

## Trabajo Fin de Grado

# Incidencia de la fuente de iluminación y del entorno en la realización del test de color Farnsworth Munsell 100 Hue Test

Autora

Esperanza Valero Alonso

Directores

Justiniano Aporta Alfonso  
Ana Isabel Sánchez Cano

Facultad de Ciencias – Universidad de Zaragoza  
Grado en Óptica y Optometría  
Curso académico 2014 - 2015

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN . . . . .	pág. 01
1.1. Iluminantes y fuentes de luz	
1.2. Características de las fuentes de luz	
1.2.1. Curva de distribución espectral	
1.2.2. Temperatura de color	
1.2.3. Índice de reproducción cromática (IRC)	
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS . . . . .	pág. 04
2.1. Hipótesis	
2.2. Objetivo principal	
2.3. Objetivos secundarios	
3. MATERIAL Y MÉTODOS . . . . .	pág. 05
3.1. Sujetos a estudio	
3.2. Protocolo de medida	
3.3. Material de medida	
3.3.1. Test	
3.3.2. Fuentes de iluminación	
3.3.3. Cabina GretagMacbeth, entornos	
3.4. Método de medida	
4. RESULTADOS . . . . .	pág. 12
4.1. Análisis de los resultados en los test de color	
4.2. Análisis de los resultados en una discromatopsia	
5. DISCUSIÓN . . . . .	pág. 18
6. CONCLUSIONES. . . . .	pág. 23
7. BIBLIOGRAFÍA . . . . .	pág. 25
8. ANEXOS . . . . .	pág. 27

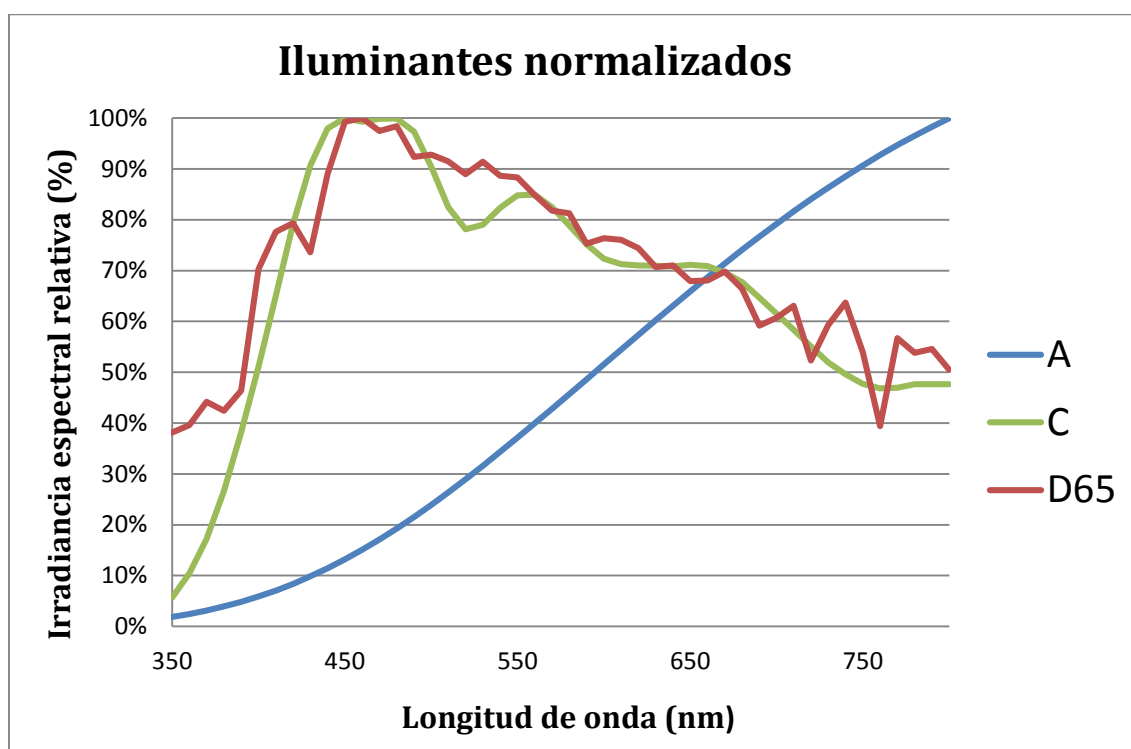
# 1. INTRODUCCIÓN

El color que percibimos al observar los objetos depende de la luz con la que se iluminan y, por tanto, del tipo de lámpara que utilicemos.

## 1.1. Iluminantes y fuentes de luz

Un iluminante es la especificación de una fuente de luz potencial, teórica, y se suelen expresar en términos de la energía relativa tabulada para cada longitud de onda.<sup>1</sup>

Existen varios tipos de iluminantes, encontrándose entre los más utilizados el A, C y D-65, cuyas curvas espectrales pueden verse en la Figura 1.1.



**Figura 1.1:** Curva de distribución espectral de los iluminantes A, C y D-65.

Los iluminantes se utilizan para la estandarización de las caracterizaciones en las industrias en las que el color es importante en sus procesos productivos, que en la actualidad alcanzaría un porcentaje muy elevado.

La CIE (Comisión Internacional de la Iluminación), es el organismo internacional de referencia para el estudio y estandarización de todo lo relacionado con la luz y el color.<sup>2</sup>

Las fuentes de luz (lámparas), son emisores físicos de radiación luminosa que, en algunas ocasiones, tienen curvas de distribución espectral similares, pero no idénticas, a los iluminantes y se suelen determinar como ellos.

## 1.2. Características de las fuentes de luz

Las fuentes de luz o lámparas más utilizadas en la actualidad son:

- De incandescencia: La emisión de luz se produce al pasar la corriente por un filamento.
- De descarga: La emisión de luz se produce a partir de la descarga eléctrica en el seno de un gas.
- LEDs: Diodos de emisión de luz.<sup>3</sup>

Los tres tipos de fuentes pueden dar luz blanca de diferentes tonalidades, pero su composición espectral puede ser diferente.

Para reproducir bien los colores tienen que emitir radiación en todo el espectro.

La potencia, el tono y la capacidad de reproducción del color (IRC) son los parámetros más importantes que definen el tipo de luz.

### 1.2.1. Curva de distribución espectral

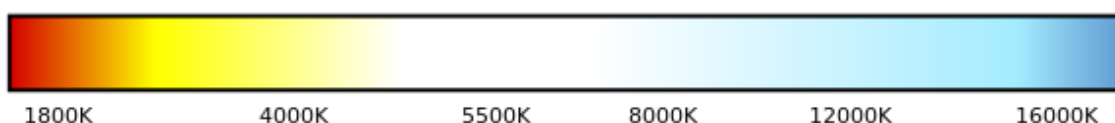
Curva que nos permite ver las características de emisión (la potencia de emisión de la fuente), pero relativa, no es exacta. Define la cantidad de energía para cada longitud de onda.

### 1.2.2. Temperatura de color

Es la temperatura que alcanza el cuerpo negro cuando al calentarlo su color coincide con el de la fuente de luz, siempre y cuando la curva de emisión de la lámpara sea proporcional a la del cuerpo negro, como las incandescentes.<sup>1</sup>

Para las lámparas de descarga se utiliza la temperatura de color correlacionada, al no coincidir exactamente las coordenadas de color con las del cuerpo negro.

Por este motivo esta temperatura de color se expresa en kelvin, a pesar de no reflejar expresamente una medida de temperatura, Figura 1.2.<sup>1</sup>



**Figura 1.2:** Emisión del cuerpo negro a cada temperatura.

(Fuente: <http://www.muchosleds.com/es/content/6-temperatura-de-color-calido-neutro-frio>)

- Un tono cálido, con tonos cercanos al rojo, se corresponde con una temperatura de color baja ( $<3.300$  K). De la misma forma, emiten más cantidad de radiación en las longitudes de onda ( $\lambda$ ) largas que en las cortas.
- Una luz neutra se definiría con valores alrededor de  $4.500$  K, en el rango de  $3.300$  K a  $5.300$  K.
- Un tono frío por tanto, con tonos más cercanos al azul, es equivalente a una temperatura de color más alta ( $>5.300$  K), emitiendo mayor cantidad de radiación en las longitudes de onda cortas.

La mayor parte de las lámparas utilizadas pueden emitir en los tres tonos.

### 1.2.3. Índice de reproducción cromática (IRC)

Expresa la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores en comparación con el iluminante A o el D-65.<sup>1</sup>

El IRC se mide en  $R_a$ , donde un  $100 R_a$  significa que todos los colores se reproducen perfectamente, y conforme nos vamos alejando de  $100 R_a$ , podemos esperar mayor dispersión sobre todos los colores.

De esta forma, se puede distinguir la siguiente escala:

$R_a < 60$	reproducción pobre
$60 < R_a < 80$	reproducción buena
$80 < R_a < 90$	reproducción muy buena
$90 < R_a < 100$	reproducción excelente <sup>3</sup>

Por regla general, se admite que una lámpara tiene una reproducción cromática buena a partir de  $85$ .<sup>1</sup>

## 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### 2.1. Hipótesis

Los test que evalúan la visión cromática se utilizan de forma habitual en una revisión optométrica.

