

Sensibilidad espectral del sistema visual

Una de las características más importantes de cualquier detector es su respuesta espectral. Por lo tanto, el sistema visual, como receptor de energía radiante, tiene una *sensibilidad espectral*, cuya determinación permite conocer su respuesta a estímulos de diferente longitud de onda.

El sistema visual es un receptor selectivo a la longitud de onda. Por ejemplo, para un mismo flujo radiante de dos estímulos de longitud de onda 620 nm (rojo) y 450 nm (azul) la respuesta del sistema visual es muy distinta y se percibe con distinto color y distinta claridad o luminosidad.

La caracterización espectral del sistema visual como receptor de energía radiante se realiza mediante la determinación de la *curva de eficiencia luminosa relativa espectral* o *curva de visibilidad espectral relativa*, que se representa por V_λ . Esta sensibilidad se refiere únicamente al atributo de la *luminosidad* o la *claridad*. La luminosidad se utiliza para fuentes de luz, y se define como el atributo de la percepción visual según el cual un campo parece mostrar más o menos cantidad de luz. La claridad se emplea tanto para objetos opacos como para transparentes, y se define como el atributo de la percepción visual que corresponde a la luminosidad de un campo comparada con la luminosidad de un campo similarmente iluminado que aparece como blanco o perfectamente transparente. La luminosidad y la claridad se refieren a la cantidad de luz que muestra un campo. Siguiendo con el ejemplo anterior, si el flujo radiante es intenso, el estímulo de 620 nm (rojo) será más luminoso que el de 450 nm (azul), es decir, el sistema visual será más sensible a la radiación roja que a la azul.

Por lo tanto, a partir de la respuesta espectral del sistema visual, es decir, a partir de la función V_λ , se puede saber qué estímulo cromático proporciona una mayor sensación de luminosidad o claridad, o qué energía debe tener el estímulo para obtener una determinada sensación de luminosidad o claridad. Esta función hace posible la conexión entre la radiometría y la fotometría, tal como se ha estudiado en el capítulo anterior, y es una de sus aplicaciones más importantes.

CURVA DE VISIBILIDAD FOTOPICA

La respuesta espectral del sistema visual depende del nivel luminoso de los estímulos. Empezaremos estudiando el caso de altos niveles luminosos, que corresponden a la visión fotópica.

La curva de visibilidad espectral relativa o de eficacia luminosa relativa espectral V_λ proporciona el cociente entre el flujo radiante ($P_{e,\lambda}$) de un estímulo monocromático de longitud de onda λ_m y un flujo $P_{e,\lambda}$ de longitud de onda λ , para que los dos estímulos produzcan la misma sensación de luminosidad o claridad bajo unas condiciones de observación determinadas. El valor de λ_m se elige adecuadamente para que el valor máximo del cociente sea la unidad.

Un estímulo no monocromático puede considerarse como la suma de sus distintas componentes monocromáticas

$$P_e = \int_{\lambda} P_{e,\lambda} d\lambda \quad (1)$$

y por consiguiente a partir de V_λ se podrá evaluar también la luminosidad de este estímulo.

La determinación experimental de la curva de visibilidad espectral relativa V_λ puede hacerse por varios métodos que llevan asociados distintos criterios de igualación de la luminosidad o claridad del estímulo, y los resultados obtenidos dependen del método utilizado.

Método de comparación heterocromática directa

Este método consiste en presentar un campo circular bipartido, en el que una de las mitades está ocupada por un estímulo monocromático o cuasimonocromático de longitud de onda λ_1 y la otra por un estímulo monocromático o cuasimonocromático de longitud de onda λ_2 (fig. 3-1). Variando la radiancia de uno de los dos semicampos (por ejemplo, el de λ_2), se puede llegar a la igualación visual de la luminosidad o claridad de los dos semicampos, aunque los colores percibidos sean distintos. Cuando se da la igualación visual se puede escribir:

$$L_{e,\lambda_1} \cdot V_{\lambda_1} = L_{e,\lambda_2} \cdot V_{\lambda_2} \quad (2)$$

donde L_{e,λ_1} y L_{e,λ_2} son las radiancias de los estímulos y V_{λ_1} y V_{λ_2} representan las sensibilidades espectrales de λ_1 y λ_2 .

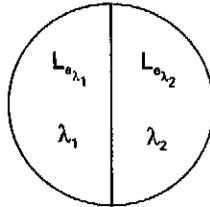


Figura 3-1. Esquema de un campo circular bipartido que puede ser utilizado en el método de comparación heterocromática directa.

Manteniendo igual el semicampo de referencia correspondiente, por ejemplo a λ_1 , y situando en el otro semicampo estímulos de longitud de onda λ_2 , al llegar a la igualación visual de la luminosidad se puede escribir:

$$L_{e,\lambda_1} \cdot V_{\lambda_1} = L_{e,\lambda_2} \cdot V_{\lambda_2} \quad (3)$$

De acuerdo con (2) y (3) se pueden obtener los factores V_{λ_2} en función de V_{λ_1} , midiendo las radiancias $L_{e,\lambda}$ de los diferentes estímulos. Eligiendo $V_{\lambda_m} = 1$ para el valor de λ_m correspondiente a la mayor sensibilidad espectral, se puede obtener la curva de visibilidad espectral relativa o de eficiencia luminosa espectral relativa (fig. 3-2).

Este método, aunque es el más simple, presenta un inconveniente importante que puede introducir errores considerables en las mediciones: la dificultad de igualar la luminosidad de dos estímulos de distinto color. Este es el problema típico de la fotometría heterocromática, que puede resolverse en parte comparando semicampos que difieran poco de color.

Método paso a paso

Este método es una simplificación del de comparación directa y además minimiza el error debido a la diferencia de color de los dos semicampos. Consiste en elegir N longitudes de onda en el espectro visible y establecer para cada una de ellas la igualación visual en los dos semicampos del campo bipartido con estímulos de longitud de onda $\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}$ y $\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}$, donde $\Delta\lambda$ sea lo suficientemente pequeño como para que apenas exista diferencia de color entre los dos semicampos. Al llegar a la igualación visual se puede escribir:

$$L_{e,\lambda+\frac{\Delta\lambda}{2}} \cdot V_{\lambda+\frac{\Delta\lambda}{2}} = L_{e,\lambda-\frac{\Delta\lambda}{2}} \cdot V_{\lambda-\frac{\Delta\lambda}{2}}$$

