser coherentes con lo señalado en el capítulo VII sobre la imposibilidad de comparar resultados correspondientes al eje rojo-verde con los correspondientes al amarillo-azul.

El método de comparación que hemos elegido ofrece una doble vertiente: por un lado, se trata de una comparación directa de los valores de visibilidad obtenidos para ambos ejes, sin distinción entre las diferentes frecuencias; por otro lado, según indicamos en la introducción, es interesante ver si a lo largo del rango de frecuencias hay alguna tendencia en las diferencias encontradas. El análisis de esta posible tendencia lo realizaremos mediante la definición de un parámetro de comparación tipo fracción de Weber, que quedaría de la siguiente forma:

$$W_i = \frac{|V_{int} - V_i|}{V_{int}} \quad (1)$$

donde el subíndice i representa al mecanismo rojo-verde (r-v) o amarillo-azul (am-az), y V_{int} al umbral de sensibilidad para el eje intermedio correspondiente.

a) Eje rojo-verde.

Comparación directa.

En la figura 8.3 se representan todos los valores de visibilidad intermedia obtenidos para cada uno de los observadores frente a sus correspondientes valores de visibilidad rojo-verde. Se incluye también la línea de pendiente unidad, que representaría la situación de igualdad completa entre ambos grupos de resultados. Hay dos aspectos importantes que podemos deducir de la comparación directa. Por un lado, de acuerdo con el comentario anterior que se refería a que los resultados de ambos ejes intermedios son bastante similares entre sí, vemos que las tendencias de los dos grupos de datos en cada parte de la figura son también las mismas, es decir, coincide el comportamiento global de los puntos correspondientes a la línea '1' con el que muestra la línea '2' para cada uno de los observadores. Por otro lado, el comportamiento para la visibilidad rojo-

verde difiere en cuanto a la tendencia mostrada entre ambos observadores: JL tiende hacia una disminución de los valores de visibilidad para los ejes intermedios con respecto a los que obtuvo para el eje cardinal rojo-verde, mientras que JH muestra una tendencia hacia una ausencia de cambios en los valores de visibilidad. De otra forma, podríamos decir que el añadir la misma cantidad de contraste amarillo-azul al eje cardinal rojo-verde parece que hace disminuir levemente la visibilidad para JL y no la altera para JH. Volveremos sobre este aspecto en apartados posteriores.

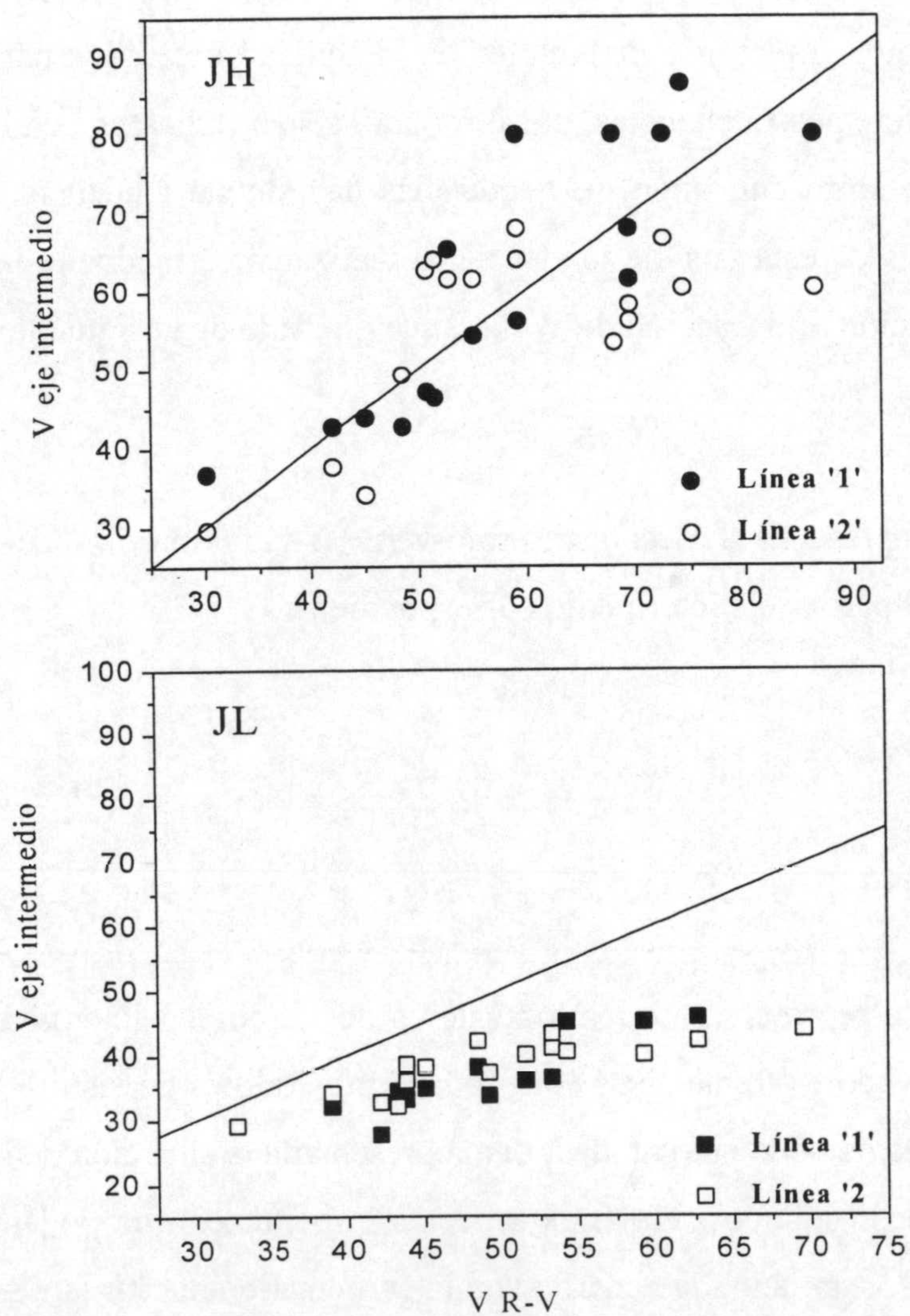


Figura 8.3. Comparación directa entre la visibilidad obtenida para los ejes intermedios (ordenadas) y la obtenida para el eje cardinal rojo-verde (abscisas). La línea de pendiente unidad representa la situación de igualdad entre ambos resultados. En la parte superior de la figura se muestra la comparación para JH y en la parte inferior para JL.

Comparación para los distintos valores de frecuencia.

En la figura 8.4 se representa la fracción de Weber (definida como se indica en la ecuación 8.1) en función de la frecuencia espacial, para el eje cardinal rojo-verde con la línea intermedia '1'. Podemos deducir que el comportamiento en cuanto a las diferencias observadas con el eje cardinal rojo-verde parece no registrar cambios a lo largo del rango de frecuencias utilizado, siendo irregular en todo él. También se ve reflejada en la figura la tendencia mostrada por la figura 8.3 hacia mayores variaciones relativas de sensibilidad para el observador JL que para el observador JH. Las mismas conclusiones se hacen también extensivas para la línea intermedia '2', como puede verse en la figura 8.5, aunque las variaciones entre los distintos observadores son menos aparentes que para la línea '1'.

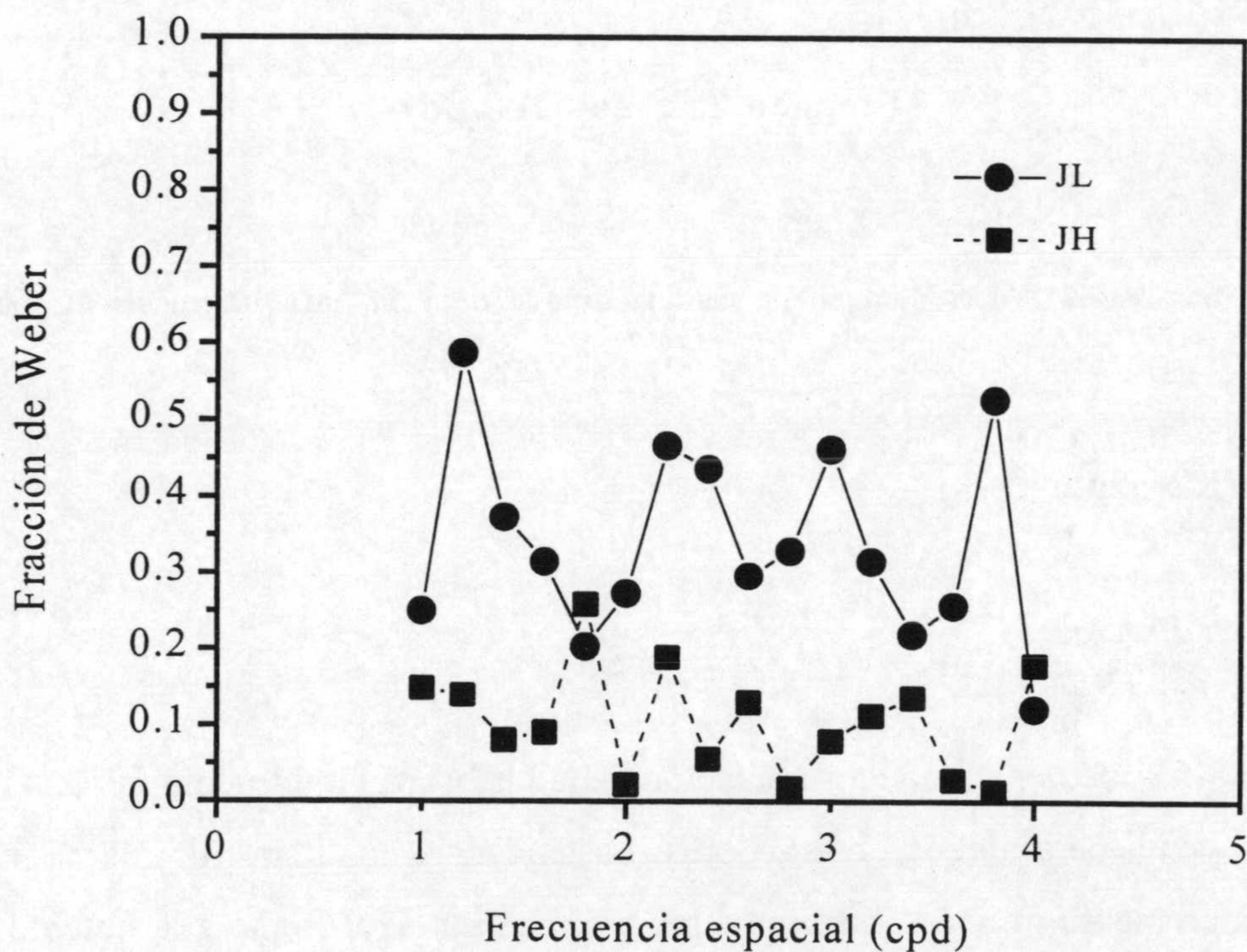


Figura 8.4. Fracción de Weber para el eje cardinal rojo-verde y la línea intermedia '1', para ambos observadores.

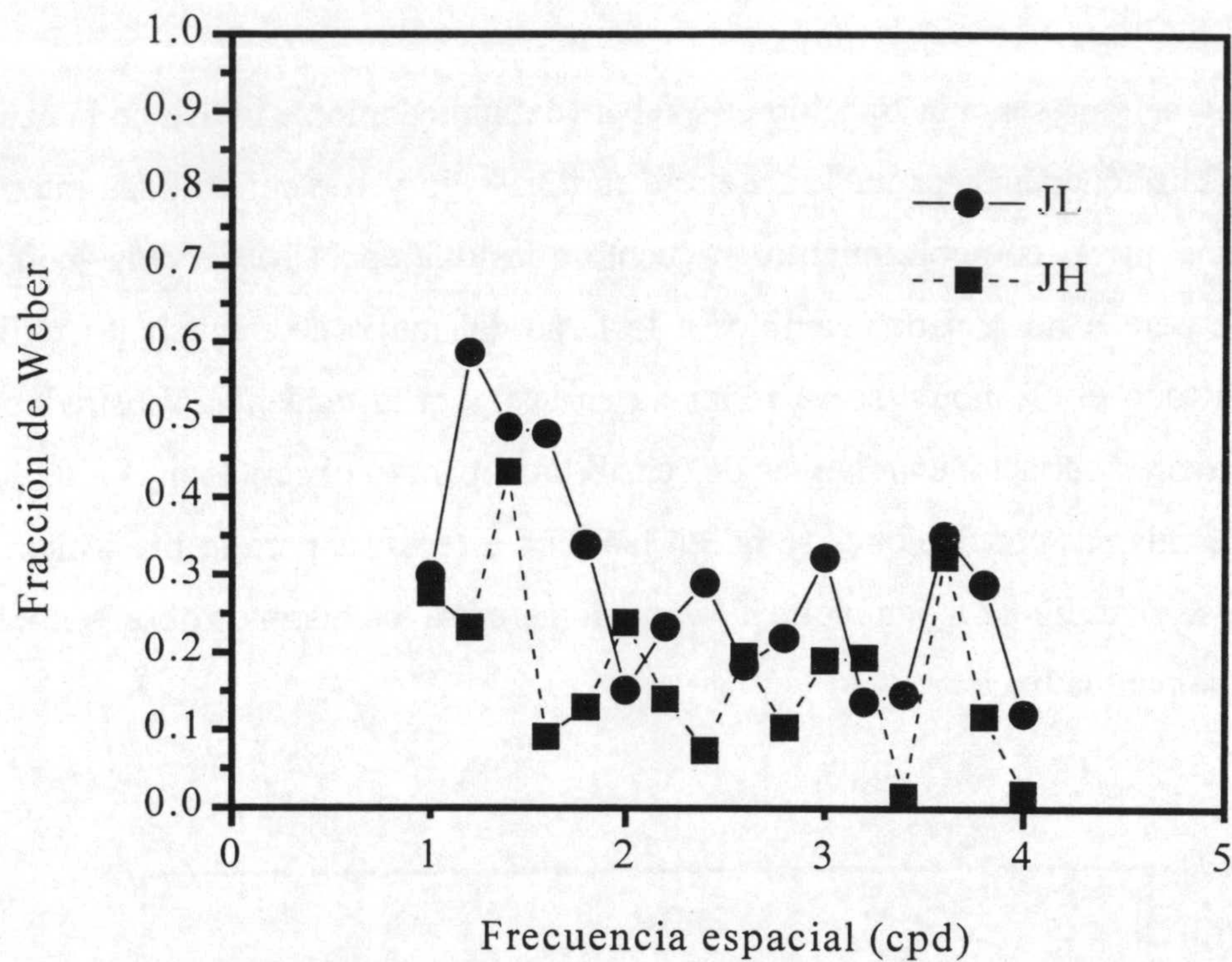


Figura 8.5. Fracción de Weber para el eje cardinal rojo-verde y la línea intermedia '2', para ambos observadores.

b) Eje amarillo-azul.

Comparación directa.

En la figura 8.6 podemos ver la representación de la visibilidad intermedia frente a la del eje cardinal amarillo-azul, para ambos observadores. La tendencia es ahora muy clara en los dos casos hacia un incremento muy notable en visibilidad amarillo-azul frente a la obtenida para el eje cardinal correspondiente. Es decir, que añadiendo iguales cantidades de contraste rojo-verde conseguimos aparentemente una mejora sustancial de las capacidades de detección en el eje amarillo-azul.

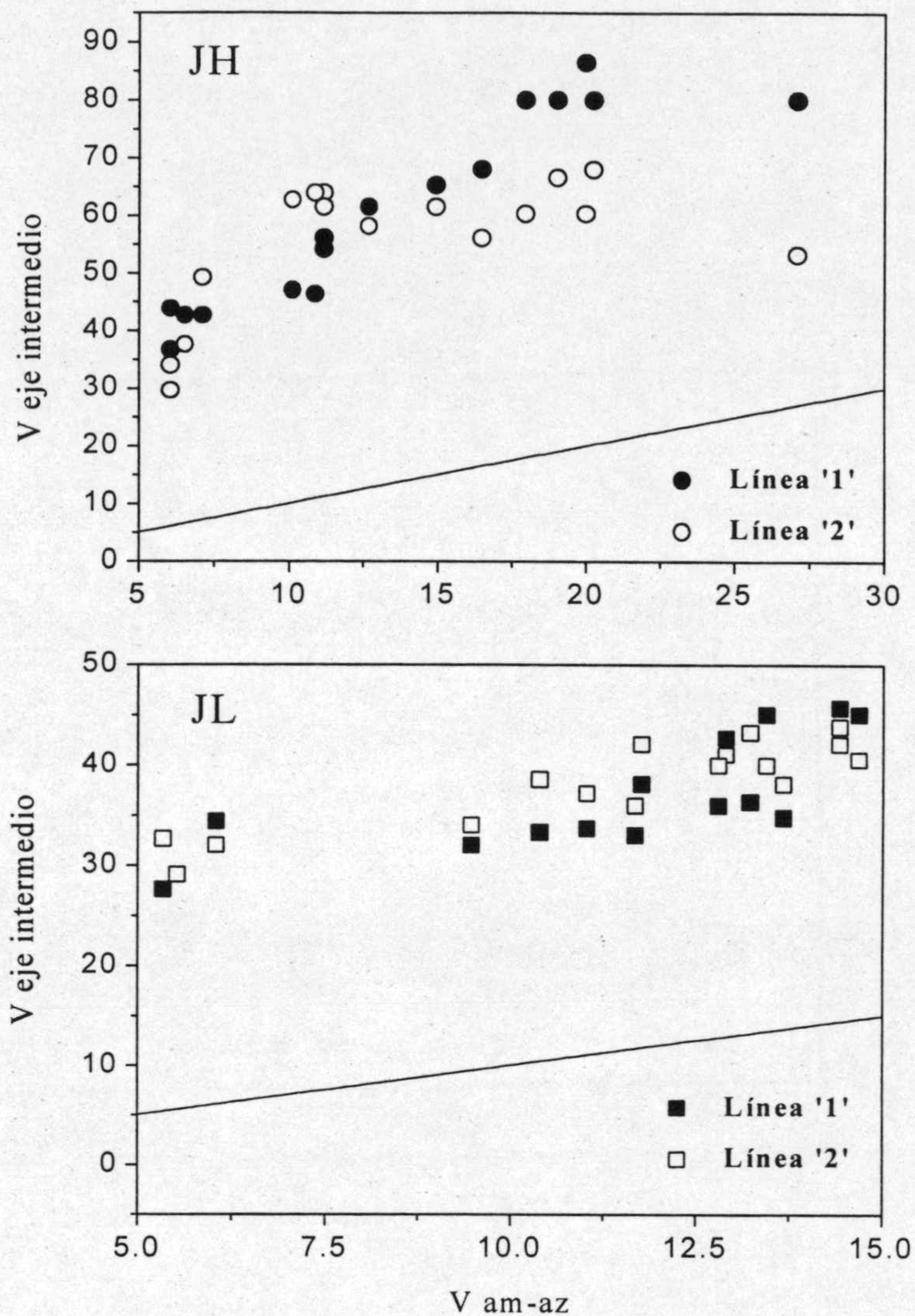


Figura 8.6. Comparación entre la visibilidad obtenida para los ejes intermedios (ordenadas) y la obtenida para el eje cardinal amarillo-azul (abscisas). La línea de pendiente unidad representa la situación de igualdad entre ambos resultados. En la parte superior de la figura se muestra la comparación para JH y en la parte inferior para JL.

Comparación para los distintos valores de frecuencia.

En la figura 8.7 se representa la fracción de Weber (definida como se indica en la ecuación 8.1) en función de la frecuencia espacial, para el eje cardinal amarillo-azul con la línea intermedia '1' y para ambos observadores. Podemos observar, en línea con lo señalado anteriormente para la figura 8.6, que las variaciones relativas con respecto a la visibilidad del eje cardinal son bastante mayores que para el eje rojo-verde y la tendencia coincide para los dos observadores. En cuanto al comportamiento para las distintas frecuencias, podemos señalar que

se mantiene con una mayor uniformidad que para el eje rojo-verde, sin que aparezca la característica forma de picos alternantes, y con mucha menor diferencia entre los valores máximos y mínimos de la fracción de Weber. Esta tendencia es similar para los dos observadores.

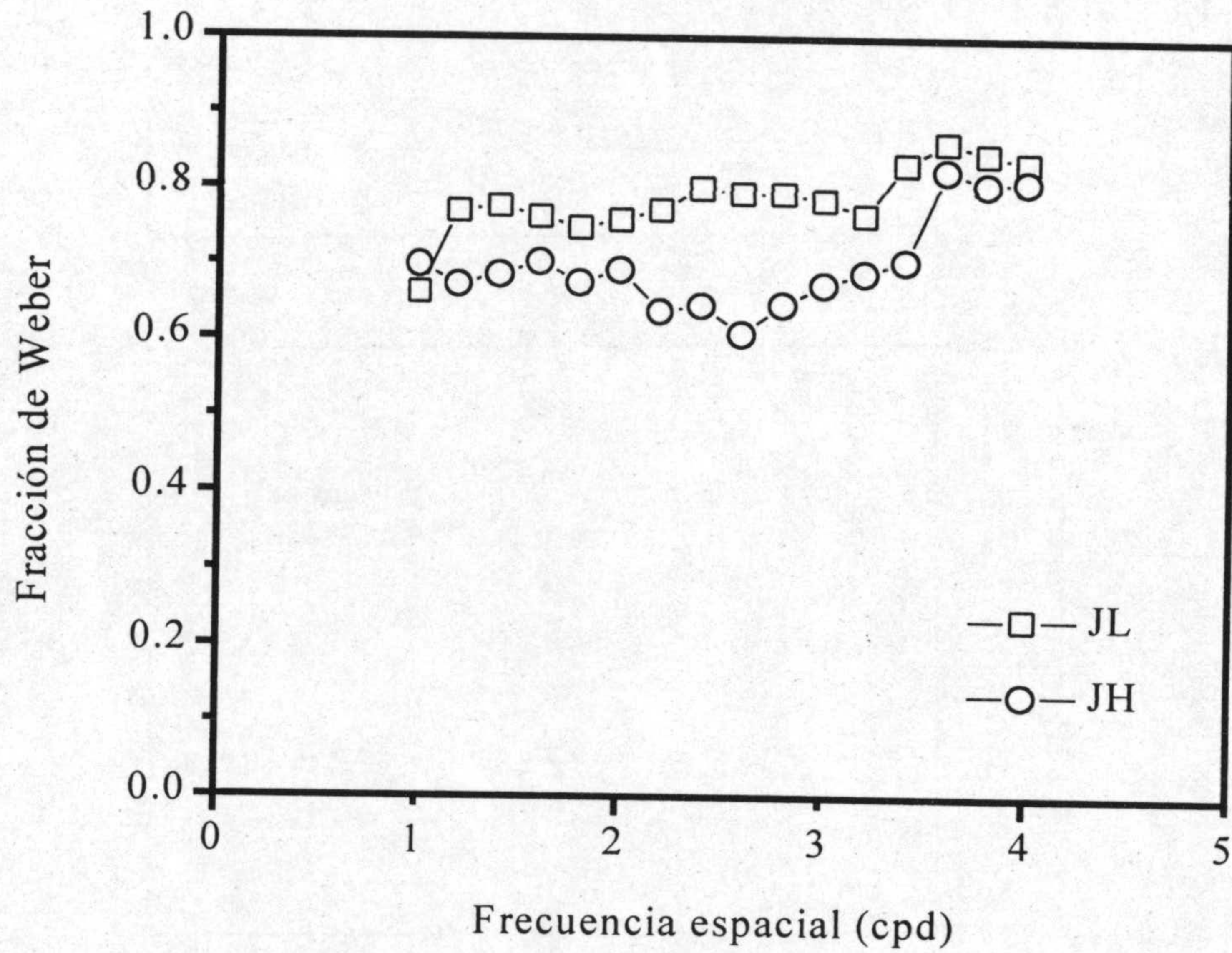


Figura 8.7. Fracción de Weber para el eje cardinal amarillo-azul y la línea intermedia '1'.