No todas las lámparas tienen las mismas características, por tanto, no se esperan obtener los mismos resultados al realizar los test de color.

Por tanto, para la utilización de estos test, podríamos considerar como más idóneas aquellas lámparas tanto con una distribución espectral uniforme, como con un IRC alto.

### 2.2. Objetivo principal

El objetivo principal es saber si el tipo de lámpara que utilizamos al evaluar la visión del color con test Farnsworth Munsell 100 Hue puede afectar a los resultados de este (como de cualquier otro test de color) y en qué medida.

En caso de ser así, buscaremos el factor más influyente utilizando lámparas diferentes en una población de la que tenemos en conocimiento que no dará resultados de anomalías en este tipo de visión puesto que son sanos en este aspecto.

### 2.3. Objetivos secundarios

De forma adicional, es importante estudiar la influencia del entorno (paredes, suelo y techo) donde se realizan las pruebas.

Para ello, utilizaremos diferentes entornos centrándonos en los que sabemos que en mayor medida pueden influir, conociendo la gráfica de distribución espectral de cada uno.

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1. Sujetos a estudio

Para la realización de las pruebas, se les solicitó, de forma aleatoria, la participación a 30 adultos jóvenes (9 hombres y 21 mujeres) sin ningún defecto en la visión del color.

Los criterios de inclusión fueron:

- Disponibilidad y colaboración para la realización de las pruebas.
- Edad comprendida entre 20 y 25 años.
- Medios ópticos transparentes.
- Se refieren como visualmente sanos. La mayoría han realizado hace uno o dos años Test de Farnsworth 28 Hue (versión reducida del test de Farnsworth 100 Hue), lo que también hace que entiendan tanto los objetivos como el funcionamiento del test.

Los criterios de exclusión:

- Dificultades físicas o mentales que puedan influir en la realización correcta de las medidas.
- Algún tipo de déficit en la visión del color.
- Opacidad de medios ópticos que puedan afectar en cierta medida a la visión cromática.

- Al hacer las pruebas, si necesitan algún tipo de corrección, las realizarán con ella.

### 3.2. Protocolo de medida

El estudio consistió en la obtención de resultados de la ordenación de las distintas fichas que forman el test Farnsworth Munsell 100 Hue con cuatro tipos de lámparas, y dentro de cada una de ellas, con distintos entornos.

Para la realización del test, se dispuso una cabina *GretagMacbeth* gris estándar Munsell N7, que permitió tanto introducir las fuentes de iluminación, como adaptarla a cada uno de los entornos escogidos.

### 3.3. Material de medida

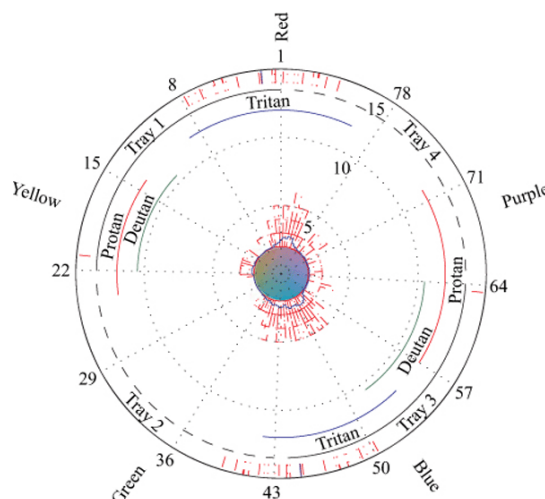
#### 3.3.1. Test Farnsworth-Munsell 100 Hue

Este test está formado por 85 fichas coloreadas, Figura 3.1, con pigmentos especiales que presentan una saturación y luminosidad constantes, sólo difieren en tonalidad. <sup>4</sup>



**Figura 3.1:** Test Farnsworth-Munsell 100 Hue utilizado.  
(Fuente: <http://www.allaboutvision.com/eye-exam/color-blind-tests.htm>)

Dentro de los test de evaluación del color, se encuentra en el subgrupo de “clasificación y ordenación”. Se le pide al paciente que las ordene, y se evalúa su clasificación debido a su numeración en el reverso; la respuesta se compara con la correspondiente a esos colores en el círculo cromático, Figura 3.2.<sup>5,6</sup>



**Figura 3.2:** Círculo cromático y líneas de confusión en las diferentes anomalías  
(Fuente: [http://ieeexplore.ieee.org/ieee\\_pilot/articles/06/ttq2009061291/figures.html](http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/06/ttq2009061291/figures.html))

Este modelo es el que más piezas contiene de los test Farnsworth, lo que hace que sus posiciones estén mucho más próximas en el círculo, separadas por un valor cercano al mínimo de sensibilidad diferencial. Este test es el más prolongado de realizar de los de este subgrupo, pero está completo y por tanto es más fiable.<sup>7</sup>

A la hora de medir, también hay que tener en cuenta que el test exige unas condiciones de medida dadas por el fabricante, y son las siguientes:

- La iluminación debe proporcionar aproximadamente una temperatura de color de 6.700 K.
- El nivel de iluminación debe de ser de al menos 270 lux, o la similar a la luz del día sin el rango UV (iluminante C).
- Se debe realizar a 50 cm.



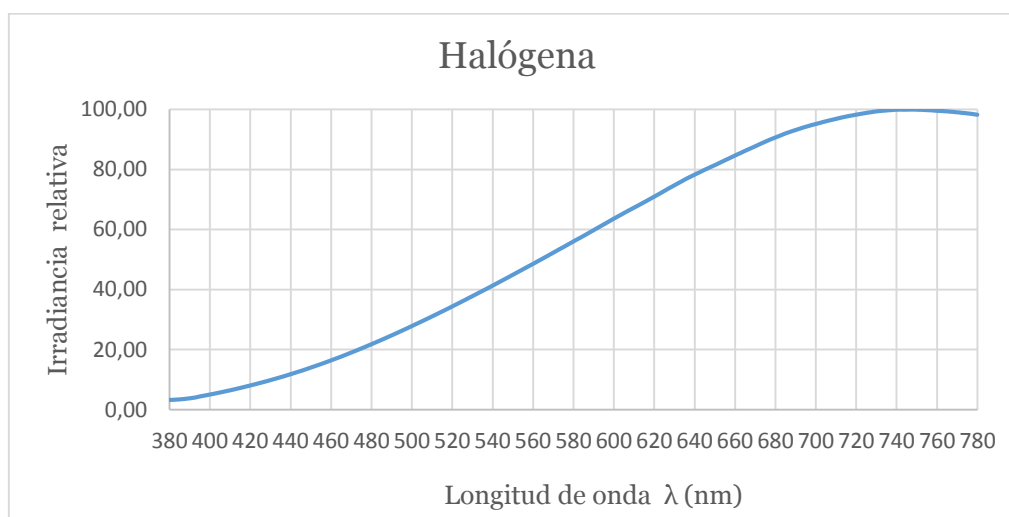
- En cuanto al entorno, ha de ser neutro.

Estas condiciones son en las que mejores resultados esperamos obtener.

### 3.3.2. Fuentes de iluminación

Para la realización del estudio, se dispusieron cuatro fuentes de luz con diferentes valores de IRC, temperatura de color, distribución espectral e iluminancia en el plano de realización del test Farnsworth Munsell 100-Hue.

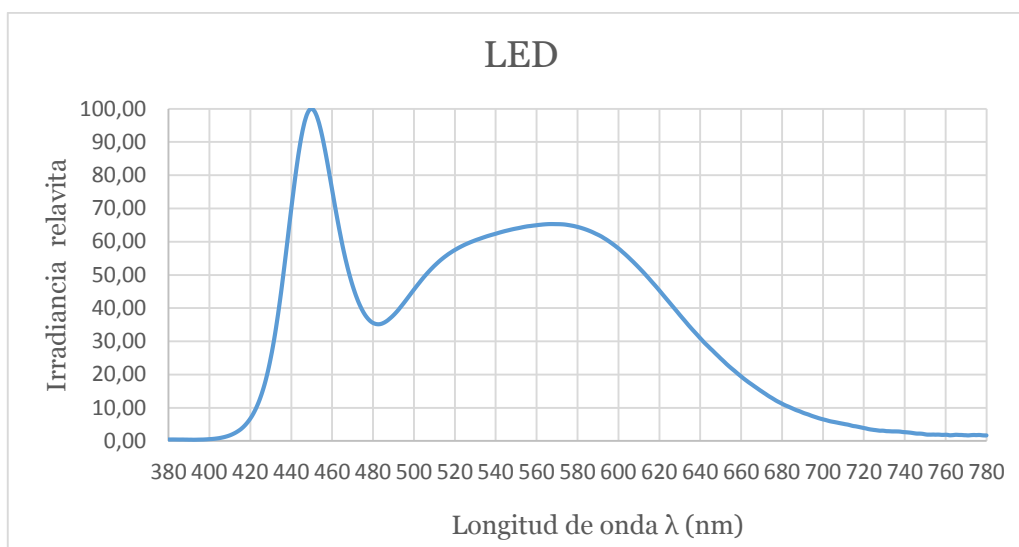
- Incandescencia (Iluminante A)
  - Iluminancia: 2.5 Klux
  - IRC: 99.1
  - Tc: 2777 K
  - Distribución espectral:



**Figura 3.3:** Curva de distribución espectral de la lámpara halógena utilizada.

En este caso, y según la gráfica (Figura 3.3), al realizar el test Farnsworth Munsell 100-Hue esperaríamos resultados de error en la parte de los violetas y azules, puesto que la potencia de emisión es mucho menor en las longitudes de onda bajas.

