



Universidad de Valladolid



FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

Mecanismos de adaptación visual:
ganancia al contraste

Presentado por María García Güémez

Tutelado por: Cristina Beatriz Martínez Matesanz y
Eduardo García Vicente

Tipo de TFG: Revisión Investigación

En Valladolid a, 21 de Junio de 2019

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Mecanismos de adaptación del sistema visual	4
1.1.1 Adaptación a la oscuridad	4
1.1.2 Adaptación a la luz	4
1.2 Ganancia al contraste	5
1.2.1 Contraste umbral	6
1.2.2 Tiempo de reacción visual.....	6
1.3 Iluminación LED y conducción nocturna	6
1.3.1 Temperatura de color correlacionada	6
1.3.2 Ratio S/P	7
1.4 Objetivo	8
2 METODOLOGÍA	9
2.1 Sujetos.....	9
2.2 Descripción del dispositivo experimental	9
2.3 Cálculo de los primarios para las distintas condiciones experimentales	10
2.4 Procedimiento de medidas.....	12
2.4.1 Adaptación.....	12
2.4.2 Procedimiento medida contraste umbral.....	12
2.4.3 Procedimiento medida tiempo de reacción visual.....	12
2.4.4 Obtención valor de ganancia al contraste.....	13
3 RESULTADOS	14
3.1 Efecto de la temperatura de color correlacionada, el ratio S/P y el tiempo de exposición en el contraste umbral.....	14
3.2 Efecto de la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P en el tiempo de reacción visual.....	15
3.3 Ganancia al contraste.	16
4 DISCUSIÓN	18
4.1 Contraste umbral.....	18
4.2 Tiempo de reacción visual.....	18
4.3 Ganancia al contraste	18
CONCLUSIONES.....	19
BIBLIOGRAFÍA	20

RESUMEN

A lo largo de estos últimos años, cada vez es más frecuente encontrarnos con iluminación LED, principalmente debido a su mayor eficacia. Esto nos lleva a preguntarnos sobre cómo influyen en nuestro rendimiento visual, ya que son pocos los estudios que lo valoran. Los principales parámetros que caracterizan la iluminación LED son la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P.

Empleando un fotoestimulador de dos canales y cuatro primarios se lleva a cabo un estudio piloto en el que participan cuatro sujetos. El rendimiento visual se valora midiendo funciones visuales como el contraste umbral y el tiempo de reacción, así como cuantificando la influencia de mecanismos de adaptación como la ganancia al contraste. Las medidas se han realizado para una luminancia de fondo mesópica de $0,1 \text{ cd/m}^2$, dos tiempos de exposición del estímulo (40 y 500 ms), dos temperaturas de color correlacionadas (3007 y 5020 K) y dos ratios S/P para cada temperatura.

En estos primeros resultados solamente se observa una mejoría en el contraste umbral, en el tiempo de reacción y la ganancia al contraste al emplear una iluminación con un alto ratio S/P. Un mayor contenido en longitudes de onda corta, que favorece la estimulación de bastones y conos S, podría explicar los resultados. Sin embargo, no se observan diferencias claras al comparar temperaturas de color correlacionadas.

1 Introducción

La adaptación es una característica de nuestro sistema nervioso, mediante la cual podemos adecuarnos a los cambios que ocurren en nuestro entorno visual. Podemos encontrarnos con variaciones en el nivel de iluminación de hasta 10 órdenes de magnitud. Este amplio rango, que abarca desde una noche estrellada hasta una escena a plena luz del día, es muy superior al rango de respuesta de nuestro sistema visual. Gracias a la adaptación visual podemos detectar, responder y adaptar la información según el nivel de iluminación. Es decir, mantener la respuesta del sistema visual ante cambios en la iluminación. Por lo tanto, estos mecanismos están implicados en las funciones visuales más básicas como pueden ser la agudeza visual, la apariencia del color o la sensibilidad al contraste. Esta adaptación es un proceso complejo que no ocurre de manera instantánea, ya que su duración depende de numerosos factores, tanto externos como internos.

1.1 Mecanismos de adaptación del sistema visual

Dentro de los mecanismos de adaptación visual, podemos diferenciar la adaptación a la oscuridad y la adaptación a la luz.

Para poder entender estos mecanismos, definimos primero los diferentes rangos de iluminación que nos encontramos en nuestro entorno, junto con el rango de luminancias correspondientes.

- Escotópico: la luminancia va desde 10^{-6} hasta $0,01 \text{ cd/m}^2$. Abarca condiciones de muy baja iluminación, como puede ser la noche. Aquí los bastones están completamente activos, ya que son muy sensibles a la luz, y los conos se encuentran en reposo. La visión es acromática.
- Mesópico: la luminancia va desde $0,01$ hasta 10 cd/m^2 . Corresponde a la iluminación tenue presente en carreteras urbanas o a la luz artificial en espacios interiores. Aquí podemos ver actividad tanto de los bastones como de los conos, estando los primeros cerca de su saturación, y empezando a activarse los segundos a medida que nos acercamos al límite superior de luminancia.
- Fotópico: la luminancia va desde 10 hasta 10^8 cd/m^2 . Corresponde con la iluminación diurna. Aquí los conos están completamente activos, ya que son menos sensibles a la luz, y los bastones se encuentran saturados. Gracias a los conos, en estos niveles contamos con visión cromática.

1.1.1 Adaptación a la oscuridad

El tiempo de adaptación a la oscuridad es aquel necesario para recuperar la sensibilidad retiniana absoluta después de que finalice la emisión de un estímulo luminoso. La adaptación a la oscuridad no ocurre de manera instantánea, es necesario un tiempo mínimo de 30 minutos para poder asegurarnos de que los fotorreceptores de todos los fotorreceptores están regenerados.