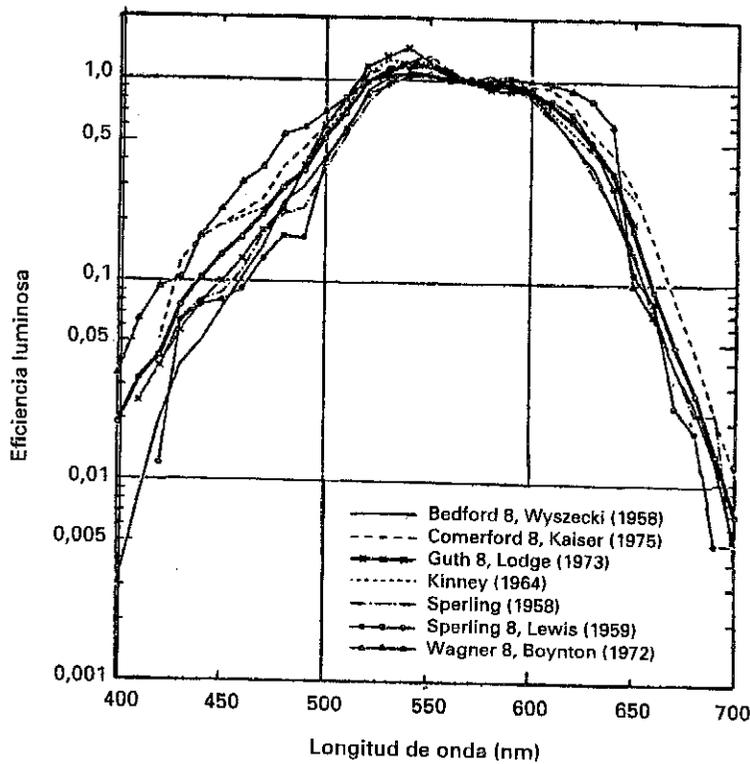


Figura 3-2. Curva de visibilidad espectral relativa obtenida por varios autores mediante el método de comparación heterocromática directa. La línea más oscura corresponde a una media de todas las determinaciones [G. Wyszecky, W. S. Stiles (1982)].

y por lo tanto la relación de radiancias l es igual a

$$l = \frac{L_{e_{\lambda-\frac{\Delta\lambda}{2}}}}{L_{e_{\lambda+\frac{\Delta\lambda}{2}}}} = \frac{V_{\lambda+\frac{\Delta\lambda}{2}}}{V_{\lambda-\frac{\Delta\lambda}{2}}} \quad (5)$$

y teniendo en cuenta que $\Delta\lambda$ es pequeño

$$l = \frac{V_{\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{2} \frac{dV_{\lambda}}{d\lambda}}{V_{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2} \frac{dV_{\lambda}}{d\lambda}} = 1 + \frac{\Delta\lambda}{V_{\lambda}} \frac{dV_{\lambda}}{d\lambda} = 1 + \Delta\lambda \frac{d(\ln V_{\lambda})}{d\lambda} \quad (6)$$

y por consiguiente

$$\frac{d(\ln V_{\lambda})}{d\lambda} = \frac{l - 1}{\Delta\lambda} \quad (7)$$

Partiendo de los valores de l medidos se puede obtener la función derivada de $\ln V_\lambda$, y por integración posterior la función V_λ .

Método del mínimo parpadeo

Este método consiste en presentar alternativamente en la misma área retiniana luz blanca de radiancia fija y una luz monocromática o cuasimonocromática de radiancia variable, a una frecuencia de alternancia inferior a la frecuencia crítica de fusión, es decir, en visión central a unos 10-20 Hz, para que se pueda observar la alternancia o parpadeo. Se varía la radiancia de la luz cuasimonocromática hasta que el parpadeo se minimiza. En esta situación se llega a la igualación de luminosidades, y por tanto se verifica:

$$L = V_{e\lambda} \cdot V_\lambda \quad (8)$$

donde L es la luminosidad de la luz blanca de referencia, $L_{e\lambda}$ la radiancia de la luz monocromática o cuasimonocromática y V_λ el factor de visibilidad relativa.

Así pues

$$V_\lambda = \frac{L}{L_{e\lambda}} \quad (9)$$

Representando $1/L_{e\lambda}$ en función de la longitud de onda y normalizando a la unidad para el valor máximo, se obtiene la curva de visibilidad espectral relativa V_λ .

Con este método de medida parece que los resultados son más fiables que con los métodos anteriores.

Método del mínimo borde distinguible

En este método se presentan al observador las dos mitades de un campo bipartido yuxtapuestas de forma muy precisa. En uno de los semicampos existe un estímulo blanco de radiancia fija y en el otro semicampo un estímulo monocromático o cuasimonocromático cuya radiancia puede variarse. El criterio establecido para la igualación visual de la luminosidad o claridad de los dos semicampos consiste en obtener el mínimo borde distinguible entre ambos. Los resultados mejoran utilizando lentes que compensen la aberración cromática del ojo y se puede conseguir una precisión comparable a la obtenida con el método del parpadeo.

Método del umbral absoluto

El umbral absoluto es la mínima cantidad de energía que debe tener un estímulo para que pueda ser detectado por el sistema visual. El capítulo 5 está dedicado al estudio de los umbrales de luminancia. Según esta definición, el

umbral está relacionado con la sensibilidad de forma inversamente proporcional, y por lo tanto la medición del umbral puede aplicarse a la determinación de la sensibilidad espectral del sistema visual. El método consiste en obtener el umbral absoluto para cada longitud de onda en unas condiciones determinadas de observación. La representación de la inversa del umbral en función de la longitud de onda está relacionada con la función de visibilidad espectral relativa.

Método de la agudeza visual

La curva de visibilidad también puede determinarse empleando un optotipo para la medición de la agudeza visual, como un anillo de Landolt, una E de Snellen o una red cuadrada. El optotipo debe ser monocromático y su radiancia se debe ajustar hasta alcanzar un valor mínimo que permita reconocerlo adecuadamente. La inversa de la radiancia en función de la longitud de onda está relacionada con la curva de visibilidad.

Otros métodos

Además de los indicados se han propuesto otros métodos o criterios de igualación para obtener la función de visibilidad relativa. Entre ellos se pueden citar los basados en el tiempo de reacción o los basados en técnicas electrofisiológicas.

La función de visibilidad relativa depende del método empleado para su determinación, como puede verse en la figura 3-3, en la que se comparan resultados obtenidos por los métodos del mínimo parpadeo, mínimo borde distinguible, paso a paso y comparación heterocromática directa.

EL OBSERVADOR PATRON

La curva de visibilidad relativa obtenida en visión fotópica por cualquiera de los métodos descritos en el apartado anterior es distinta para cada observador. Por consiguiente resulta necesario definir una curva que describa el comportamiento de un *observador patrón de referencia*.

Esta curva fue adoptada por la CIE en 1924 a partir de los resultados obtenidos por varios investigadores que utilizaron diferentes métodos.

- a) Método del mínimo parpadeo: resultados obtenidos por Coblentz y Emerson (1918) en 125 observadores.
- b) Método paso a paso: resultados obtenidos por Hyde, Forsythe y Cady (1918) en 29 observadores en la región espectral de 500 a 600 nm y por Gybson y Tyndall (1923) en 52 observadores.
- c) Método de comparación heterocromática directa: resultados obtenidos por Hyde, Forsythe y Cady (1918) en la región roja del espectro en 9 observadores y por Hartman (1918) en 20 observadores.