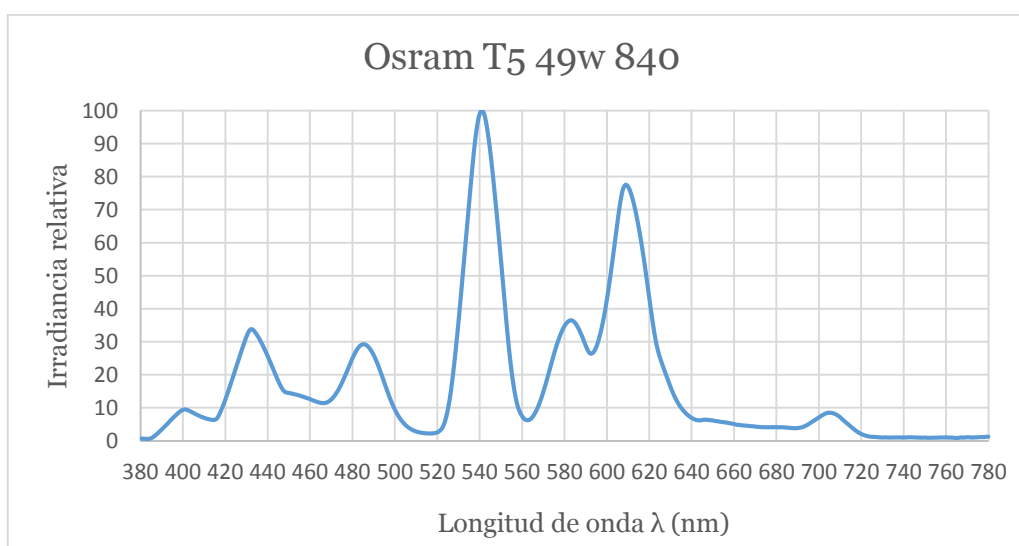
- LED blanco frío
  - Iluminancia: 925 lux
  - IRC: 81.6
  - Tc: 5997 K
  - Distribución espectral:



**Figura 3.4:** Curva de distribución espectral de la lámpara LED utilizada.

En este caso (Figura 3.4), el error esperado de la ordenación de Farnsworth Munsell 100-Hue estaría en los intervalos 380-420 y 700-780, seguramente también en 480 puesto que es el punto de inflexión de un cambio brusco, y este puede inducir a error.

- Fluorescente 8400
  - Iluminancia: 755 lux
  - IRC: 77.6
  - Tc: 4096 K
  - Distribución espectral:

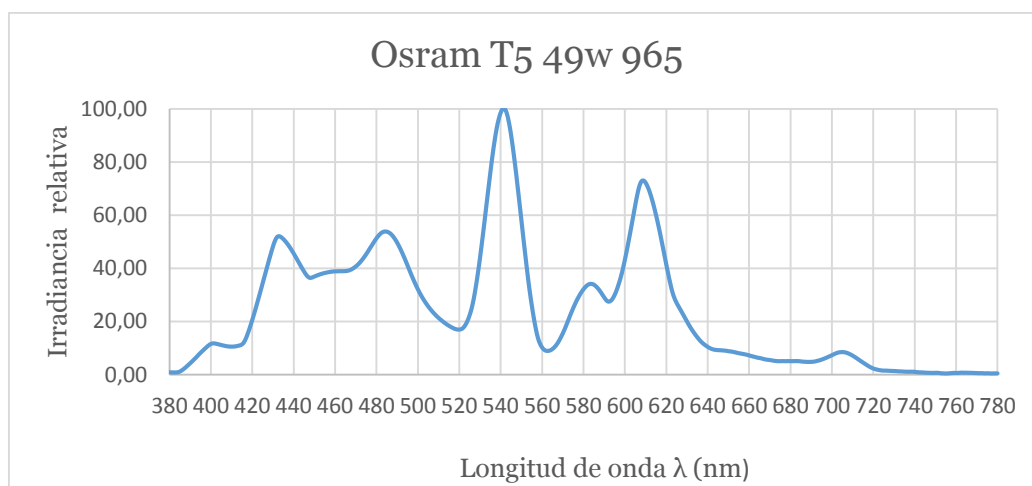


**Figura 3.5:** Curva de distribución espectral de la lámpara fluorescente 840 utilizada.

En este fluorescente (Figura 3.5), esperaríamos resultados erróneos en el Farnsworth Munsell 100-Hue en los valles de la gráfica, puesto que no solo es

donde menor potencia de emisión hay sino que al haber mayor cantidad en las longitudes de onda adyacentes lleva a error.

- Fluorescente 9650 (se puede aproximar al Iluminante D-65)
  - Iluminancia: 780 lux
  - IRC: 92.7
  - Tc: 6327 K
  - Distribución espectral:



**Figura 3.6:** Curva de distribución espectral de la lámpara fluorescente 965 utilizada.

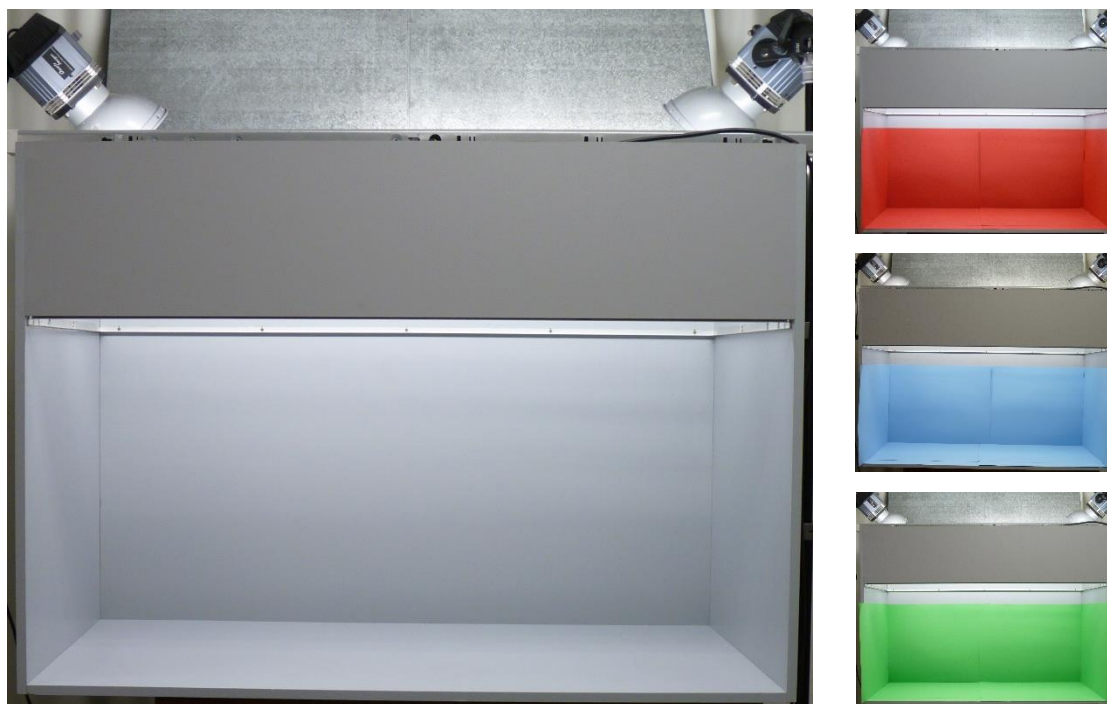
Este fluorescente (Figura 3.6) tiene diferente distribución espectral que el D-65 pero similar temperatura de color; como se puede observar en la Figura 1.1.

Esto nos hace esperar menores cifras de error en el test Farnsworth Munsell 100-Hue, que con la fuente de luz anterior.