1.1.2 Adaptación a la luz

El nivel de iluminación de nuestro entorno varía, de manera que nuestros ojos tienen que adaptarse continuamente a estos cambios para evitar, por

ejemplo, el deslumbramiento en condiciones de alta iluminación o para mantener una alta sensibilidad en condiciones de baja iluminación. La adaptación a la luz puede clasificarse en función de la naturaleza de los cambios fisiológicos que conlleva o en función de su velocidad de actuación. Por cómo influyen en la respuesta visual, pueden clasificarse como:

- a. Los mecanismos multiplicativos actúan sobre la ganancia del sistema visual reajustando la luminancia percibida, evitando así la saturación (principalmente de los bastones), y permitiendo que la sensibilidad permanezca inalterada. Entre estos mecanismos se encuentran:
 - Variación del diámetro pupilar: variando su diámetro entre los 7 mm y los 2 mm, conseguimos abarcar una unidad logarítmica en cuanto a nivel de iluminación. El cambio que produce es muy pequeño, por lo que no es suficiente si actúa sola.
 - Control de ganancia de luminancia: actúa ante una variación en la luminancia. No actúa por igual para conos que para bastones, y depende también del rango de iluminación en el que nos encontremos.
 - Blanqueamiento y regeneración del pigmento de los fotorreceptores: es un proceso lento pero el que más aporta a la adaptación. Con el estímulo luminoso, las moléculas de fotorpigmento disponibles se van agotando (proceso conocido como blanqueamiento). La velocidad de blanqueamiento es mayor que la de regeneración, de ahí la lentitud del proceso. Sin embargo, permite un rango de respuesta de los fotorreceptores de hasta 8 órdenes de magnitud.
- b. Dentro de los mecanismos de adaptación a la luz, también encontramos los mecanismos sustractivos, que reducen el nivel de actividad del sistema visual tras la exposición a un fondo constante, consiguiendo así recuperar sensibilidad ante posibles nuevos cambios. Estos mecanismos varían en función de la iluminación, el tamaño y el tiempo de exposición del estímulo.
- c. Por último, los mecanismos de adaptación al contraste puramente dichos, que incluyen la ganancia al contraste. Dependiendo de la velocidad de adaptación, hablaremos de adaptación al contraste si el proceso es lento (10 s), o ganancia al contraste, si es rápido (200 ms).

1.2 Ganancia al contraste

Tal y como hemos introducido en el punto 1.1.2, la ganancia al contraste es un mecanismo rápido de adaptación al contraste, que relaciona la respuesta visual ante una variación en el contraste, con la amplitud de dicha variación. Permite reescalar la respuesta neuronal en función del contraste, maximizando así su rango dinámico de respuesta y manteniendo constante su sensibilidad. Sus unidades son impulsos por segundo por porcentaje de contraste. En psicofísica la ganancia al contraste se calcula a partir de la medida del tiempo de reacción visual en función del contraste del estímulo.

Bajo los niveles de iluminación mesópicos en los que se va a estudiar este mecanismo, el mecanismo de ganancia de contraste actúa de forma aislada a nivel de la vía magnocelular (1) (2) (3).

Para valorar la función visual en este trabajo, vamos a medir la ganancia al contraste, pero para ello deberemos medir antes el contraste umbral y el tiempo de reacción visual.

1.2.1 Contraste umbral

Para calcular el contraste umbral, aplicamos la ley de Weber. Si se cumple la ley de Weber significa que el aumento de intensidad necesario para percibir un estímulo es proporcional a la intensidad del fondo sobre el que se presenta.

$$C = \frac{L_t - L_b}{L_b}$$

Donde C es el contraste, L_t es la luminancia del test y L_b la luminancia del fondo.

1.2.2 Tiempo de reacción visual

El tiempo de reacción visual se define como la suma de la latencia visual, que es el tiempo que transcurre desde la presentación de un estímulo hasta su percepción en la zona cerebral correspondiente, y la respuesta motora del sujeto a la percepción de dicho estímulo.

La ley de Piéron relaciona el tiempo de reacción visual con el contraste del estímulo presentado. De manera que a medida que el contraste se incrementa (un aumento de la luminancia del estímulo para un fondo constante) el tiempo de reacción disminuye. Obteniendo valores más altos para contrastes cerca del umbral y más bajos para contrastes supra-umbrales.

1.3 Iluminación LED y conducción nocturna

El cambio progresivo que se está produciendo en los sistemas de iluminación es un tema de actualidad, optando cada vez más por la tecnología LED en sustitución de la tradicional. Entre las grandes ventajas de la iluminación LED, nos encontramos con la eficacia luminosa y una larga vida útil, además de no emitir en el espectro ultravioleta e infrarrojo. No generan calor y su color y nivel de iluminación pueden ser regulados fácilmente. (4)

Para caracterizar un LED, existen dos parámetros: la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P, ambos se definen a partir del espectro de la fuente luminosa.

1.3.1 Temperatura de color correlacionada

La temperatura de color correlacionada (TCC) se define como la temperatura en la que el espectro de emisión de una fuente luminosa es equiparable al espectro de emisión de un cuerpo negro a dicha temperatura. Subjetivamente, es un parámetro que se relaciona con la tonalidad de la luz (Figura 1). Su efecto en el rendimiento visual se desconoce. El rango de TCC más utilizado va desde 3000 hasta 6000 K.



Figura 1. Temperatura de color correlacionada, desde valores de 1000 K, consideradas temperaturas cálidas, hasta 10000 K, consideradas temperaturas frías. Imagen obtenida de la Federación de Asociaciones Europeas de Luminarias y Componentes para Luminarias.