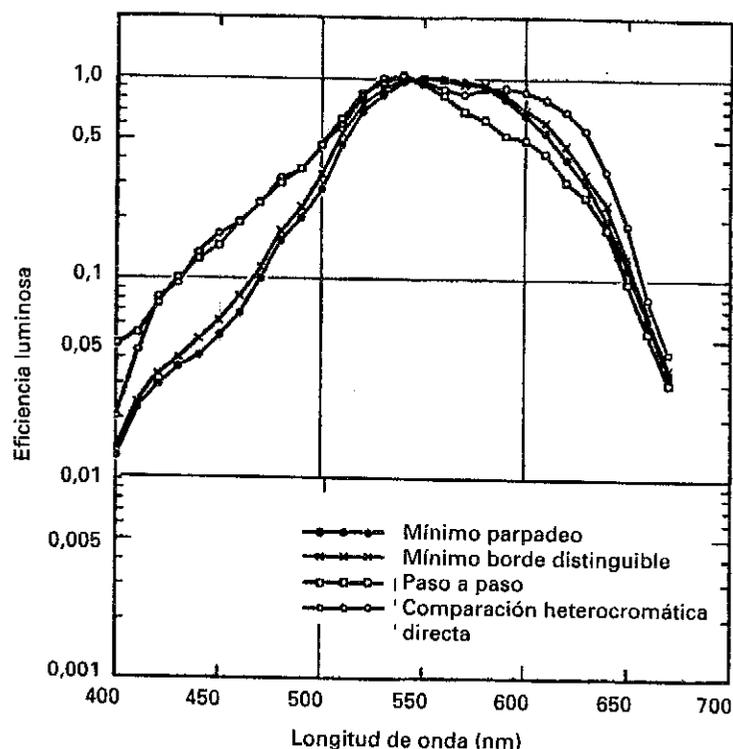


Figura 3-3. Curva de visibilidad espectral relativa obtenida por Wagner y Boynton (1972) en cuatro observadores con diferentes métodos o criterios de igualación: parpadeo, mínimo borde distinguible, paso a paso y comparación heterocromática directa [G.Wagner, R. M. Boynton (1972)].

Los valores adoptados en 1924 fueron propuestos por Gibson y Tyndall (1923) y no corresponden a un promedio de los resultados experimentales, sino a una unión ponderada de todos ellos. En todas estas experiencias se utilizó un campo que subtendría un ángulo de 2° rodeado de una región más amplia de la misma luminosidad.

La curva de visibilidad espectral relativa del observador patrón en visión fotópica V_λ (CIE-1924) aparece representada en la figura 3-4 y sus valores numéricos aparecen en la tabla 3-1. Este observador patrón ha sido tomado como el observador de referencia fotométrico y toda la fotometría se ha definido respecto a él, como se indicó en el capítulo anterior.

Como puede observarse en la figura 3-4, la *máxima sensibilidad* corresponde a una longitud de onda de 555 nm y la función V_λ presenta una pendiente mayor para longitudes de onda menores de 555 nm.

Existen considerables diferencias entre los *valores obtenidos para cada observador*. En la figura 3-5 pueden observarse las variaciones obtenidas por Gibson y Tyndall (1923) en 52 observadores utilizando el método paso a paso. Por ejemplo, V_λ varía entre 0,014 y 0,064 para una longitud de onda de 430 nm

TABLA 3-1

Valores de la función de visibilidad espectral relativa V_λ para el observador patrón en visión fotópica

<i>Longitud de onda λ (nm)</i>	V_λ
380	0,0000
390	0,0001
400	0,0004
410	0,0012
420	0,0040
430	0,0116
440	0,0230
450	0,0380
460	0,0600
470	0,0910
480	0,1390
490	0,2080
500	0,3230
510	0,5030
520	0,7100
530	0,8620
540	0,9540
550	0,9950
560	0,9950
570	0,9520
580	0,8700
590	0,7570
600	0,6310
610	0,5030
620	0,3810
630	0,2650
640	0,1750
650	0,1070
660	0,0610
670	0,0320
680	0,0170
690	0,0082
700	0,0041
710	0,0021
720	0,0010
730	0,0005
740	0,0003
750	0,0001
760	0,0001
770	0,0000
780	0,0000

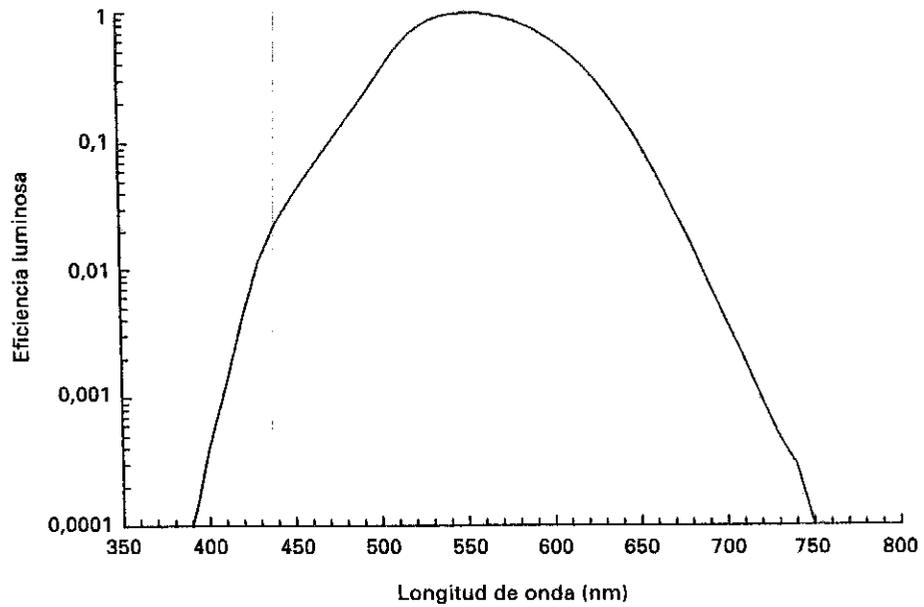


Figura 3-4. Curva de visibilidad espectral relativa V_λ para el observador patrón en visión fotópica.