### 3.3.3. Cabina GretagMacbeth, entornos

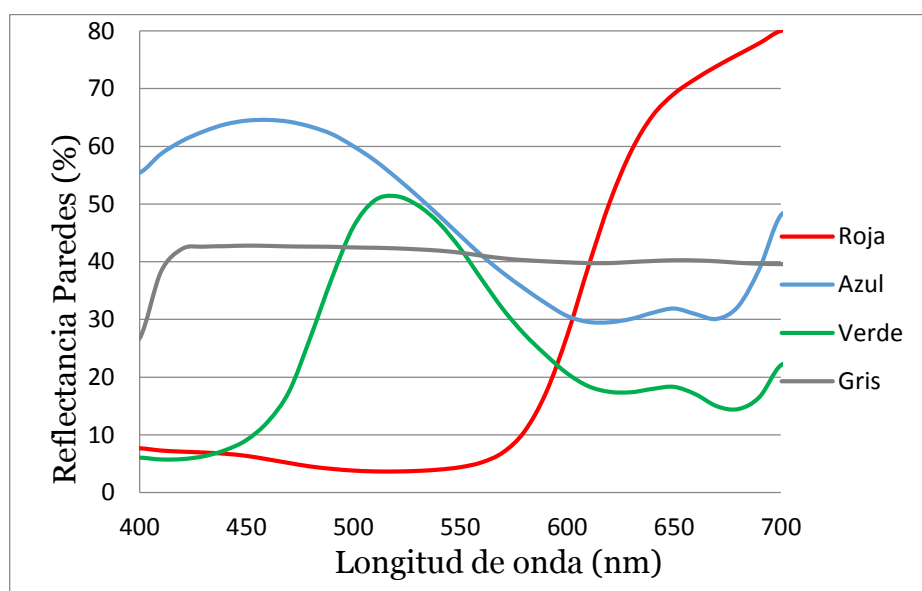
Utilizando una cabina tipo GretagMacbeth, que es lo más adecuado para evaluar la calidad y uniformidad del color, adaptamos los distintos entornos para los iluminantes en los que creemos que más van a influir, colocando unas cartulinas de colores (como se muestra en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10).

Los niveles de iluminancia en el plano de trabajo se miden utilizando un luxómetro CHAUVIN ARNOUX C.A 813, sensor con respuesta CIE y corrección coseno.



**Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10:** Cabina adaptada a los distintos entornos: Munsell N7, rojo, azul y verde.

Midiendo las muestras de las cartulinas utilizadas con un espectrofotómetro Konica-Minolta CM-700d podemos obtener la Figura 3.11, que expresa la reflectancia de cada una para cada longitud de onda.



**Figura 3.11:** Reflectancia para cada uno de los entornos, en cada longitud de onda.

Podemos ver que el entorno más adecuado es el gris, como ya sabíamos, puesto que es lineal, lo que hace que tenga un contraste constante. En cambio, para el

resto de entornos vemos que hay picos más marcados, pues reflejan las longitudes de onda pertenecientes a su color.

Estas curvas de reflectancia son intrínsecas al material aunque el color percibido por el ojo dependerá del tipo de iluminante utilizado. Así que, dependiendo de la distribución espectral del iluminante, puede hacer más difícil la realización del test Farnsworth Munsell 100-Hue. Dificultaría la ordenación de las piezas del test que coincidan con el color del entorno.

- No utilizaremos todos los fondos para cada uno de los iluminantes, sino para los que, según su gráfica de distribución espectral, esperamos que influyan en la ordenación del test.

De esta forma:

- Iluminante A: Gris, rojo y azul.
- LED: Gris, rojo, azul y verde.
- Fluorescente 840: Gris.
- Fluorescente 965: Gris.

### 3.4. Método de medida

Los datos se registraban mediante unas plantillas, en las que aparecían las 85 fichas para cada uno de los iluminantes y también para cada entorno (Anexo 1).

Se anotaban los resultados pudiendo ver en qué ficha se ha fallado y por cuál se ha realizado en cambio de esta.

En estas también se podían añadir notas, según cómo se fuera realizando la prueba, además de las opiniones de los sujetos con cada una.

Una vez analizados los 30 sujetos del estudio, se introdujeron los datos obtenidos en el programa Excel para su posterior análisis y valoración.

## 4. RESULTADOS

Ya realizadas las pruebas y reagrupados los resultados, los compararemos con los que esperaríamos para cada iluminante (según su distribución espectral), como ya hemos comentado.

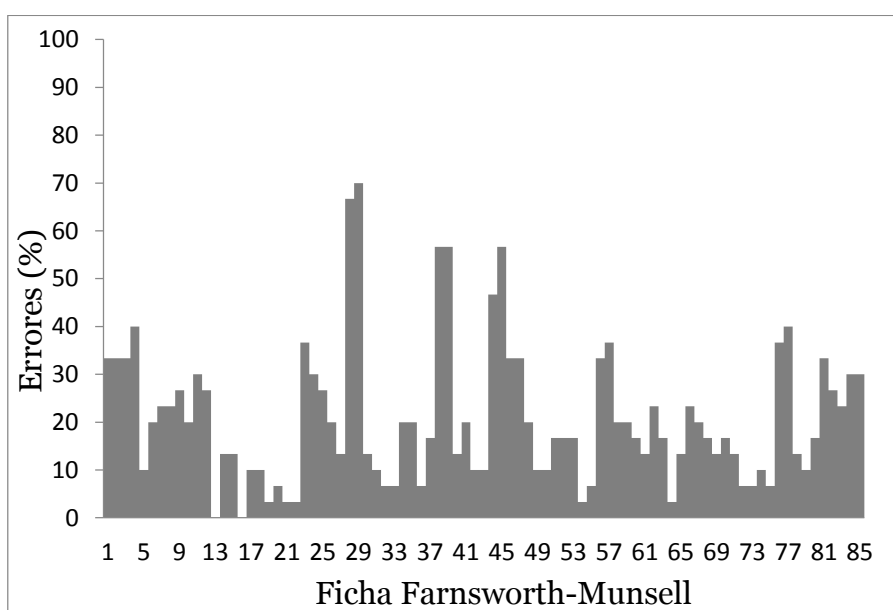
Antes de empezar, es importante tener en cuenta que en las gráficas anteriores (Figura 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6) las longitudes de onda corta, correspondientes a violetas y azules, se encontraban a la izquierda de esta; mientras que en el test, estas se encuentran en las piezas con números más altos (53-63). Las longitudes de onda altas, los rojos, sin embargo, se encuentran en los números bajos (1-15). De la siguiente forma:



**Gráfica 4.1:** Secuencia colorimétrica en Test Farnsworth.  
(Fuente: <http://www.xrite.com/fm-100-hue-test>)

### 4.1. Análisis de los resultados en los test de color

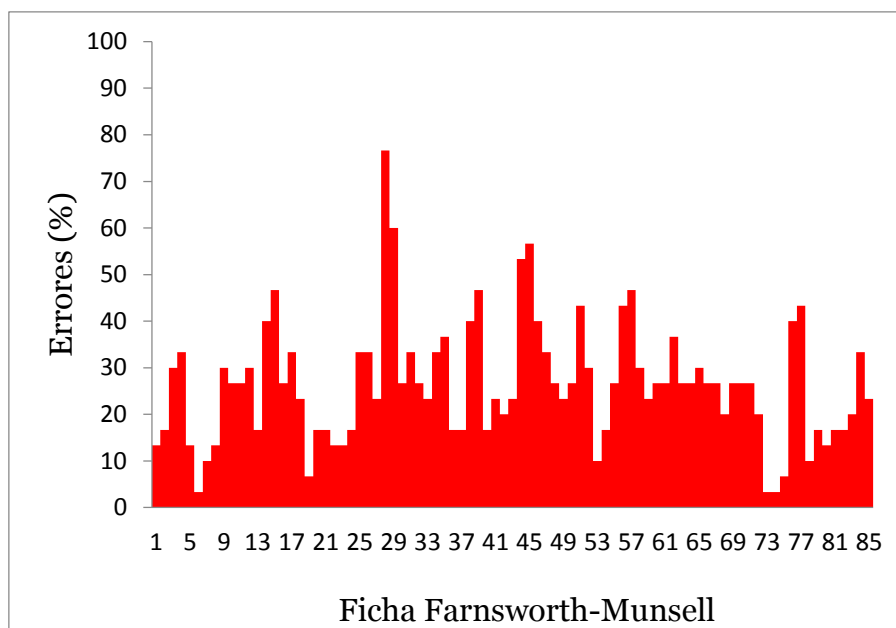
#### - Iluminante A



**Figura 4.1:** Resultados, en porcentaje de errores, del Iluminante A con fondo gris.

En el caso del iluminante A con el fondo de la cabina gris, Figura 4.1, vemos que su pico de error más alto está en la ficha número 29, que corresponde a los verdes, después de este, los picos de errores van disminuyendo su valor pasando del 70% al 20% aproximadamente. Existen mínimos de error de cero en los rojos, fichas 13 y 16, (coincidía con una energía relativa mayor en la gráfica de distribución espectral, Figura 3.3).