Las características de los resultados para la comparación en todo el rango de frecuencias con el eje amarillo-azul son muy similares para el otro eje intermedio, la línea '2', como puede deducirse de la figura 8.8, aunque la tendencia a la uniformidad entre las diferentes frecuencias es menor para el observador JH.

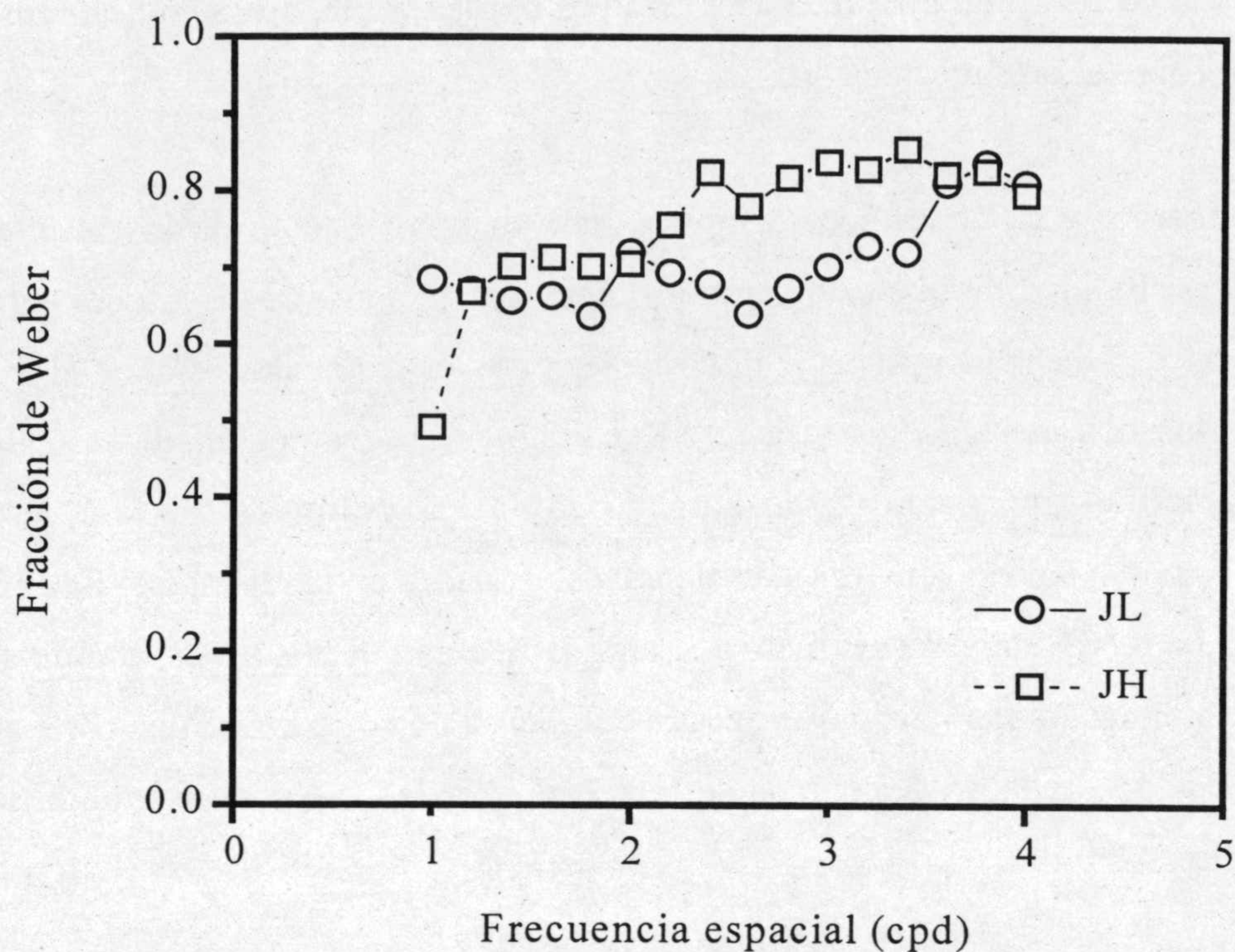


Figura 8.8. Fracción de Weber para el eje cardinal amarillo-azul y la línea intermedia '2'.

8.2.4. Aportación a la caracterización de las posibles interacciones entre mecanismos visuales.

Resumiendo las conclusiones a las que nos lleva el análisis comparativo realizado en los apartados anteriores, podemos señalar que:

- 1) "aparentemente" la visibilidad amarillo-azul se ve fuertemente incrementada por la adición de contraste rojo-verde, lo que podría considerarse, en principio, como un indicio que apuntase hacia una interacción entre canales;
- 2) la visibilidad rojo-verde no se ve afectada o cambia muy ligeramente por la adición de contraste amarillo-azul.

Podría pensarse entonces, considerando que la influencia sobre los cambios de la visibilidad no se produce de igual manera para ambos canales, que existe una interacción de tipo asimétrico,

que podríamos llamar *dominancia aparente rojo-verde*. El canal que sufre menos modificaciones por la adición de contraste del otro mecanismo es el rojo-verde, que se muestra así más estable, dominando sobre el otro mecanismo.

Sin embargo, para poder considerar válida esta interpretación de los resultados debemos eliminar la posibilidad de que estuvieran influidos por factores de diseño del experimento. Un factor que puede tener una influencia importante sobre los resultados es el nivel de estimulación relativo de los dos mecanismos visuales. Recordemos que hemos añadido *igual cantidad* de contraste amarillo-azul y rojo-verde para construir los estímulos en los ejes intermedios. ¿Significa esto que ambos canales están siendo estimulados en la misma medida en las líneas no cardinales? La respuesta sería afirmativa si ambos tuvieran el mismo umbral de sensibilidad al contraste cromático, o bien, dado que nuestra definición no nos permite una comparación directa entre ejes, que las unidades de contraste estuvieran reescaladas según los umbrales de detección en ambos ejes.

Veamos un ejemplo que ayude a explicar con más claridad esta última idea sobre la necesidad de plantear un cambio de escala de contraste en unidades umbral. Para el eje intermedio '1', consideremos un punto de la línea de contraste 0,0125. Esto implica que hay 0,0125 de contraste rojo-verde y 0,0125 de contraste amarillo-azul. Supongamos que el sujeto tiene un umbral de contraste rojo-verde para una frecuencia dada de 0,012, mientras que su umbral amarillo-azul para la misma frecuencia fuese de 0,085. ¿Cómo respondería entonces el sujeto ante el estímulo de la línea '1'? Dado que para el canal rojo-verde se ha superado apenas el umbral de contraste, el estímulo sería entonces apenas perceptible para el observador. Sin embargo, para el canal amarillo-azul el estímulo se encuentra claramente por debajo del umbral de contraste, por lo que este mecanismo se encontraría estimulado en mucha menor medida, relativamente hablando, que el rojo-verde. Bajo este punto de vista, que el sujeto perciba el estímulo para ese valor de contraste en la línea '1' no significa en absoluto que su umbral de contraste amarillo-azul haya disminuido, sino que ha sido mediante el canal rojo-verde, estimulado en mayor medida, que el sujeto ha podido percibir el estímulo.

En este ejemplo, hemos visto que podemos obtener una explicación a nuestros resultados perfectamente compatible con la hipótesis de independencia de los mecanismos visuales, pues en ningún momento hemos dejado de considerarlos por separado. El problema con nuestros ejes

intermedios sería entonces que están "viciados", en el sentido de que no están teniendo en cuenta la diferencia de sensibilidad entre ambos mecanismos visuales. Sin embargo, no tiene sentido plantearnos construir una CSF utilizando unidades de contraste reescaladas según el umbral en cada eje, pues entonces la CSF en ambos ejes cardinales tendría valor unidad en todo el rango de frecuencias y perderíamos la información aportada por la caída en función de la frecuencia, factor fundamental en el estudio de la CSF, como hemos visto en los capítulos anteriores. En este punto del análisis, considerando también como un factor importante las diferencias de comportamiento en el eje rojo-verde que se producen entre los dos observadores, conviene entonces plantearse la posibilidad de cambiar de método experimental para analizar la cuestión de la posible interacción entre mecanismos visuales, de forma que nos limitásemos a una frecuencia determinada, reescalando en unidades umbral ambos ejes y viendo qué sucede con el umbral de percepción de la red si añadimos distintas cantidades (ahora sí relativas al umbral) de contraste rojo-verde y amarillo-azul. El procedimiento ideal resulta ser entonces el de *sumación subumbral*, que explicamos en el capítulo III. Los resultados que obtengamos por este método nos ayudarán a dilucidar si la explicación alternativa ofrecida para nuestros datos en el ejemplo que hemos visto antes es efectivamente correcta, o bien podemos seguir considerando la posibilidad de que exista interacción en la zona subumbral para la detección de redes cromáticas.

8.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR SUMACIÓN SUBUMBRALE.

Además de aportar información sobre la posible interacción entre los canales cromáticos en la zona por debajo del umbral de percepción, los resultados que se obtengan por medio del procedimiento de sumación subumbral en nuestro caso pueden ayudar a dilucidar otra cuestión. Como indicamos en el capítulo IV, según Mullen y Sankeralli (1999), el sistema escogido para determinar la isoluminancia puede ser una clave importante para explicar las discrepancias entre sus resultados para la interacción luminancia-cromaticidad y los obtenidos por Gur y Akri (1992). Nosotros utilizamos para medir la isoluminancia el método de fotometría de parpadeo, como Gur y Akri, con la única modificación de tomar varias medidas de isoluminancia para distintos valores de contraste cromático. Si el fallo está en el método de fotometría de parpadeo globalmente, entonces es de esperar que obtengamos un perfil de interacción lineal, como sucedió a Gur y Akri, pues la tesis de Mullen y Sankeralli es que este sistema introdujo variaciones adicionales de luminancia y el canal rojo-verde no estaba bien aislado. Sin embargo, si el fallo está en sólo realizar una medida de isoluminancia y no varias a lo largo del eje

cromático, entonces el uso de la fotometría de parpadeo será compatible con la obtención de resultados similares a los de Mullen y Sankeralli para la interacción entre ambos canales cromáticos.

8.3.1. Curvas de sumación subumbral para ambos observadores.

El procedimiento seguido para la obtención de los datos consiste en medir el umbral para uno de los canales cromáticos, una vez determinada la isoluminancia, en presencia de una serie de pedestales fijos de contraste del otro canal cromático. La frecuencia espacial de la red queda fijada en 0,5 cpd, lo que con el campo utilizado de 8° permite que aparezcan cuatro ciclos completos en la pantalla del monitor de presentación. Para representar los datos, reescalamos los ejes correspondientes a ambos canales en sus respectivas unidades de contraste cromático umbral, que hemos medido previamente a introducir los pedestales. Los datos así representados pueden ajustarse, según el modelo de Quick (1974), por un procedimiento de mínimos cuadrados a una curva correspondiente a la ecuación:

$$x^k + y^k = 1 \quad (2)$$

donde x e y representan los valores de contraste en unidades umbral para el eje rojo-verde y amarillo-azul respectivamente, en presencia de los pedestales correspondientes. Del ajuste obtenemos el valor del coeficiente k que determina la compatibilidad o no con la hipótesis de independencia de ambos mecanismos, siguiendo la interpretación de la ecuación (2) que propone la teoría de *probabilidad de sumación* (Graham, 1989). Según esta teoría, el valor del coeficiente k del ajuste marca el grado de sumación existente entre los mecanismos visuales involucrados. Cuanto mayor sea el valor de k , más alto será el grado de sumación de tipo probabilístico, lo que implica un menor grado de interacción entre los mecanismos visuales. Un valor mayor de k también significa que la forma de la curva es más cuadrada, y en consecuencia más lejos se situarán los puntos de la recta que une los puntos (1,0) y (0,1), correspondiente a un valor de k unidad, que indicaría interacción lineal entre los mecanismos visuales. En la figura 8.9 podemos ver los datos obtenidos para ambos observadores, con los correspondientes resultados del ajuste antes mencionado.

Los valores de k que se derivan del ajuste son de 4,9 para JH y 3,0 para JL. El parámetro χ^2 obtenido es de 43,06 para JH y 19,58 para JL. Ambos se han calculado tomando como peso la inversa del cuadrado de la desviación estándar para cada uno de los puntos experimentales. El margen de confianza del ajuste es el usual del 95% en ambos casos. En la figura 8.9 se indica también el valor del coeficiente de correlación obtenido para cada uno de los ajustes. Estos resultados nos permiten, considerando también la disposición de los datos experimentales, descartar la hipótesis de interacción lineal entre los mecanismos de visión del color.

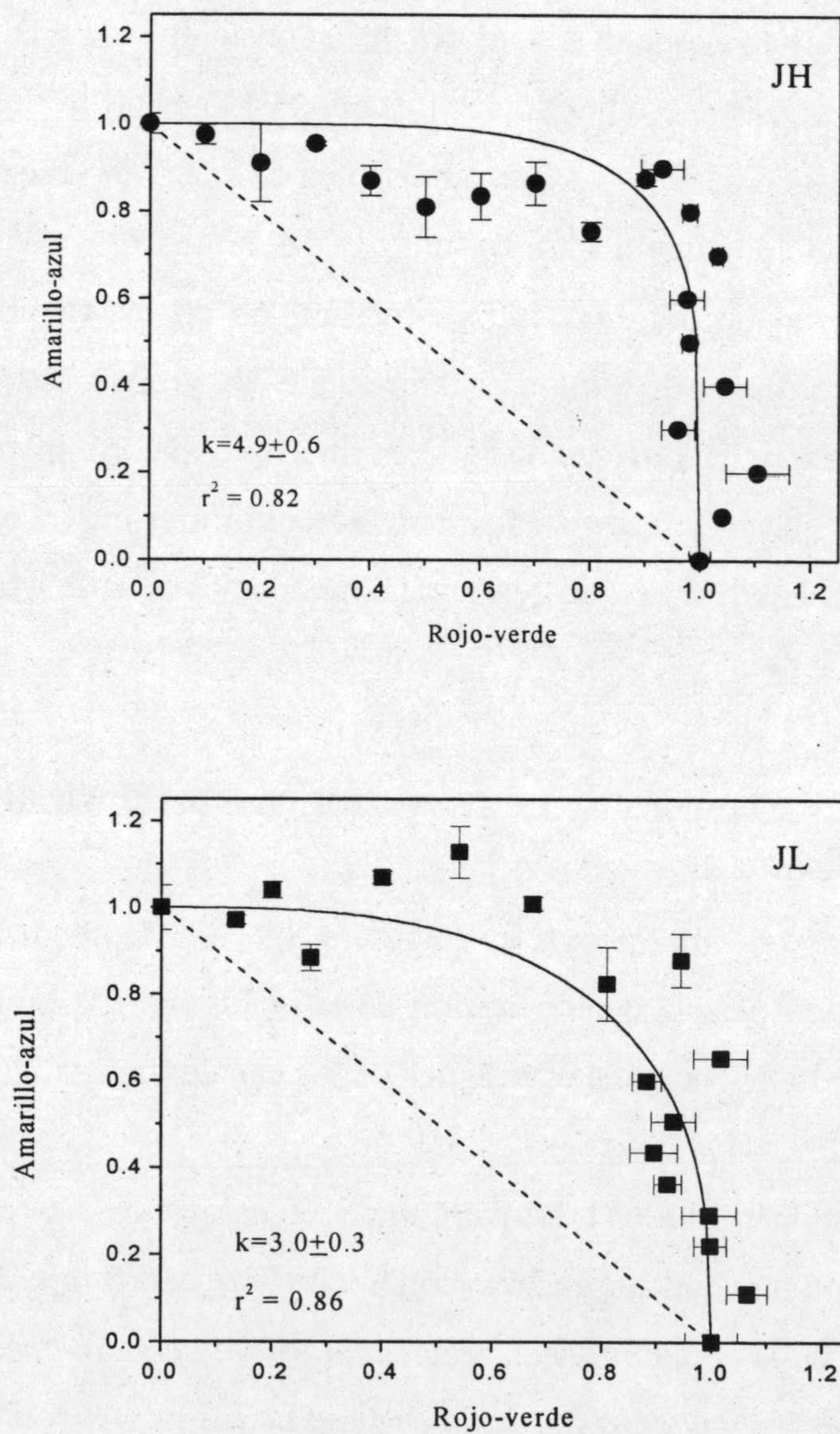


Figura 8.9. Curvas de sumación subumbral para el observador JH (parte superior) y para el observador JL (parte inferior de la figura). Las líneas continuas representan la curva de ajuste obtenida por mínimos cuadrados. Las líneas discontinuas representan el lugar que ocuparían los datos si el valor de k obtenido fuese la unidad (interacción de tipo lineal, como la obtenida por Gur y Akri (1992)).

En las figuras puede observarse que los valores de pedestales fijos son ligeramente diferentes para ambos observadores. Esto se debe a que aunque partimos de una serie de valores fijos seleccionados entre 0 y 0,9, tal y como se indica en el capítulo VI, se realizaban controles periódicos del valor de contraste umbral durante el período de medida de las curvas subumbral, y las pequeñas variaciones que se registraban ocasionaron un reescalado de todos los pedestales según las medidas más recientes de umbral.

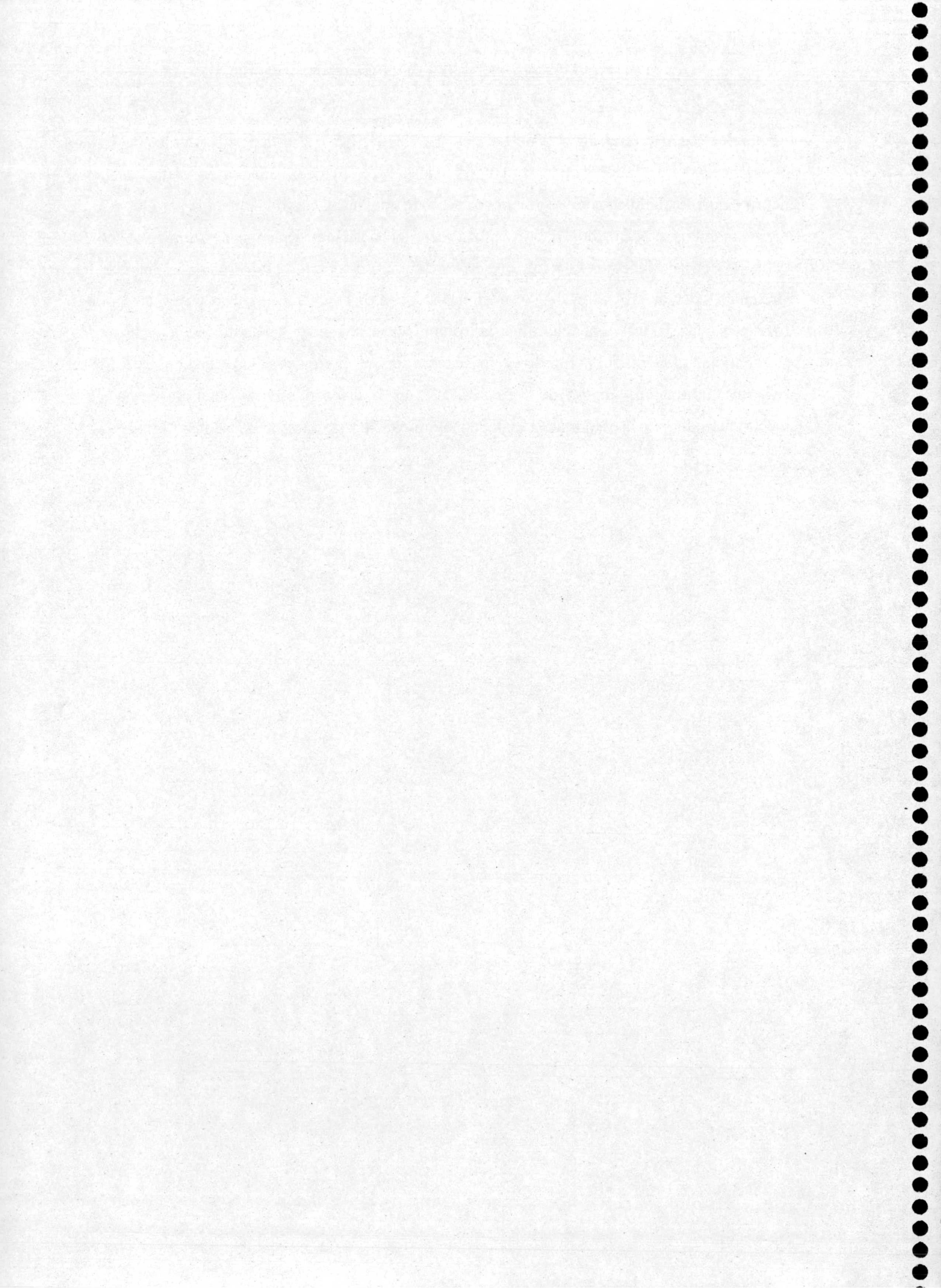
Por tanto, la conclusión general en cuanto a la independencia estocástica de los mecanismos de visión del color coincide con los resultados obtenidos por Mullen y Sankeralli (1999). Hay, sin embargo, diferencias en cuanto a los valores de la constante k derivada del ajuste de los datos: en el estudio de Mullen y Sankeralli, para los tres observadores utilizados, se obtienen valores de k por debajo de 2,7. Esta tendencia a valores más altos de k también fue obtenida en el estudio de Mullen *et al.* (1997) sobre la interacción cromaticidad-luminancia, y se debe, fundamentalmente, a la forma de muestreo de los datos para construir las curvas (Mullen y Sankeralli, 1999). Incluyendo un número mayor de puntos experimentales en la zona de contrastes cerca del valor umbral (1,0 en la escala utilizada), se consigue un muestreo más completo de las "esquinas" de la función de ajuste, lo que hace que éstas se revelen como más curvadas de lo que resultan con pocos puntos experimentales. El que sean más curvadas (menos cuadradas) hace descender el valor de k considerablemente.