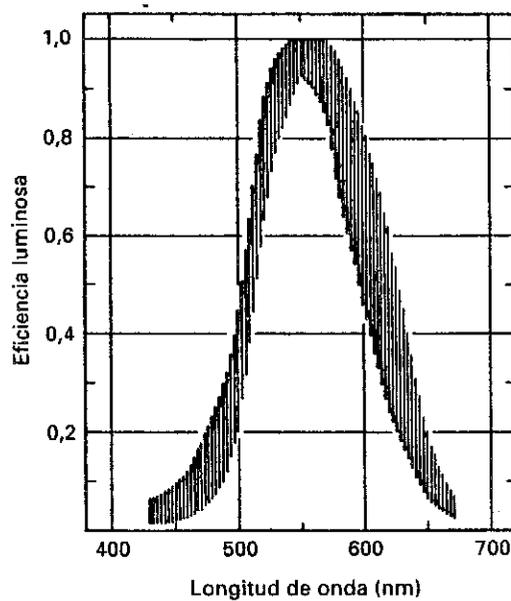


Figura 3-5. Intervalo de variación de la curva de visibilidad espectral relativa para visión fotópica obtenida por Gibson y Tyndall (1923) por el método paso a paso en 52 observadores [K. S. Gibson, E. P. T. Tyndall (1923)].

y entre 0,0028 y 0,0069 para 700 nm. Con el método de parpadeo las variaciones son menores, pero de acuerdo con los resultados obtenidos por Coblentz y Emerson (1918) el máximo de la curva varía entre 549 nm y 570 nm con un valor medio de 557,6 nm (fig. 3-6).

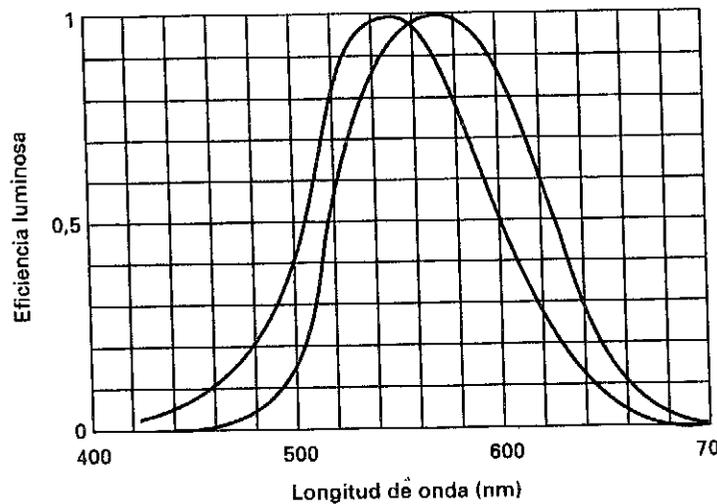


Figura 3-6. Límites de la curva de visibilidad espectral relativa según los resultados obtenidos por Coblentz y Emerson en 125 observadores con el método de parpadeo [W. W. Coblentz, W. B. Emerson (1918)].

A partir de la respuesta espectral del sistema visual se pueden determinar los límites del espectro visible tomando como criterio un valor mínimo para V_λ . Así, por ejemplo, considerando que las radiaciones no son visibles por debajo de $V_\lambda = 10^{-3}$ los límites del espectro visible serían 410 nm y 720 nm. Controlando muy bien las condiciones de medición se ha determinado el valor de V_λ a 900 nm ($V_\lambda = 1,6 \cdot 10^{-8}$) [Goodeve (1936)] y se ha obtenido una variación lineal entre 700 nm y 900 nm. En la región del ultravioleta también se ha podido medir la V_λ , y se han obtenido valores muy distintos en función del observador. Por ejemplo, una V_λ comprendida entre $3 \cdot 10^{-7}$ y $1,5 \cdot 10^{-5}$ para $\lambda = 365$ nm, o comprendida entre $4 \cdot 10^{-9}$ y $5 \cdot 10^{-6}$ para $\lambda = 313$ nm (Groot 1934).

Determinaciones experimentales de V_λ obtenidas después del establecimiento por parte de la CIE del observador patrón de fotometría en 1924 revelaron que la función de visibilidad espectral relativa era demasiado baja en la región azul del espectro. Judd (1951) propuso una modificación a la función (fig. 3-7) para longitudes de onda inferiores a 460 nm (tabla 3-2). A pesar de que se ha demostrado que con las modificaciones propuestas por Judd la curva V_λ describe más adecuadamente la respuesta espectral del observador patrón en visión fotópica, la CIE no ha modificado la curva del observador de referencia fotométrico por una razón eminentemente práctica, puesto que esto significaría redefinir toda la fotometría.

TABLA 3-2

Valores de la función de visibilidad espectral relativa V_λ para el observador patrón en visión fotópica con las modificaciones propuestas por Judd (1951)

<i>Longitud de onda λ (nm)</i>	V_λ
380	0,0004
390	0,0015
400	0,0045
410	0,0093
420	0,0175
430	0,0273
440	0,0379
450	0,0468
460	0,0600
470	0,0910
480	0,1390
490	0,2080
500	0,3230
510	0,5030
520	0,7100
530	0,8620
540	0,9540
550	0,9950
560	0,9950
570	0,9520
580	0,8700
590	0,7570
600	0,6310
610	0,5030
620	0,3810
630	0,2650
640	0,1750
650	0,1070
660	0,0610
670	0,0320
680	0,0170
690	0,0082
700	0,0041
710	0,0021
720	0,0010
730	0,0005
740	0,0003
750	0,0001
760	0,0001
770	0,0000
780	0,0000

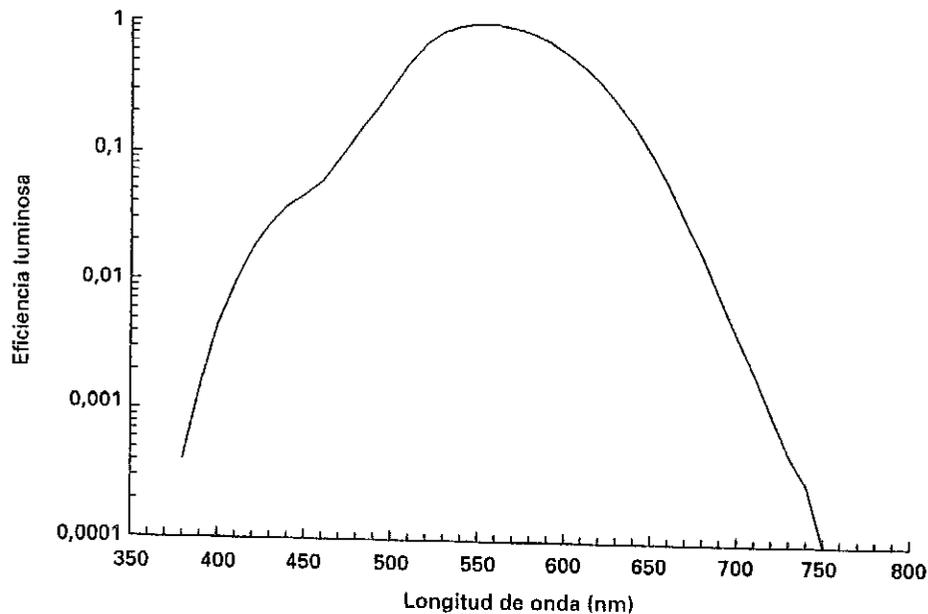


Figura 3-7. Curva de visibilidad espectral relativa V_λ correspondiente al observador patrón CIE-1924 para visión fotópica y con las modificaciones propuestas por Judd (1951).