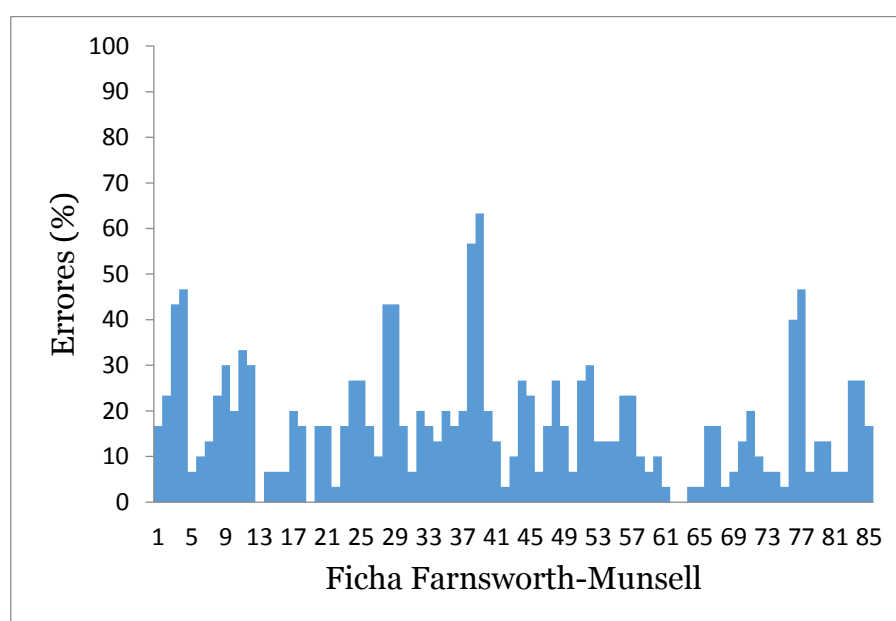
Este entorno fue el favorito para los sujetos al realizar las pruebas con este iluminante, además del más cómodo y relajado.



**Figura 4.2:** Resultados, en porcentaje de errores, del Iluminante A con fondo rojo.

Vemos que al añadir el fondo rojo, Figura 4.2, los errores aumentan, no solo se ven incrementados los picos (que se sitúan en las mismas puntos), alcanzando casi el 80% en el caso de la pieza 29, sino que también los valles tienen valores más altos en el porcentaje de errores, ya no hay valores de cero (cambian los mínimos de los rojos puesto que el entorno no lo favorece y se confunde debido a la reflectancia de los rojos de la cartulina).

La mayoría de los sujetos que realizaron el estudio lo definieron como el peor entorno para este iluminante, y en el que más dudas tuvieron.

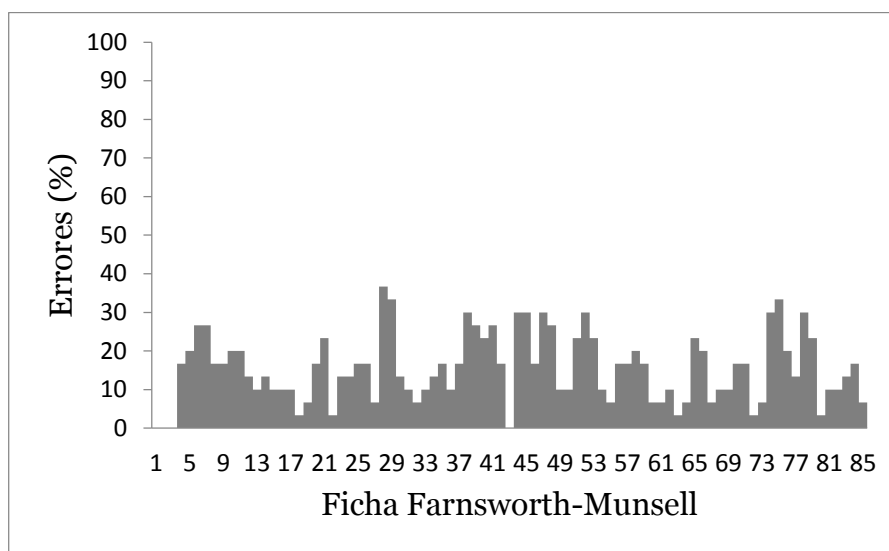


**Figura 4.3:** Resultados, en porcentaje de errores, del Iluminante A con fondo azul.

Con el fondo azul, Figura 4.3, vemos que se ven disminuidos los valores de error respecto al rojo y al gris. Además el pico más alto se ve desplazado hacia los azules (fichas 38 y 39), como esperábamos.

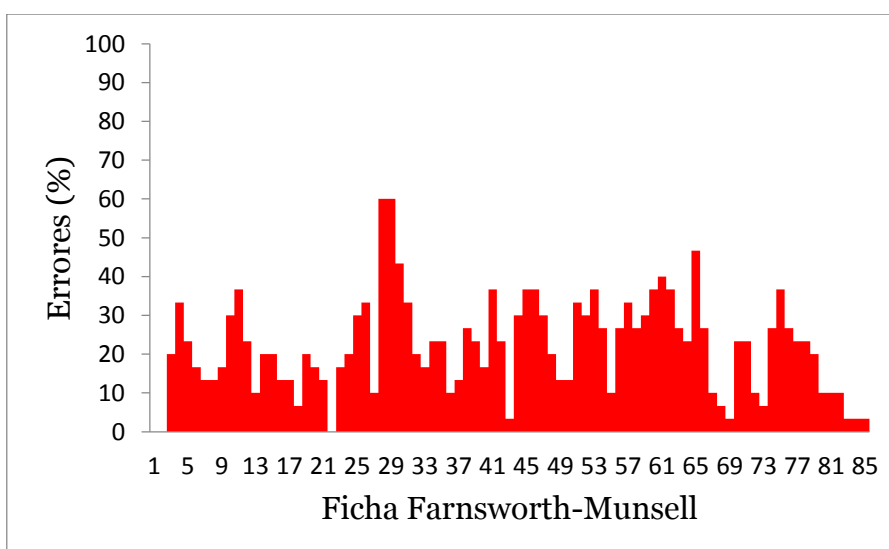
Por otra parte, los sujetos notaban mucho el cambio de entorno y se ven disminuidos los valores de error en todo el espectro, incluida la zona de los azules, donde referían mayor dificultad.

#### - LED blanco frío



**Figura 4.4:** Resultados, en porcentaje de errores, del LED con fondo gris.

En el LED con fondo gris, Figura 4.4, vimos una notable disminución en los valores de error, siendo similares en todo el espectro. Los picos más altos se siguen encontrando en la ficha 29 y además, en la 75.



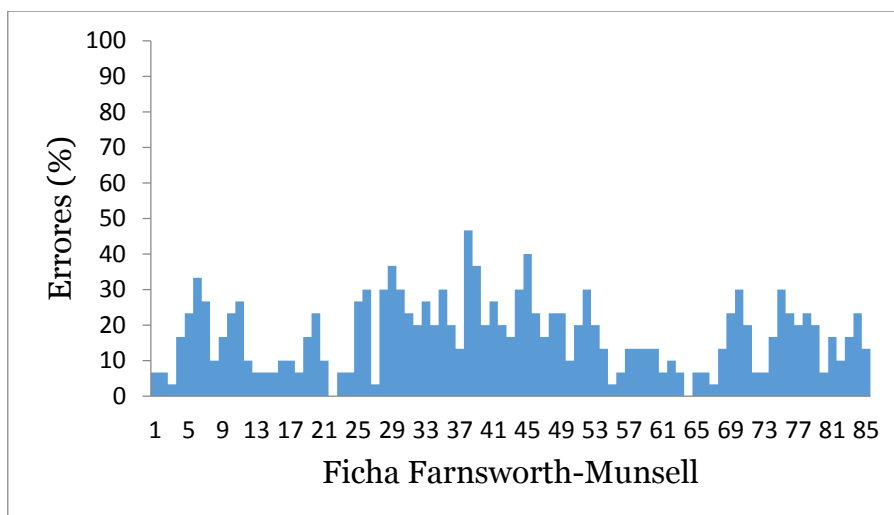
**Figura 4.5:** Resultados, en porcentaje de errores, del LED con fondo rojo.



Con el LED y el fondo rojo, Figura 4.5, vemos que tiene los mismos patrones:

- Disminuye desde el inicio hasta la pieza 21.
- Hay un pico máximo en el 29 y después disminuye fuertemente.
- Como picos secundarios podríamos marcar el 45 y 75.

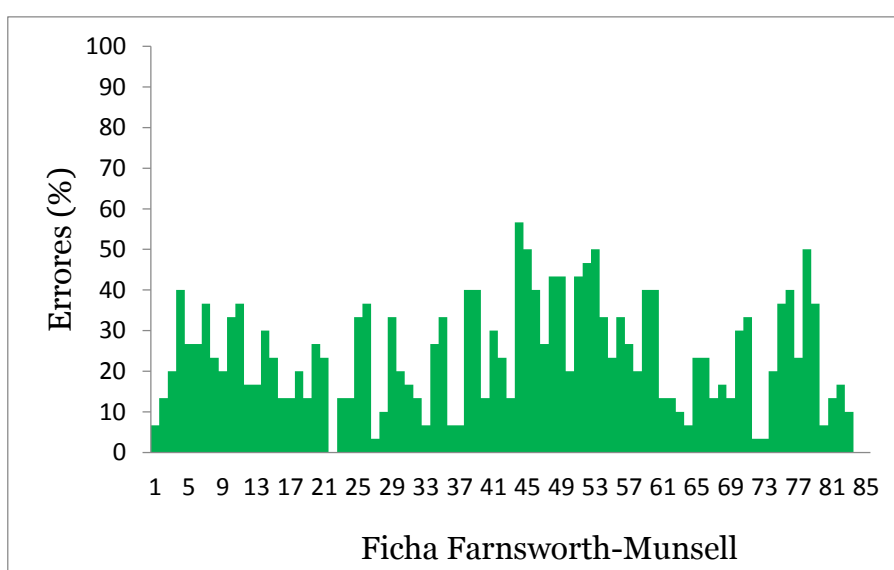
Aun con una forma similar, todos los valores de error se ven incrementados en este entorno, como ha sucedido con el iluminante A.