1.3.2 Ratio S/P

Con el objetivo de una mejor caracterización del comportamiento del sistema visual en condiciones de iluminación mesópicas, donde actúan tanto conos como bastones, la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) desarrolló un sistema para medir iluminación mesópica (5) que permite definir un iluminante mediante su ratio S/P (Scotopic/Photopic). Este ratio define la relación entre la emisión luminosa evaluada de acuerdo con la curva de eficiencia luminosa escotópica ($V'(\lambda)$) y la evaluada de acuerdo con la curva de eficiencia luminosa fotópica ($V(\lambda)$). Por consiguiente, cuanto mayor contenido en longitud de onda corta tiene la lámpara, mayor ratio S/P le corresponde.

Numerosos estudios se han planteado la pregunta de si es correcto asociar un ratio S/P con una TCC alta. Todos concuerdan en lo mismo: la respuesta es sí. Si representamos en una gráfica el ratio S/P frente a TCC, obtenemos una recta en la cual la pendiente es positiva, lo que corrobora que son directamente proporcionales. Fotios 2018 (4) encontró una correlación de 0.83 entre ambos parámetros (Figura 2).

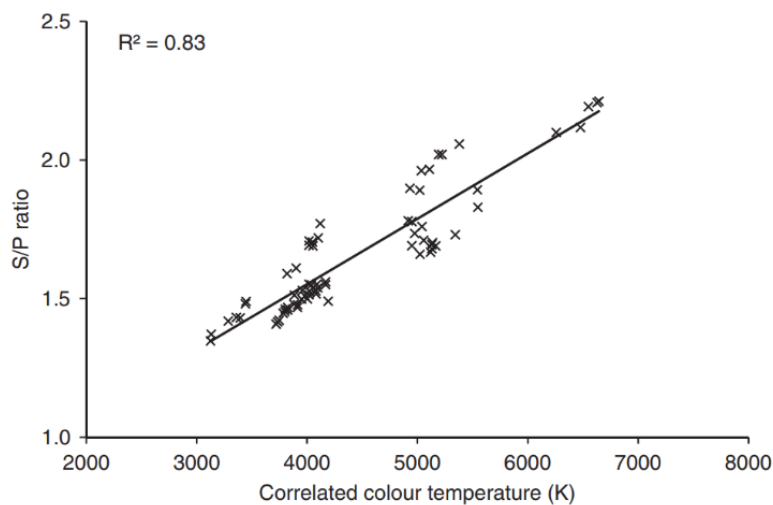


Figura 2. Ratio S/P en función de la TCC para los 297 iluminantes analizados en el trabajo de Fotios 2018 (4).

1.4 Objetivo

El objetivo general de este estudio piloto es conocer y cuantificar cómo influye la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P en el mecanismo de ganancia al contraste, mediante la medida del contraste umbral y el tiempo de reacción visual.

2 Metodología

2.1 Sujetos

Las pruebas llevadas a cabo en este trabajo se realizaron en 4 sujetos (edades 22, 27, 47, 50). A estos sujetos se les realizó un examen optométrico antes de realizar las pruebas, el cual incluía la refracción óptica de lejos, evaluación de los medios oculares con lámpara de hendidura, oftalmoscopia y estudio de la visión al color con los tests de Ishihara y Farnsworth-Munsell 15 hue. Ninguno de ellos presentó ninguna patología ocular, por lo que les consideramos ocularmente sanos. El objetivo de la refracción fue conseguir la mejor agudeza visual con corrección del ojo derecho, ya que las medidas se llevaron a cabo de forma monocular sobre el ojo derecho, mientras el izquierdo estaba ocluido. Al realizar el experimento, todos los sujetos se encontraban emetropizados con lentes de contacto.

2.2 Descripción del dispositivo experimental

El dispositivo experimental empleado para realizar este experimento es un fotoestimulador de segunda generación (Figura 3) de dos canales (prueba y campo de adaptación, subtendiendo en la retina del sujeto 2° y 10° , respectivamente) y cuatro primarios, que corresponden a cuatro LEDs casi monocromáticos con ancho de banda estrecho y distinto pico de máxima emisión espectral (Rojo: 660 nm, Verde: 560 nm, Cyan: 514 nm; Azul: 460nm). Dichos LEDs permiten obtener fuentes de luz con una cromaticidad preestablecida y una luminancia variable entre 0,001 y 100 cd/m^2 . Tras los LEDs, se encuentra un tubo acrílico (PMMA) que homogeneiza los colores, y un difusor holográfico que termina de mezclarlos. Dos objetivos fotográficos coliman los haces y disminuyen la aberración cromática. En el caso del haz de prueba, un prisma desvía la luz procedente de los LEDs para a continuación incidir en una elipse espejada tallada en la hipotenusa de dos prismas que configuran el cubo fotométrico. En el caso del haz del campo de adaptación, la luz procedente de los LEDs atraviesa directamente el cubo fotométrico. Posteriormente, ambos haces atraviesan una lente de campo que forma imagen en el agujero estenopeico. El dispositivo experimental está completamente informatizado, permitiendo controlar con gran precisión la luminancia proporcionada por los LEDs.

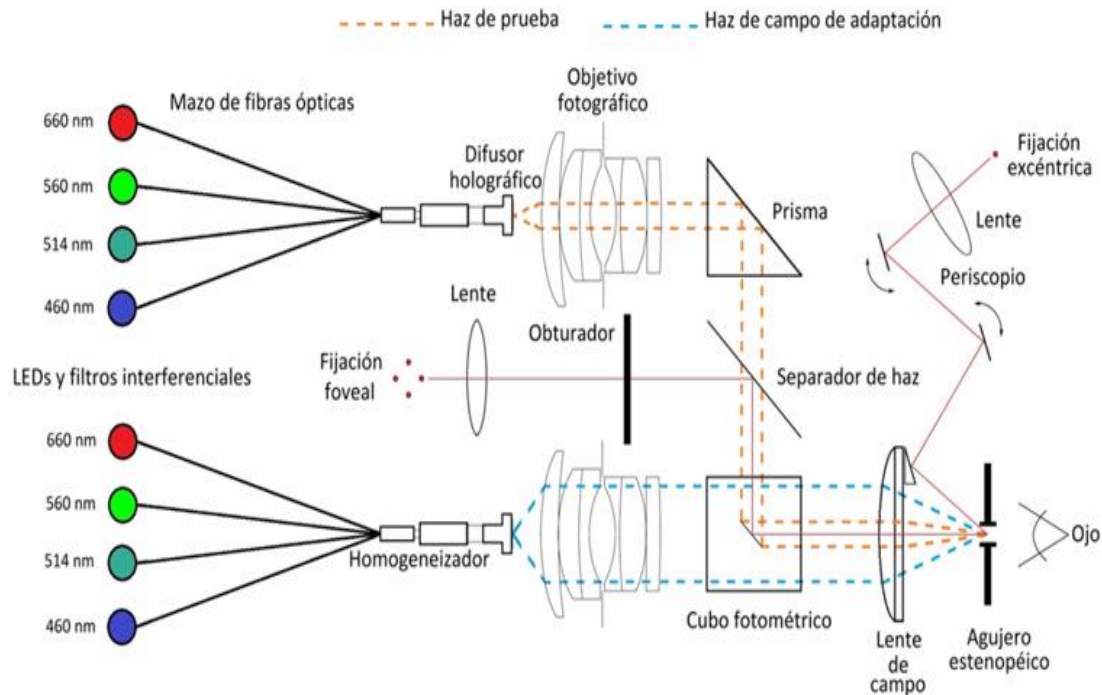


Figura 3. Esquema fotoestimulador de dos canales y cuatro primarios.

La fijación del sujeto se mantiene gracias a un punto láser de fijación excéntrica que nos permite presentar el estímulo a 10° de excentricidad retiniana temporal y una impresión dental personalizada para cada sujeto, colocada sobre un desplazador XYZ. Este sistema permite variar la posición del observador con el fin de que quede totalmente centrado respecto al agujero estenopéico.

2.3 Cálculo de los primarios para las distintas condiciones experimentales

Con el objetivo de conocer las TCC comúnmente empleadas en investigación y, teniendo en cuenta también su uso comercial, se llevó a cabo una búsqueda en la bibliografía. Se eligieron TCC de 3007 y 5020 K, cuyas coordenadas (x, y) en el diagrama cromático de la CIE (Figura 4) son conocidas (6).

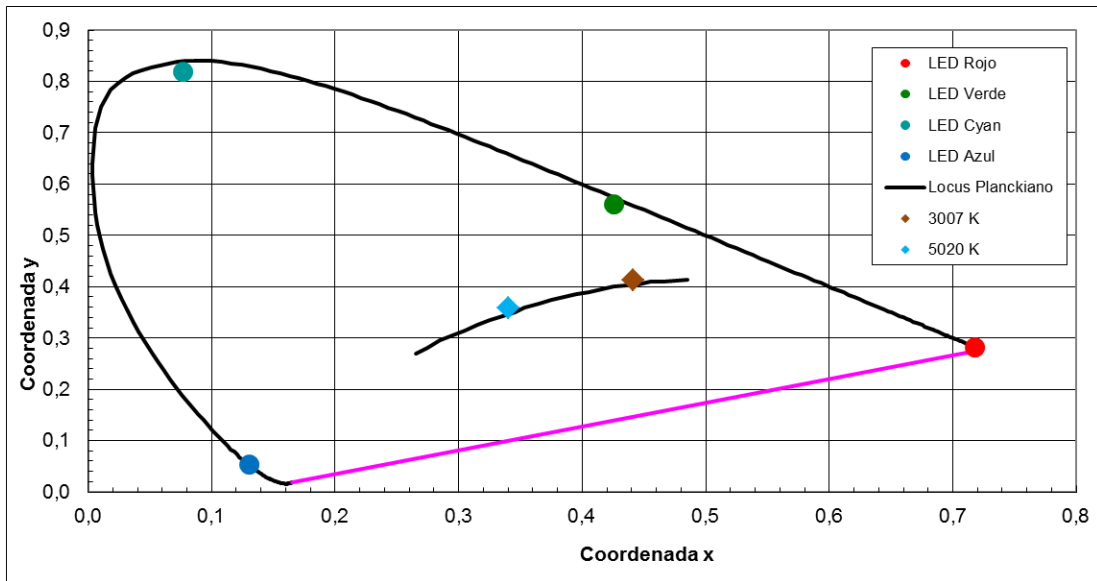


Figura 4. Representación de los cuatro LEDs en el diagrama cromático de la CIE. Se representa también la línea del locus Planckiano junto con la posición de las dos temperaturas de color correlacionadas empleadas.

A partir de las coordenadas se calcularon los valores triestímulo X, Y, Z correspondientes a esas dos TCC. Teniendo en cuenta los valores triestímulo de las dos TCC y de los cuatro LEDs, se obtuvo la luminancia necesaria para cada uno de ellos que permitía obtener la TCC deseada.

Cómo las TCC empleadas no representan un único punto en la línea del locus Plankiano, sino unas líneas conocidas como líneas de isotemperatura, se calcularon las dos combinaciones posibles más diferentes de los cuatros LEDs dentro de dichas líneas (señaladas en la Figura 5 con un círculo verde). A esas dos combinaciones de los cuatro LEDs, dentro de una misma TCC, se las caracterizó con el ratio S/P (bajo y alto). De manera que cuánto más alto era el ratio S/P, había mayor contribución de los LEDs de longitud de onda corta (cyan y azul).

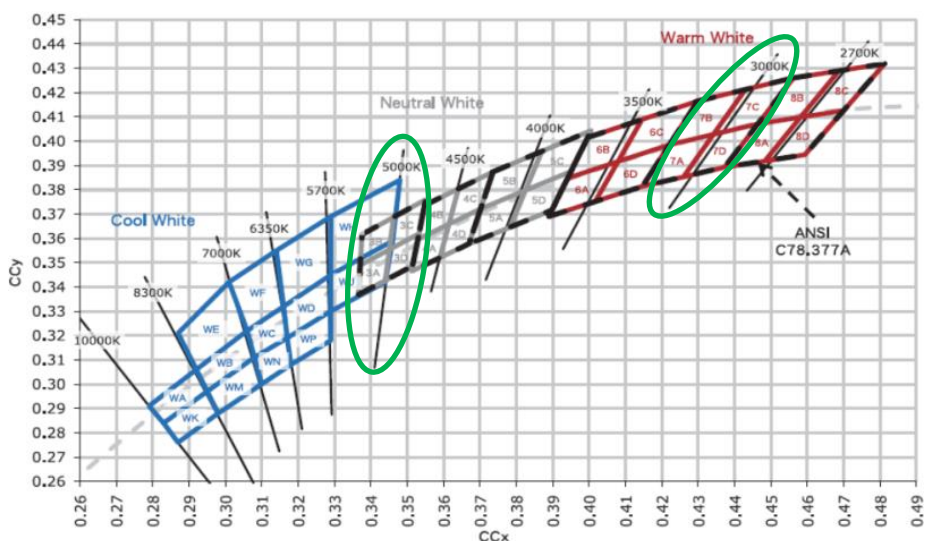


Figura 5. Líneas de isotemperatura del locus Planckiano, segmento del diagrama cromático de la CIE. Imagen obtenida de Cree, Binning & Labeling.

2.4 Procedimiento de medidas

2.4.1 Adaptación

Tras 30 minutos de adaptación a la oscuridad y con el sujeto ya colocado en el dispositivo, se invirtieron 3 minutos de adaptación a la luz para cada condición estudiada.

2.4.2 Procedimiento medida contraste umbral

El contraste umbral lo hemos medido para una luminancia de fondo de 0,1 cd/m^2 y dos tiempos de exposición de la prueba diferentes: 40 y 500 ms. Para cada tiempo de exposición, se realizaron medidas para dos TCC y sus correspondientes ratios S/P extremos: 0,993 y 2,015 para 3007 K y 1,615 y 2,157 para 5020 K. Por lo tanto, para cada sujeto, se realizaron las medidas en ocho condiciones diferentes (Tabla 1).

CONDICIÓN 1	CONDICIÓN 2	CONDICIÓN 3	CONDICIÓN 4
Tiempo de exposición 40 ms TCC de 3007 K Bajo S/P 0,993	Tiempo de exposición 40 ms TCC de 3007 K Alto S/P 2,015	Tiempo de exposición 40 ms TCC de 5020 K Bajo S/P 1,615	Tiempo de exposición 40 ms TCC de 5020 K Alto S/P 2,157
CONDICIÓN 5	CONDICIÓN 6	CONDICIÓN 7	CONDICIÓN 8
Tiempo de exposición 500 ms TCC de 3007 K Bajo S/P 0,993	Tiempo de exposición 500 ms TCC de 3007 K Alto S/P 2,015	Tiempo de exposición 500 ms TCC de 5020 K Bajo S/P 1,615	Tiempo de exposición 500 ms TCC de 5020 K Alto S/P 2,157

Tabla 1. Resumen de las condiciones de medida del contraste umbral.

El procedimiento psicofísico mediante el cual se ha calculado el contraste umbral es el método de límites. Este método combina escaleras ascendentes y descendentes, de manera que se le presenta un estímulo al sujeto que sí percibe y se disminuye su luminancia hasta que no lo percibe, se anota dicho valor de luminancia. A continuación, se invierte el proceso, presentando el estímulo por debajo del umbral e incrementando su luminancia hasta que es percibido, anotando de nuevo este valor. Las escaleras se repiten tres veces y se promedian las luminancias umbrales obtenidas, resultando en un único valor a partir del cual se calcula el contraste umbral aplicando la ley de Weber.

2.4.3 Procedimiento medida tiempo de reacción visual

El tiempo de reacción visual se ha medido para una luminancia de fondo de 0,1 cd/m^2 y un tiempo de exposición de 500 ms. Para una TCC de 5020 K, con sus respectivos bajo (1,615) y alto (2,157) ratio S/P.

CONDICIÓN 1	CONDICIÓN 2
TCC 5020 K Bajo S/P 1,615	TCC 5020 K Alto S/P 2,157

Tabla 2. Resumen de las condiciones de medida del tiempo de reacción visual.

Los cinco contrastes empleados para la medida del tiempo de reacción visual se han calculado a partir del valor de contraste umbral más alto obtenido para la condición de una TCC de 5020 K y sus correspondientes bajo y alto ratio S/P. La inversa de esos cinco valores de contraste debe abarcar una unidad logarítmica.