CURVA DE VISIBILIDAD FOTOPICA EN VISION PERIFERICA

La determinación experimental de la curva de sensibilidad fotópica en la periferia de la retina presenta mayores dificultades que en la visión foveal, debido a los cambios en las propiedades de la visión periférica producidos por una exposición prolongada del estímulo (efecto Troxler) o debido a la necesidad de eliminar la participación de los bastones en la respuesta visual. La presentación de los estímulos en forma de pulsos de breve duración puede contribuir a reducir el efecto Troxler y la presentación de estímulos de adaptación no selectivos para los diferentes tipos de conos puede eliminar la respuesta de los bastones.

Estas dificultades, unidas a las diferentes condiciones de observación, como pueden ser el tamaño y la localización retiniana del estímulo, y al criterio de igualación visual utilizado por el observador, pueden justificar las diferencias en los resultados de la curva de visibilidad fotópica en visión periférica obtenidos por diferentes autores.

En la figura 3-8 se pueden ver los resultados obtenidos por Wooten, Fuld y Spillman (1975). El método utilizado consistió en medir la curva de adaptación a la oscuridad para cada longitud de onda (véase el capítulo 5) y en obtener a partir de ellas la curva de visibilidad espectral relativa para diferentes tiempos de adaptación a la oscuridad. Como puede observarse para tiempos pequeños aparece un máximo a 440 nm, que desaparece al aumentar el tiempo de adap-

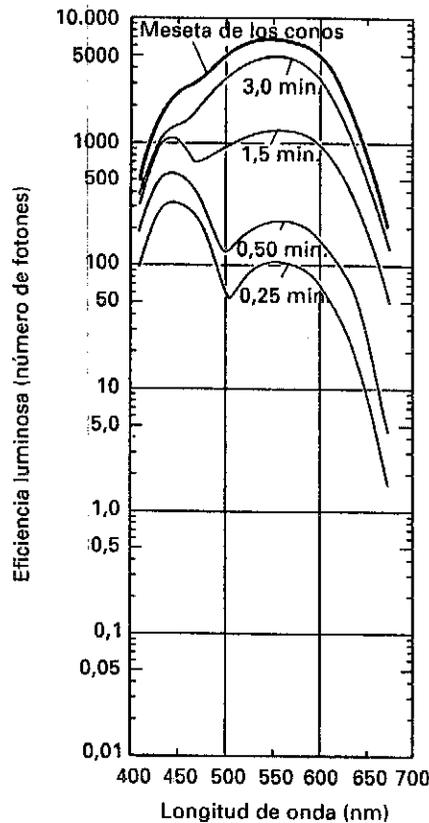


Figura 3-8. Curvas de visibilidad espectral relativa para un observador a una excentricidad retiniana de 30° , obtenidas mediante la determinación de la curva de adaptación a la oscuridad para cada longitud de onda. En cada gráfica se indica el tiempo transcurrido desde la extinción del estímulo de fondo (0,25 min., 0,50 min., 1,5 min., 3 min., meseta de conos) [B. R. Wooten, K. Fuld, L. Spillman (1975)].

tación. En la región correspondiente a la meseta de los conos, la curva presenta un máximo a 550 nm con una forma parecida para las diferentes localizaciones retinianas. La aparición del máximo a 440 nm, que ya había sido puesto de manifiesto por otros autores, puede deberse a que el estímulo de fondo pesa selectivamente a los mecanismos de los conos y concretamente en menor medida al azul que a los otros.

Comparando las curvas de visibilidad espectral en visión periférica y en visión foveal, las diferencias que se observan en la región de las longitudes de onda pequeñas son atribuibles a la existencia del pigmento macular. No obstante, corrigiendo la curva en visión foveal a través del espectro de transmisión del pigmento macular se observan todavía pequeñas diferencias respecto a la visión periférica, originadas por pequeños cambios en la sensibilidad espectral de los mecanismos de los conos al pasar de visión foveal a parafoveal.

CURVA DE VISIBILIDAD ESCOTOPICA. EFECTO PURKINJE

Purkinje, un célebre fisiólogo checo, descubrió en 1825 que dos superficies, una roja y otra azul, que parecían tener la misma claridad durante el día cambiaban en la oscuridad, y la azul parecía más luminosa. Como en condiciones de oscuridad la sensación de color desaparecía, la superficie azul se percibía como un gris claro y la roja como negra. Esta observación demuestra la variación de la eficiencia luminosa relativa del sistema visual al pasar de condiciones fotópicas a condiciones escotópicas, variación que se conoce con el nombre de *efecto Purkinje* en honor de su descubridor.

La determinación experimental de la curva de visibilidad escotópica es más simple que en visión fotópica. La retina debe estar totalmente adaptada a la oscuridad (véase el capítulo 5) y el test presentarse a unos 10° de excentricidad, en la zona donde la población de bastones es más densa (véase el capítulo 1). En estas condiciones, el método de comparación heterocromática directa puede aplicarse mucho más fácilmente que en visión fotópica puesto que no hay diferencia de color entre los dos estímulos. El método del umbral absoluto también puede utilizarse obteniéndose buenos resultados. Sin embargo, el método del mínimo parpadeo es de difícil aplicación puesto que en visión periférica se llega en seguida a la fusión.

En 1951 la CIE adoptó la *curva de visibilidad escotópica* V'_λ para el observador patrón (fig 3-9), cuyos valores aparecen en la tabla 3-3, a partir de mediciones experimentales de Wald (1945) y Crawford (1949). Los datos de

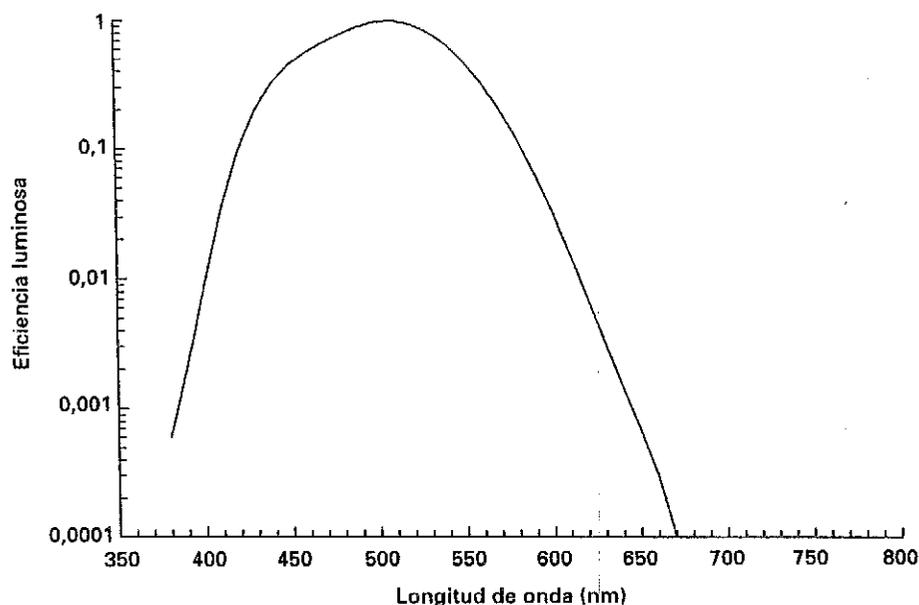


Figura 3-9. Curva de visibilidad espectral relativa V'_λ para el observador patrón en visión escotópica.