**Figura 4.6:** Resultados, en porcentaje de errores, del LED con fondo azul.

Con el LED y fondo azul, Figura 4.6, vemos que también sigue el mismo patrón, con menor error que el rojo y picos más altos que en el gris.

Además, como ha sucedido con el iluminante A, el pico más alto de error se desplazado hacia la derecha (de verdes a azules), en la ficha 39, debido al entorno.



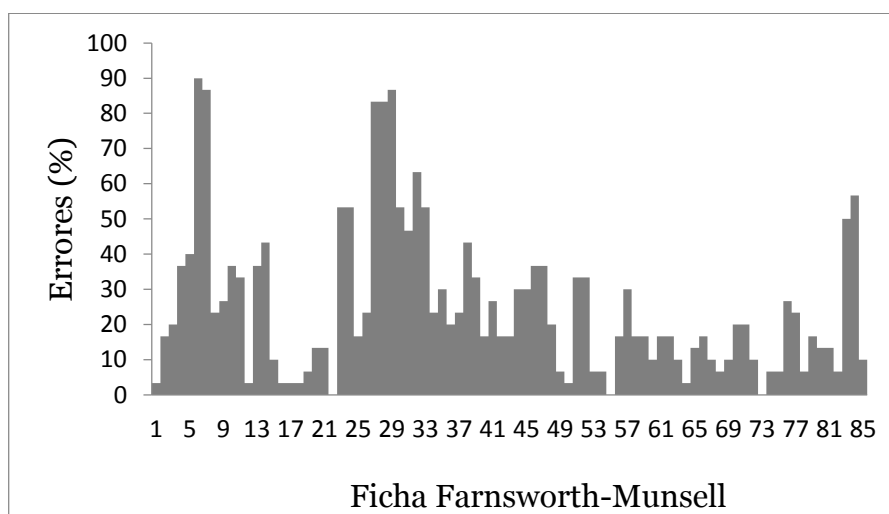
**Figura 4.7:** Resultados, en porcentaje de errores, del LED con fondo verde.

En la Figura 4.7, observamos que varía poco respecto de las anteriores, sin embargo:

- El pico se ha desplazado todavía más hacia la derecha, coincidiendo en la gráfica de reflectancia del entorno.
- Los picos y valles están mucho más marcados y los valores de error son más altos, como en el caso del rojo.

Aun con esto, los sujetos consideraban como entorno más influyente al rojo, también en este iluminante.

#### - Fluorescente 840



**Figura 4.8:** Resultados, en porcentaje de errores, del fluorescente 840 con fondo gris.

En la Figura 4.8, con fondo gris, los valores de error superan los valores de 90% y los picos más marcados están en las fichas 7 y 29 (y uno menos marcado en la 74). Estos coinciden con los valles más bajos correspondientes a la distribución espectral de la lámpara (Figura 3.5).

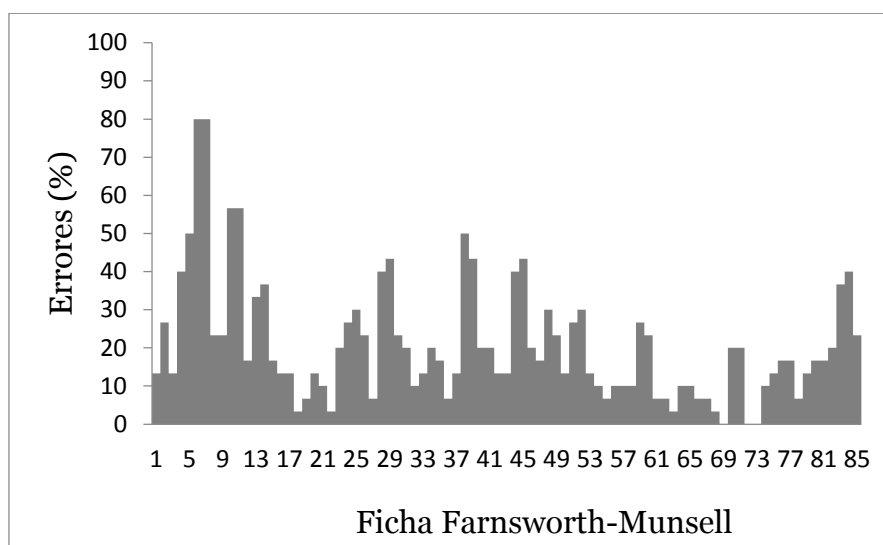
Consideraremos este iluminante como el peor, no solo por la percepción de los sujetos sometidos a las pruebas, sino por los valores de error obtenidos, además de tener el IRC más bajo de todos los iluminantes (77.6).

En concreto, había dos fichas, correspondientes a los números 27 y 32, que parecían “no encajar” en el test, según los sujetos. Estas tenían un color que resaltaba más, como se puede apreciar en la Figura 4.9.



**Figura 4.9:** Piezas 26-33 del test Farnsworth Munsell 100 Hue.

### - Fluorescente 965



**Figura 4.10:** Resultados, en porcentaje de errores, del fluorescente 965 con fondo gris.

Con el fondo gris los valores son similares que en el caso del fluorescente 840, con errores más bajos, reducidos en la ficha 29.

Se obtienen los resultados esperados, por el espectro del iluminante como habíamos comentado, Figura 3.6, y su alto IRC (92.7). De todos los fluorescentes, este es mejor que el anterior para realizar este tipo de test.

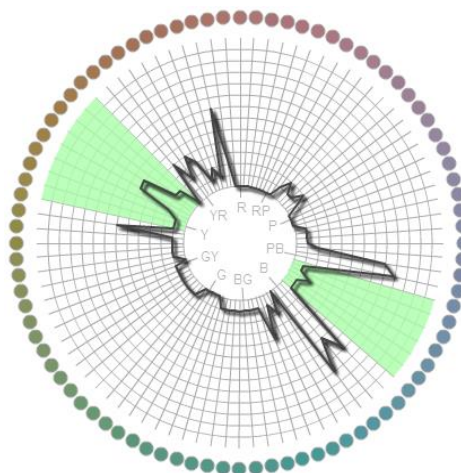
## 4.2. Análisis de los resultados en una discromatopsia

Los resultados anteriores se han realizado con población sana en cuanto a la visión del color.

Para poder comparar, se le realizan las pruebas a una persona con daltonismo, pero no en todas las condiciones, sino en las que, a partir de los resultados anteriores, podemos considerar las mejores, es decir el LED con fondo gris.

Los resultados que se obtienen son:

- Deután - Moderado (deficiencia en los verdes).
- Líneas de confusión en el círculo cromático: Figura 4.11.



**Figura 4.11:** Resultados de error obtenidos en el círculo cromático.

## 5. DISCUSIÓN

El tipo de iluminante, como hemos podido comprobar, influye en los resultados, pero, ¿cuál sería el más apropiado? Se podría decir, que encontramos cierta controversia entre varios estudios existentes.

Primero, analizaremos si las condiciones marcadas por el fabricante son las idóneas realmente para la realización del test con respecto a los factores que hemos ido variando.

El iluminante recomendado por el fabricante es el C de 6.700 K a 50 cm (aproximadamente 270 lux) o más. Esto es debido a que cuando comparamos iluminantes siempre lo hacemos con la luz del día como referencia, pues estamos acostumbrados a los colores que nos ofrece la naturaleza.<sup>8</sup>

Como C es un iluminante teórico (de referencia, semejante a la luz diurna media, sin incluir el rango UV), y se utilizan las fuentes de luz aproximadas al iluminante D-65, en este caso hemos escogido un fluorescente 965, de la misma temperatura de color.

En nuestro fluorescente, el pico más alto de la curva de distribución espectral (Figura 3.6) se encuentra en los verdes (coincidente con la curva de sensibilidad del ojo), lo que procura una mejor discriminación en esta zona. Pero en realidad, el iluminante estándar D-65 se caracteriza por la uniformidad de su grafica de distribución espectral (Figura 1.1).

Vemos que siempre se describe a los similares del iluminante D-65 como mejores para reproducir toda gama de colores, por su semejanza al iluminante día. En realidad, y como hemos podido comprobar no todos son buenos para la realización de estos test, porque a pesar de tener la temperatura de color adecuada, no se especifica la curva de distribución espectral que deberían tener y hay muchas variables de este entre las distintas fuentes de luz consideradas como tal. En nuestro caso, la elección no ha sido la correcta, ya que tiene picos muy marcados capaces de influir en los resultados.

Según el artículo de Hovis y Neumann (1995)<sup>9</sup>, que busca la similitud con el iluminante C, marca como prioritarios los parámetros de IRC y CCT (temperatura de color correlacionada). De esta manera, considera como buenos los valores superiores a 90 en IRC y una temperatura de color de entre 5500 K y 7500 K.