El procedimiento a seguir por el sujeto era el siguiente: se presentaban 100 valores aleatorios diferentes, 20 para cada uno de los 5 contrastes calculados previamente. El sujeto contaba con un pulsador. Se presentaba un estímulo (como ya hemos dicho previamente, siempre con la misma luminancia de fondo) y el sujeto debía presionar el pulsador cuando lo viera. Valores menores de 150 ms o mayores de 2000 ms automáticamente se descartaban y se repetía la medida.

2.4.4 Obtención valor de ganancia al contraste

De los valores de tiempo de reacción obtenidos previamente, en función de la inversa del contraste ($1/C$), se obtiene la ganancia al contraste como la inversa de la pendiente tras el ajuste lineal de los resultados.

3 Resultados

3.1 Efecto de la temperatura de color correlacionada, el ratio S/P y el tiempo de exposición en el contraste umbral

El contraste umbral lo hemos medido para una luminancia de fondo de $0,1 \text{ cd/m}^2$ y dos tiempos de exposición de la prueba diferentes: 40 y 500 ms. Para cada tiempo de exposición, se realizaron medidas para dos temperaturas de color correlacionadas (3007 y 5020 K) y sus correspondientes bajo y alto ratios S/P.

A continuación, en la Figura 6 se representa el contraste umbral promedio de todos los sujetos. Se observa como para un tiempo de exposición de 40 ms e independientemente de la condición, el contraste umbral aumenta en comparación con un tiempo de exposición de 500 ms. En cuanto a la influencia de la TCC, se observa como para 40 ms y bajo S/P hay una tendencia del contraste umbral a disminuir cuando aumenta la TCC, dándose la misma situación para un ratio S/P alto. Este efecto no se observa para un tiempo de exposición de 500 ms. Por último, para 40 ms, no se observa influencia del ratio S/P para cada una de las TCC. Sin embargo, para 500 ms si se observa una tendencia más marcada a mejorar el contraste umbral con un alto ratio S/P en 5020 K.

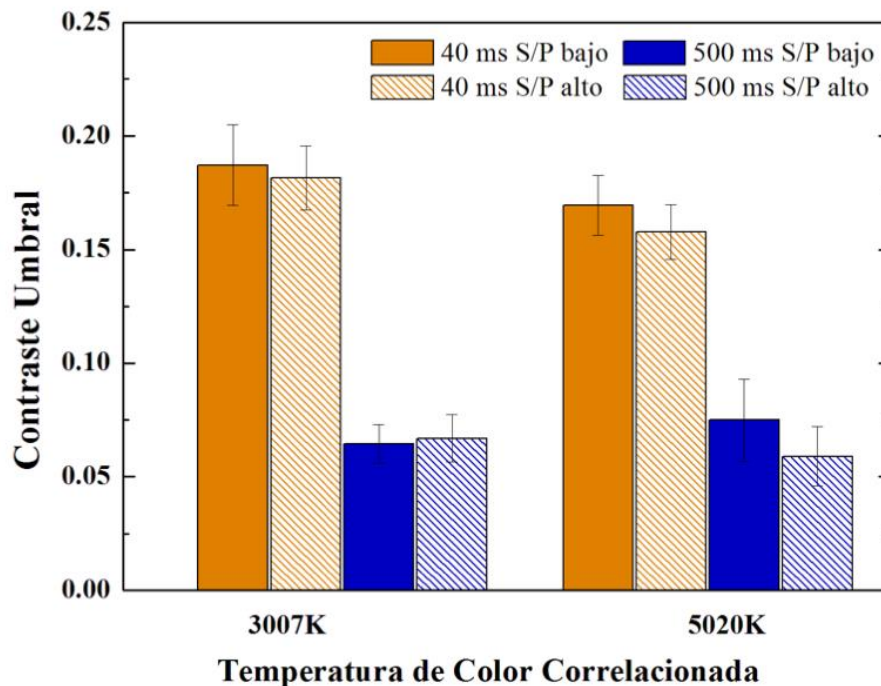


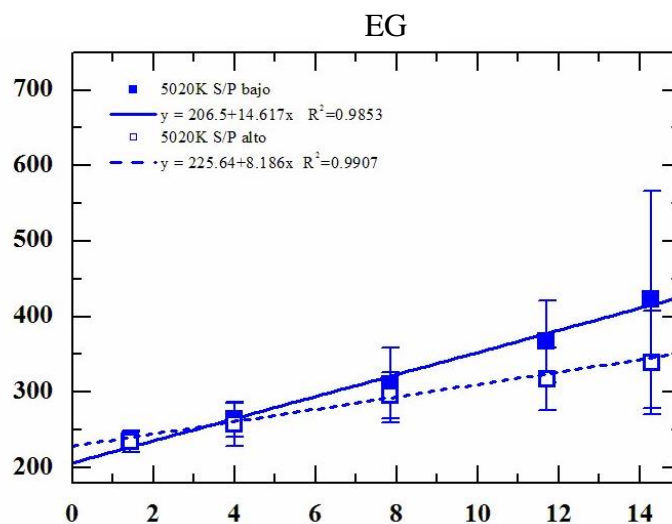
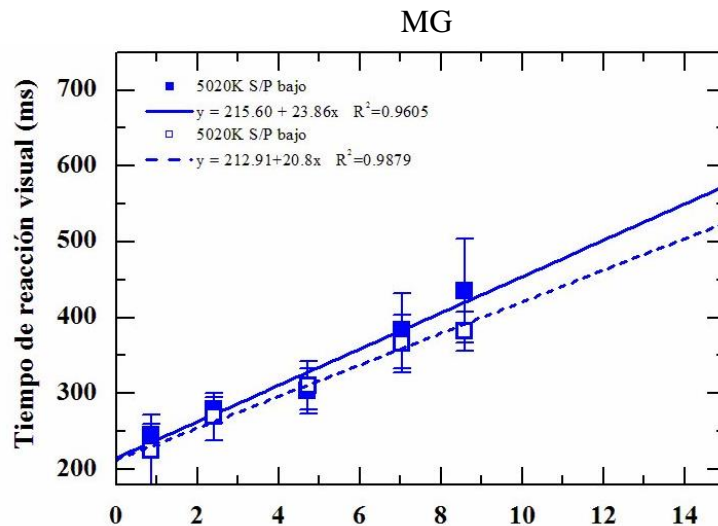
Figura 6: Representación mediante un gráfico de barras del contraste umbral. En color naranja encontramos los resultados para un tiempo de exposición de 40 ms, siendo el color uniforme para un ratio S/P bajo y con un patrón de rayas para un ratio S/P alto. En color azul encontramos los resultados para un tiempo de exposición de 500 ms, siendo el color uniforme para un ratio S/P bajo y con un patrón de rayas para un ratio S/P alto.

3.2 Efecto de la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P en el tiempo de reacción visual

Para realizar las medidas de tiempo de reacción únicamente empleamos un tiempo de exposición de 500 ms al tratarse de una condición más cercana a las situaciones de la vida diaria que pueden darse en nuestro entorno. Nos hemos centrado en una TCC de 5020 K al haber encontrado un mayor efecto del ratio S/P a dicha TCC en el contraste umbral.

El tiempo de reacción visual lo hemos medido para una luminancia de fondo de $0,1 \text{ cd/m}^2$ y una TCC de 5020 K, con sus respectivos bajo y alto ratios S/P.

En la Figura 7 se representa el tiempo de reacción visual en función de la inversa del contraste ($1/C$) para los cuatro sujetos participantes. Se incluye la ecuación del ajuste lineal de los resultados y su correspondiente coeficiente de determinación (R^2). Podemos observar como en los 4 sujetos se sigue la misma tendencia: al aumentar el contraste (disminuir $1/C$), el tiempo de reacción se reduce, cumpliéndose la ley de Piéron. También observamos como la pendiente de la recta para alto ratio S/P es menor que para bajo ratio S/P, con un coeficiente de determinación superior a 0.9 en todos los sujetos y condiciones.



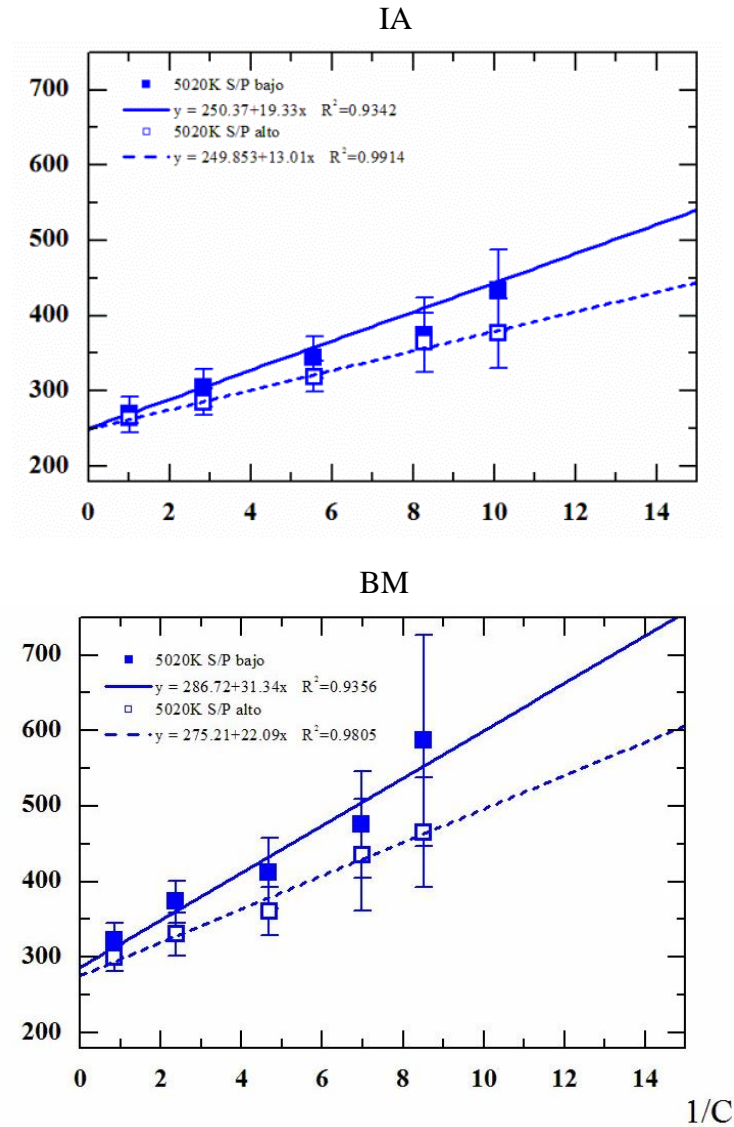


Figura 7: Tiempo de reacción visual en función de la inversa del contraste para los cuatro sujetos (MG, EG, IA y BM), una temperatura de color correlacionada de 5020 K y dos ratios S/P (bajo y alto). Los símbolos rellenos corresponden a un ratio S/P bajo y los símbolos vacíos a un ratio S/P alto, junto con la recta obtenida tras el ajuste lineal (continua y discontinua para ratios S/P bajo y alto, respectivamente). Se representa la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación R^2 correspondientes.

3.3 Ganancia al contraste.

El valor de ganancia al contraste lo hemos obtenido realizando la inversa de la pendiente tras el ajuste lineal de los resultados de tiempo de reacción en función de la inversa del contraste ($1/C$).

En la Tabla 3 observamos los datos de ganancia al contraste y su correspondiente desviación estándar para cada sujeto. Se observa en los cuatro sujetos una tendencia del valor de ganancia al contraste a disminuir para un ratio S/P bajo.

	TCC 5020 K			
	Ratio S/P bajo		Ratio S/P alto	
	Ganancia al contraste	s.e.	Ganancia al contraste	s.e.
MG	0,0419	0,0044	0,0481	0,0048
EG	0,0680	0,0158	0,1224	0,0287
IA	0,0517	0,0075	0,0769	0,0123
BM	0,0319	0,0062	0,0453	0,0081

Tabla 3. Resultados del valor de ganancia al contraste de los cuatro sujetos para una temperatura de color correlacionada de 5020 K y dos ratios S/P (bajo y alto). También se muestran los valores de la desviación estándar para cada medida.

4 Discusión

4.1 Contraste umbral

El argumento que explica la diferencia en los resultados obtenidos para los dos tiempos de exposición es la sumación temporal. Cuando el tiempo de exposición es 40 ms, entra dentro de la duración crítica de los conos (entre 10 y 50 ms), pero no entra en la de los bastones (100 ms) (7), es decir, la duración del estímulo no es suficiente para que los bastones sumen su estimulación y logren superar su umbral de respuesta. Por lo que, si incrementamos el tiempo de exposición a 500 ms, y para un nivel de iluminación de 0,1 cd/m², los bastones alcanzan el umbral e incrementan su contribución.

De los resultados que hemos obtenido en este primer estudio piloto, podemos afirmar que no hay efecto de la TCC pero sí del ratio S/P. Para una TTC alta el contraste umbral es menor para alto ratio S/P, porque hay mayor contenido en longitudes de onda corta. Lo que equivale a una mayor contribución de los LEDs cyan y azul, responsables de una mayor estimulación de los bastones y conos S, ya que son los fotorreceptores más implicados considerando 0,1 cd/m² de luminancia de fondo y 10° de excentricidad.

4.2 Tiempo de reacción visual

El efecto del ratio S/P que se da en la medida del contraste umbral, también se observa en el tiempo de reacción, pese a que sea una tarea visual distinta en la que contribuyen también factores motores. Observamos que, para una TCC de 5020 K, hay una tendencia de los resultados a mejorar para un alto ratio S/P. Observamos valores de tiempo de reacción más bajos para alto ratio S/P, de nuevo la mayor cantidad en longitudes de onda corta favorece la estimulación de bastones y conos S. En las condiciones experimentales en las que hemos realizado las medidas (bajos contrastes, baja luminancia de fondo y a 10° de excentricidad) el tiempo de reacción está mediado por la vía visual magnocelular de procesamiento rápido, que recibe información procedente de los bastones.

4.3 Ganancia al contraste

Los valores de ganancia al contraste se incrementan con un mayor ratio S/P, también pudiendo ser debido al mayor contenido en longitudes de onda corta y una mayor estimulación de los bastones y los conos S.

En bajos niveles de iluminación, la vía magnocelular mediada por la actividad de los bastones es la principal responsable del mecanismo de ganancia al contraste (8).

Conclusiones

Después de estudiar la influencia de la temperatura de color correlacionada y el ratio S/P, parámetros que caracterizan la iluminación LED, llegamos a las siguientes conclusiones:

- 1) Se observa una disminución del contraste umbral, así como del tiempo de reacción visual para lámparas con alto contenido en longitud de onda corta proporcionada por un alto ratio S/P, parece ser que independientemente de la temperatura de color correlacionada.
- 2) El mecanismo de ganancia al contraste, mediado por la vía magnocelular en nuestras condiciones experimentales, muestra una mayor actividad si empleamos un alto ratio S/P, con mayor contenido en longitudes de onda corta.
- 3) La temperatura de color correlacionada, como parámetro que se emplea para caracterizar un LED, no aporta suficiente información para conocer su efecto en el rendimiento visual. Quizás otros parámetros sean necesarios para una correcta clasificación.

Bibliografía

1. Di Russo F, Spinelli D, Morrone MC. Automatic gain control contrast mechanisms are modulated by attention in humans: evidence from visual evoked potentials. *Vision Res.* 2001; 41(19): 2435-47.
2. Purpura K, Kaplan E, Shapley RM. Background light and the contrast gain of primate P and M retinal ganglion cells. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1988; 85(12): 4534-7.
3. Cao D., Lee B. B., & Sun H. (2010). Combination of rod and cone inputs in parasol ganglion cells of the magnocellular pathway. *J. Vis.* 10(11): 4.
4. Fotios S, Yao Q. The association between correlated colour temperature and scotopic/photopic ratio. *Lighting Research & Technology.* 2018; 0: 1-11.
5. Commission Internationale de l'Éclairage. Recommended System for Visual Performance Based Mesopic Photometry. CIE Publication 1991. Vienna: CIE, 2010.
6. Huaizhou J, Shangzhong J, Liang C, Songyuan C. Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures. *IEEE Photonics Journal* 7(6): 1-9.
7. Schwartz S. *Visual perception: a clinical orientation.* Ed. McGraw hill Medical, Fourth Edition, 2010.
8. Beaudoin DL, Borghuis BG, Demb JB. Cellular basis for contrast gain control over the receptive field center of mammalian retinal ganglion cells. *J Neurosci.* 2007; 27(10): 2636-45.