TABLA 3-3
 Valores de la función de visibilidad espectral relativa V_λ para el observador patrón
 en visión escotópica

<i>Longitud de onda λ (nm)</i>	V_λ
380	0,0006
390	0,0022
400	0,0093
410	0,0348
420	0,0966
430	0,1998
440	0,3281
450	0,4550
460	0,5670
470	0,6770
480	0,7930
490	0,9040
500	0,9820
510	0,9970
520	0,9350
530	0,8110
540	0,6500
550	0,4810
560	0,3288
570	0,2076
580	0,1212
590	0,0655
600	0,0332
610	0,0159
620	0,0074
630	0,0033
640	0,0015
650	0,0007
660	0,0003
670	0,0001
680	0,0001
690	0,0000
700	0,0000
710	0,0000
720	0,0000
730	0,0000
740	0,0000
750	0,0000
760	0,0000
770	0,0000
780	0,0000

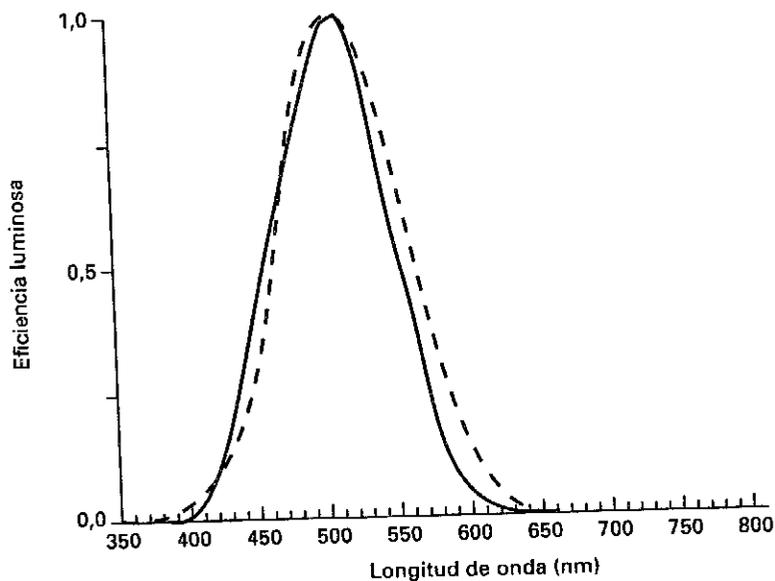


Figura 3-10. Curva de visibilidad escotópica (—) y curva de visibilidad fotópica (---) con el máximo desplazado 48 nm hacia las longitudes de onda cortas.

Wald corresponden a 22 observadores con una media de edad de 20 años y al método del umbral absoluto. Crawford hizo una serie de mediciones a 50 observadores de edades inferiores a los 30 años con el método de comparación directa entre un estímulo blanco de $3 \cdot 10^{-5}$ cd/m² y uno monocromático de longitud de onda λ variable. El campo bipartido subtendía un ángulo de 20°, el punto de fijación estaba en la parte superior de la línea divisoria de los dos semicampos y los observadores tenían que adaptarse durante una hora a la oscuridad antes de empezar a medir.

Comparando las figuras 3-4 y 3-9 puede observarse que el máximo de la curva de visibilidad escotópica se ha desplazado hacia longitudes de onda cortas, y se sitúa en 507 nm, en lugar de los 555 nm que corresponden al máximo de la curva de visibilidad fotópica. Sin embargo, la diferencia entre estas dos curvas no es únicamente una traslación de su valor máximo, tal como se pone de manifiesto en la figura 3-10, donde el máximo de la curva de visibilidad fotópica se ha desplazado 48 nm hacia las longitudes de onda cortas para hacerlo coincidir con el de la curva de visibilidad escotópica.

La curva V_{λ}' corregida respecto a la absorción del cristalino reproduce muy bien la curva de absorción espectral de la rodopsina, único fotopigmento presente en los bastones, lo cual justifica esta coincidencia (fig. 3-11).

La curva de visibilidad escotópica no varía tanto en función del observador como la fotópica. Sin embargo, depende en gran medida de la *edad*, de forma que el observador patrón en condiciones escotópicas corresponde a observadores de edades iguales o inferiores a 30 años, y para λ inferiores a los 500 nm, V_{λ}' decrece con la edad (A) expresada en años de acuerdo con la fórmula de Crawford

$$\Delta[\log_{10} V'(\lambda)] = 10^{-4} \cdot (500 - \lambda) \cdot (A - 30) \quad (10)$$

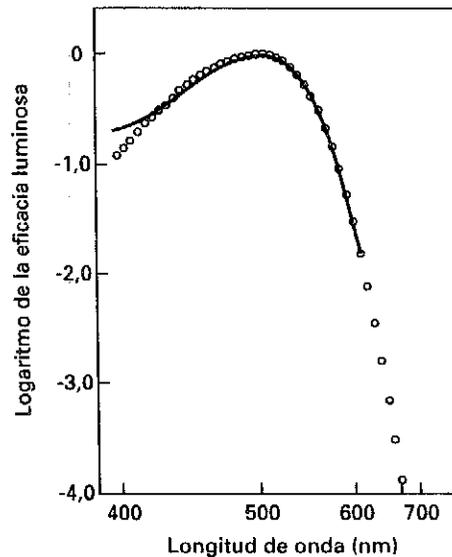


Figura 3-11. Curva de visibilidad escotópica corregida para la absorción del cristalino (ooooo), comparada con el espectro de absorción de la rodopsina (—). [D. Jameson (1972)].

Esta disminución se debe al progresivo amarilleamiento del cristalino. En los afáquicos, la sensibilidad espectral en condiciones escotópicas aumenta considerablemente en la región azul del visible y en el ultravioleta, y se han obtenido valores de $V_{\lambda}' = 0,1$ a 350 nm mediante electroretinografía.

DUALIDAD RETINIANA

La retina humana es como un receptor doble, con sensibilidades espectrales distintas en condiciones fotópicas y escotópicas. Esta dualidad puede manifestarse de muy diversas formas. Por ejemplo, en el valor del diámetro pupilar en función de la luminancia (fig. 3-12) aparecen dos zonas correspondientes a los dominios fotópico y escotópico. El efecto Stiles-Crawford, que se estudiará en el siguiente capítulo, es también una manifestación de la dualidad retiniana.

Se considera que el *límite inferior de luminancia* para el *nivel fotópico* es de 10 cd/m^2 , aunque las experiencias que sirvieron de base para la definición de observador patrón fotópico fueron realizadas con valores de luminancia inferiores. Además se han observado pequeñas desviaciones con respecto a la curva de la CIE para las luminancias superiores a este valor, con un desplazamiento del máximo hacia las longitudes de ondas largas. Aunque se sigue considerando que 10 cd/m^2 es el valor de la luminancia donde empieza la visión fotópica, el nivel real es muy difícil de fijar puesto que puede depender, entre otros factores, del tamaño, de la composición espectral y de la localización retiniana del estímulo.

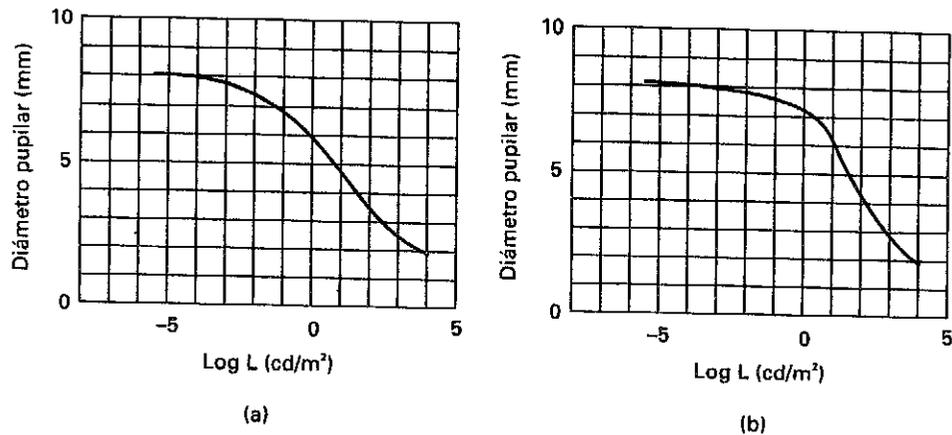


Figura 3-12. Variación del diámetro pupilar en función de la luminancia en visión binocular (a) y en visión monocular (b). [Modificado de Y. Le Grand (1972)].

El límite de luminancia para el nivel escotópico está mucho mejor establecido, puesto que para valores inferior a 10^{-3} cd/m^2 la curva de visibilidad prácticamente no varía. En el caso de visión puramente foveal, es decir, con estímulos del orden de 1 grado y controlando la fijación de forma muy precisa, no se da el efecto Purkinje y se obtiene la curva V_λ aún en condiciones escotópicas debido a la ausencia de bastones en esta región.

NIVEL MESOPICO

Entre el nivel fotópico y el escotópico, es decir, entre 10^{-3} cd/m^2 y aproximadamente 10 cd/m^2 hay una región intermedia, que corresponde al nivel mesópico, en la que actúan simultáneamente los conos y los bastones.

En la región mesópica, el máximo de la curva de visibilidad va variando en función de la luminancia, desde los 507 nm del nivel escotópico a los 555 nm del nivel fotópico (fig. 3-13).

Se han efectuado numerosas determinaciones experimentales de las curvas de visibilidad mesópica y los resultados muestran que estas curvas no pueden obtenerse únicamente por combinación lineal de las funciones escotópica V'_λ y fotópica V_λ . Las interacciones entre conos y bastones no pueden ser descritas con un modelo tan simple y su complejidad hace que su estudio detallado escape de los objetivos de este libro.

ADITIVIDAD DE LA LUMINANCIA. LEY DE ABNEY

Normalmente, en fotometría visual, se comparan dos estímulos compuestos por diferentes longitudes de onda, es decir, dos estímulos no monocromáticos. Además, en el caso de la fotometría heterocromática el problema básico radica en determinar cuándo dos estímulos de diferente cromaticidad tienen la misma luminosidad o claridad.

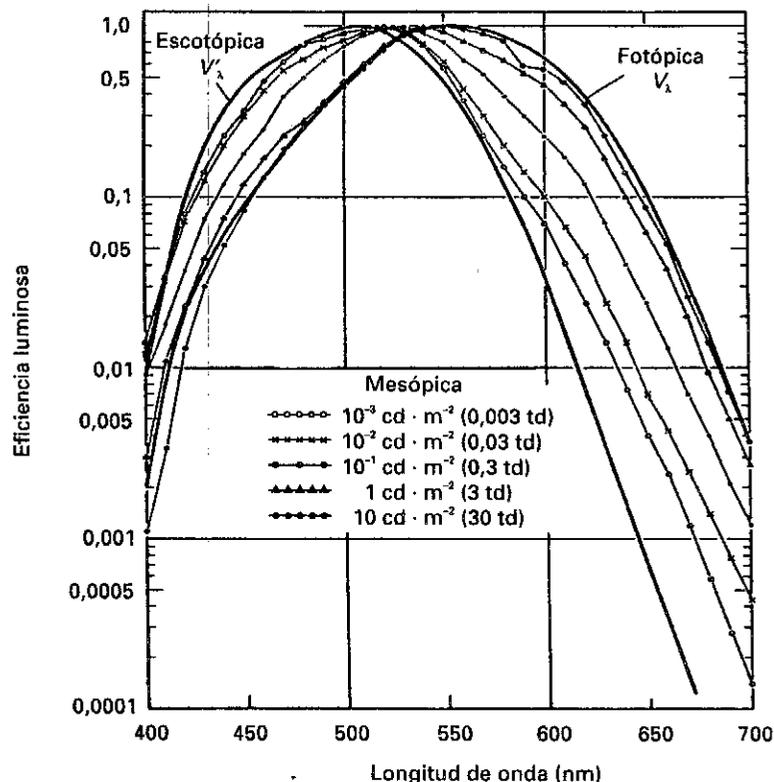


Figura 3-13. Curva de visibilidad mesópica para distintos niveles de luminancia. [Kokoschka (1972)].

Como ya hemos indicado en el capítulo anterior, la magnitud fotométrica que aprecia el ojo cuando observa fuentes extensas es la luminancia. Por tanto, la luminosidad o claridad con que se percibe un estímulo está relacionada con su luminancia. La definición fotométrica de la luminancia deja bien establecidas las propiedades de aditividad y proporcionalidad para esta magnitud. En efecto, de acuerdo con la ecuación básica de la fotometría:

$$L = K_m \int_{380}^{780} L_{e_\lambda} V_\lambda d\lambda \quad (11)$$

donde L es la luminancia del estímulo, L_{e_λ} es la radiancia espectral de dicho estímulo, V_λ la curva de visibilidad para el observador patrón CIE-1924, y K_m constante de valor $680 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Pero, ¿visualmente se verifica esta relación? Si es así, por ejemplo al comparar en un campo bipartido un estímulo blanco con el formado por todo sus componentes espectrales con un valor de la radiancia adecuado para que se cumpla la igualdad (11), los dos estímulos parecerán igual de luminosos. O

bien, si comparamos un estímulo amarillo y uno azul de igual luminancia según (11), ambos darán la misma sensación de claridad.

A finales del siglo pasado Abney indicó que visualmente se verificaba la ecuación (11), y en su honor la ley que indica que visualmente las luminancias de estímulos monocromáticos son aditivas se conoce con el nombre de *Ley de Abney*.

Sin embargo, se han puesto de manifiesto diferentes situaciones experimentales en las que la aditividad de la luminancia no se verifica estrictamente. Por ejemplo, si un estímulo cromático se compara con uno blanco, normalmente sucede que la luminancia del estímulo cromático es menor que la del estímulo blanco cuando se establece la igualación visual. Es decir, si hay dos estímulos, uno blanco y otro cromático que tienen la misma luminancia, este último parece más luminoso que el primero. Este efecto se conoce con el nombre de *efecto Helmholtz-Kohlrausch*, y en el capítulo 8 se analiza con mayor detalle. Denominando L_C a la luminancia del estímulo cromático y L_T a la del blanco, el cociente L_T/L_C es en general mayor que la unidad y aumenta al aumentar la saturación del estímulo cromático. Una excepción a esta regla viene dada por el amarillo, para el cual el cociente L_T/L_C tiene un valor cercano a la unidad incluso para saturación máxima.

También en mezclas para las que hay una cancelación de tono existe una cancelación parcial de luminosidad. Por ejemplo, si mezclamos a partes iguales de luminancia un color azul y otro amarillo y lo comparamos con un estímulo de uno de estos dos colores que tenga la misma luminancia que la mezcla, ésta se verá más oscura y mucho menos saturada que los colores originales.

A pesar de los ejemplos indicados, en la práctica los fallos en la ley de aditividad de la luminancia no son excesivamente importantes y se puede considerar que el sistema visual en cuanto receptor de energía verifica la ley de Abney.

Se han realizado muchos experimentos para verificar el cumplimiento de la ley de aditividad de la luminancia. Por ejemplo, Guth y colaboradores igualaban la luminosidad de un estímulo monocromático C de longitud de onda λ con un blanco de referencia W en un campo bipartido. Cuando los dos estímulos tienen la misma luminosidad se verifica

$$C_\lambda \stackrel{v}{\equiv} B \quad (12)$$

donde la v significa igualación visual. Entonces mezclaban la mitad de radiancia del estímulo blanco, es decir, $0,5 B$, con el estímulo monocromático en una mitad del campo bipartido y lo comparaban con el estímulo blanco de referencia que se encontraba en la otra mitad del campo. El observador variaba la radiancia del estímulo monocromático hasta obtener la igualación, es decir,

$$[nC_\lambda + 0,5B] \stackrel{v}{\equiv} B \quad (13)$$

donde n indica la proporción de estímulo cromático necesaria para igualar visualmente la luminosidad de los dos semicampos.

Si la ley de Abney se verificara en esta situación experimental teniendo en cuenta (12), el valor de n debería ser 0,5 para cualquier valor de λ . En la figura 3-14 se pueden ver los principales resultados obtenidos en este experimento.

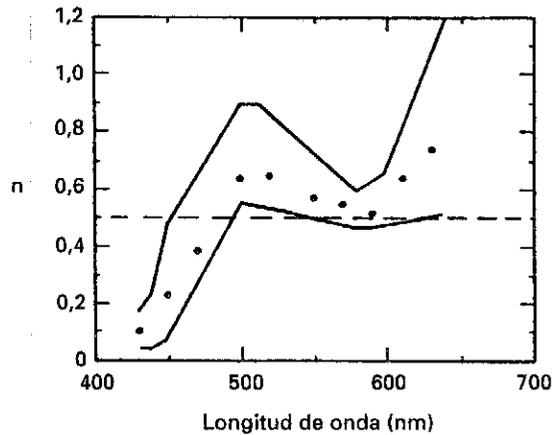


Figura 3-14. Proporción de estímulo monocromático (n) necesaria para igualar visualmente la luminosidad de dos semicampos de acuerdo con la ecuación (13), por el método de comparación heterocromática directa, en función de la longitud de onda (λ), [Guth (1970)].

Como puede observarse, para algunos valores de λ , n es menor de 0,5, mientras que para otros valores n es mayor que 0,5, sólo para $\lambda \approx 580$ nm y $\lambda \approx 490$ nm se encontraron valores cercanos a 0,5. Por tanto, hay dos tipos distintos de desviaciones respecto a la ley de aditividad, cuando $n < 0,5$ (*superaditividad*) o cuando $n > 0,5$ (*subaditividad*).

No obstante, existe un factor que influye en las desviaciones obtenidas en la ley de Abney: el *método de igualación* utilizado. En efecto, la experiencia que acabamos de describir y otras que se han realizado demuestran que con el método de comparación heterocromática directa la ley de Abney falla en determinadas situaciones experimentales.

Sin embargo, con otros métodos como el del mínimo parpadeo o el del mínimo borde distinguible, se obtienen resultados que muestran un acuerdo mucho mayor con la ley de Abney. De hecho, con estos dos métodos se obtie-

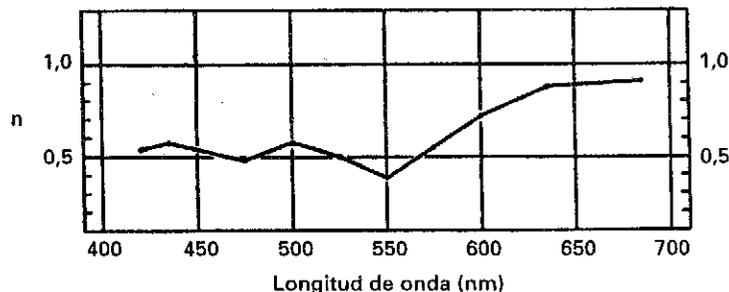


Figura 3-15. Proporción de estímulo monocromático (n) necesaria para verificar visualmente la ecuación (13), obtenida utilizando el método del umbral absoluto, en función de la longitud de onda (λ), [Guth, Donley, Marrocco (1969)].

nen funciones de visibilidad muy parecidas que se ajustan a la del observador patrón de la CIE teniendo en cuenta las modificaciones propuestas por Judd. En cambio, con el método de comparación heterocromática directa los resultados difieren mucho de los obtenidos con los métodos anteriores.

En la figura 3-15 pueden observarse los resultados obtenidos en una experiencia similar a la descrita anteriormente, realizada por Guth y colaboradores, en la que se emplea el método del umbral absoluto. Los resultados muestran una desviación estándar importante con respecto a la ley de Abney para λ grandes. Sin embargo, a diferencia del método de comparación heterocromática directa, se obtienen valores de $n \simeq 0,5$ para $\lambda < 550$ nm y no se obtienen valores de $n < 0,5$. Es decir, con este método no se dan fenómenos de superaditividad y únicamente se presenta subaditividad en la región de λ grandes.