Por contra, en nuestro estudio, hemos visto que a pesar de tener un IRC más alto en el iluminante A (99.1), los resultados obtenidos han sido mejores en el LED, que le supera en CCT (5997 K frente a 2777 K). Basándonos en esto, entre ambos parámetros podríamos dar más importancia al de la temperatura de color (CCT), pero hay que tener en cuenta que la diferencia entre temperaturas era mayor a la que había entre los IRCs. Así que, puesto que a partir del 80 se considera bueno

y son los valores con los que estamos trabajando, si trabajáramos con IRCs más bajos los resultados también se verían afectados (como en el caso del fluorescente 840, de IRC=77.6).

Además, en cuanto a la temperatura de color, y comparando el D-65, que se usa habitualmente, con nuestros resultados del Fluorescente 965 de 6327 K, también podríamos calificar al LED de más fiable. Este primero se “adaptaba” mejor a la discriminación de los verdes por su pico central en su espectro (Figura 3.6), pero los errores obtenidos en general han sido más altos y menos uniformes (Figura 4.10).

Por otro lado, valorando la iluminancia, si tomáramos cifras por debajo del número especificado por el fabricante (<270 lux), posiblemente encontraríamos que ha aumentado notablemente el número de errores. Es decir, que como en el caso del IRC, estamos trabajando con valores altos, pero si aunque el resto de las condiciones son idóneas, reducimos este número por debajo del anteriormente mencionado, sí puede causar cambios relevantes.

Respecto al entorno, aunque varíen los resultados dentro de cada fuente de luz, vemos que el mejor entorno es el gris (entorno neutro, como marca el fabricante), con una reflectancia constante, seguido del azul. Por el contrario, el rojo es el que peores resultados ofrece, pues tiene valores muy bajos en una gran zona de la gráfica de reflectancia anteriormente mostrada (Figura 3.11).

Después de estudiar los parámetros propios del iluminante, al analizar los resultados obtenidos de las medidas, no eran del todo los esperados, esto quiere decir que hay más factores por los que se están viendo influenciados, y que hay que tener en cuenta.

En primer lugar, y lo que más llama la atención, es que las fichas correspondientes a los verdes (alrededor de la 29), tienen un porcentaje de error más alto, independientemente de la fuente de luz y el entorno.

Esto se debe a las llamadas elipses de MacAdam, que definen los límites en la visión del color según estudios estadísticos. De esta forma, en el diagrama cromático, cada elipse contiene colores que no se pueden diferenciar cuando están en la misma luminancia, es decir áreas que inducen al metamerismo (dos estímulos de diferente color que se perciben como el mismo). <sup>10, 11, 12</sup>

Estas elipses, son de mayor tamaño en la zona de los verdes, lo que indica un área de confusión a la hora de diferenciar unos tonos de otros dentro de la elipse, que conlleva un porcentaje mayor de error puesto que los valores están por debajo del mínimo de sensibilidad diferencial. (Puede verse más fácilmente en la representación gráfica del Anexo 2). <sup>10, 13</sup>

Según el artículo de Wood (2010)<sup>10</sup>, estas elipses no están basadas en una propiedad física definible, sino que derivan de mediciones estadísticas de la

visión, y critica que MacAdam no utilizó los suficientes sujetos en sus pruebas, así que su información original es estadísticamente débil. Sin embargo repeticiones posteriores del experimento por parte de otros investigadores han confirmado los datos, y ahora es ampliamente aceptada y utilizada. De hecho, podemos ver su influencia sobre los resultados de nuestro estudio (Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.10).

En este mismo artículo, se relaciona el tamaño de las elipses (medidas en pasos) con la industria de la iluminación, puesto que también varía su tamaño entre las diferentes fuentes de luz, calificando a las incandescentes de mejores (de un paso). Además, podríamos complementar estos datos con los del artículo de Comerford (2010)<sup>14</sup>, que marca que para no tener una gran pérdida en el color, lo fabricantes no deben salirse de las elipses de cuatro pasos, según especifica la ANSI.

También, en varios de estos artículos se nombra a los LEDs relacionándolo con las elipses de dos a cuatro pasos, y en comparación con las lámparas incandescentes, de un paso, deberíamos esperar peores resultados. Por eso, llama la atención que el número de errores en nuestro estudio sea menor que en los de la lámpara incandescente. Puede por ello que sea más importante prestar atención a otros factores; se podría decir que estas elipses nos son fácilmente enlazables con el genérico error en las fichas verdes (especialmente la 29) pero que no conllevan cambios notablemente significativos entre las distintas lámparas. También es importante destacar que el artículo de Tagawa. D. (2013) se ha llevado a cabo con un número muy bajo de sujetos, lo que lo hace estar más limitado.<sup>15</sup>

Por otro lado, este último artículo, junto con “LED Color Mixing: Basics and Background” (s.a)<sup>12</sup>, comenta cómo los LEDs han mejorado en los últimos años sus características de iluminación y capacidad para definir los colores. Aun así, siguen sin ser clasificados como la mejor opción por pequeños fallos en su uniformidad. En cambio, nosotros hemos podido comprobar que estos han ofrecido mejores resultados, y más fiables, que otras lámparas “mejor valoradas” (Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7).

Por otra parte, tanto en el artículo de Comerford (2010) como en “Chromaticity Difference Specification for Light Sources” (2014)<sup>16</sup>, se indica que con respecto a estas elipses, los peores iluminantes son los fluorescentes, siendo estas de cinco y siete pasos (las más grandes, y por tanto peores). En este estudio, hemos comprobado que, efectivamente, el fluorescente 840 nos ha proporcionado los resultados menos fiables para evaluar la visión del color (Figura 4.8); pero por otro lado, el fluorescente 965 (del que esperábamos los mejores resultados) aun no siendo el que mejores resultados ha ofrecido, los consideraríamos como fiables (Figura 4.10). Esto indica que han sido más influyentes otros factores, como ya hemos marcado antes.

En resumen, como ya hemos comentado, el ojo humano no discrimina todos los colores en la misma medida, sino que esta capacidad se ve reducida para los verdes, como se puede distinguir en las elipses de MacAdam, basadas en la estadística de la visión del ojo estándar.<sup>17</sup>

Estas influyen en los resultados de los verdes (ficha 29 y alrededores), pero, aunque además se vean variadas de una fuente de luz a otra, esta segunda parte no es lo suficientemente influyente para comparar y calificar las fuentes de luz de buenas o no.

El siguiente punto que hay que tener en cuenta, es que según la experiencia de los sujetos, y el artículo de Breton, M. E. et al. (1988)<sup>18</sup>, es un test, que tras muchas veces realizado, se “aprende” de alguna forma a hacerlo, sobre todo más en varias pruebas sucesivas que si son intercaladas en el tiempo.

En cualquier caso, aunque esto pueda parecer que reduce la fiabilidad del estudio, hemos visto sujetos que hasta la última prueba no han sido capaces de disminuir el tiempo o el número de errores. Esto nos dice que las lámparas seguían influyendo, ya que además el porcentaje de errores de los resultados no se ha visto disminuido.

Además, siguen existiendo artículos de diferente índole, como el de Gockce, H. et al. (2010)<sup>19</sup>, que pueden verse relacionados. Este expresa que, al colocarse distintos iluminantes en la clínica dental (iluminante D-65 e iluminante T), el grupo con deficiencia en la visión del color en el eje rojo-verde no tuvo éxito en la mezcla de colores con el iluminante D65. En contraste, hubo un aumento significativo en el rendimiento de la adaptación cromática en el grupo de deficiencia con el iluminante T. Además, comenta que una menor temperatura de color redujo drásticamente la correcta puntuación en la coincidencia de color de los grupos de visión sana.

Este estudio, corrobora, como hemos comentado antes, la importancia de la temperatura de color para una fuente de luz y los resultados que es capaz de proporcionar.

Por último, hemos querido comparar los resultados de error obtenidos en los 30 sujetos estudiados, con los de un sujeto daltónico con deficiencia en el eje rojo-verde (Figura 4.11).

Estos también varían, pero se ven incrementados en zonas, y estas suelen definir un eje de deficiencia, al contrario que en los sujetos sanos, donde los errores que encontramos se sitúan en todo el espectro.

Puede que en ciertas situaciones, y si los parámetros de la fuente son bajos, o también dependiendo del entorno, puedan confundirse los resultados de error en uno de estos ejes que definen las discromatopsias dando como resultado una deficiencia que el sujeto no tiene.



Aunque para poder hablar con certeza, en realidad habría que igualar el número de sujetos sanos con el de sujetos daltónicos, de esta forma obtendríamos estadísticas más fiables.

## 6. CONCLUSIONES

Podemos sacar unas conclusiones a partir de los resultados obtenidos. Son los siguientes:

### Factores que influyen referentes al iluminante

El tipo de iluminación es un factor a tener en cuenta a la hora de realizar un test de color, pues puede hacer variar en gran medida los resultados de este.

- La distribución espectral vemos que el factor más influyente. El IRC influye pero no lo suficiente pues el iluminante A daba errores mucho más altos que el LED teniendo un IRC de 99.1 frente a 81.6.

Sería conveniente que el fabricante, además de especificar temperatura de color y luxes, estableciera una curva de distribución espectral para el uso del test, pues hemos visto que en el caso del fluorescente 965, que comparte temperatura de color con el iluminante teórico D-65, y con una buena iluminancia, no se obtenían los mejores resultados.