8.3.2. Aportación a la polémica sobre interacción luminancia-cromaticidad.

De los resultados que mostramos en la figura 8.9, se desprende que el hecho de utilizar fotometría de parpadeo para la determinación de la isoluminancia no es obstáculo para que se apoye la hipótesis de independencia estocástica de los canales cromáticos.

La tesis que sostienen Mullen y Sankeralli (1999) es que las discrepancias de sus resultados sobre interacción cromaticidad-luminancia con los de Gur y Akri (1992) puede deberse a errores en la determinación de la isoluminancia, "*realizada usando condiciones espaciales y temporales muy distintas a las utilizadas para los estímulos test en los experimentos.*" Si esta interpretación fuera totalmente correcta, es inmediato deducir que existirían problemas de aislamiento incorrecto de los canales visuales en nuestro experimento, pues la determinación de la isoluminancia se ha realizado en condiciones diferentes tanto espaciales (campo uniforme) como

temporales (oscilación a 20 Hz) de las del test (red de 0,5 cpd estacionaria) utilizado en las experiencias. De modo que si ambos canales cromáticos resultasen estar aislados incorrectamente, la interacción entre ambos sería de tipo lineal, como la obtenida por Gur y Akri, pues en ambos mecanismos habría intrusiones del canal de luminancia. Como esto no ha resultado ser así, debemos concluir que la verdadera causa de los problemas que plantean los resultados de Gur y Akri no está en el hecho de usar condiciones espaciales y temporales diferentes a las del test para determinar la isoluminancia, sino en el hecho de que no se ha tenido en cuenta la variación del punto de isoluminancia con los diferentes valores de contraste que se registra al utilizar fotometría de parpadeo. Esta es la única diferencia de importancia entre nuestro método para la determinación de la isoluminancia y el utilizado por Gur y Akri (1992).



CAPÍTULO IX

APLICACIONES DE LA CSF CROMÁTICA EN ESCLEROSIS MÚLTIPLE

-¡Imbécil!- gritó el general, rojo de cólera. -¿Para qué has estudiado, entonces? ¡Cúrala!

Mijail Sholoyov. El Don apacible.

9.1. INTRODUCCIÓN.

Como explicamos al final del capítulo II y en el capítulo IV, resulta interesante controlar las pérdidas visuales que se producen en diversas patologías (glaucoma, Parkinson, ambliopía, Esclerosis Múltiple) como sistema para determinar el grado de afectación de las vías ópticas. Si los tres canales procesan la información espacial a nivel subumbral de modo independiente, como avalan los resultados expuestos en la última parte del capítulo VIII y los del grupo de Mullen, podemos esperar que de estudios sobre poblaciones de sujetos con una determinada patología se encuentre diferente grado de afectación, en especial en lo que se refiere a diferencias entre el canal de luminancia y los canales cromáticos, como se ha puesto de manifiesto en estudios anteriores (ver capítulo II).

Según lo detallado en el capítulo IV, en la parte de objetivos, nos centraremos en pacientes afectados de Esclerosis Múltiple. Nuestra intención es aportar un método no invasivo que pueda ayudar a la confirmación del diagnóstico y también al seguimiento posterior de los pacientes de esta patología, al mismo tiempo que estudiamos si existen diferencias entre las pérdidas visuales para los distintos mecanismos de visión. Esto exigirá el diseño de un método experimental específico adaptado a nuestro propósito. Dedicaremos el siguiente apartado a la descripción de este método, para posteriormente detallar las características de los pacientes que participaron en las experiencias y del grupo de control, constituido por sujetos no afectados por patologías; por último, expondremos y analizaremos los resultados obtenidos, lo que supondrá nuestra aportación sobre la utilidad de este test de CSF cromática en la detección de pérdidas visuales en pacientes de Esclerosis Múltiple.

9.2. MÉTODO EXPERIMENTAL.

Los pacientes de Esclerosis Múltiple con los que hemos estado en contacto realizan de forma periódica una serie de pruebas visuales, que describiremos con detalle posteriormente (medida de la Agudeza Visual, refracción, sensibilidad al contraste en luminancia, pruebas estándar de visión del color y perimetría automatizada). Dado que se trata de personas con un cierto riesgo de sufrir variaciones con el tiempo de su estado general y en concreto de su visión, interesa realizar todas estas pruebas un día determinado y no espaciarlas en varias sesiones, a parte de que la disponibilidad de los propios sujetos es muy limitada, pues un número importante de ellos necesita ayuda externa para los desplazamientos. Al mismo tiempo, entre los síntomas más comunes de la patología se encuentra un incremento del cansancio ante cualquier tipo de tarea (fatiga), por lo que resulta fundamental planificar el desarrollo de las pruebas de forma que puedan ser realizadas con fiabilidad suficiente, pero en el menor espacio de tiempo posible y solicitando del sujeto el mínimo número de respuestas para obtener el umbral.

Por lo tanto, el método descrito en el capítulo VI, utilizado para la toma de datos sobre sujetos sin ninguna patología y de amplia disponibilidad, no resulta adecuado al caso de los pacientes, por lo que tuvimos que introducir un método sustancialmente diferente, reduciendo la duración de las sesiones y el número de frecuencias estudiadas. A la explicación pormenorizada de este método alternativo dedicamos el siguiente apartado.

9.2.1. Descripción del método experimental.

Entre los métodos que cumplen los requisitos necesarios en cuanto a economía de tiempo, uno de los más utilizados es el denominado "de los límites", que consiste, en su versión más sencilla, en determinar por medio de una tarca de elección forzosa entre dos alternativas (2 AFC) el umbral de percepción, obtenido como la media entre dos puntos límite. Los puntos se obtienen procediendo de diferente forma: primero, se presentan al observador estímulos claramente *por encima* de su umbral, y se van aproximando al mismo hasta que el sujeto advierte que no es capaz de percibir el estímulo; posteriormente, se parte de estímulos claramente *por debajo* del umbral de percepción, y se van aproximando al mismo (moviéndose en sentido opuesto al indicado antes para el primer punto límite) hasta que se alcanza el umbral y el observador advierte que es capaz de percibir el estímulo. Así, el umbral queda determinado con la realización de dos recorridos y un número relativamente corto de respuestas del observador.

Sin embargo, en nuestro caso consideramos que resultaba interesante introducir modificaciones a este método, por las siguientes razones:

- 1) Los pacientes de Esclerosis Múltiple serán con muy alta probabilidad sujetos sin ninguna experiencia en la realización de pruebas psicofísicas, y por las razones indicadas al principio del apartado no es posible realizar sesiones previas de entrenamiento, por lo que realizando sólo dos recorridos por cada determinación del umbral resulta previsible que haya efectos sobre el mismo debidos a que es la primera vez en la vida del sujeto que se realiza la prueba.
- 2) A lo largo del trabajo previo realizado con sujetos afectados por esta patología, hemos podido darnos cuenta de que presentan características peculiares desde un punto de vista psicológico, y en particular cuando no son capaces de percibir el estímulo durante repetidas veces tienden a achacarlo a sus propias deficiencias visuales y no al método experimental, aunque éste se les explique con el suficiente detalle. Por ello, se desaniman bastante y su interés por la prueba decae mucho.

Así, pues, optamos por una modificación del método de los límites que denominaremos "método de ajuste del umbral", que ha sido utilizado previamente en trabajos sobre sujetos con hipertensión intracraneal (Stavrou y Honan, 1997) para medidas de umbrales de sensibilidad al contraste con redes en cromaticidad y en luminancia. A partir de la presentación de una red con un valor de contraste claramente visible para el sujeto, se va descendiendo progresivamente el contraste, hasta que llega un valor en que el sujeto no es capaz de percibir la red, calculando así el punto límite inferior. Pero en vez de determinar el punto límite superior, se repite este proceso cinco veces, y el umbral de detección de la red se determina como la media de los cinco valores de contraste límite inferior obtenidos. De esta forma, si alguno de estos límites resulta muy alejado del resto, como consecuencia de la inexperiencia del sujeto en la tarea, aún contamos con un número suficiente de medidas para determinar el umbral con fiabilidad. También, reducimos al mínimo el número de veces que el sujeto da respuestas negativas porque no es capaz de percibir la red.

Entre presentación y presentación se deja un tiempo de 4 s, durante el cual aparece el campo uniforme, para que desaparezcan los efectos de post-imagen que se asocian normalmente a

valores altos de contraste cromático, aunque son menos frecuentes en la población de pacientes que en la de sujetos de control.

Los cinco valores límite de contraste se obtienen sucesivamente, sin variar la frecuencia de la red hasta que no ha finalizado el proceso de obtención del umbral. Como sistema de control adicional, se presenta al sujeto aleatoriamente a lo largo de la sesión un fondo acromático uniforme, para asegurarnos que está colaborando en la toma de medidas y de que da respuestas afirmativas realmente sólo cuando es capaz de percibir franjas coloreadas sobre la pantalla del monitor de presentación. Esto es importante dado que la peculiar psicología en general de estos pacientes puede inducir a determinados sujetos a maximizar el número de respuestas positivas, evitando en lo posible reconocer que no son capaces de detectar el estímulo. Por ello, deben saber que si se sienten tentados a esta práctica un poco desleal, pueden ser detectados por el experimentador.

Con este sistema, podemos obtener los umbrales para tres frecuencias espaciales en un tiempo no superior a 10 minutos, con lo que incluyendo la adaptación inicial, el tiempo de la sesión de mayor duración (con obtención de seis umbrales de detección como media de cinco puntos límite de contraste cada uno) no excede de los 25 minutos. Detallamos a continuación la definición de contraste cromático utilizada y los parámetros experimentales más relevantes empleados en la toma de medidas.

9.2.2. Selección de los estímulos y definición de contraste cromático.

Los estímulos presentados a los observadores para esta parte del estudio se sitúan en los ejes cardinales rojo-verde y amarillo-azul, cuyas ecuaciones en el diagrama CIE 1931 pueden verse en el capítulo VI. La elección de estos ejes se ha hecho con el propósito de examinar si existen algunas diferencias en cuanto al patrón de pérdidas visuales entre ambos ejes.

En cuanto a la definición de contraste cromático, debido a que esperábamos que los pacientes tuviesen disminuidas sus capacidades de percepción cromática, introdujimos algunos cambios para ampliar la gama de estímulos de color presentada. Recordemos que para las medidas anteriores de CSF, el contraste cromático se definía de modo tal que fuese simétrico en el espacio de excitación de conos en torno al estímulo equienergético. Esto condicionaba el que no se aprovechara toda la extensión de las líneas accesible al dispositivo, sino que sólo se llegase

a dichos límites por un extremo de cada línea, como puede apreciarse en la figura 6.5. Sin embargo, dado que en el caso de los pacientes de Esclerosis Múltiple interesa conseguir que los extremos de las líneas sean lo menos saturados posible (pues, como señalamos antes, estos sujetos suelen tener disminuidas sus capacidades de percepción cromática), consideramos interesante cambiar la definición de contraste cromático de forma que ya no fuese simétrica en el espacio de excitación de conos. Así, logramos aprovechar al máximo las capacidades de generación de color de nuestro dispositivo y presentar a los observadores de esta fase del experimento los estímulos de color más alejados del acromático que podíamos conseguir. La definición matemática de contraste cromático, que mostramos en la ecuación (1), adopta la misma forma que la usada anteriormente, con dos salvedades que explicamos a continuación.

$$C_i = \frac{Ex_{i1} - Ex_{i2}}{K^N_i} \quad (1)$$

Recordemos que Ex_1 y Ex_2 hacen referencia a los valores de excitación del canal cromático i (rojo-verde o amarillo-azul) en los dos puntos correspondientes para los cuales se calcula el contraste cromático, y K^N_i (K_i en el capítulo VI) es la constante de normalización, cuyo valor cambia debido a que se han ampliado los límites del eje en cuestión. Los valores de normalización fijados según los nuevos límites (que dependen sólo de las limitaciones del dispositivo experimental) son:

$$K^N_{r-v} = 12,38 \text{ cd/m}^2.$$

$$K^N_{am-az} = 97,36 \text{ cd/m}^2.$$

La otra salvedad en la definición de contraste se refiere a que, cuando se alcanza el límite de generación de estímulos de color del dispositivo por el extremo más cercano a dicho límite de la línea, el valor de excitación correspondiente a dicho extremo queda fijo, creciendo sólo el valor de excitación del extremo opuesto. En el caso del eje rojo-verde, el límite se alcanza primero por el extremo rojo, mientras que en el caso amarillo-azul, el límite más cercano al equienergético es el correspondiente al extremo amarillo de la línea.

9.2.3. Parámetros experimentales.

a) Frecuencias espaciales utilizadas.

Como explicamos con anterioridad, es fundamental limitar al mínimo el número de frecuencias presentadas a los pacientes, por lo que hemos seleccionado tres valores, de forma que cada uno corresponda a una zona de la CSF (bajas, medias y altas frecuencias). El hecho de introducir frecuencias altas constituye otra novedad con respecto al método experimental. Hemos optado por seleccionar un valor de frecuencia alto, aun sin corregir aberración cromática longitudinal o transversal, porque entendemos que resulta de gran interés conocer cómo responden los sujetos de Esclerosis Múltiple a este tipo de estímulos, cosa que no ha sido realizada con anterioridad en todos los trabajos que hemos revisado. El interés (a parte de la novedad) radica en el carácter mixto de los estímulos de elevada frecuencia espacial, por la componente aparente en luminancia introducida por la aberración cromática, lo que nos hace esperar que presenten alguna variación con respecto a las conclusiones que extraigamos para el resto de frecuencias. Por todo ello, los valores de frecuencia espacial seleccionados son: 1,0, 4,0 y 12,0 cpd. Este sistema de seleccionar frecuencias representativas de diferentes rangos se emplea también en test estándar de CSF en luminancia, como el CSV-1000, si bien, comparativamente, nuestro valor superior de frecuencia es más elevado.

b) Tamaño de campo y nivel de luminancia de los estímulos.

El tamaño de campo escogido fue de 2,3°, que es el menor que nos permite nuestro dispositivo experimental, como explicamos en capítulos anteriores. Es importante, desde nuestro punto de vista, reducir al máximo el campo estimulado en estos sujetos, pues como tendremos ocasión de comprobar, la mayoría presentan lesiones en la zona periférica de su campo visual, lo que podría dificultarles la tarea de detección.

El nivel de luminancia escogido es el mismo ya utilizado en las experiencias con los dos observadores JL y JH, bien dentro del fotópico y permitiendo que el monitor alcance buena reproducibilidad de los estímulos de color. El valor queda entonces fijado en 21,50 cd/m².

c) Adaptación.

Antes de cada sesión, el sujeto se adaptaba a la oscuridad durante cinco minutos, intervalo que se aprovechaba para describirle el tipo de estímulos y explicarle la sistemática de la toma de medidas. Al principio de cada determinación de umbral, se presentaba un fondo uniforme acromático de $21,50 \text{ cd/m}^2$ durante 10 s, con el fin de que el sujeto pudiera hacerse a la idea del tamaño de los estímulos y prepararse para prestar la máxima atención antes de la toma de datos.

d) Condiciones de visión.

Las experiencias fueron realizadas en condiciones de visión monocular directa, con pupila natural y posición fija de la cabeza, para lo cual se utilizó una mentonera regulable en altura. El ojo utilizado fue el "mejor" de cada sujeto, según el resultado obtenido en las pruebas anteriores al test de CSF cromática, que describiremos con posterioridad.

9.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS OBSERVADORES.

Dividiremos los observadores que han participado en esta experiencia en dos grandes grupos. Por un lado, los pertenecientes al *grupo de control*, que no padecen patologías que afecten a la visión y que sirvieron para determinar nuestro "estándar" de medida, o sea, los límites que marcan un resultado de umbrales de CSF como normal. Por otro lado, los sujetos que conformaron el *grupo de pacientes* afectados de Esclerosis Múltiple. Sobre este grupo se realizaron pruebas adicionales al test de CSF cromática, con el fin de determinar el estado de las capacidades visuales de los pacientes. Estas pruebas adicionales son las de uso más extendido para examinar la visión del color, CSF en luminancia, Agudeza Visual y campimetría.

a) Grupo de control.

El número de sujetos que conforman este grupo es de quince. Todos ellos con visión normal del color según las pruebas estándar de Ishihara y L'Anthony desaturé, y corregidos de ametropías en los casos en que no eran emétopes. La Agudeza Visual (A.V.) mínima encontrada para ellos es de 0,9. En pruebas de CSF en luminancia, que describimos más adelante, se obtuvieron valores siempre dentro del rango considerado como normal. Dado que no padecen ni han padecido ninguna patología que pueda repercutir en el sistema visual, podemos suponer que

no presentan alteraciones de su campo visual. De los quince sujetos participantes, doce son hombres y tres mujeres, siendo la edad media del grupo de 33,07 años, con una desviación estándar de 7,82 años.

b) Grupo de pacientes.

Explicaremos en primer lugar las características generales de esta población, para pasar después a detallar los resultados de las pruebas estándar que se les realizaron. El número de sujetos que participaron en el experimento fue de catorce. De ellos, once son mujeres y tres hombres, siendo la edad media de la población de 35,35 años, con una desviación estándar de 8,41 años. Hemos realizado un test de tipo t de Student para comparar las características en cuanto a edad de la población de control con la de pacientes, según el procedimiento que explicaremos en apartados posteriores. El resultado indica que ambas poblaciones no son significativamente diferentes en el parámetro edad ni siquiera tomando un margen de confianza tan reducido como el 50% para la hipótesis de desigualdad de medias. Por problemas a veces de cansancio o disponibilidad, no todos los pacientes realizaron el test de CSF cromática para ambos ejes cardinales, sino que hubo un grupo de tres pacientes cuyos resultados se limitaron al eje rojo-verde. Así pues, la población de pacientes que realizaron medidas para el eje amarillo-azul es de once sujetos, 8 mujeres y 3 hombres. La media de edad es de 36,18 años, con una desviación estándar de 8,03 años. De nuevo, el test t de Student realizado para este caso revela que no hay diferencias significativas entre esta población y la de control en el parámetro edad ni para el 50% de margen de confianza.

Designaremos a cada uno de los pacientes por un número que marca el orden cronológico de realización de las pruebas. Los números 2, 6 y 8 son los sujetos que no han realizado las medidas de CSF para el eje amarillo-azul. En la tabla 9.1 presentamos los datos relativos a los síntomas visuales experimentados por los pacientes en algún momento del desarrollo de la enfermedad y en el momento de realización de las pruebas, así como la medicación administrada en el momento de realizar las medidas. Todos los sujetos se encuentran diagnosticados de Esclerosis Múltiple *definida*, según el criterio de Poser *et al.* (1983). El diagnóstico ha sido realizado tras una serie de pruebas clínicas en base a dicho criterio por el doctor Miguel Guerrero del Servicio de Neurología del Hospital Clínico de Granada. El tipo de Esclerosis es remitente-recidivante (secundaria progresiva para el sujeto 14, ver el apéndice para más información) y el período transcurrido desde el inicio de los primeros síntomas hasta la realización de la prueba es muy

variable según los sujetos. Sin embargo, éste no es un parámetro que interese tener en cuenta, pues los estudios visuales realizados en base al tiempo de evolución de la enfermedad no han mostrado que juegue un papel significativo sobre el estado de los sujetos, sino que hay mucha variabilidad dependiendo de cada caso particular (Honan, Heron, Foster, Scase y Collins, 1990).

Paciente	Sint. Vis. Antes	Sint. Vis. actuales	Medicación
1	Visión borrosa y dolor	Ninguno	Interferón β
2	Ninguno	Ninguno	Prednisona
3	Visión borrosa, picor	Picor, lagrimeo	Interferón β
4	Molestias, dolor	Molestias	Prednisona
5	Visión borrosa y molestias	Ninguno	Ninguno
6	Dificultad de enfoque y diplopia	Mareos en visión cercana	Ninguno
7	Lagrimeo y visión borrosa, dolor	Ninguno	Interferón β
8	Visión borrosa, dolor	Ninguno	Interferón β
9	Visión borrosa	Ninguno	Interferón β
10	Pérdida de visión, dolor	Ninguno	Interferón β
11	Visión borrosa ojo izquierdo	Ninguno	Prednisona
12	Visión borrosa, diplopia	Ninguno	Interferón β
13	Visión borrosa	Ninguno	Interferón β
14	Pérdida de visión	Ninguno	Interferón β

Tabla 9.1. Síntomas visuales experimentados por los pacientes a lo largo de su historia y en el momento de la realización de las pruebas, así como la medicación administrada cuando se realizaron las medidas.

A continuación, describiremos los resultados obtenidos por los pacientes para las pruebas anteriores a la CSF cromática, que son las siguientes:

• **Medida de Agudeza visual (A.V.)** Se realiza mediante optotipos E de Snellen estándar a seis metros de distancia y con nivel de luminancia del fondo de 80 cd/m². La determinación se realiza monocularmente en ambos ojos, con corrección en el caso de que existan ametropías, comprobando que la misma es correcta mediante la prueba del estenopeico. Caso de que fuese necesario, se modificaba la corrección del sujeto mediante método subjetivo, con caja de lentes y montura de pruebas.

normal si el observador en alguno de sus ojos obtiene un valor igual o menor de 18. Este procedimiento ha sido utilizado en un estudio sobre pacientes de Esclerosis Múltiple con un test muy similar al CSV-1000 (van Diemen *et al.*, 1992). Sin embargo, puede darse que un sujeto que tuviese una curva con muy buenos resultados en las frecuencias bajas y muy malos en las altas alcance un resultado mayor de 18 y sea considerado como normal. Por esta razón, hemos añadido al número suma otro parámetro, que califica si hay pérdidas en una zona concreta de la curva, y también indica, aunque el resultado global sea menor de 18, en qué zona se produce la pérdida preferentemente o si ésta es para todas las frecuencias. Así, este parámetro adopta el valor 1, 2, 3, 4 y 5 si el resultado está por debajo de lo normal para las frecuencias de 3, 6, 12, 18 cpd o todas las frecuencias, respectivamente. En la tabla 9.2, en la columna dedicada al test CSV-1000, mostraremos el valor suma obtenido por cada sujeto y a continuación entre paréntesis el parámetro que acabamos de describir. Señalaremos con mayor tamaño y en negrita cursiva los resultados suma que estén clasificados como *no normales* según el parámetro total obtenido.

- ***Tests estándar de visión del color.*** Los pacientes de Esclerosis Múltiple realizaron también la prueba de láminas de Ishihara y la de ordenación de L'Anthony 15 desaturé. El test de Ishihara está diseñado para detectar anomalías cromáticas de tipo rojo-verde, mientras que el test de L'Anthony detecta también anomalías de tipo amarillo-azul. Para la corrección de estos tests, seguimos el mismo método que se ha utilizado en un estudio anterior también sobre sujetos con Esclerosis Múltiple (Frederiksen *et al.*, 1986), que explicamos a continuación.

- Para el test de Ishihara, se cuenta el número de fallos en la lectura de números que obtiene el sujeto. Si este número es superior a dos, el resultado viene clasificado como anormal, aunque, como es el caso de los pacientes de Esclerosis Múltiple, no quede encuadrado en las categorías previstas por los diseñadores del test (deuteranómalo, protanómalo, deuteránope o protanope). En la tabla 9.2, indicaremos el número de fallos de cada sujeto, señalando en negrita cursiva y tamaño mayor los superiores a dos.

- Para el test L'Anthony 15 desaturé, el procedimiento es diferente, pues dado que se trata de ordenar correctamente por afinidad cromática una serie de 15 fichas, no sería justo limitarse a contar el número de fallos; no es igual que un sujeto coloque la ficha 15 después de la 1 que la número 3 después de la 1, puesto que la máxima diferencia de tono se da entre la ficha 1 y la 15. Así pues, el procedimiento consiste en obtener un parámetro

“cuenta de errores” modificado, que sería la suma de catorce diferencias. Cada diferencia se obtiene como el valor absoluto del resultado de restar el número de la ficha siguiente del número de ficha actual y disminuir en una unidad este valor. Se empieza por la ficha de partida, a la que se le asigna un valor de cero. Para mayor claridad, veamos un ejemplo. Supongamos que el orden especificado por un sujeto para las primeras cinco posiciones fuera:

1, 5, 3, 7, 11.

Entonces, el parámetro de error se calcularía (para las primeras cinco fichas) como:

$$\begin{aligned} & ((1-0) - 1) + ((5-1) - 1) + (|3-5| - 1) + ((7-3) - 1) + ((11-7) - 1) = 10. \\ & 0 \quad + \quad 3 \quad + \quad 1 \quad + \quad 3 \quad + \quad 3 \quad = 10. \end{aligned}$$

Puede comprobarse que un sujeto que ordenase correctamente las cinco fichas obtendría un parámetro de error de cero. El criterio para determinar si el resultado puede clasificarse como normal o no consiste en considerar como *no normal* un parámetro de error superior a 8 (Frederiksen *et al.*, 1986) En la tabla 9.2, detallamos los resultados del parámetro de error correspondientes a este test, indicando en negrita cursiva y mayor tamaño los resultados que se clasifiquen como *no normales*.

- ***Campimetría.*** Esta prueba, realizada mediante un campímetro automático modelo Octopus 1-2-3, tiene como objetivo determinar si el sujeto presenta pérdidas de sensibilidad a la presencia de un estímulo luminoso en alguna zona de su campo visual. Esta pérdida de sensibilidad en los casos de sujetos con Esclerosis Múltiple está causada por neuritis óptica parcialmente recuperada o bien por desmielinización de zonas de las vías ópticas (Plant, Kermode, Turano, Moseley, Miller, MacManus, Halliday y McDonald, 1992). Para nuestro estudio, interesa especialmente centrarnos en la zona central de la retina, que es la que utilizarán los pacientes para ver las redes cromáticas. Por ello, en la tabla 9.2 señalaremos la presencia o no de disminuciones relativas de sensibilidad en esta zona y a continuación entre paréntesis si hay o no pérdidas de sensibilidad en otras zonas del campo visual, que hagan que el sujeto quede clasificado como *no normal* según los resultados proporcionados por el campímetro.

Paciente	A.V. (ojo)	CSV-1000	Ishihara	F- 15	Campimetría
1	1,0 (OI)	20 (4)	9	43	No (sí, leve)
2	1,0 (OI)	22	2	5	No (Sí, leve)
3	0,8 (OI)	17 (1)	2	21	No (si, media)
4	1,0 (OI)	18 (3-4)	3	1	No (sí, leve)
5	0,8 (OD)	11 (5)	6	7	No (si, leve)
6	1,0 (OI)	20	1	0	SÍ LEVE (Sí, media)
7	0,8 (OI)	19 (4)	3	1	No (Sí., leve)
8	0,9 (OD)	18 (1)	2	3	No (Sí, leve)
9	0,7 (OI)	24	1	0	No (No)
10	0,7 (OI)	11 (5)	1	6	SÍ MEDIA (Sí, grave)
11	1,2 (OD)	24	1	8	SÍ LEVE (Sí, media)
12	0,8 (OD)	12 (5)	13	17	No (Sí, leve)
13	0,8 (OD)	19	1	10	No (Sí, leve)
14	0,6 (OD)	5 (5)	13	32	SÍ MEDIA (Sí, media)

Tabla 9.2. Resultados de las pruebas estándar realizadas a los pacientes. En la segunda columna, se indican los resultados de Agudeza Visual para el mejor ojo de cada sujeto, y a continuación entre paréntesis si éste era el derecho o el izquierdo. En la tercera columna, los resultados del test CSV-1000 y entre paréntesis el rango predominante de pérdida en frecuencias. Las columnas cuatro y cinco muestran los resultados de las pruebas de visión del color, evaluadas según se indicó con anterioridad, y la última columna indica si se producen pérdidas de sensibilidad visual en la zona central del campo (menor de 10°) y entre paréntesis en el resto del campo, señalando la entidad de la pérdida en términos cualitativos con respecto a los estándares del campímetro. Los resultados fuera del rango normal para cada prueba, según lo explicado anteriormente, se indican en negrita cursiva y con mayor tamaño.

Pasamos entonces a la presentación de los resultados obtenidos por los distintos pacientes para cada una de las pruebas. Todas ellas se realizaron para ambos ojos por separado, pero

presentamos los resultados correspondientes al ojo de cada paciente que reunía los mejores resultados, puesto que para la prueba de CSF cromática será el “mejor ojo” el utilizado para obtener los resultados. Esto es así porque el objetivo del diseño de nuestro test es detectar anomalías de la forma más sensible posible y el test demostrará más sensibilidad si es capaz de detectar anomalías en casos lo menos afectados posible según el resto de pruebas.

Puede observarse que la prueba que ha detectado más resultados anormales es la de A.V. (8 de 14), seguida del test CSV-1000, test de Ishihara, L'Anthony 15 desaturé y por último (en lo que a la zona central del campo visual se refiere) la campimetría (sólo 4 de 14). De los catorce sujetos afectados de Esclerosis Múltiple definida, sólo el sujeto número 2 obtiene resultados dentro del rango normal para todo el conjunto de pruebas visuales estándar. Queda entonces patente la correlación entre Esclerosis Múltiple y problemas visuales ya señalada en los estudios revisados en los capítulos II y III.

9.4. RESULTADOS DEL TEST DE CSF CROMÁTICA.

a) Eje rojo-verde.

En la figura 9.2 presentamos los puntos de umbral de sensibilidad para los catorce pacientes que participaron en el experimento. La línea continua y los intervalos de error corresponden a los resultados de visibilidad umbral rojo-verde obtenidos por el grupo de control. Los intervalos de error que hemos adoptado son de 1,3 desviaciones estándar alrededor de la media del grupo de control, lo que suponiendo que la población de control es normal, equivale a que se deja por debajo del mínimo del intervalo a un 10% de la población.

Es importante señalar que todos los pacientes tienen al menos un punto umbral situado *por debajo de la media* del grupo de control, lo que indica que sus umbrales de detección están disminuidos con respecto al global del grupo de sujetos no afectados de Esclerosis Múltiple.

b) Eje amarillo-azul.

En la figura 9.3. se muestran los resultados obtenidos por los once pacientes que realizaron el experimento, junto con la media del grupo de control. El intervalo de error es de 1,3 desviaciones estándar. También en el caso de los resultados para el eje amarillo-azul podemos

observar que todos los pacientes tienen al menos un punto umbral por debajo de la media del grupo de control.

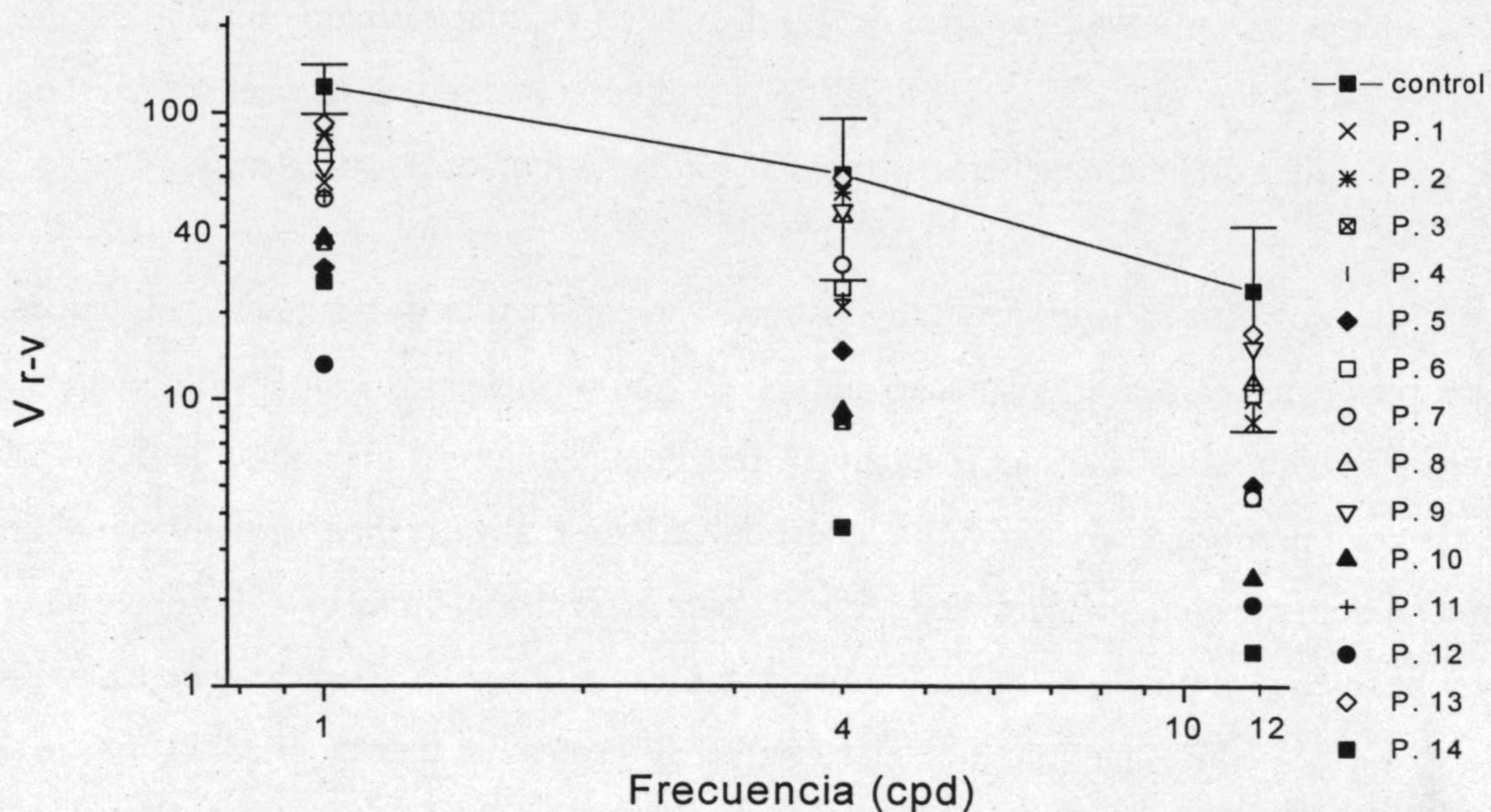


Figura 9.2. Resultados del grupo de control (línea continua) junto con los de cada uno de los pacientes (símbolos), para el test de sensibilidad al contraste cromático en la línea rojo-verde.

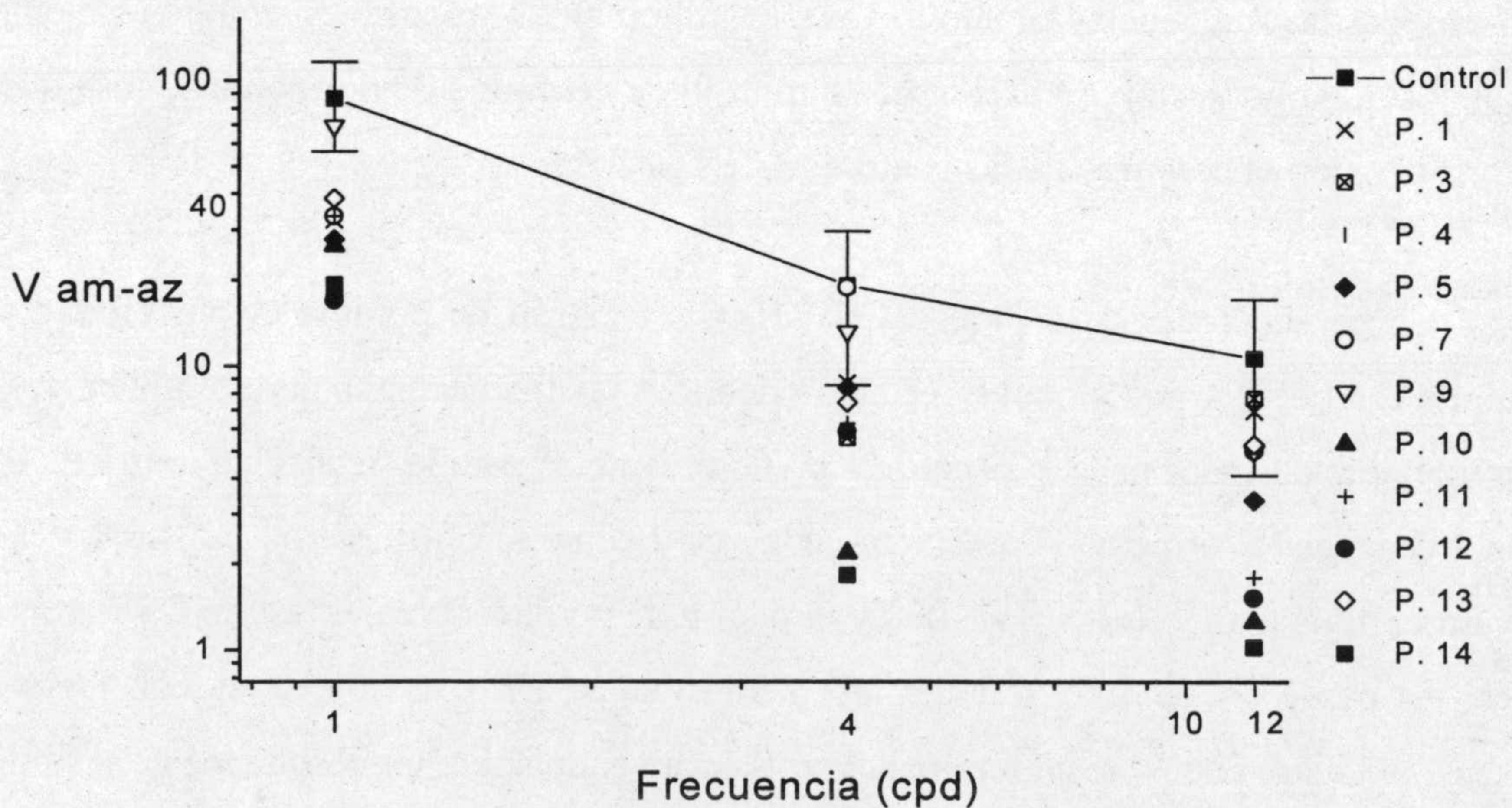


Figura 9.3. Resultados del grupo de control (línea continua) junto con los de cada uno de los pacientes (símbolos), para el test de sensibilidad al contraste cromático en la línea amarillo-azul.

De las figuras 9.2 y 9.3 se desprende una tendencia clara hacia una menor visibilidad para los sujetos afectados de Esclerosis Múltiple, en ambas líneas. Pasamos ahora a un análisis más detenido de esta tendencia. En primer lugar, en la tabla 9.3 presentamos los resultados (considerando el intervalo de error de 1,3 desviaciones estándar para el grupo de control) de los catorce pacientes, señalando si el nivel de visibilidad obtenido estaría dentro del rango normal o no para alguna de las frecuencias y, si es así, para qué frecuencia sucede esto.

Creemos que puede resultar ilustrativo recapitular los resultados obtenidos para dos ejemplos interesantes: el paciente número 2, como ya hemos comentado, obtiene resultados normales para todas las pruebas estándar, registrando sólo una afectación leve del campo visual en la zona periférica. Sin embargo, el test de CSF cromática realizado muestra que la visibilidad obtenida no queda dentro del rango normal para la frecuencia más baja. En el caso número 7, los resultados de las pruebas estándar indican valores no normales (pero muy cerca de serlo) para la A.V. y CSV-1000, mientras que el test de CSF cromática detecta pérdidas en tres de las seis frecuencias medidas (dos en la línea rojo-verde y una en la amarillo-azul). Estos ejemplos son una muestra de la conclusión global que podemos extraer del examen de las tablas 9.2 y 9.3: el test de CSF cromática, considerando conjuntamente los dos ejes rojo-verde y amarillo-azul o por separado cada uno de ellos, es más sensible que cualquiera de los tests de tipo estándar a los que se sometieron los pacientes, pues sólo dos sujetos obtienen resultados dentro del rango normal para todas las frecuencias en uno de los ejes. Si tomamos ambos ejes simultáneamente, todos los sujetos de la población de pacientes estarían fuera del rango de normalidad, cosa que no sucede considerando el conjunto de las cuatro pruebas estándar realizadas.

Como sucede para la prueba CSV-1000, el patrón de pérdida de visibilidad que más se repite es el de pérdida global (afectación de todas las frecuencias), pero también hay un número importante de casos en que la pérdida predominante es para la frecuencia más baja o para ésta y la frecuencia intermedia. Los sujetos con una buena A.V. (números 1,2,4,6,8 y 11) registran valores altos para el test CSV-1000 y el patrón de pérdidas para el test de CSF cromática (salvo en un caso) es de tipo frecuencias medias-bajas. Esto es lógico si consideramos que la sensibilidad al contraste en luminancia está influyendo sobre los resultados de visibilidad para la CSF cromática en la frecuencia de 12 cpd especialmente, pues el efecto de la no corrección de aberraciones cromáticas es más notable para esta frecuencia. Por tanto, si este grupo de sujetos tiene buenas capacidades de visión espacial en luminancia, es de esperar que la frecuencia cromática que mejor discriminen sea la más elevada.

Paciente	Rojo-verde	Amarillo-azul
1	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 4,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)
2	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)	No disponible
3	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 4,0 cpd)
4	Normal	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)
5	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 12,0 cpd)
6	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 4,0 cpd)	No disponible
7	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)
8	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)	No disponible
9	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)	Normal
10	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)
11	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 4,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)
12	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)
13	<i>NO NORMAL</i> (1,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0 y 4,0 cpd)
14	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)	<i>NO NORMAL</i> (1,0, 4,0 y 12,0 cpd)

Tabla 9.3. Resultados del test de CSF cromática para los catorce pacientes que realizaron la experiencia. Entre paréntesis se indican las frecuencias para las cuales el resultado obtenido se sitúa fuera del rango de normalidad definido.

En las figuras 9.4 y 9.5 presentamos los resultados de visibilidad para las tres frecuencias en función del número de sujeto, del 1 al 14, para ambos ejes cardinales. Con este tipo de representación, podemos apreciar las tendencias de cada sujeto en cuanto a la posición relativa de los valores de visibilidad obtenidos para las diferentes frecuencias, es decir, si existe mayor distancia en visibilidad entre unas frecuencias y otras, o si siempre se mantiene el orden de

visibilidades que se considera lógico atendiendo a la forma global de la CSF. Este orden implicaría que la frecuencia menor (1,0 cpd) tuviese mayor visibilidad que la frecuencia de 4,0 cpd, y ésta a su vez mayor visibilidad que la frecuencia más elevada, de 12 cpd. De la figura 9.4 (eje rojo-verde) podemos deducir que la tendencia global en cuanto a separación entre las diferentes frecuencias es bastante similar para el grupo de control y para los pacientes, quedando aproximadamente a igual distancia en escala logarítmica unas frecuencias de otras. En cuanto al orden esperable por la forma de la CSF, se mantiene también en todos los casos.

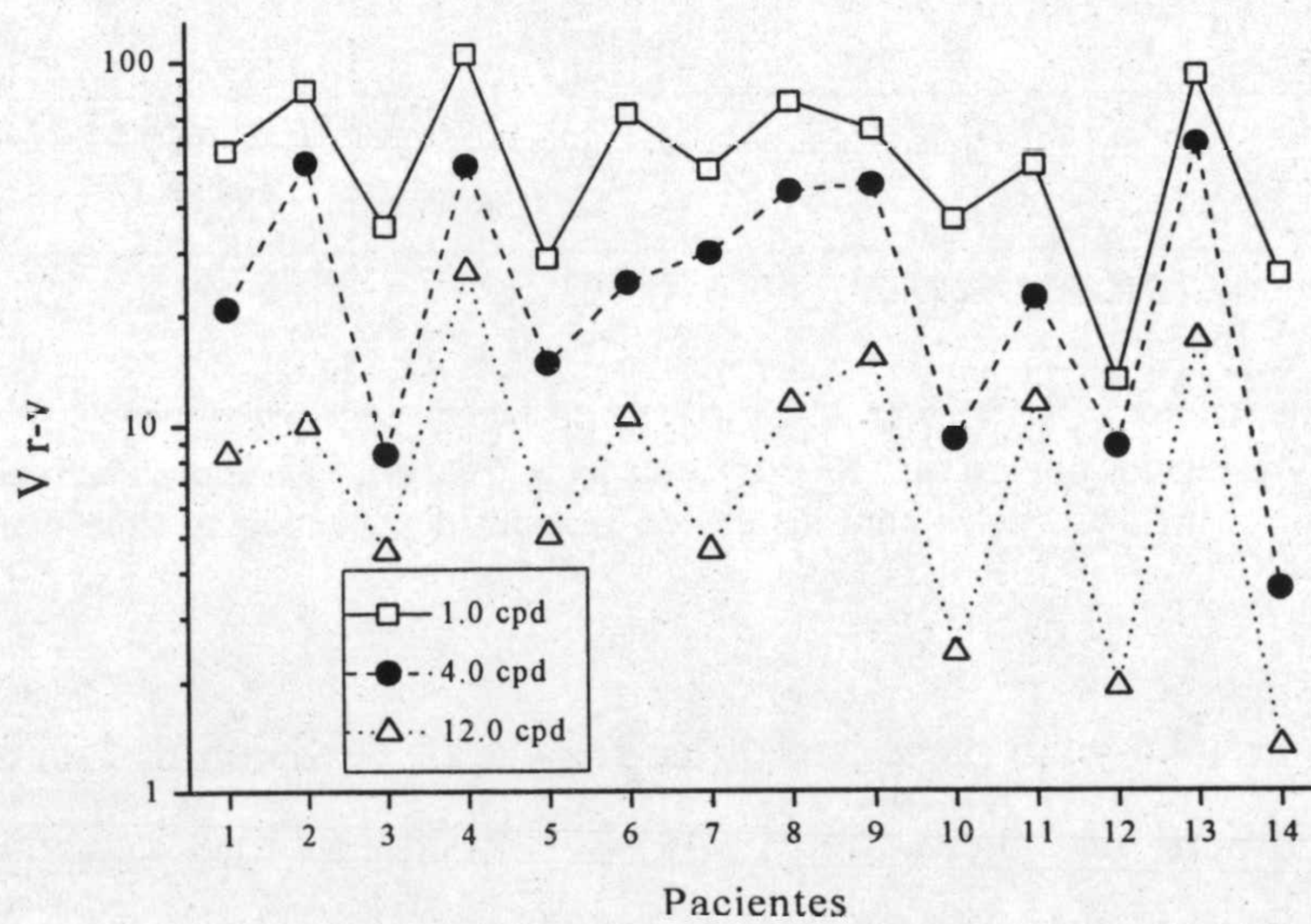
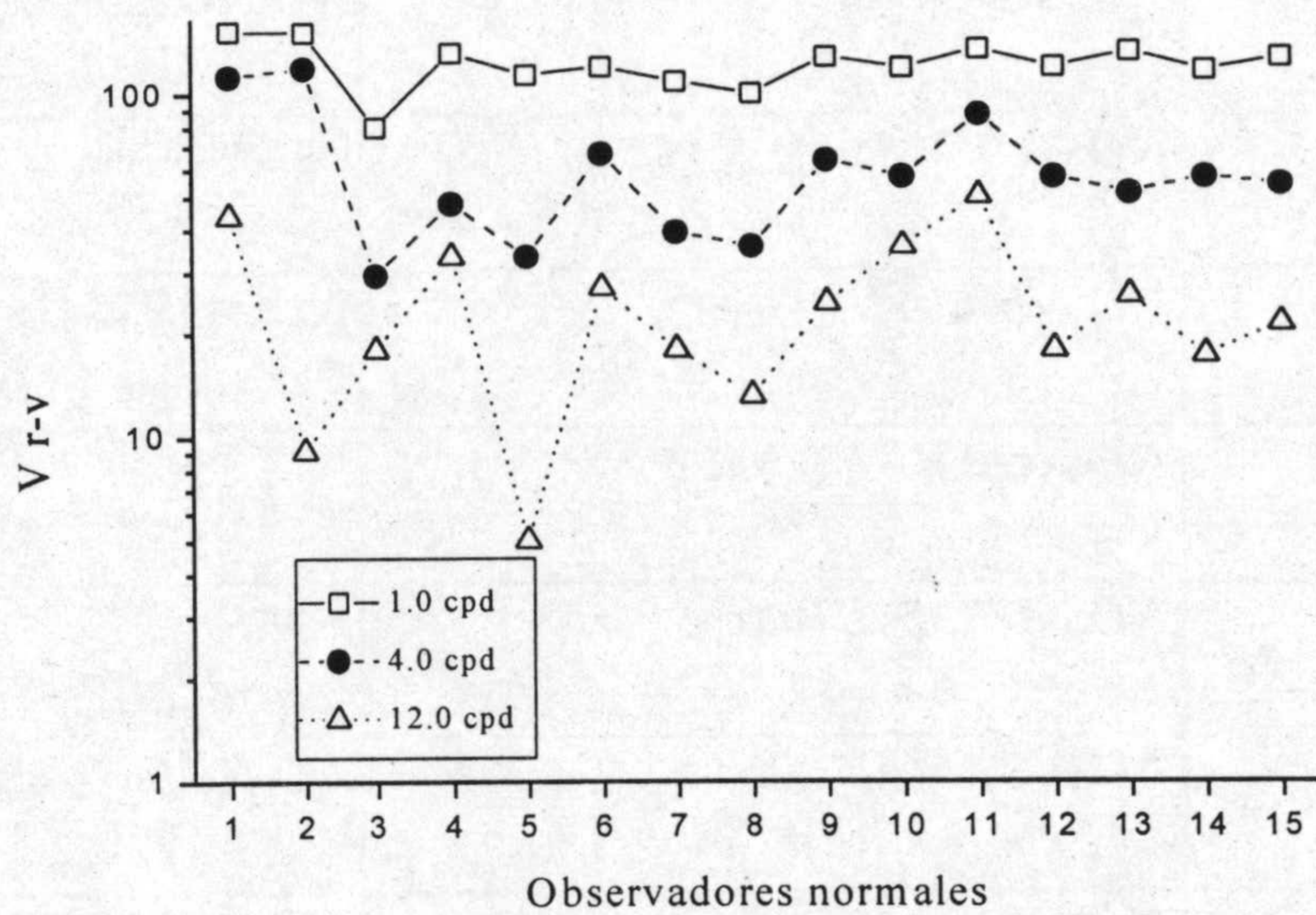


Figura 9.4. Visibilidad para las tres frecuencias en el eje cardinal rojo-verde en función del número de sujeto, para el grupo de control (parte superior) y para los pacientes (parte inferior).

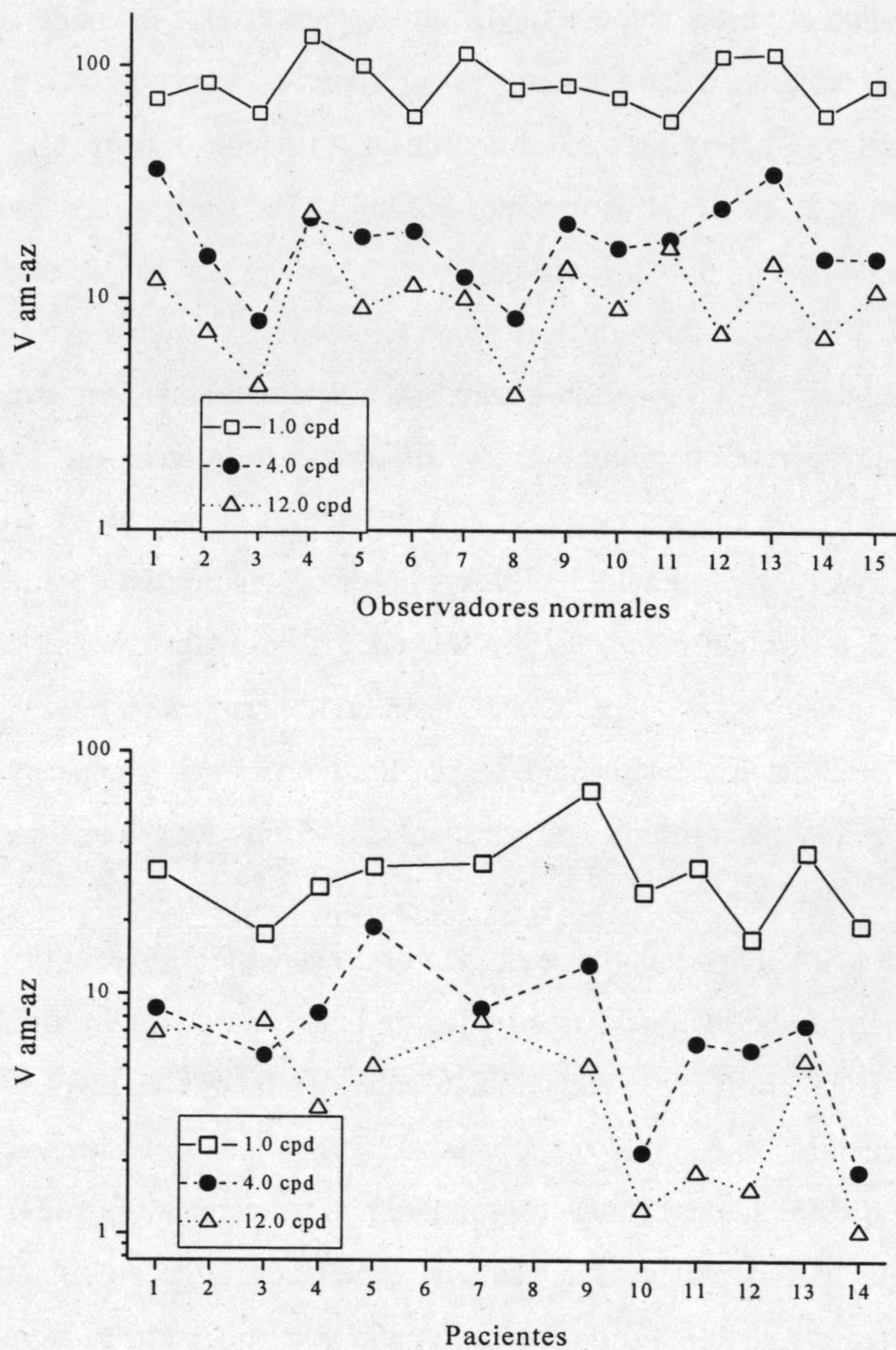


Figura 9.5. Visibilidad para las tres frecuencias en el eje cardinal amarillo-azul en función del número de sujeto, para el grupo de control (parte superior) y los pacientes (parte inferior).

En la figura 9.5 (eje amarillo-azul) podemos observar que ya no se mantienen en general distancias iguales en escala logarítmica entre las tres frecuencias, sino que la visibilidad para la frecuencia de 4,0 cpd tiende a situarse mucho más cerca de la obtenida para la frecuencia de 12 cpd que de la obtenida para 1,0 cpd. Además, aumenta el número de casos para los cuales no se mantiene el orden esperable según la forma de la CSF (dos sujetos del grupo de control, y dos pacientes).

Sobre la tendencia observada en ambos grupos de sujetos en el eje amarillo-azul, hacia una mayor proximidad entre los valores de visibilidad para las dos frecuencias mayores, entendemos que podría estar relacionada con una mayor contribución de la aberración cromática para este eje cardinal, puesto que los valores extremos de la línea que definen el contraste máximo están situados, como indicamos anteriormente, bastante más alejados del equienergético que en la anterior definición de contraste cromático (utilizada para los resultados expuestos en los capítulos VII y VIII), y también más lejos con relación a los puntos extremos correspondientes al eje rojo-verde, debido a las posibilidades de nuestro dispositivo experimental. Una mayor influencia de la aberración cromática determinaría que hubiese un incremento de visibilidad relativa para la frecuencia más elevada con respecto a la intermedia (donde no constituye un factor tan relevante), aproximando así los valores de visibilidad de ambas frecuencias. A este factor parece que resultan más sensibles los sujetos normales que los pacientes, lo cual puede relacionarse a su vez con las pérdidas de sensibilidad a estímulos modulados en luminancia que presentan los pacientes en mayor medida, por lo que son menos capaces de detectar el estímulo en base a las variaciones aparentes de luminancia que introduce la aberración cromática.

Hasta ahora, en el análisis realizado hemos considerado los resultados individuales de cada sujeto, con el fin de comparar la efectividad de la prueba de CSF cromática con los otros tests visuales de uso generalizado. Pero también entendemos que es interesante realizar un análisis teniendo en cuenta los resultados globales del grupo de pacientes frente a los del grupo de control. Según este planteamiento, responderemos fundamentalmente a dos cuestiones: por un lado, hasta qué punto podemos considerar estadísticamente significativa la tendencia hacia menores valores de visibilidad de los pacientes; por otro lado, si hay alguna diferencia en el comportamiento global de la población de pacientes para los dos ejes y dentro de cada eje para las distintas frecuencias.

9.4.1. Análisis estadístico de las diferencias entre los resultados medios de ambos grupos.

En este apartado, aplicaremos técnicas usuales en estadística aplicada (Martín y Luna, 1990) para la comparación de medias entre dos muestras independientes de poblaciones normales. El procedimiento consta de los siguientes pasos:

- 1) aplicar un test de Fisher-Snedecor para comparar las varianzas de ambas muestras;

- 2) si las varianzas son iguales, se aplica un test tipo t de Student para la comparación de las medias de las dos muestras, mientras que si son distintas, se aplica una aproximación también estándar denominada *test de Welch*.

Veamos ahora pormenorizadamente la aplicación de estos dos pasos para cada uno de los ejes y cada frecuencia, pues el objetivo es determinar si la media de la población de pacientes es significativamente diferente de la media del grupo de control y tenemos tres parejas de medias dentro de cada eje, una para cada frecuencia.

• **Eje rojo-verde.**

a) *Comparación de varianzas.*

En la tabla 9.4. se presentan las desviaciones típicas de las dos poblaciones a comparar para las tres frecuencias utilizadas en el experimento.

Frecuencia (cpd)	S ₁ (control)	S ₂ (pacientes)
1,0	18,53	26,93
4,0	26,69	18,91
12,0	12,46	6,92

Tabla 9.4. Desviación típica s (raíz cuadrada de la varianza) de ambas muestras para cada una de las frecuencias.

El procedimiento para la comparación consiste en calcular un cociente F_{exp} entre los cuadrados de las desviaciones típicas, la mayor siempre en el numerador. Posteriormente, tomamos el intervalo de confianza estándar de $\alpha = 0,20$ para esta prueba (así para el test posterior de las medias aseguramos un valor bajo de error asociado) y comparamos F_{exp} con la distribución de Fisher-Snedecor $F_{\alpha/2} (n_1-1, n_2-1)$, con los subíndices 1 y 2 designando respectivamente la población de control y la de los pacientes, siendo n el número de individuos de cada muestra. Si el valor de F_{exp} es superior a $F_{\alpha/2} (n_1-1, n_2-1)$, aceptamos la hipótesis propuesta, que en este caso es la de que *las varianzas son distintas*.

Así pues, el valor de referencia con el que compararemos las F_{exp} obtenidas es igual para todas las frecuencias, resultando $F_{0,10}(14,13) = 2,05$. En la tabla 9.5 podemos ver los resultados de F_{exp} para cada una de las frecuencias y la conclusión sobre la aceptación o rechazo de la hipótesis propuesta.

Frecuencia (cpd)	F_{exp}	Hipótesis ($s^2_1 \neq s^2_2$)
1,0	2,11	Aceptada
4,0	1,99	Rechazada
12,0	3,36	Aceptada

Tabla 9.5. Valores de F_{exp} obtenidos para cada frecuencia y decisión sobre la hipótesis propuesta.

Tenemos entonces que para las frecuencias de 1,0 y 12,0 cpd debemos considerar las varianzas como diferentes al nivel de significación fijado. Según lo explicado anteriormente, para comparar las medias debemos utilizar el *test de Welch*. Para la frecuencia de 4,0 cpd, en cambio, no podemos considerar como significativamente diferentes las varianzas, por lo que aplicaremos un test t de Student estándar para comparar las medias.

b) Comparación de medias (tests de Welch y t de Student).

En la tabla 9.6 se muestran los valores de visibilidad media obtenidos por la población de pacientes de Esclerosis Múltiple y por el grupo de control. En el test de Welch se utilizan también los datos de desviación típica que mostramos en la tabla 9.6.

Frecuencia (cpd)	Control (x_1)	Pacientes (x_2)
1,0	122,6	56,30
4,0	60,75	28,09
12,0	23,95	9,26

Tabla 9.6. Visibilidad media de ambas muestras para cada una de las frecuencias.

El método consiste en comparar un valor llamado t_{exp} (obtenido a partir de los valores de las medias y varianzas de las dos muestras poblacionales) con el valor $t_{\alpha}(f)$, que corresponde a la distribución t de Student, donde el parámetro f se calcula a partir de las varianzas y el número de

individuos de cada muestra para el test de Welch, y sólo en función del número de sujetos de cada muestra para el test t de Student (frecuencia 4,0 cpd); de las tablas de la distribución t de Student obtendremos el valor mínimo de α que hace que se verifique que $t_{\text{exp}} > t_{\alpha}(f)$. El valor $(1 - \alpha)$ nos indica el nivel de significación para la aceptación de la hipótesis de desigualdad de medias propuesta ($x_1 \neq x_2$). El valor de t_{exp} y de f para las comparaciones realizadas con el test de Welch se ha calculado según las expresiones:

$$t_{\text{exp}} = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

$$f = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

donde x_i ($i=1,2$) representa la media de visibilidad obtenida por cada población, s_i la desviación típica y n_i el número de sujetos de la muestra. Para la frecuencia de 4,0 cpd, se calcula el valor de desviación estándar como media ponderada de las dos desviaciones no significativamente diferentes, y luego t_{exp} y f según las siguientes expresiones:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_{\text{exp}} = \frac{|x_1 - x_2|}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3)$$

$$f = n_1 + n_2 - 2$$

En la tabla 9.7 mostramos los valores de t_{exp} , f y α obtenidos, así como la conclusión sobre la hipótesis de desigualdad de medias para cada frecuencia.

Frecuencia (cpd)	t_{exp}	f	α	$t_{0,001}(f)$	Hipótesis ($x_1 \neq x_2$)
1,0	7,67	22,6	0,001	3,77	Aceptada
4,0	3,78	27	0,001	3,69	Aceptada
12,0	3,96	22,2	0,001	3,79	Aceptada

Tabla 9.7. Valores de t_{exp} , f, α y $t_{\alpha}(f)$ para cada frecuencia y decisión sobre la hipótesis propuesta.

La conclusión del análisis realizado es entonces que para un nivel de significación del 99,9% podemos aceptar la hipótesis de que las medias de ambas poblaciones son distintas. Por tanto, podemos concluir con un margen de confianza aceptable que ambas medias son diferentes para las tres frecuencias.

• Eje amarillo-azul.

a) Comparación de varianzas.

En la tabla 9.8 se muestran las desviaciones típicas de los datos de ambas poblaciones para las tres frecuencias en la línea amarillo-azul.

Frecuencia (cpd)	S_1 (control)	S_2 (pacientes)
1,0	23,09	14,38
4,0	8,13	4,81
12,0	5,01	2,58

Tabla 9.8. Desviación típica s (raíz cuadrada de la varianza) de ambas muestras para cada una de las frecuencias.

Siguiendo el procedimiento detallado en el apartado anterior, los resultados obtenidos sobre la hipótesis de diferencia de varianzas, como mostramos en la tabla 9.9, son muy similares a los del eje rojo-verde. En este caso, el valor de la función F de referencia es $F_{0,10}(14,10) = 2,1$.

Frecuencia (cpd)	F_{exp}	Hipótesis ($s^2_1 \neq s^2_2$)
1,0	2,57	Aceptada
4,0	2,85	Aceptada
12,0	3,77	Aceptada

Tabla 9.9. Valores de F_{exp} obtenidos para cada frecuencia y decisión sobre la hipótesis propuesta.

b) Comparación de medias.

En la tabla 9.10 se muestran los valores de visibilidad media obtenidos para ambas poblaciones en el eje amarillo-azul. Los resultados del test de Welch y la conclusión sobre la hipótesis de desigualdad de medias se muestran en la tabla 9.11. Como podemos ver, la conclusión para todas las frecuencias es la misma que se obtuvo para el eje rojo-verde, es decir, que las medias son diferentes con un nivel de significación del 99,9 %, con lo que obtenemos que existen pérdidas de sensibilidad al contraste en ambos ejes cardinales, de acuerdo con los resultados de Mullen y Plant (1986).

Frecuencia (cpd)	Control (s)	Pacientes (s)
1,0	86,21	31,68
4,0	19,11	7,89
12,0	10,61	4,22

Tabla 9.10. Visibilidad media de ambas muestras para cada una de las frecuencias en el eje amarillo-azul.

Frecuencia	t_{exp}	f	α	$t_{0,001}(f)$	Hipótesis ($x_1 \neq x_2$)
1,0	7,40	23,5	0,001	3,76	Aceptada
4,0	4,40	23,2	0,001	3,76	Aceptada
12,0	4,23	21,9	0,001	3,79	Aceptada

Tabla 9.11. Valores de t_{exp} , f, α y $t_{\alpha}(f)$ para cada frecuencia y decisión sobre la hipótesis propuesta para el eje amarillo-azul.

En la figura 9.6 podemos ver la comparación gráfica entre la visibilidad media del grupo de control (con los intervalos de error definidos de 1,3 desviaciones estándar) y la visibilidad media

del grupo de pacientes, para la línea rojo-verde. Podemos observar que para las frecuencias de 4,0 y 12,0 cpd la media del grupo de pacientes se sitúa dentro (aunque en el límite) del intervalo de error del grupo de control. Pero, como hemos visto en el análisis estadístico, en las tres frecuencias las medias de los dos grupos son significativamente diferentes, por lo que seguramente el hecho de que para las dos frecuencias más altas la dispersión entre los resultados del grupo de control resultara ser mayor que para la más baja, haya sido el factor determinante de la diferencia que hemos señalado.

En la figura 9.7 presentamos la comparación gráfica de medias para el eje amarillo-azul. Los resultados son muy similares a los de la línea rojo-verde, situándose la curva de visibilidad media correspondiente a los pacientes claramente por debajo de la curva para el grupo de control, con una forma, además, muy similar. En este caso, todas las frecuencias del grupo de pacientes quedan fuera de los intervalos de error definidos para el grupo de control.

De las figuras 9.6 y 9.7 se desprende que, en promedio, no hay cambios importantes en la forma de la curva de visibilidad media para los dos grupos estudiados. Otra forma de examinar este factor es calculando el cociente entre las medias de ambas poblaciones para cada línea y cada frecuencia, ya que, si hay cambios en la forma de la curva, este factor cociente variará bastante entre unas frecuencias y otras. En la tabla 9.12 podemos ver los resultados de este cociente para ambos ejes. En la línea rojo-verde es donde se producen las mayores diferencias entre las dos poblaciones, en concreto para la frecuencia de 12,0 cpd, en la que los resultados de los pacientes tienden a situarse un poco más por debajo que en el resto de frecuencias (mayor valor del cociente). También podemos ver que los valores del cociente son un poco mayores (en las mismas frecuencias), en general, para la línea amarillo-azul, lo que indica que la curva media para los pacientes se sitúa un poco más por debajo de la del grupo de control para esta línea.

Frecuencia (cpd)	Cociente r-v	Cociente am-az
1,0	2,18	2,72
4,0	2,16	2,42
12,0	2,58	2,51

Tabla 9.12. Cociente entre la visibilidad media del grupo de control y la de los pacientes, para ambas líneas.

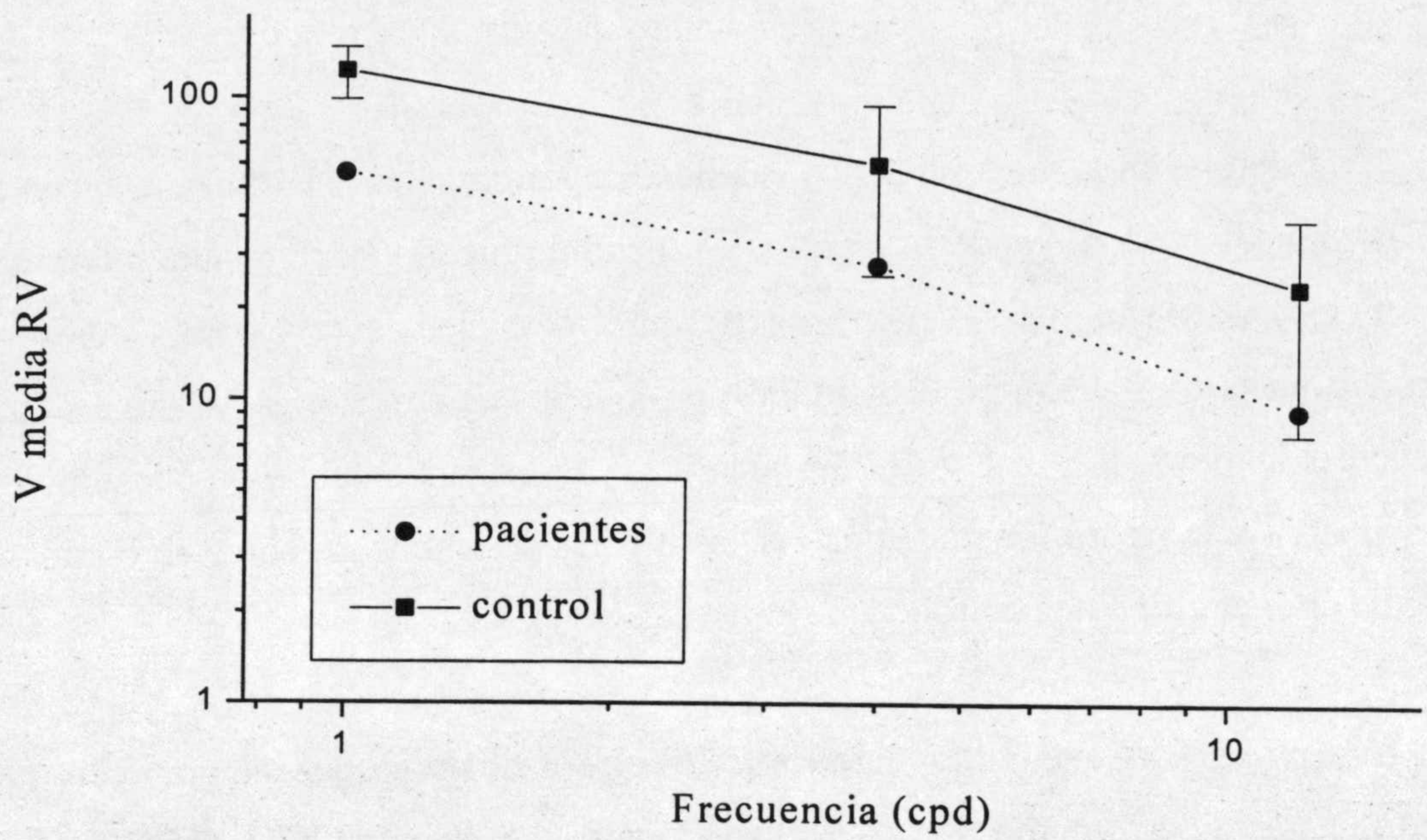


Figura 9.6. Visibilidad media para el grupo de control y el grupo de pacientes en el eje rojo-verde.

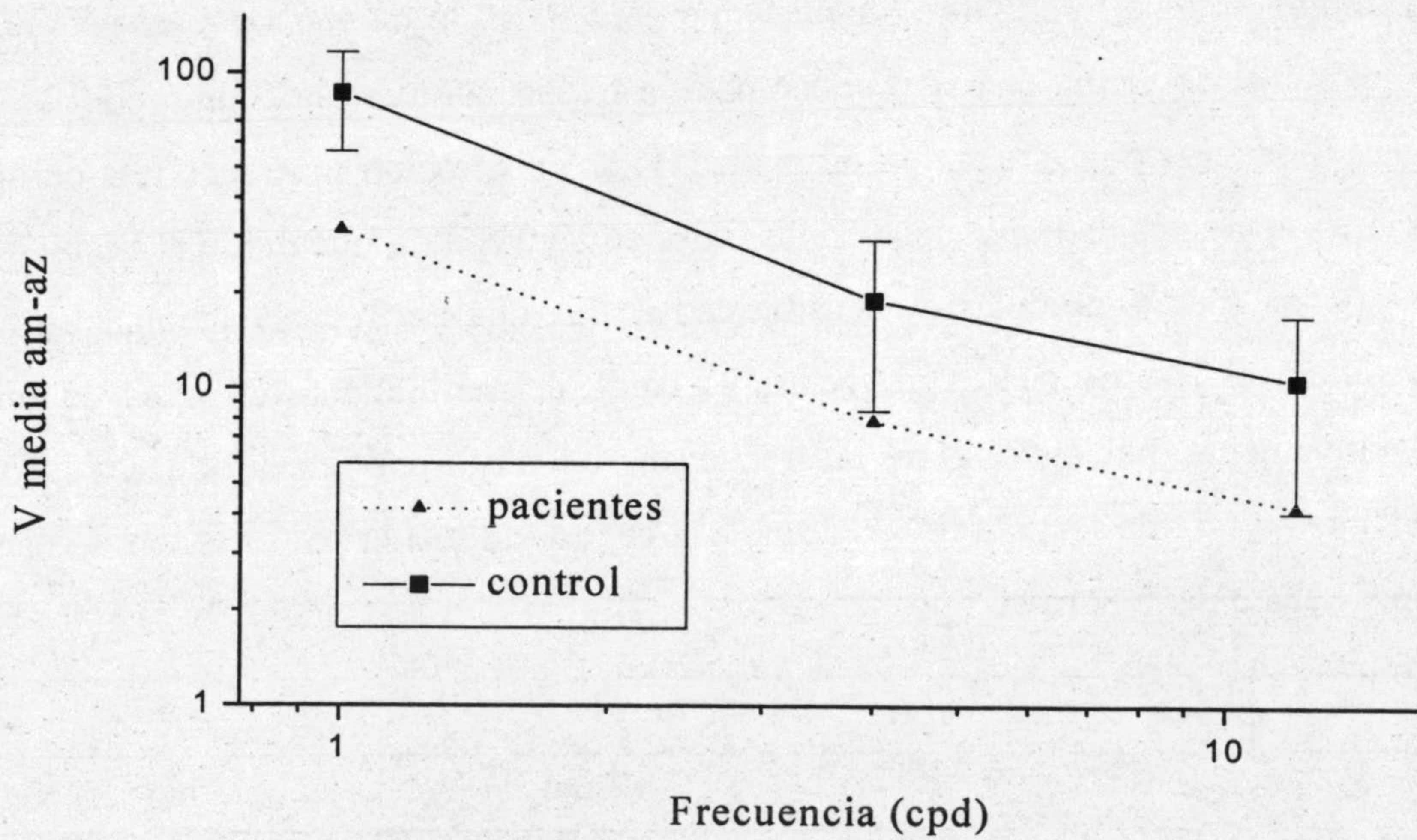


Figura 9.7. Visibilidad media para el grupo de control y el grupo de pacientes en el eje amarillo-azul.

9.4.2. Análisis comparativo de los resultados en función de la prueba de Agudeza Visual.

Dado que en la mayoría de los exámenes oftalmológicos se utiliza casi con exclusividad la determinación de la Agudeza Visual (A.V.) como prueba visual, resulta interesante separar a los sujetos en dos subgrupos, según tengan valores normales de A.V. o no. Con esta idea, hemos formado un primer subgrupo constituido por aquellos sujetos con A.V. igual o superior a 0,9 (pacientes números 1,2,4,6,8 y 11, ver tabla 9.2) y un segundo subgrupo constituido por el resto de sujetos. En la figura 9.8 podemos ver las medias de ambos grupos y su comparación con la obtenida por el grupo de control.

Una primera característica destacable de este análisis es que el grupo de pacientes que vendría caracterizado como normal realizando sólo la prueba de A.V. presenta una pérdida de visibilidad para la frecuencia más baja, que lo clasifica como anormal según la prueba de CSF cromática, y una tendencia a valores menores de visibilidad para las otras frecuencias, siguiendo la forma de la curva del grupo de control. Esto sugiere que es interesante realizar pruebas de percepción de redes cromáticas con frecuencias bajas incluso para sujetos con valores dentro del rango normal para las pruebas estándar de A.V.

También es muy interesante destacar que para el grupo de sujetos con A.V. baja la caída más importante de visibilidad se produce para la frecuencia más alta, como podríamos esperar, dada la influencia de la aberración cromática. Dicha aberración introduce una componente de variaciones aparentes de luminancia en las redes de 12,0 cpd, lo que unido al hecho de que estos sujetos tienen fuertes pérdidas de sensibilidad en la zona de frecuencias altas en luminancia, como refleja el test de A.V., provocaría la caída de visibilidad. Así pues, la mayor caída comparativamente hablando para la frecuencia de 12,0 cpd en la línea rojo-verde, que comentamos a raíz de los valores de la tabla 9.12, está inducida por el grupo de pacientes con A.V. por debajo de lo normal.

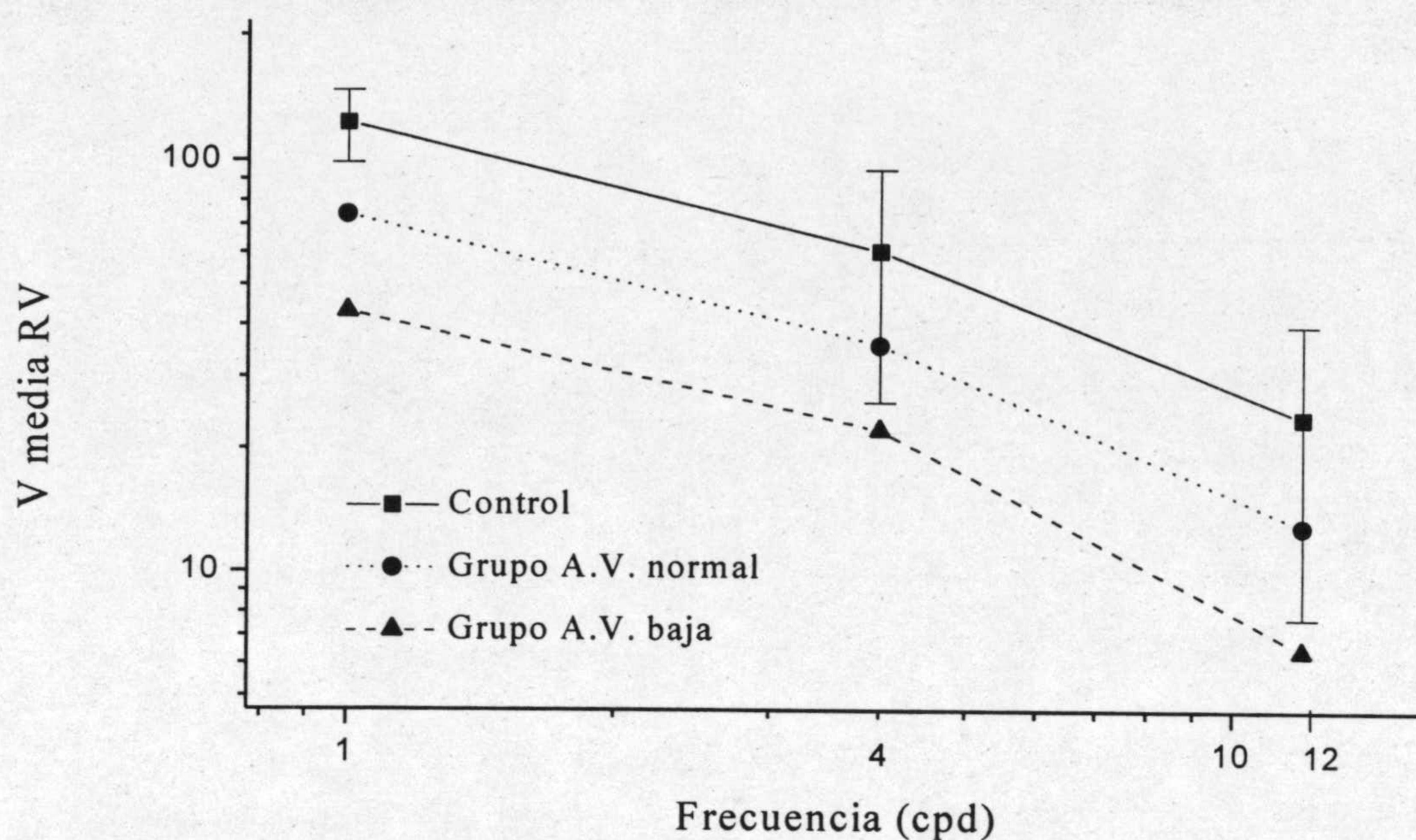
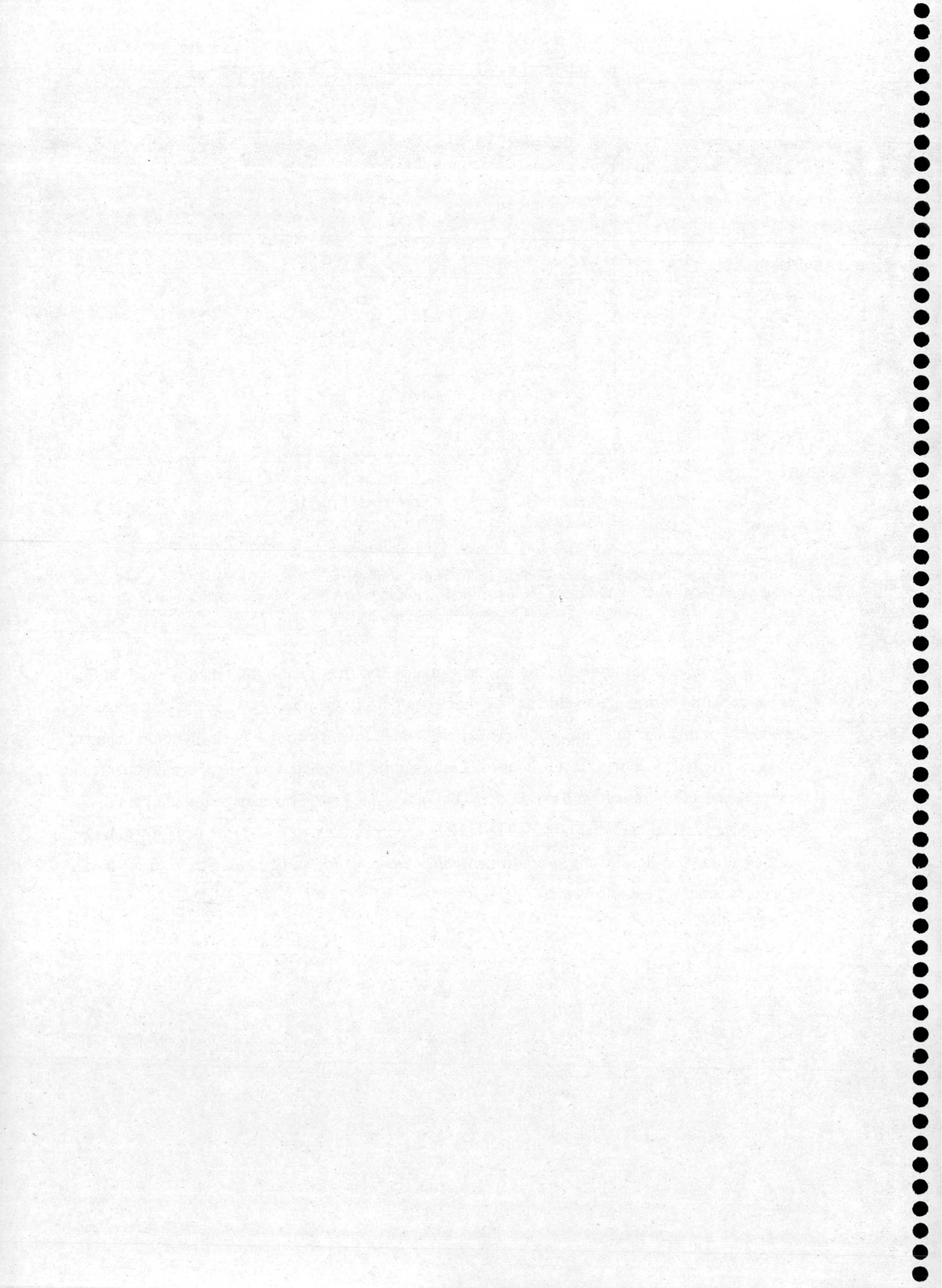


Figura 9.8. Evaluación de la visibilidad media obtenida en la línea rojo-verde en función de la Agudeza Visual. En la figura se comparan los resultados obtenidos para los pacientes con A.V. normal con los obtenidos para aquellos con A.V. baja. La línea continua representa los datos del grupo de control.

En la línea amarillo-azul, sólo hay tres sujetos con A.V. dentro del rango normal, lo que explicaría los valores relativamente más elevados del cociente entre las medias del grupo de control y de los pacientes que pudimos ver en la tabla 9.12. Dado que el conjunto de medidas para un grupo de sólo tres sujetos no resulta muy significativo, hemos creído oportuno no incluir la representación gráfica similar a la de la figura 9.8 que podría obtenerse también para el eje amarillo-azul. Resultará, por tanto, de indudable interés abordar en un futuro nuevas medidas en este sentido, que desmientan o confirmen como creemos que sería en este caso la tendencia encontrada para el eje rojo-verde.

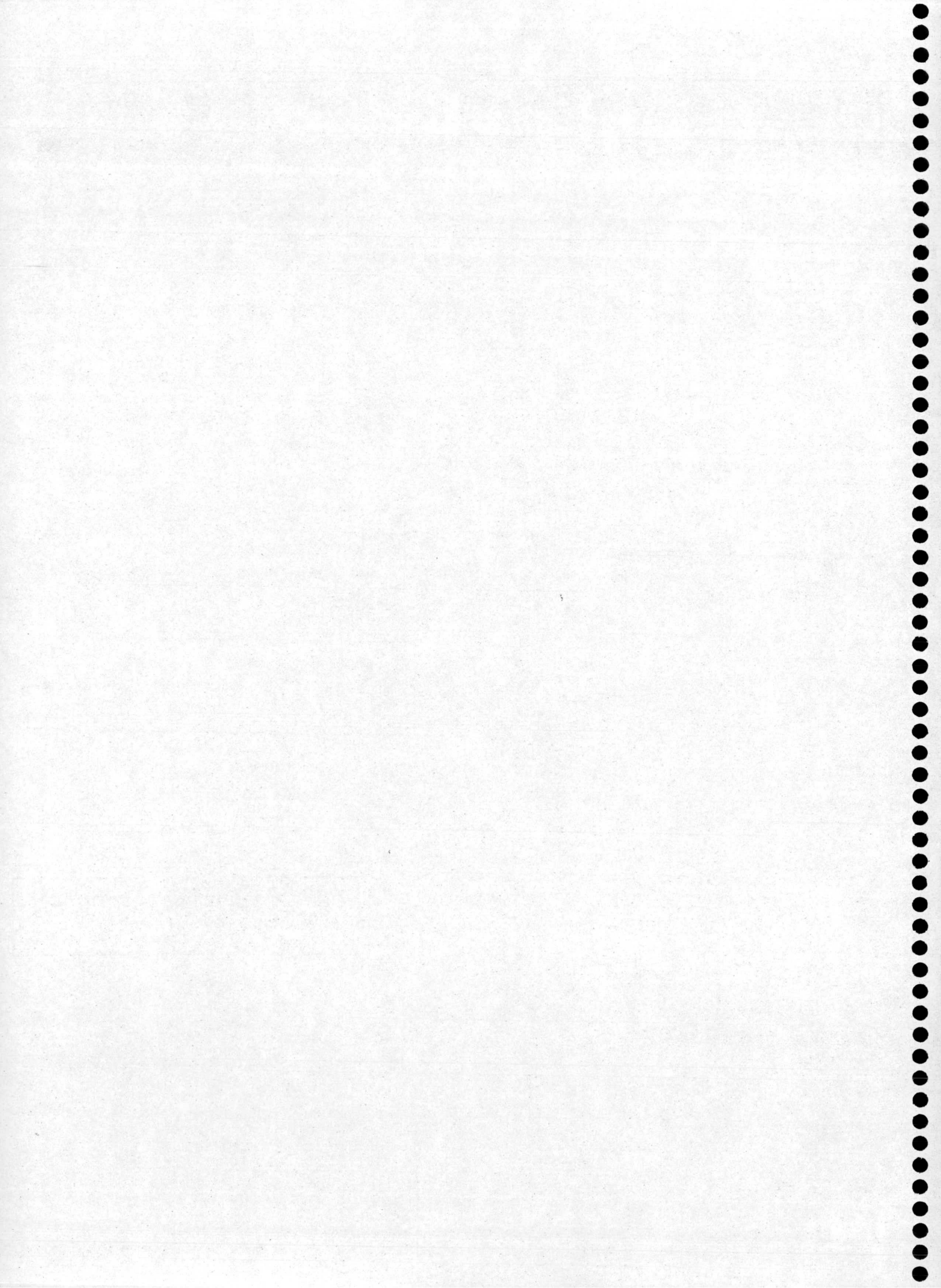


Conclusiones y Bibliografía.

UNIVERSIDAD DE GRANADA

07 ABR. 2000

COMISION DE DOCTORADO



CAPÍTULO X CONCLUSIONES

Me vacila el cuello;
fácil caigo de cabeza,
blando está el órgano
que engendra; seco el oído.

Snorri Sturluson. Saga de Egil Skallagrimsson.

De los resultados presentados en los capítulos anteriores y de la experiencia adquirida en la realización de este trabajo, podemos extraer las aportaciones y conclusiones que expondremos a continuación. Entendemos por aportaciones aquellas cuestiones que, bien previamente a la realización del trabajo o durante el mismo, ha sido necesario resolver para su correcto desarrollo. Así, por ejemplo, lo relacionado con el dispositivo y método experimental.

10.1. APORTACIONES.

- 1) Se ha construido, diseñado y puesto a punto un dispositivo experimental que permite la presentación de redes cromáticas a diferentes distancias, dando lugar así a una gran versatilidad de las condiciones experimentales de determinación del umbral, según las exigencias de las diferentes partes del trabajo.
- 2) Se ha elaborado una definición de contraste cromático que cumple los requisitos de normalización y simetría en el espacio de excitación de conos, utilizando como base el modelo de Boynton (1986). Esta definición se adapta tanto a redes cromáticas rojo-verde y amarillo-azul como en otros ejes intermedios. Además, se ha cambiado para el estudio sobre pacientes de Esclerosis Múltiple, con el fin de incluir estímulos lo más alejados del equienergético posible, debido a las reducidas capacidades de discriminación cromática de este grupo de sujetos.
- 3) Se han elaborado los programas necesarios para controlar el desarrollo de las sesiones de toma de datos mediante el método de escalera (2 AFC temporal) utilizado en la primera parte del trabajo, que dejan en manos del experimentador la selección de estímulos que se presentan, impidiendo así el conocimiento por parte del observador de la evolución de resultados obtenidos a lo largo de cada una de las sesiones experimentales.

- 4) Asimismo, se ha desarrollado un método experimental basado en el de los límites que, conservando las exigencias de fiabilidad y reproducibilidad, optimiza el número de estímulos presentados y la duración de las sesiones, con el fin de atender a las necesidades específicas de un grupo de observadores constituido por pacientes de Esclerosis Múltiple.

10.2. CONCLUSIONES.

- 1) En el rango de frecuencias espaciales estudiado, de 1,0 a 4,0 cpd en intervalos de 0,2 cpd, las curvas de sensibilidad al contraste cromático en los dos ejes cardinales rojo-verde y amarillo-azul resultan de tipo paso-baja. Los resultados son muy similares para los dos observadores que participaron en las medidas, registrándose las diferencias mayores en la zona entre 1,0 y 2,0 cpd. Este carácter paso-baja se presenta en menor medida que en los resultados obtenidos por Van der Horst *et al.* (1967) para redes cuadradas cromáticas, con un nivel de luminancia muy superior al utilizado en nuestra experiencia.
- 2) La visibilidad relativa del máximo respecto del mínimo en nuestros resultados para los ejes cardinales presenta muchas similitudes con los valores obtenidos por Van der Horst y Bouman (1969) y Granger y Heurtley (1973), lo que refleja de un modo cuantitativo el grado de carácter paso-baja de la curva. Ambos estudios no implementan la corrección de la aberración cromática, al igual que el nuestro, y la selección de estímulos de color de Van der Horst y Bouman (1969) es también muy similar a la nuestra, tomando como centro el equienergético. Sin embargo, las curvas obtenidas en los ejes cardinales por Mullen (1985) son bastante más paso-baja que las nuestras y las de estos autores, lo cual puede ser debido a la corrección de aberraciones cromáticas llevada a cabo por Mullen y a la diferente selección de estímulos de color.
- 3) Tras el estudio realizado con tres frecuencias espaciales y cuatro tamaños de campo diferentes, concluimos que el campo utilizado en la presentación de las redes cromáticas rojo-verde influye sobre el nivel de visibilidad obtenido. El mayor valor de visibilidad corresponde al campo de 8°, y el menor a 15°, para los dos observadores. Esto supone

que este parámetro debe mantenerse fijo para la medida de la visibilidad en todo el rango de frecuencias espaciales que se evalúe.

- 4) Se ha estudiado también la variación de la visibilidad para dos frecuencias espaciales y cuatro niveles de luminancia. Existe un crecimiento de la visibilidad conforme aumenta la luminancia, para las redes cromáticas rojo-verde y ambos observadores, con lo que se ratifica la tendencia observada en otros estudios con diferentes niveles de luminancia a los empleados en nuestro trabajo. Este parámetro debe entonces tenerse en cuenta para la comparación de resultados entre distintos autores.
- 5) Las curvas de sensibilidad al contraste cromático para ejes que estimulan simultáneamente los dos canales oponentes cromáticos, con iguales variaciones de contraste cromático en los ejes cardinales presentan las mismas características en cuanto a forma y valores relativos de visibilidad ya señaladas para los ejes cardinales. Estas curvas resultan muy similares entre sí para cada uno de los observadores, demostrando el previsible comportamiento idéntico del sistema visual cuando es estimulado en líneas simétricas con respecto a los ejes cardinales en el espacio de excitación de conos.
- 6) La comparación directa de valores de visibilidad en las líneas intermedias y los ejes cardinales ofrece resultados conflictivos entre ambos observadores en el eje rojo-verde, y tendencias muy similares en el eje amarillo-azul. Esto parece sugerir una posible interacción entre canales para uno de los observadores, mientras que para el otro observador esta posibilidad no es tan manifiesta. Por ello, se hace necesario recurrir a otras técnicas alternativas para estudiar la posible interacción entre los mecanismos cromáticos.
- 7) Por otro lado, el análisis comparativo de los valores de visibilidad cardinales e intermedios por medio de la Fracción de Weber refleja también estos resultados conflictivos, existiendo mayores diferencias relativas para uno de los observadores en cuanto a la visibilidad rojo-verde, y tendencias similares para la visibilidad amarillo-azul, con mayores fluctuaciones en general entre las distintas frecuencias para la visibilidad rojo-verde. Estas fluctuaciones no permiten distinguir sin embargo entre distintos rangos de frecuencias con tendencias comunes, reflejando un comportamiento

similar de los diferentes filtros que procesan la información espacial cromática entre 1,0 y 4,0 cpd.

- 8) La hipótesis de interacción lineal entre los mecanismos oponentes cromáticos queda descartada por los resultados obtenidos mediante sumación subumbral para ambos observadores, ya que estos resultados son compatibles con una hipótesis de independencia estocástica de los canales cromáticos. Se despejan así las dudas que sobre una posible interacción entre ambos planteaban los resultados de CSF cromática en los ejes intermedios. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de una interacción a nivel supraumbral, así como de otras interpretaciones de los ajustes realizados.
- 9) Hemos obtenido los resultados de sumación subumbral con la técnica de fotometría de parpadeo heterocromática (HFP) para determinar la isoluminancia. La discrepancia entre los resultados de Gur y Akri (1992) y Mullen *et al.* (1997) radicaba, según estos últimos autores, en la determinación de la isoluminancia en condiciones espaciales y temporales muy diferentes a las de presentación del estímulo. En cambio, nuestros resultados demuestran que el uso de la técnica HFP no presupone la intrusión del canal de luminancia en los estímulos modulados en cromaticidad, por lo que, realizada adecuadamente, es perfectamente válida para el estudio de la interacción color-luminancia.
- 10) Para caracterizar el grupo de pacientes con Esclerosis Múltiple que han participado en nuestras experiencias, se realizaron cinco tests estándar de valoración de la función visual (A.V., sensibilidad al contraste, Ishihara, L'Anthony Desaturé y campimetría). Los resultados muestran la falta de uniformidad característica del estado visual de estos sujetos, aun quedando todos excepto uno clasificados como anómalos por alguno o varios de los tests. La prueba que ha detectado más sujetos con anomalías fue la perimetría automática considerando los 60° de campo visual, aunque si consideramos los 10° centrales de campo visual sólo 5 de los 15 sujetos registraron valores anómalos.
- 11) A raíz de estos resultados, se diseñó un test de CSF cromática para evaluar la sensibilidad al contraste en los ejes rojo-verde y amarillo-azul. Para al menos una de las tres frecuencias espaciales utilizadas, la sensibilidad al contraste cromático resultó fuera del rango normal para el 92% de los pacientes en el eje rojo-verde y el 93% en el eje

amarillo-azul, lo que da buena muestra de la eficacia del test para detectar pérdidas visuales en pacientes de Esclerosis Múltiple. Estos resultados indican que no existen diferencias en cuanto al patrón de pérdidas detectado para ambos ejes, por lo que aunque, como hemos concluido anteriormente, haya que considerar los dos mecanismos cromáticos como independientes, esto no supone que en esta patología se vean afectados en distinta medida.

- 12) Respecto de los valores de visibilidad, tanto para los pacientes como para el grupo de control, la caída de los mismos para la frecuencia de 12,0 cpd no es tan elevada como cabe esperar, debido a la influencia de la no corrección de la aberración cromática. Este descenso menor de lo esperado es más evidente para el eje amarillo-azul que para el rojo-verde. De las tres frecuencias espaciales utilizadas, aunque se registra una variabilidad significativa entre los resultados individuales de los pacientes, la que registra pérdidas visuales en mayor número de sujetos es la más baja, de 1,0 cpd, para la cual el grupo de control ha obtenido menor dispersión en los resultados.
- 13) Comparando gráficamente las medias obtenidas por el grupo de quince sujetos de control y los pacientes se obtiene un patrón de pérdida uniforme, con descenso en el umbral de sensibilidad para las tres frecuencias utilizadas, con lo que la curva media de los pacientes sigue la misma tendencia que la de los sujetos del grupo de control, pero con valores reducidos de visibilidad. Desde un punto de vista estadístico, los valores medios de visibilidad de ambas poblaciones resultan diferentes con un nivel de significación del 99,9%, para ambos ejes y las tres frecuencias espaciales utilizadas.
- 14) Se ha estudiado la influencia de la Agudeza Visual en las respuestas de los pacientes, para lo que se han separado en dos grupos, uno con agudeza normal y otro con agudeza reducida. Las respuestas en el eje rojo-verde registran un patrón de pérdida mayor para la frecuencia más baja, y en general el grupo de A.V. normal tiene mejor sensibilidad a todas las frecuencias que el grupo de A.V. reducida. Esto refleja que para sujetos que no registran pérdidas importantes en la percepción de altas frecuencias en luminancia es mucho más fácil detectar las redes de frecuencias medias y altas, que tienen un componente en luminancia debido a la aberración cromática no corregida. Por ello, el test que hemos diseñado resulta ser útil para detectar pérdidas visuales tanto en sujetos con A.V. reducida como normal.

Durante la realización del trabajo, han ido surgiendo una serie de cuestiones que podrían constituir el objetivo de futuros trabajos. Así, por ejemplo, sería interesante volver a obtener la CSF cromática llegando hasta frecuencias altas, para lo cual se hace totalmente necesario corregir previamente la aberración cromática tanto longitudinal como transversal. De esta forma, se podría valorar el efecto de la corrección de aberraciones sobre la forma de la curva y determinar el valor de la frecuencia de corte. Por otra parte, sería interesante profundizar en el efecto que puedan tener sobre la curva otros parámetros experimentales, como por ejemplo la excentricidad del estímulo o su orientación. Así mismo, desde un punto de vista de su utilización en la detección y seguimiento de determinadas patologías, quedan aspectos interesantes que abordar, que podrían ir desde aplicar el test a otras patologías (v.g. glaucoma) o estudiar la evolución de los pacientes de Esclerosis Múltiple que están siendo tratados con diferentes fármacos.

CAPÍTULO XI BIBLIOGRAFÍA

La biblioteca se defiende sola, insondable como la verdad que en ella habita, engañosa como la mentira que custodia.
Umberto Eco. El nombre de la rosa.

ANSTIS S. Y CAVANAGH P. "A Minimum Motion Technique for Judging Equiluminance." Colour Vision, Psychology and Psychophysics. Ed. Mollon y Sharpe, Academic Press London, 155-166 (1983).

BLAKEMORE C. Y CAMPBELL F.W. "On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images." J. Physiol. (Lond.) **203**, 237-260 (1969).

BODIS-WOLLNER I., MARX M.S., MITRA S., BOBAK P., MYLIN L. Y YAHR M. "Visual dysfunction in Parkinsons' disease - loss in spatiotemporal contrast sensitivity." Brain **110**, 1675-1698 (1987).

BOYNTON R.M. "Human color vision." New York: Holt, Rinehart Y Winston. (1979).

BOYNTON R.M. "A system of photometry and colorimetry based on cone excitations." Color Res. & Appl. **11**, 244-252 (1986).

BOYNTON R.M. Y KAMBE N. "Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes." Color Res. & Appl. **5**, 13-23 (1980).

BRADLEY A., SWITKES E. Y DE VALOIS, K.K. "Orientation and spatial frequency selectivity of adaptation to isoluminant color patterns." Invest. Ophtalmol. Vis. Sci. (Suppl.) **26**, 182 (1985).

BRADLEY A., SWITKES E. Y DEVALOIS K. "Orientation and spatial frequency selectivity of adaptation to color and luminance gratings." *Vision Res.* **28**, 841-856 (1988).

BRADLEY A., ZHANG X. Y THIBOS L.N. "Achromatizing the Human Eye." *Optom. & Vis. Sci.* **68**, 608-616 (1991).

BRAINARD D.H. Calibration of a computer controlled color monitor. *Color Res. & Appl.* **14**, 23-34 (1989).

CAMPBELL F.W. Y GREEN D.G. "Optical and retinal factors affecting visual resolution." *J. Physiol. (Lond.)* **181**, 576-593 (1965).

CAMPBELL F.W. Y KULIKOWSKI J.J. "Orientation selectivity of the human visual system" *J. Physiol. (Lond.)* **187**, 437-445. (1966).

CAMPBELL F.W. Y ROBSON J.G. "Application of Fourier Analysis to the visibility of gratings." *J. Physiol. (Lond.)* **197**, 551-566 (1968).

CONGIA S., MELLINO G.A., PORCELLA A., BORGHERO G. Y CANNAS A. "Primary Optic Neuritis evolved in Multiple Sclerosis: an epidemiological study." *Acta Neurol. (Napoli)* **15**, 433-441 (1993).

CORNSWEET T.N. "The staircase method in psychophysics." *Am. J. of Psychol.* **75**, 485-491 (1962).

COWAN W.B. Y ROWELL N. "On the gun independence and phosphor constancy of colour video monitors." *Color Res. & Appl.* **11**, 533-538 (1986).

DAITCH J.M. Y GREEN D.G. " Contrast sensitivity of the human peripheral retina." *Vision Res.* **9**, 947-952 (1969).

DAVIS F.A., STEFOSKI D. Y RUSH J. "Orally administered 4-aminopyridine improves clinical signs in multiple sclerosis." *Ann. Neurol.* **27**, 186-192 (1990).

- DERRINGTON A.M., KRAUSKOPF J. Y LENNIE P.** "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque." *J. Physiol. (Lond.)* **357**, 241-265 (1984).
- DE VALOIS R.L., ALBRECHT D.G. Y THORELL L.G.** "Spatial tuning of LGN and cortical cells in the monkey visual system." *Spatial Contrast*, 60-63 H. Spekreijse Y H. van der Tweel (Edit.), Amsterdam (Elsevier) (1977).
- DE VALOIS R.L. Y DE VALOIS K.K.** "Neural Coding of color" *Handbook of perception*, vol. **5**, 117-166. Edit. Academic Press, New York (1975).
- DE VALOIS R.L. Y DE VALOIS K.K.** "Spatial vision". Oxford Science publications, Psychology series 14. (1990).
- DE VALOIS R.L. Y DE VALOIS K.K.** "A multi-stage color model" . *Vision Res.* **33**, 1053-1065 (1993).
- DE VALOIS K.K. Y SWITKES E.** "Simultaneous masking interactions between chromatic and luminance gratings." *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 11-18 (1983).
- FLITCROFT I.D.** " The interactions between chromatic aberration, defocus and stimulus chromaticity: implications for visual physiology and colorimetry." *Vision Res.* **29**, 349-360 (1989).
- FOLEY J.M.** "Human luminance pattern-vision mechanisms: masking experiments require a new model." *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 1710-1719 (1994).
- FOLEY J.D. Y VAN DAM A.** "Fundamentals of interactive Computer Graphics." Addison Wesley, Reading P.A. (1982).
- FREDERIKSSEN J., LARSSON H., OLESEN J. Y STIGSBY B.** " Evaluation of the visual system in multiple sclerosis. II. Colour vision." *Acta Neurol. Scand.* **74**, 203-209 (1986).

- GARCÍA J.A., ROMERO J., GARCÍA-BELTRÁN A. Y JIMÉNEZ J.R.** "Interobserver variability of chromaticity discrimination and color representation spaces." *J. Optics* **24**, 65-59 (1993).
- GRAHAM N.V.S.** "Visual pattern analyzers." Oxford University Press, New York (1989).
- GRANGER E.M. Y HEURTLEY J.C.** "Visual Chromaticity modulation transfer function." *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 1173-1174 (1973).
- GUR M. Y AKRI V.** " Isoluminant stimuli may not expose the full contribution of color to visual functioning: Spatial contrast sensitivity measurements indicate interaction between color and luminance processing." *Vision Res.* **32**, 1253-1262 (1992).
- GUTH S.L.** "Model for color vision and light adaptation." *J. Opt. Soc. Am. A* **8**, 976-993 (1991).
- HITA E., GONZÁLEZ CABALLERO F. Y CERVANTES A.** " On the geometric structure of color discrimination thresholds." *Die Farbe* **30**, 55-64 (1982).
- HITA E. Y ROMERO J.** " Análisis de la influencia de las condiciones de observación en los procesos de discriminación de color." *Opt. Pur. Apl.* **14**, 11-17 (1981).
- HONAN W.P., HERON J.R., FOSTER D.H., EDGAR G.K., SCASE M.O. Y COLLINS F.** " Visual loss in multiple sclerosis and its relation to previous optic neuritis, disease duration and clinical classification." *Brain* **113**, 975-987 (1990).
- HURVICH L.M. Y JAMESON D.** "Some quantitative aspects of an opponent-colours theory II." *J. Opt. Soc. Am.* **45**, 602-616 (1955).
- HURVICH L.M. Y JAMESON D.** "An opponent process theory of color vision." *Psych. Rev.* **64**, 384-404 (1957).

JIMÉNEZ DEL BARCO L., DÍAZ J.A., JIMÉNEZ J.R. Y RUBIÑO M. "Considerations on the calibration of CRT color displays assuming constant channel chromaticity." *Color Res. Appl.* **20**, 377-387 (1995).

JONES R.M. Y TULUNAY-KEESEY U. "Local retinal adaptation and spatial frequency channels." *Vision Res.* **15**, 1239-1244 (1975).

JUDD D.B. Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight, CIE Proceeding, 12 Session, Stockholm. CIE Central Bureau, Paris, 1, Sec.7,11 (1951).

KELLY D.H. "Spatio-temporal frequency characteristics of color-vision mechanisms." *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 983-990 (1974).

KELLY D.H. "Spatio-temporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds." *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 742-749. (1983) .

KINGDOM F. Y MULLEN K.T. " Separating colour and luminance information in the visual system." *Spatial Vision* **9**, 191-219 (1995).

KRAUSKOPF M. Y GEGENFURTNER H. "Color discrimination and adaptation." *Vision Res.* **32**, 2165-2175 (1992).

LOSADA M.A. Y MULLEN K.T. "The spatial tuning of chromatic mechanisms identified by simultaneous masking." *Vision Res.* **34**, 331-341 (1994).

LUCASSEN M.P. Y WALRAVEN J. "Evaluation of a simple method of color monitor recalibration." *Color Res. & Appl.* **15**, 321-326 (1990).

MARTÍN ANDRÉS J. Y LUNA DEL CASTILLO J.D. "Bioestadística para las ciencias de la Salud." Ed. Norma, Madrid (1990).

MARTINEZ-URIEGAS E. "Spatio-temporal multiplexing of chromatic and achromatic information in human vision." SPIE, 1249. Human visión and Electronic Imaging: Models, Methods and Applications. (1990).

MEDJBEUR S. Y TULUNAY-KEESEY U. "Spatio-temporal responses of the visual system in demyelinating diseases." *Brain* **108**, 123-138 (1985).

MULLEN K.T. "The contrast sensitivity of Human colour vision to red-green and yellow-blue chromatic gratings." *J. Physiol.* **359**, 381-400 (1985).

MULLEN K.T., CROPPER S.J. Y LOSADA M.A. "Absence of linear subthreshold summation between red-green and luminance mechanisms over a wide range of spatio-temporal conditions." *Vision Res.* **37**, 1157-1165 (1997).

MULLEN K.T. Y LOSADA M.A. "Evidence for separate pathways for color and luminance detection mechanisms." *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 3136-3151 (1994).

MULLEN K.T. Y PLANT G.T. "Colour and luminance vision in human Optic Neuritis." *Brain* **109**, 1-13 (1986).

MULLEN K.T. Y SANKERALLI M.J. "Evidence for the stochastic independence of the blue-yellow, red-green and luminance detection mechanisms revealed by subthreshold summation." *Vision Res.* **39**, 733-745 (1999).

NIEVES J.L., ROMERO J., GARCÍA J.A. Y HITA E. "visual system's adjustments to illuminant changes: heuristic-based model revisited." *Vision Res.* **40**, 391-399 (2000).

NOORLANDER C., HEUTS H.J.G. Y KOEDERINK J.J. "Influence of the target size on the detection threshold for luminance and chromaticity contrast." *J. Opt. Soc. Am.* **70**, 1116-1121 (1980).

OGBOSO Y.U. Y BEDELL H.E. "Magnitude of lateral chromatic aberration across the retina of the human eye." *J. Opt. Soc. Am. A* **4**, 1666-1672 (1987).

PANDEY R. Y VIMAL R.L.P. "Threshold elevation curves for the red-green channel estimated by oblique masking." *Invest. Ophthalmol. Visual Sci. Suppl.* **34**, 751 (1993).

PÁRRAGA C.A., BREISTAFF G., TROSCIANKO T. Y MOOREHEAD I.R. "Colour and luminance in natural scenes." *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 563-569 (1998).

PATEL A.S. "Spatial resolution by the human visual system." *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 689-694 (1966).

PLANT G.T., KERMODE A.G., TURANO G., MOSELEY I.F., MILLER D.H., MACMANUS D.G., HALLIDAY A.M. Y MCDONALD W.I. " Symptomatic retrochiasmal lesions in multiple sclerosis: clinical features, visual evoked potentials and magnetic resonance imaging." *Neurology* **42**, 68-76 (1992).

PORCIATTI V. Y SARTUCCI F. "Specific losses in both eyes of patients with multiple sclerosis and unilateral optic neuritis." *Brain*, **119**, 723-740 (1996).

POSER C.M., PATY D.W., SCHEINBERG L., MCDONALD W.I., DAVIS F.A., EBERS G.C. et al. " New diagnostic criteria for multiple sclerosis: guidelines for research protocols. " *Ann. Neurol.* **13**, 227-231 (1983).

POWELL I. "Lenses for correcting the chromatic aberration of the eye." *Appl. Opt.* **20**, 4152-4155 (1981).

QUICK R.F. "A vector magnitude model for contrast detection." *Kybernetik* **16**, 65-67 (1974).

REGAN D., SILVER R. Y MURRAY T.J. "Effect of body temperature on Visual Evoked Potential delay and visual perception in Multiple Sclerosis." *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, **40**, 1083-1091 (1977a).

REGAN D., SILVER R. Y MURRAY, T.J. "Visual acuity and contrast sensitivity in multiple sclerosis-Hidden visual loss." *Brain* **100**, 563-579 (1977b).

RIKLAN M. " Levodopa and behaviour." *Neurology* **22**, 43-55 (1972).

ROHALY A.M. Y BUCHSBAUM G. " Inference of global spatiochromatic mechanisms from contrast sensitivity functions." *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 572-576 (1988).

- ROMERO J., GARCÍA J.A., JIMÉNEZ DEL BARCO L. Y HITA E.** . "Evaluation of color discrimination ellipsoids in two-color spaces." *J. Opt. Soc. Am. A* **10**, 827-837 (1993).
- RONCHI L. Y FERRARA MORI G.** "On the characteristics of observers employed in visual research". *Atti. Fond. G. Ronchi* **18**, 203-219 (1963).
- ROVAMO J.M., VIRSU V. Y NASANEN R.** "Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision." *Nature* **271**, 54-56 (1978).
- RYNDERS M.C., NAVARRO R. Y LOSADA M.A.** " Objective measurement of the Off-Axis longitudinal chromatic aberration in the human eye." *Vision Res.* **38**, 513-522 (1998).
- SAVOY R.L. Y MCCANN J.J.** "Visibility of low spatial frequency sine-wave targets: dependence on number of cycles." *J. Opt. Soc. Am.* **65**, 343-350 (1975).
- SCHAPIRO R.T. Y LANGER S.L.** "Symptomatic therapy of Multiple Sclerosis." *Curr. Opin. Neurol.* **7**, 229-233 (1994).
- SCHADE O.** "On the quality of color-television images and the perception of color detail." *J. Soc. Motion Picture and Television Eng.* **67**, 801-819 (1958)
- SIEGEL C.** " Color discrimination as a function of exposure time." *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 566 (1964).
- SMITH V.C. Y POKORNY J.** "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 700 nm." *Vision Res.* **15**, 161-171 (1975).
- SPERLING H.G. Y HARWERTH R.S.** "Red-green cone interactions in increment thresholds of spectral sensitivity of primates." *Science*, **172**, 180-184 (1971).
- SPRONSON W.N.** " Colour science in television and displays systems." Adam Hilger, Bristol, 1983.

STAVROU P. Y HONAN W.P. "Contrast sensitivity in benign intracranial hypertension." *Neuro Ophth.* **17**, 127-134 (1997).

SWITKES E., BRADLEY A. Y DE VALOIS K.K. "Contrast dependence and mechanisms of masking interactions among chromatic and luminance gratings." *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1149-1162 (1988).

THIBOS L.N., BRADLEY A., STILL D.L., ZHANG X. Y HOWARTH P.A. "Theory and Measurement of ocular chromatic aberration." *Vision Res.* **30**, 33-49 (1990).

THIBOS L.N., YE M., ZHANG X. Y BRADLEY A. "The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans." *Appl. Opt.* **31**, 3594-3600 (1992).

THOMAS J.P. "Model of the function of receptive fields in human vision." *Psychol. Review* **77**, 121-134 (1970).

TRAVIS D. "Effective color displays: theory and practice." Academic Press, (1991).

TRAVIS D. Y THOMPSON P. "Spatiotemporal contrast sensitivity and colour vision in multiple sclerosis." *Brain* **112**, 283-303 (1989).

TUNACLIFFE, A.H. "Introduction to visual optics." Association of British Dispensing Opticians. London, 1993.

URÍA D.F., MENES B.B., CALATAYUD M.T. Y ARRIBAS J.M. "Factores de prognosis en una serie basada en la población en Asturias." *Neurología* **9**, 182-187 (1994).

VALERO E.M., BERMÚDEZ J., PÉREZ M.A., NIEVES J.L. Y GARCÍA J.A. "Estudio comparativo de distintos tests de visión del color en pacientes de Esclerosis Múltiple Y Neuritis Óptica." V Congreso Nacional del Color, Tarrassa 9-11 Junio 1999. Libro de Actas, p.121-122.

VAN DER HORST J.G.C. "Chromatic Flicker." *J. Opt. Soc. Am.* **59**, 1213-1217 (1969).

VAN DER HORST J.G.C. Y BOUMAN M.A. "Spatiotemporal Chromaticity Discrimination." *J. Opt. Soc. Am.* **59**, 1482-1488 (1969).

VAN DER HORST J.G.C., DE WEERT M.C.C. Y BOUMAN M.A. "Transfer of Spatial Chromaticity-contrast at threshold in the Human Eye." *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 1260-1266 (1967).

VAN DIEMEN H.A.M., LANTING P., KOETSIER J.C., STRIJERS R.L.M., VAN WALBEEK H.K. Y POLMAN C.H. "Evaluation of the visual system in multiple sclerosis: a comparative study of diagnostic tests." *Clin. Neurol. Y Neurosurg.* **94**, 191-195 (1992).

VIMAL R.L.P. "Color-luminance interaction: data produced by oblique cross masking." *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 1756-1766 (1998).

VIMAL R.L.P. Y PANDEY R. "Spatial frequency tuned mechanisms of the red-green channel estimated by oblique masking." *Soc. Neurosci. Abstr.* **20**, 1580 (1994).

VISION AND VISUAL DYSFUNCTION, Tomo 10. "Spatial Vision". Editor: D. Regan. MacMillan Press (1991).

WEBSTER M.A., DE VALOIS K.K. Y SWITKES E. "Orientation and spatial frequency discrimination for luminance and chromatic gratings." *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 1034-1049 (1990).

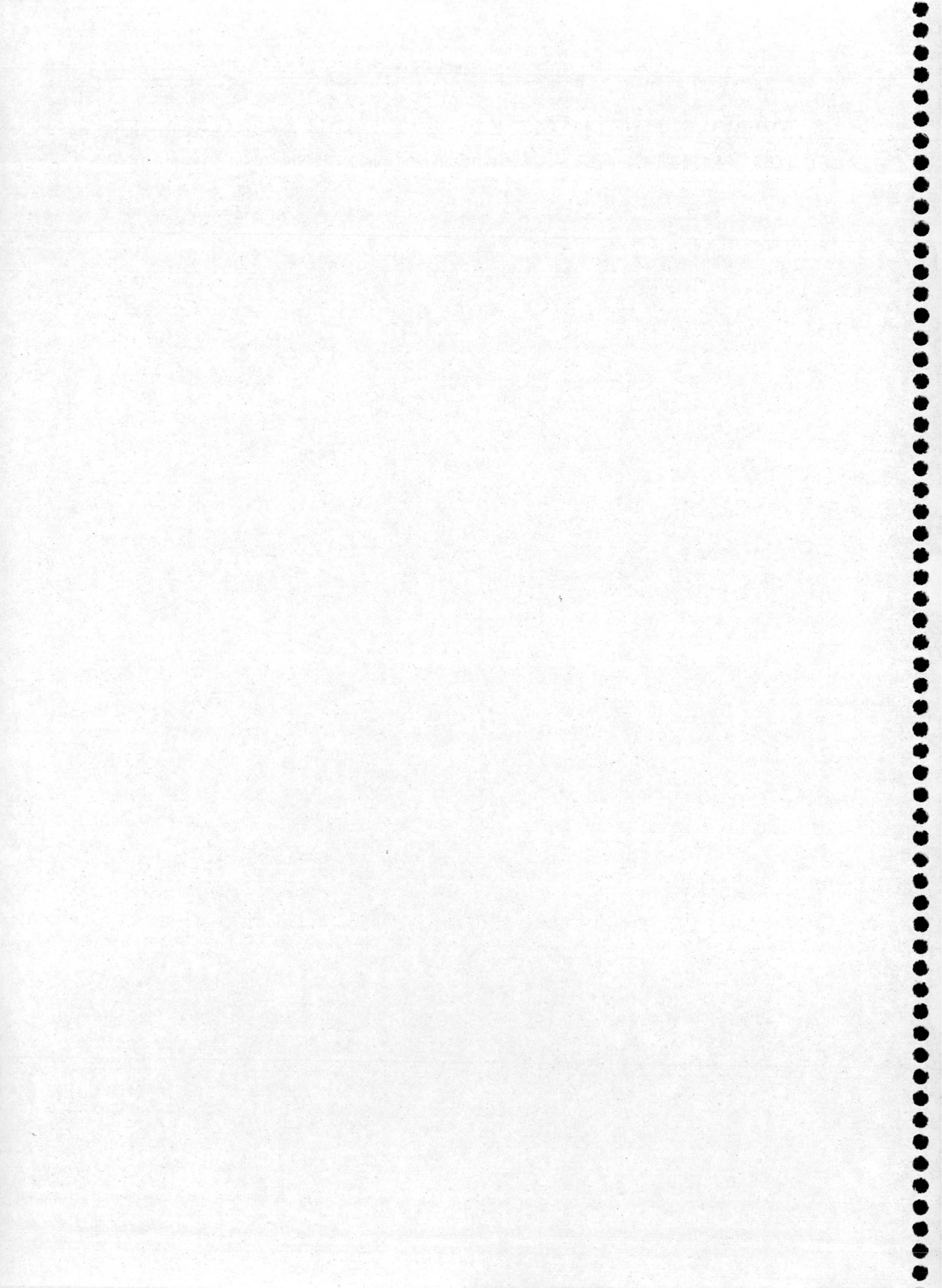
WEBSTER M.A. Y MOLLON J.D. "The influence of contrast adaptation on color appearance." *Vision Res.* **34**, 1993-2020 (1994).

WIESEL T.N. Y HUBEL D.H. "Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey." *J. Neurophysiol.* **29**, 1115-1156 (1966).

WILSON H.R., MACFARLAINE D.K. Y PHILLIPS G.C. "Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking." *Vision Res.* **23**, 873-882 (1983).

WYSZECKY G. Y STILES W.S. "Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulae." Wiley, New York (1982).

YUJIRI A., EJIMA Y. , ALITA H. Y NOGUCHI T. "Spatial frequency selectivity of human color vision mechanisms." ARVO abstracts. Invest. Ophtal. Vis. Sci. Suppl. , 217 (1980).



APÉNDICE ESCLEROSIS MÚLTIPLE

A.1. INFORMACIÓN GENERAL, HISTORIA Y EPIDEMIOLOGÍA.

La Esclerosis Múltiple es una enfermedad autoinmune que afecta al sistema nervioso central. El sistema inmunológico del paciente identifica la mielina que protege sus fibras nerviosas como agente extraño y la ataca, dañándola. Cuando la mielina se daña, se multiplican las células alrededor del área de ataque, causando la formación de un tejido cicatricial denso. Este tejido aparece como marrón en las disecciones post-mortem, y se da en lugares diseminados del sistema nervioso central. De estas dos características (endurecimiento cicatricial y diseminación) deriva el nombre de la patología. La formación de tejido esclerótico retrasa o incluso llega a impedir la transmisión nerviosa, con lo que se ven afectadas muchas funciones corporales, como visión, movilidad y coordinación.

La patología se caracteriza por producir una serie de *brotos* o exacerbaciones en los pacientes a los que afecta. Un brote supone la aparición repentina de síntomas que corresponden a la parte de sistema nervioso central afectada. Puede durar varios días o semanas, y la recuperación posterior suele durar varias semanas o meses, de forma variable según los sujetos. Según el curso de la enfermedad, los sujetos se dividen, una vez diagnosticados como definitivos, en tres categorías: remitente-recidivante, cuando se producen brotes seguidos de períodos de recuperación, sin que se aprecie empeoramiento significativo con el tiempo; primaria progresiva si además de los brotes hay un empeoramiento continuo, y secundaria progresiva cuando el paciente se deteriora con más rapidez después de un período inicial de brotes remitentes. Algunos individuos padecen Esclerosis Múltiple de un tipo que no manifiesta ningún síntoma, conocida como “silenciosa”.

La enfermedad no fue reconocida oficialmente hasta 1868, cuando Charcot introdujo el término “esclerosis en placas” para designar las lesiones observadas en la médula espinal durante autopsias efectuadas más de treinta años antes, entre 1830 y 1835. Desde entonces, y sobre todo en los últimos cincuenta años, con los avances en el diagnóstico de lesiones neurológicas, se han ido descubriendo un número progresivamente mayor de casos. Se calcula que sólo en los

EE.UU. hay más de medio millón de afectados. La enfermedad está más extendida entre los habitantes de las zonas frías del globo (Europa del Norte, Norte de Rusia, EE.UU., Canadá, Nueva Zelanda y Sureste de Australia), posiblemente debido a factores ambientales en conjunción con una mayor susceptibilidad genética. Por sexos, la proporción de mujeres afectadas es mayor (razón de 1,4:1 frente a los hombres), y la media de edad de diagnóstico es de 33 años. Según los datos de afectados, el paciente más probable de Esclerosis Múltiple resulta ser una mujer de raza blanca, entre 20 y 40 años de edad.

A.2. CAUSAS Y SÍNTOMAS.

No se trata de una enfermedad hereditaria, aunque sí puede heredarse la predisposición a contraerla. Pero debe haber siempre un agente externo (que se desconoce hasta ahora, podría ser un virus) que actúe como desencadenante de la patología. Así pues, se desconocen totalmente los agentes causales de la enfermedad.

Las áreas más afectadas son la espina dorsal, el encéfalo y el nervio óptico. Estas zonas controlan funciones corporales muy variadas, así que la Esclerosis Múltiple tiene un cuadro sintomático muy amplio. Algunos de los signos y síntomas más comunes son:

- Motores: espasticidad (tensión muscular continuada), debilidad, reflejos disminuidos.
- Sensoriales: pérdida del sentido del equilibrio, insensibilidad al dolor y a la temperatura, sensación de shock eléctrico.
- Cerebrales: ataxia (dificultad para caminar y moverse), temblor, nystagmus.
- Encefálicos: neuritis óptica, molestias oculares, vértigo.
- Del sistema autónomo: disfunción urinaria y fecal, disfunción sexual, anomalías vasculares y de sudoración.
- Psiquiátricos: depresión, euforia, anomalías cognitivas.
- Varios: fatiga.

En cuanto a la neuritis óptica, problema originario de la mayoría de las pérdidas visuales que padecen los pacientes de Esclerosis Múltiple (ver capítulos II y III), entendemos que el tema merece que le dediquemos un comentario un poco más extenso. Aproximadamente el cincuenta por ciento de los sujetos que desarrollan neuritis óptica como primer síntoma acaban por padecer Esclerosis Múltiple. Sin embargo, si se trata la neuritis óptica con corticosteroides inyectados y

orales se reduce en un 50% el riesgo de desarrollo de Esclerosis Múltiple en los siguientes dos años a la neuritis óptica. Esta disminución de riesgo por tratamiento con corticoides es aplicable también a otros síntomas primarios no visuales de la Esclerosis Múltiple, detectados por medio de resonancia magnética. La neuritis óptica causa normalmente dolor ocular y una rápida y a menudo extrema pérdida de visión, que generalmente se recupera aun sin tratamiento. Los sujetos tratados con corticoesteroides intravenosos recuperaron la visión dos semanas antes que los sujetos sin tratamiento. Sin embargo, el tratamiento no produjo un mejor estado visual a largo plazo.

A.3. DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO.

El diagnóstico se realiza mediante exploración neurológica con una serie de pruebas estándar (reflejos, examen de visión, coordinación, potenciales evocados) conjuntamente con la prueba más fiable para detectar las placas de desmielinización, que es la técnica de imagen mediante *resonancia magnética*, y en ocasiones se realizan también punciones lumbares. Una herramienta importante de diagnóstico son también los criterios estandarizados, como el de Poser *et al.* (1983), y las escalas de discapacidad (la más extendida es la EDSS). Como ejemplo de la precisión obtenida en la localización de las lesiones con la técnica de imágenes por resonancia magnética, podemos ver la figura A.1, que muestra con flechas las manchas blancas brillantes correspondientes a zonas desmielinizadas de ambos hemisferios cerebrales en un paciente de Esclerosis Múltiple.

Actualmente no existe ningún tipo de cura para la Esclerosis Múltiple, aunque se investiga mucho sobre la enfermedad, tanto en cuanto a tratamientos como en identificación del gen responsable de la predisposición a contraerla. Los únicos recursos para los pacientes son entonces los distintos fármacos de tratamiento, que ayudan a reducir la frecuencia y severidad de los brotes y (los de tipo sintomático) a otorgar al paciente una mejor calidad de vida. Los tratamientos de uso más extendido son:

-Betaferón (interferón β 1-b). Fue el primer tratamiento aprobado por la FDA americana para la Esclerosis Múltiple, en 1995. Se trata de un derivado farmacológico de una proteína que existe naturalmente en los humanos, cuya función es controlar la magnitud de la respuesta inmunológica. La dosificación más habitual es inyecciones subcutáneas en días

alternos. Estudios de eficacia clínica han demostrado que reduce la frecuencia anual de brotes en un 31%, aumenta el porcentaje de sujetos libres de brotes en un 9% y reduce el porcentaje de lesiones nuevas o crecientes observadas por resonancia magnética del 29% al 6%. Los efectos secundarios son algo mayores que los que presentan otros fármacos, siendo los más comunes dolor y picazón locales en la zona inyectada y sensación de resfriado en los días posteriores a la inyección. Se ha demostrado que reduce significativamente la frecuencia e intensidad de los brotes en Esclerosis Múltiple de tipo remitente-recidivante, y su uso para secundaria progresiva está aprobado desde Junio de 1999 en Canadá, tras los resultados de un estudio preliminar con 718 pacientes.



Figura A.1. Imagen por resonancia magnética de un paciente de Esclerosis Múltiple con lesiones por desmielinización en ambos hemisferios cerebrales.

- Avonex (interferón β 1-a). Es otro preparado farmacéutico similar al Betaferón, y de mecanismo de acción idéntico, aunque la dosis más habitual se reduce a una inyección intramuscular semanal. En un estudio con 380 pacientes de Esclerosis Múltiple, los resultados indican una reducción del riesgo de progresión de la discapacidad en un 37%,

y de la frecuencia de los brotes en un 10%. Los efectos colaterales son un poco menores que para el Betaferón.

- Rebif (interferón β 1-a). Presentado para su aprobación por la FDA el 3/3/98. Los estudios realizados indican reducciones en la frecuencia de brotes de un 27%. Es muy similar al Avonex. Actualmente (noticia de fecha 5/10/99) el laboratorio que produce Rebif está llevando a cabo un estudio sobre las diferencias en el estado general de pacientes de Esclerosis Múltiple tratados con dosis altas y bajas de interferón β 1-a.
- Copaxone (acetato de glatiramer). Es también relativamente reciente. Actúa bloqueando la respuesta inmunológica específica contra la mielina, sin afectar globalmente al sistema inmunológico como hace el interferón. La estructura molecular del compuesto es muy similar a la de la proteína básica de mielina. Aunque no se conoce con exactitud su mecanismo de acción, se cree que bloquea las células tipo T que destruyen la mielina, actuando como cebo para ellas. Esto activa los supresores de células T y hace crecer secreciones que controlan la respuesta autoinmune contra la mielina. La dosificación es diaria, con administración subcutánea. Un estudio realizado por un laboratorio independiente revela que produce reducción de los brotes en un 29%. El laboratorio productor tuvo que hacer frente en septiembre de 1998 a una recomendación de la FDA para suprimir parte de la publicidad, que consideraba no correspondía a los efectos reales del producto sobre los pacientes de Esclerosis Múltiple.
- Corticoides (metil- prednisolona, dexametazona, Prednisona) para el tratamiento de choque contra los brotes agudos. Reducen la inflamación provocada en el sistema nervioso central por el brote. Generalmente se administran intravenosos durante cuatro días, y luego orales en dosis menores durante los días posteriores.
- Tratamientos variados para los síntomas específicos.

Resultados preliminares, aunque no detallados, de un estudio comparativo de la eficacia de Betaferón, Avonex y Copaxone parecen indicar una mayor eficacia relativa en la reducción del número de brotes de Betaferón y Copaxone, según fuentes de la asociación americana de Esclerosis Múltiple.

En la Tabla A.1 podemos ver un cuadro resumen de los distintos fármacos de acción general más utilizados en el tratamiento de la patología, junto con la dosificación habitual.

Medicamento	Frecuencia de administración
Betaferón	Subcutánea en días alternos
Avonex	Intramuscular semanal
Rebif	Tres veces por semana subcutánea
Copaxone	Subcutánea diaria

Tabla A.1. Frecuencia y sistema de administración de los cuatro fármacos más utilizados en el tratamiento de Esclerosis Múltiple.

A.4. NOTICIAS MÁS RECIENTES SOBRE LA INVESTIGACIÓN EN ESCLEROSIS MÚLTIPLE.

Toda la información contenida en este apéndice ha sido obtenida a través de diversos sitios de internet, tomando como punto de partida aquél denominado <http://www.msnews.org>, del que hemos extraído una selección de las noticias que datan de los años 1999 y 2000, sobre aspectos curiosos o que hemos considerado importantes sobre temas relacionados con el tratamiento, origen y características de la Esclerosis Múltiple. Listamos a continuación un breve extracto de los mismos, por orden cronológico, pidiendo disculpas de antemano por posibles fallos debidos al desconocimiento en bioquímica y medicina, y a la traducción del inglés que se ha realizado de las noticias.

1/99. El fármaco Eliprodil ayuda a regenerar la mielina en las lesiones asociadas a la Esclerosis Múltiple, pero sin ningún efecto sobre los agentes desmielinizadores (estudio en animales).

25/1/99. Un estudio de 18 meses sobre 52 sujetos con Esclerosis Múltiple remitente-recidivante muestra mejoras en las lesiones (vistas a través de resonancia magnética) y un efecto significativo en la frecuencia y severidad de los brotes, debido a la administración de CLADRIBINE (2 Cd-adenosina, un inmunosupresor).

29/4/99. El estriol (hormona) mejora las lesiones debidas a enfermedades desmielinizantes, según un estudio preliminar en animales de laboratorio. Posible aplicación en Esclerosis Múltiple.

7/99. ANTEGREN (natalizumab), un anticuerpo monoclonal humano, en fase de estudio para el tratamiento de brotes agudos de Esclerosis Múltiple. Ya aprobado en Irlanda, los datos preliminares sugieren que puede ser efectivo en el tratamiento prolongado, para la reducción de síntomas.

7/99. La administración de inmunoglobulinas intravenosas (IVIG) se propone como uno de los tratamientos recientes más eficaces contra las enfermedades desmielinizantes, que podría encontrar aplicación en Esclerosis Múltiple.

8/99. Las imágenes por resonancia magnética nuclear demuestran ser la técnica más eficaz de diagnóstico de la Esclerosis Múltiple, en combinación con la EDSS.

9/99. Nuevo tratamiento efectivo por medio de intercambio de plasma, demostrado en un grupo de 40 pacientes de Esclerosis Múltiple secundaria progresiva.

15/10/99. Paclitanel (laboratorios Angiotech) muestra efectos beneficiosos en pacientes de Esclerosis Múltiple secundaria progresiva, en su grado de EDSS y su calidad de vida.

1/11/99. Se experimenta el trasplante de células del cerebro que pueden moverse a través del mismo, lo que supone una esperanza de recuperación para enfermos de Esclerosis Múltiple con secuelas permanentes.

31/12/99. Las moléculas conocidas como quimoquinas (del inglés chimokines) juegan un papel importante en el desarrollo de encefalitis en pacientes de Esclerosis Múltiple.

1/00. El GGF2 (factor de crecimiento glial 2) disminuye la desmielinización de tipo autoinmune, y promueve los procesos de remielinización (estudio preliminar con animales de laboratorio).

1/00. Se propone un análisis más racional del realizado hasta la fecha sobre los posibles usos terapéuticos del cannabis en el tratamiento de náuseas, glaucoma y Esclerosis Múltiple.

1/00. La proteína MOBP, que se encuentra en los oligodendrocitos (células que producen mielina) causa encefalomielitis alérgica y está relacionada con la Esclerosis Múltiple.

3/1/00. Se prueba que el gen IL2-RB (citoquina) está relacionado con la susceptibilidad genética a la Esclerosis Múltiple en un subgrupo de pacientes.

1/2/00. Avonex muestra un efecto beneficioso en cuanto al retraso en el desarrollo de Esclerosis Múltiple clínicamente definida.

2/00. NOVANTRONE (mitoxantrone concentrado para inyecciones) se recomienda unánimemente por la FDA para su aprobación con la finalidad de retrasar el empeoramiento de la discapacidad y reducir la frecuencia de los brotes en pacientes de Esclerosis Múltiple remitente-recidivante y secundaria progresiva. Consigue una reducción del 65% en la frecuencia de los brotes, y del 64% en la escala de discapacidad.