- La temperatura de color también es un factor relevante. En las instrucciones del test también se especifica que ha de ser aproximadamente 6700 K (para asemejarse en el máximo posible al iluminante C estándar). El iluminante A no cumple estas condiciones, el LED sin embargo se aproxima (5997 K) de manera que se ve reflejado en los resultados, pues han sido mejores.
- La iluminancia en el plano de trabajo, tampoco es un factor destacable puesto que trabajamos con valores superiores a 600 lux, es decir que podrían considerarse buenas condiciones. Por debajo de 270 luxes, valor marcado por el fabricante, no se podrían realizar las pruebas esperando resultados fiables.
- El entorno, como hemos podido comprobar, es otro factor influyente, siendo importante que la reflectancia sea la misma para todas las longitudes de onda.



### Factores que influyen relacionados con la visión

También hay unos factores, ajenos al iluminante, que hay que tener en cuenta, pues afectan a los resultados.

- Los valores de error en las fichas de color verde siempre se verán incrementados debido a una discriminación de los colores en nuestro ojo que varía en función de la longitud de onda. Esto se debe a las elipses de MacAdam, creadas a partir de la estadística de visión del ojo estándar.
- Este test, como desventaja, tras repetirlo tiene cierta capacidad de aprendizaje, así que, para realizar un estudio lo más fiable posible habría que reducir las fuentes de luz a lo estrictamente necesario. Además, sería conveniente que las pruebas no se realicen de forma consecutiva.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Wyszecki, G. y Stiles, W.S. (1982). "Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae." New York: Wiley.
2. (1971). CIE (Comisión Internacional de la Iluminación). France, Paris.
3. Guía Técnica de Iluminación Eficiente. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A. 2006.
4. Artigas, J. M., Capilla, P., Pujol, J. (2002). "Tecnología del color." Valencia: Maite Simon.
5. Wright, W. D. (1964). "The measurement of colour." London: Adam Hilger LTD.
6. Dain, S. J. Clinical color vision test. *Clinical and experimental optometry*. 2004.
7. Cochrane, S. The Munsell Color System: A scientific compromise from the world of art. *Elsevier*. 2014.
8. Foster, D. H. Color constancy. *Elsevier*. 2011.
9. Hovis, J. K., Neumann, P. Colorimetric Analyses of Various Light Sources for the D-15 Color Vision Test. *Optometry and Vision Science*. 1995; 72 (9): 667-678.
10. Wood, M. MacAdam Ellipses. *Out of the Wood*. 2010.
11. Brown, W. R. J., MacAdam, D. L. Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences. *Journal of the Optical Society of America*. 1949.
12. LED Color Mixing: Basics and Background. *Cree*. (s.a)
13. Kuehni, R. G. Color-tolerance data and the tentative CIE 976 L\*a\*b\* formula. (s.p.i). 1976.
14. Comerford, R. LED Specs - Understanding the Color White. 2011.

15. Tagawa D. Evaluation of color discrimination under LED lighting by two types of 100 –Hue Test. (s.p.i). 2013.
16. Chromaticity Difference Specification for Light Sources. *CIE*. 2014.
17. Romero, J., García, J. A., García, A. Curso introductorio a la Óptica Fisiológica (Óptica ocular y Psicología de la Visión). Granada: COMARES. 1996.
18. Breton, M. E., Fletcher, D. E., Krupin, T. Influence of serial practice on Farnsworth- Munsell 100-Hue scores: The learning effect. *Applied Optics*. 1988; 27 (6).
19. Gokce, H. S., Piskin, B., Ceyhan, D., Gokce, S. M., Arisan, V. Shade matching performance of normal and color vision-deficient dental professionals with standard daylight and tungsten illuminants. *J Prosthet Dent*. 2010; 103 (3):139-47.

## 8. ANEXOS

**ANEXO 1.** Tablas utilizadas para la anotación de los resultados de cada uno de los iluminantes:

- LED

**FARNSWORTH 100 HUE SCORE SHEET**

NOMBRE \_\_\_\_\_

DIA EXAMEN \_\_\_\_\_

**LAMPARA**

T<sub>h</sub> COLOR \_\_\_\_\_

E (Lux) \_\_\_\_\_

Notas \_\_\_\_\_

LED				
Pared	Gris	Roja	Azul	Verde
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
85				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

LED				
Pared	Gris	Roja	Azul	Verde
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				

LED				
Pared	Gris	Roja	Azul	Verde
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				

LED				
Pared	Gris	Roja	Azul	Verde
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				

- Iluminante A

FARNSWORTH 100 HUE SCORE SHEET

NOMBRE \_\_\_\_\_  
DIA EXAMEN \_\_\_\_\_

LAMPARA
T <sub>h</sub> COLOR
E (Lux)
Notas

Iluminante A			
Pared	Gris	Roja	Azul
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
85			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			

Iluminante A			
Pared	Gris	Roja	Azul
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			

Iluminante A			
Pared	Gris	Roja	Azul
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			

Iluminante A			
Pared	Gris	Roja	Azul
Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #	Actual Disc #
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75			
76			
77			
78			
79			
80			
81			
82			
83			
84			

- Fluorescente 9650 y 8400

FARNSWORTH 100 HUE SCORE SHEET

NOMBRE \_\_\_\_\_  
DIA EXAMEN \_\_\_\_\_

LAMPARA
T* COLOR
E (Lux)
Notas

Iluminante D65		Iluminante D65		Iluminante D65		Iluminante D65	
Pared	Gris	Pared	Gris	Pared	Gris	Pared	Gris
Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #
85		22		43		64	
1		23		44		65	
2		24		45		66	
3		25		46		67	
4		26		47		68	
5		27		48		69	
6		28		49		70	
7		29		50		71	
8		30		51		72	
9		31		52		73	
10		32		53		74	
11		33		54		75	
12		34		55		76	
13		35		56		77	
14		36		57		78	
15		37		58		79	
16		38		59		80	
17		39		60		81	
18		40		61		82	
19		41		62		83	
20		42		63		84	
21							

FARNSWORTH 100 HUE SCORE SHEET

NOMBRE \_\_\_\_\_  
DIA EXAMEN \_\_\_\_\_

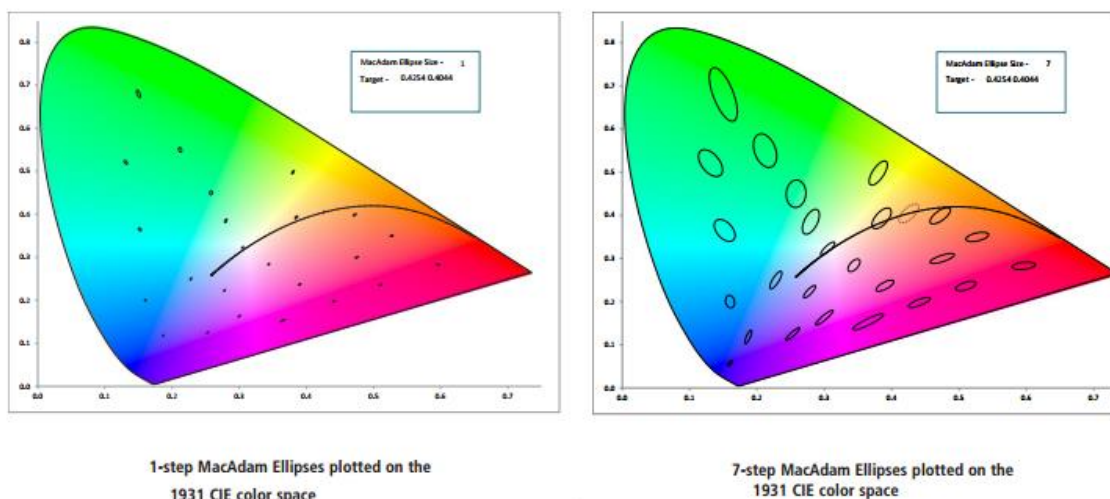
LAMPARA
T* COLOR
E (Lux)
Notas

Fluorescente		Fluorescente		Fluorescente		Fluorescente	
Pared	Gris	Pared	Gris	Pared	Gris	Pared	Gris
Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #	Disc #	Actual Disc #
85		22		43		64	
1		23		44		65	
2		24		45		66	
3		25		46		67	
4		26		47		68	
5		27		48		69	
6		28		49		70	
7		29		50		71	
8		30		51		72	
9		31		52		73	
10		32		53		74	
11		33		54		75	
12		34		55		76	
13		35		56		77	
14		36		57		78	
15		37		58		79	
16		38		59		80	
17		39		60		81	
18		40		61		82	
19		41		62		83	
20		42		63		84	
21							

## ANEXO 2. Elipses de MacAdam:

A la izquierda, la representación de las elipses es a pasos de 1; en la derecha, las elipses son de 7 pasos, para una mejor apreciación.

Se puede apreciar a simple vista como el tamaño de estas es mayor en los verdes que en el resto de longitudes de onda.



## ANEXO 3. Numeración de las fichas test Farnsworth Munsell 100 Hue:

