



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Memoria de Trabajo Fin de Grado

Evaluación colorimétrica de dispositivos de impresión gráfica

Grado en Óptica y Optometría. Universidad de Granada

Curso 2018-2019

Alumno/a:

Ana Belén López Baldomero

Código del TFG

TFGOO-A-17-18_6

Tutores Académicos:

D. Antonio Manuel Rubiño López

D. Carlos Salas Hita

Departamento

Óptica

Óptica

Granada, a 06 de Junio de 2019



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Declaración de originalidad de los Trabajos Fin de Grado

Grado en Óptica y Optometría. Universidad de Granada

Curso 2018-2019

Alumno/a: Ana Belén López Baldomero

Título del TFG: Evaluación colorimétrica de dispositivos de impresión gráfica

Tutores académicos: D. Antonio Manuel Rubiño López y D. Carlos Salas Hita

Declaro explícitamente que el Trabajo Fin de Grado presentado es original, entendido en el sentido de que no he utilizado fuentes sin citarlas debidamente.

En Granada, a 06 de Junio de 2019

Firmado: Ana Belén López Baldomero

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. MATERIAL Y MÉTODOS	4
3.1. Montaje experimental.....	4
3.2. Medida de la estabilidad temporal del dispositivo	7
3.3. Cálculo del CRI.....	7
3.4. Medida de la uniformidad de distintos tipos de papel.....	8
3.5. Obtención de la gama de color.....	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
4.1. Resultados en la medida de la estabilidad temporal del dispositivo	10
4.1.a. Fuente de iluminación D65.....	10
4.1.b. Fuente de iluminación TL84	16
4.1.c. Fuente de iluminación F	21
4.1.d. Fuente de iluminación LED.....	24
4.2. Resultados en el cálculo del CRI.....	30
4.3. Elección de la fuente	31
4.4. Resultados y elección del tipo de papel.....	31
4.5. Resultados y discusión de la gama de color	32
5. CONCLUSIONES	39
6. AGRADECIMIENTOS	40
7. REFERENCIAS	41
8. ANEXOS	43
8.1. Gráficas fuente de iluminación D65.....	43
8.2. Gráficas fuente de iluminación TL84.....	49
8.3. Gráficas fuente de iluminación F	55

8.4. Gráficas fuente de iluminación LED.....	60
8.5. Numeración en el patrón de color	67

1. INTRODUCCIÓN

La CIE (Comisión Internacional del Color) en 1970 define el color percibido como un aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura basándose en las diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación. Para describir el color debemos hablar tanto de fenómenos físicos (producción del estímulo luminoso) como de fenómenos subjetivos (interpretación del mismo mediante el sistema visual) (Berns, 2000). La percepción del color es resultado de la interacción de tres elementos básicos: la muestra, el observador y la fuente de iluminación (Huertas *et al.*, 2007).

La fuente de iluminación puede ser primaria, si emite luz por sí misma, o secundaria, si reemite la luz procedente de una fuente primaria por difusión o reflexión. Para determinar cómo emite esa fuente calculamos la curva de emisión espectral, en la que se representa el flujo radiante emitido por la fuente en cada longitud de onda del espectro visible (de 380 a 780 nm aproximadamente), siendo ese flujo la energía emitida, transportada o recibida por unidad de tiempo en forma de radiación:

$$F_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Con t en segundos (s), Q_e en julios (J) y F_e en vatios (W). En el caso de que la fuente sea secundaria se suele usar la radiancia espectral en lugar del flujo radiante espectral (hablamos de radiancia o flujo espectral cuando se consideran estas magnitudes en cada una de las longitudes de onda del espectro visible y no en su totalidad), siendo esta el flujo emitido por unidad de superficie proyectada en la dirección de propagación y de ángulo sólido que contiene a dicha dirección cuando hablamos de fuentes extensas:

$$L_e = \frac{d^2F_e}{dw ds \cos \theta}$$

Con F_e en vatios (W), w en estereorradianes (sr), θ el ángulo que forma la normal a la fuente extensa con la dirección de propagación, s en metros cuadrados (m^2) y L_e (W/m^2sr).

Para poder reproducir medidas del color la CIE ha estandarizado algunas curvas de emisión espectral. Podemos definir un iluminante como una distribución espectral de energías que puede corresponderse o no con una fuente de iluminación real. Así tenemos el iluminante A, que representa a las lámparas de incandescencia, o el iluminante D65, que representa a la luz de día con una temperatura de color de 6504 K, siendo esta la temperatura del cuerpo negro para la cual la curva de emisión espectral de la fuente considerada y el cuerpo negro son similares (Schanda, 2007).

Otra forma de clasificar las fuentes es en función de su CRI (Color Rendering Index o Índice de rendimiento del color). El CRI (Ra) nos indica cómo son los colores percibidos al ser iluminados por una fuente de luz en comparación con una fuente ideal, viendo el grado de fidelidad a la hora de reproducir el color (Malacara, 2011).

Según las leyes de Grassman, una característica del sistema visual humano es que cualquier color puede ser igualado con la mezcla aditiva de tres colores primarios (trivarianza cromática). En 1931 la CIE creó un sistema (RGB CIE-1931) para definir un color mediante los llamados valores triestímulo, R, G y B, que dependían del observador (estandarizado con el Observador Patrón mediante las llamadas funciones de mezcla) y de la curva de emisión espectral asociada al estímulo de color. A partir de estos valores triestímulo se podían calcular las coordenadas de cromaticidad, r, g y b. El problema con este sistema es que al representar los primarios [R], [G], [B] se obtiene un diagrama en el que hay valores negativos para algunas coordenadas de cromaticidad de estímulos reales. Para obtener un sistema de representación del color en el que las coordenadas de cromaticidad de estímulos reales fueran siempre positivas se buscaron tres primarios irreales, [X], [Y] y [Z], obteniendo las nuevas funciones de mezcla, $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$, y los nuevos valores triestímulo:

$$X = k_m \sum_{380}^{780} Q_{e\lambda} \bar{x}_\lambda \Delta\lambda$$

$$Y = k_m \sum_{380}^{780} Q_{e\lambda} \bar{y}_\lambda \Delta\lambda$$

$$Z = k_m \sum_{380}^{780} Q_{e\lambda} \bar{z}_\lambda \Delta\lambda$$

Siendo k_m (eficacia luminosa máxima) = 683 lm/W (lm = lúmenes); $Q_{e\lambda}$ la magnitud radiométrica espectral medida a intervalos de longitud de onda dados por $\Delta\lambda$ (nm); y $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$, las funciones de mezcla. En el caso de que $Q_{e\lambda}$ fuera la radiancia espectral, el valor triestímulo Y representaría la luminancia:

$$L_v = k_m \sum_{380}^{780} L_{e\lambda} * V_\lambda * \Delta\lambda$$

Con V_λ la eficiencia luminosa espectral, $L_{e\lambda}$ la radiancia espectral ($W/m^2 sr nm$) y L_v (cd/m^2).

Podemos calcular las coordenadas de cromaticidad (x,y) a partir de los valores triestímulo como:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Así podemos definir cualquier color mediante sus coordenadas de cromaticidad, x e y, y el valor triestímulo Y.

En búsqueda de un sistema de representación del color más uniforme y que permitiera la medida de diferencias del color de forma más fiable, se desarrolló en 1976 el sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*). A partir de los valores triestímulo X, Y, Z de un color dado y de los valores triestímulo X_0 , Y_0 , Z_0 de un blanco de referencia se obtiene L^* , a^* y b^* , donde L^* representa la luminosidad, a^* la cantidad de rojo-verde y b^* la cantidad de amarillo-azul.

En este sistema se puede calcular el croma como:

$$C_{ab}^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$$

Asimismo se calcula el tono como:

$$H_{ab}^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Podemos definir la diferencia de color como la distancia entre los dos estímulos dentro del espacio CIELAB:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

También se puede expresar esta diferencia en términos de luminosidad, croma y tono (Fairchild, 2005):

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2]^{1/2}$$

Como sabemos existen dos tipos de mezclas de color: aditivas, en las que se mezclan luces de los tres primarios, rojo, verde y azul, y sustractivas, en las que se mezclan pigmentos de los tres primarios, magenta, cian y amarillo, que absorben parte de la luz que les llega. Los colores primarios de las mezclas aditivas son los secundarios de las mezclas sustractivas y viceversa (Hunt, 2004). Las impresoras usan tanto la mezcla sustractiva como la aditiva (mezcla mixta) para generar imágenes a color (Berns, 2000).

Existen diversos tipos de dispositivos de impresión gráfica. Algunos de los más ampliamente usados son precisamente los que vamos a utilizar para este trabajo: impresoras láser y de inyección de tinta. En las impresoras láser la imagen a imprimir se forma mediante un haz láser en un tambor sensible a la luz. El tambor recoge la tinta en polvo (tónor) usando una carga electrostática y la graba en el papel. Después, un rodillo caliente funde el tónor, fijando la imagen en el papel

(Reilly, 2003). En las impresoras de inyección de tinta, un cabezal de impresión deposita pequeñas gotas de tinta sobre el papel, generando imágenes a color con una alta resolución (Shibata *et al.*, 2009).

La gama de colores de un dispositivo de impresión gráfica es el conjunto de todos los colores que pueden ser reproducidos por este dispositivo bajo unas determinadas condiciones de observación. Esta gama suele ser representada en una proyección 2D en el diagrama de cromaticidad x , y o en el plano a^*b^* en CIELAB, aunque realmente es un volumen en el espacio 3D. Hay dos formas de obtener esta gama: una forma empírica, en la que se miden una serie de muestras impresas y se describen los límites de la gama, y una forma o método analítico, el cual genera modelos que describen el comportamiento de la impresora (Green y MacDonald, 2002). Nosotros en este trabajo vamos a usar el primero de los métodos.

2. OBJETIVOS

Los objetivos planteados en este TFG son los siguientes:

- ❖ Desarrollo de un sistema automatizado de medida del color para muestras generadas mediante dispositivos de impresión gráfica.
- ❖ Evaluación de la estabilidad temporal y del índice de rendimiento del color obtenido con distintas fuentes de iluminación.
- ❖ Evaluación de la uniformidad en distintos tipos de papel.
- ❖ Comparación de la gama de color generada por distintos tipos de dispositivos de impresión gráfica con diferentes tipos de papel.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Los principales dispositivos e instrumentos usados en este TFG han sido:

- Espectrorradiómetro (PhotoResearch SpectraScan PR-670).
- Cabina de medida del color (Verivide CAC 120).
- Módulos automatizados de precisión para el desplazamiento lineal de las muestras en dos dimensiones (Zaber).
- Blanco de referencia (white reflectance standard, Edmund optics).
- Ordenador y software de control.
- Impresora de inyección de tinta (Epson XP-530) e impresora laser (Canon iR-ADV C2020i).

3.1 Montaje experimental

Lo primero que hicimos fue realizar el montaje experimental. Introducimos los módulos de desplazamiento en la cabina de iluminación, que proporciona una iluminación difusa, y los

conectamos al ordenador (Fig. 1). También conectamos el espectrorradiómetro y probamos el programa que controla la toma de medidas.



Figura 1. Módulos automatizados de desplazamiento dentro de la cabina de iluminación. Espectrorradiómetro y ordenador usados en el montaje. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El programa usado fue desarrollado previamente en C# y se denomina Calibra1331 (Fig. 2).

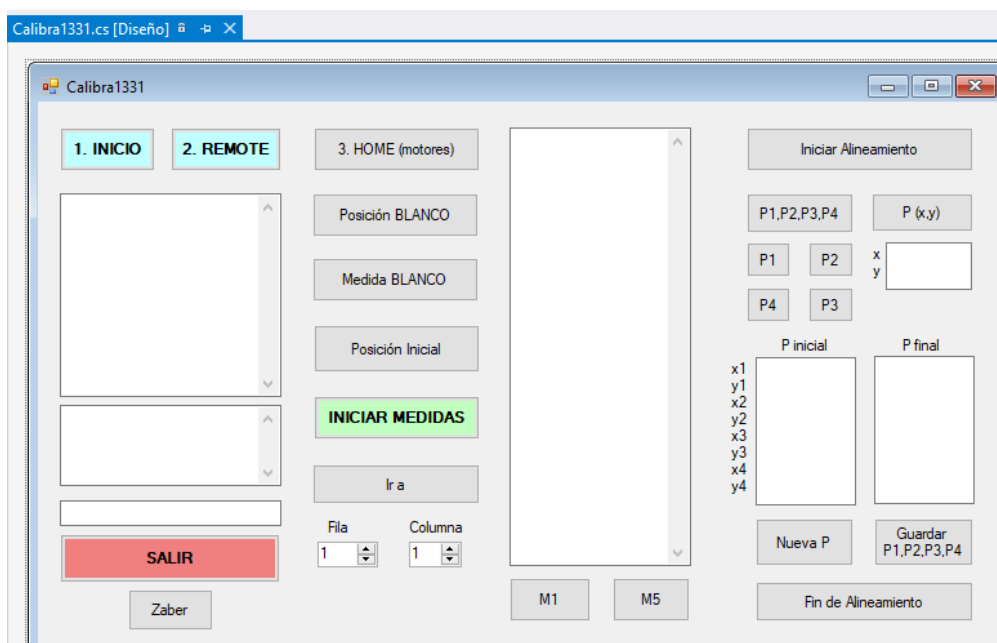


Figura 2. Interfaz del programa de control Calibra1331. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El soporte donde se coloca el patrón que vamos a medir presenta una inclinación de 45° y está montado sobre un módulo de desplazamiento lineal que a su vez va montado sobre un segundo módulo con su eje perpendicular al primero. El dispositivo está situado en el centro de la cabina de iluminación y frente a él, sobre un trípode, está colocado el espectrorradiómetro formando un ángulo de 90° respecto al soporte donde se coloca el patrón de color. Como la cabina nos

proporciona una iluminación difusa, donde el objeto es iluminado desde todas las direcciones, la geometría de iluminación/observación es difusa/0° (el espectrorradiómetro se encuentra perpendicular a la superficie de medida) (Malacara, 2011). Las medidas se realizaron en una habitación a oscuras, sin ningún tipo de luces parásitas que pudieran interferir en los resultados.

Para generar la gama de color de la impresora, esta usa tres primarios: cian, magenta y amarillo. Cualquier color vendría dado por la mezcla de una cantidad determinada de cada uno de los tres primarios. Los inyectores de tinta permiten variar la cantidad de cada uno de los primarios desde 0 hasta 100, de 1 en 1. El patrón presenta $11^3 = 1331$ muestras, en las que se han variado los tres primarios (CMY, cian, magenta y amarillo) de 0 a 100 unidades en pasos de 10 unidades (Fig. 3).



Figura 3. Patrón con 1331 muestras colocado sobre el soporte a 45°. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Lo primero que realiza el programa Calibra1331, después de comprobar que todos los puertos están conectados, es leer el archivo que contiene la posición de los puntos P1, P2, P3 y P4 del último alineamiento, situados en el patrón de color. Estos puntos se corresponden con:

- El primer cuadrado o la primera muestra de la segunda fila (P1);
- El último cuadrado de la segunda fila (P2);
- El último cuadrado de la última columna (P3);
- El penúltimo cuadrado (fila 30) de la primera columna (P4).

Esto es así debido a que el primer cuadrado de la primera fila es demasiado claro (casi blanco), siendo más difícil saber si el espectrorradiómetro apunta exactamente al centro del mismo cuando calibramos su posición. Además, cogemos la penúltima fila porque es la última que está completa. Estos puntos (P1, 2, 3 y 4) se utilizan para localizar cada cuadrado dentro del patrón por interpolación. Hemos usado una apertura en el espectrorradiómetro de $1/2^\circ$.

Es importante medir el blanco de referencia siempre antes de empezar una serie de medidas y al acabarla, para comprobar su estabilidad durante todo el proceso de medición. Una vez iniciamos las medidas, los resultados de cada cuadrado o muestra se van guardando en archivos de texto

independientes. El espectrorradiómetro nos da las radiancias espectrales ($L_{e\lambda}$) en $W/m^2 sr nm$ cada 2 nm, desde 380 hasta 780 nm, de cada cuadrado. Una serie de medidas del patrón completo dura aproximadamente 7 horas y 40 minutos.

3.2 Medida de la estabilidad temporal del dispositivo

Lo primero que nos planteamos fue cuánto tiempo había que dejar encendida la cabina de iluminación (y el espectrorradiómetro) hasta que se estabilizara su emisión y cuál de las fuentes de iluminación era la más estable a lo largo del tiempo. Para medir la estabilidad temporal decidimos dejar el sistema midiendo el blanco de referencia durante 8 horas, aproximadamente lo que tardamos en realizar una serie completa de medidas del patrón, con un intervalo de tiempo entre medidas de 1 minuto, obteniendo 481 medidas del blanco. Pusimos el programa a medir justo en el momento de encender la cabina. Esto lo hicimos para las cuatro fuentes disponibles en la cabina de iluminación: D65, TL84, F y LED.

Para poder analizar estos datos se creó un programa que los guardaba todos por columnas en un archivo de texto (extensión .asc), que luego se pasaría a Excel. Así obteníamos los datos en tablas (481x201) ordenados en función de la longitud de onda y del minuto en el que se realizó la medida. De cada fuente hicimos un estudio tanto de la radiancia como del color, usando el Observador Patrón CIE 1931 para estos últimos.

3.3 Cálculo del CRI

Además del tiempo de estabilización nos pareció interesante el estudio del CRI (Color Rendering Index o Índice de Rendimiento del Color) para determinar la fuente de iluminación más adecuada para nuestras medidas. En la figura 4 podemos ver los pasos que hay que seguir para realizar este cálculo. Primero se calcula la curva de emisión espectral del iluminante de referencia que tiene la misma temperatura de color que la fuente a examinar. Una vez que tenemos también la curva de emisión espectral de la fuente test, se calculan virtualmente los valores triestímulo X, Y, Z que se obtendrían al iluminar ocho ejemplos que nos proporciona la CIE (TCS o Test Color Samples), con el iluminante de referencia y con la fuente test. Después, los valores triestímulo de los ocho ejemplos bajo la fuente test son transformados mediante la transformada de von Kries para tener en cuenta la adaptación cromática. En el siguiente paso se calculan los valores U^* V^* W^* de cada ejemplo en el sistema CIE 1964 (funciones de mezcla con un campo de 10°). Se calcula la diferencia de color entre cada ejemplo y finalmente, el CRI (Ra) (Li *et al.*, 2012). El Ra toma valores de 0 a 100, siendo 100 el grado de fidelidad máximo de reproducción del color.

Debido a que el cálculo del Ra no era muy preciso cuando se calculaba para fuentes con estrecho ancho de banda o con varios picos, como ocurre en algunas lámparas fluorescentes o en los ledes, en los últimos años se ha desarrollado una nueva forma de calcular el Ra, llamado CRI2012, que es más fiable. (Smet *et al.*, 2013).

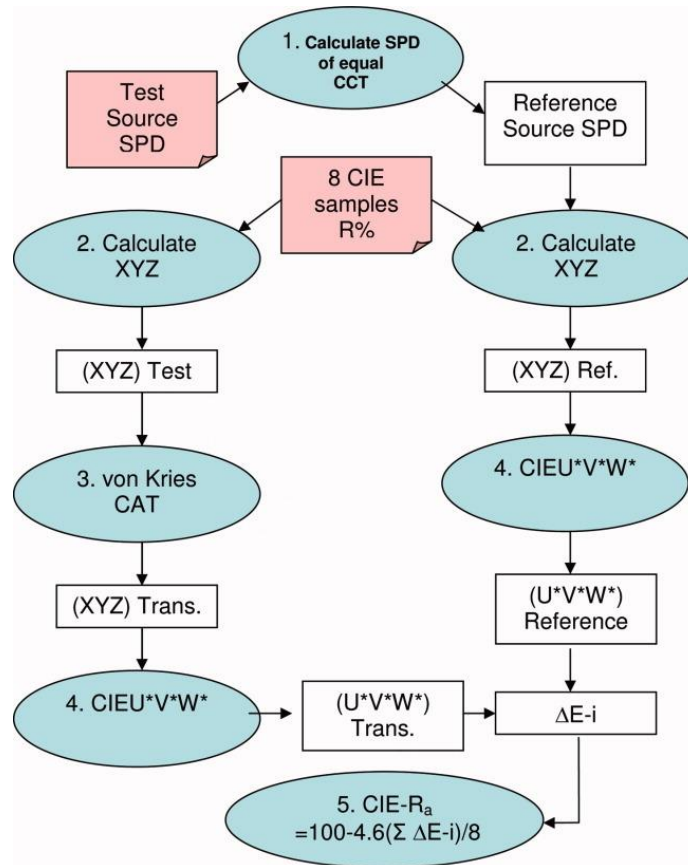


Figura 4. Esquema para el cálculo del Ra. Fuente: Li et al., 2012.

Puesto que los cálculos eran bastante complejos, se ha decidido usar un Excel desarrollado por varios investigadores (Smet *et al.*, 2015) para calcular el CRI. Este calcula tanto el índice de rendimiento del color antiguo, Ra, como el nuevo, CRI2012. Para realizar el cálculo sólo hay que introducir los valores de radiancia normalizados para cada fuente de 380 a 780 nm, de 5 en 5 nm. Debido a que nuestros datos están recogidos de 2 en 2 nm se ha realizado una interpolación lineal a la media de la radiancia calculada a partir del minuto de estabilización para cada fuente.

3.4. Medida de la uniformidad de distintos tipos de papel

La siguiente cuestión era elegir un tipo de papel para imprimir nuestro patrón de color. Para ello medimos la radiancia en cada punto del papel sin imprimir las muestras, usando como fuente la elegida en el apartado anterior. Esto se hace para ver si se encuentran diferencias de color en los 1331 puntos que luego mide el espectrorradiómetro y para ver de qué orden son esas diferencias.

Elegimos tres tipos de papel: folio, papel fotográfico y formato de dibujo. Para caracterizar el papel podemos indicar el tipo de papel (fotográfico, mate, glossy, etc) y el gramaje (Li *et al.*, 2016). Otras fuentes indican que entre las características más importantes del papel para la impresión se encuentran el formato, el gramaje, la opacidad y la textura (Fernández-Rechea *et al.*, 2003). En nuestro caso lo hemos caracterizado en función de todos los datos que hemos podido hallar sobre ellos:

Tipo de papel	Folio	Papel fotográfico	Papel de dibujo
Formato	A4	A4	A4
Gramaje	80 g/m ²	167 g/m ²	150 g/m ²
Acabado	Levemente satinado	Mate	Levemente satinado
Luminosidad	112%	97%	
Opacidad	95%	94%	
Marca	Navigator Universal Copy Paper	Epson	Liderpapel

Tabla 1. Características de los tipos de papel estudiados en el trabajo.

El método para realizar la medida es el siguiente: colocamos la muestra sobre un fondo negro como nos dice la norma ANSI/CGATS.5-1993 (Fernández-Rechea *et al*, 2003), y usamos una geometría de iluminación/observación difusa/0° (Salas, 2016), recomendada por la CIE en 1986 (Fig. 5). Antes y después de realizar las medidas para cada papel se midió el blanco de referencia.

Una vez realizadas las medidas de radiancia para los tres tipos de papel, se ordenaron todos los datos por columnas en un documento con extensión .asc para pasarlo después a Excel y calcular los valores triestímulo y coordenadas de cromaticidad de cada punto. Los valores x, y, Y se introdujeron en un programa desarrollado en Visual Basic que calculaba la diferencia de color de cada punto del papel con los demás puntos. Para ello el programa pasa primero los datos al sistema CIELAB (L*, a* y b*), proporcionándole un blanco de referencia, y luego realiza la diferencia de color. Para cada papel se introdujo en el programa los valores triestímulo del blanco de referencia medido justo antes de comenzar las medidas. En total se obtuvieron 885116 medidas de diferencias de color, luminosidad, tono y croma para cada papel.

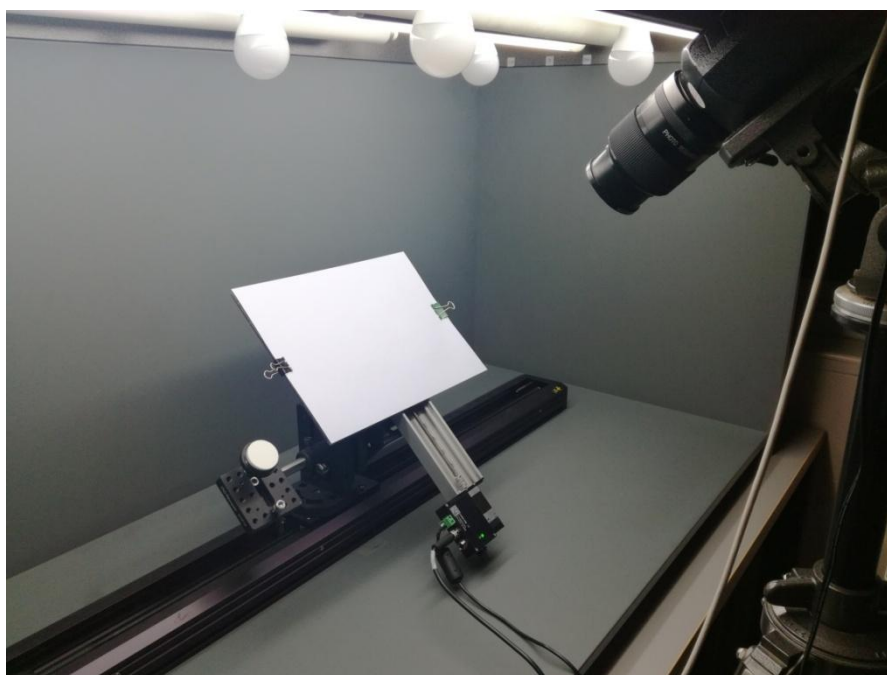


Figura 5. Geometría de medida difusa/0° en la medida de la uniformidad del papel. Autora: Ana Belén López Baldomero.

3.5 Obtención de la gama de color

A continuación se procedió a obtener la gama de color proporcionada por dos tipos de dispositivos de impresión gráfica: impresora láser (marca Canon iR-ADV C2020i) e impresora de inyección de tinta (Epson XP-530). Para ello se imprimió el patrón de color con 1331 muestras en el papel más uniforme (dos marcas distintas).

Se midió cada muestra con el espectrorradiómetro, gracias al programa Calibra1331, y se analizaron los datos obtenidos. De las radiancias de cada muestra desde los 380 hasta los 780 nm calculamos con Excel los valores triestímulo X, Y, Z y las coordenadas de cromaticidad x e y en cada punto del patrón. Posteriormente se usó un programa en Matlab para representar gráficamente en un mapa 3D la gama de color que es capaz de reproducir cada dispositivo de impresión gráfica con cada marca de papel en valores x, y, Y. Además se representaron los colores primarios (CMY) y secundarios (RGB) en el diagrama de cromaticidad CIE 1931, comparando los datos obtenidos con ambas impresoras y con ambos tipos de papel.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados en la medida de la estabilidad temporal del dispositivo

4.1.a. Fuente de iluminación D65

La fuente D65 de la cabina de iluminación simula al iluminante D65 (luz de día) (Huertas *et al.*, 2007).

4.1.a.1 Estudio de la radiancia

Lo primero que hicimos fue representar la variación de la radiancia con la longitud de onda para distintos espacios de tiempo. En definitiva se obtuvo la curva de emisión espectral en distintos minutos, comparándola con la obtenida en los últimos 10 min. La radiancia obtenida es la emitida por el blanco de referencia, por lo que sería una fuente secundaria. En la figura 6 se muestra la curva de emisión espectral de la fuente D65 en el minuto 480.

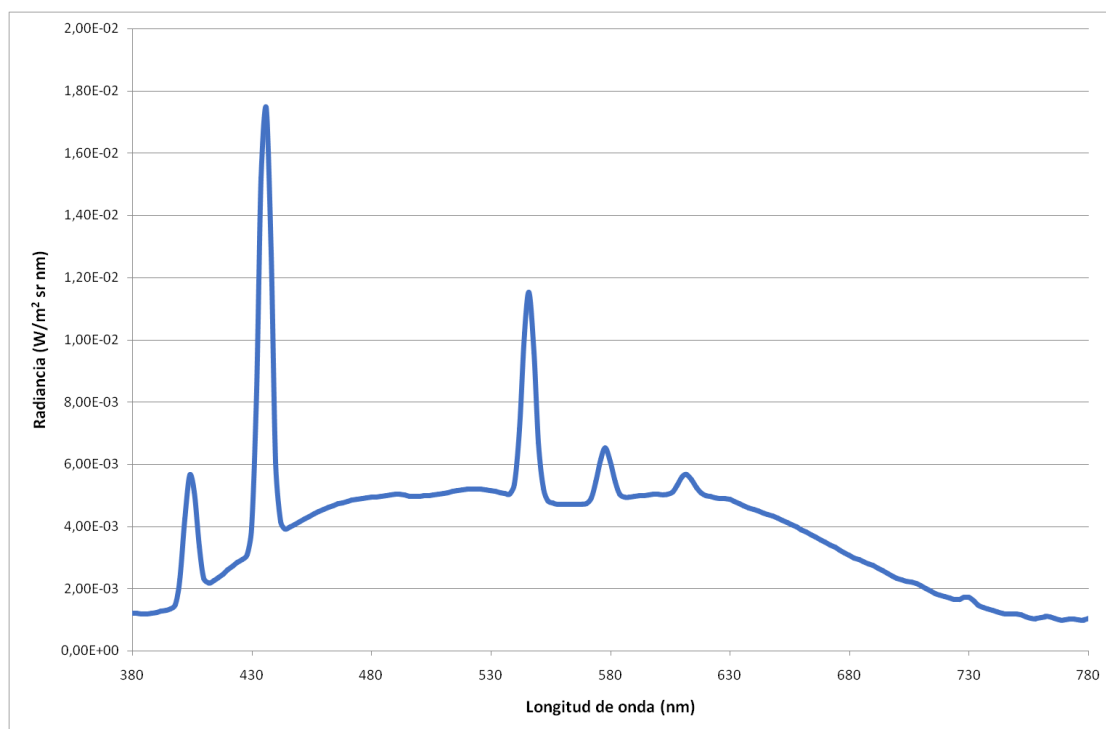


Figura 6. Curva de emisión espectral para la fuente de iluminación D65. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El resto de gráficas se pueden ver en el apartado 8.1 del anexo. En ellas vemos como el cambio más brusco en la emisión se observa en los primeros 4 minutos y en el pico de los 436 nm. Al comparar los valores de radiancia en ese pico (Tabla 2) obtenemos la siguiente tabla:

Minuto	Radiancia (W/m² sr nm)
5	0,01832 ± 0,00001
10	0,01789 ± 0,00001
15	0,01786 ± 0,00001
20	0,01781 ± 0,00001
480	0,01746 ± 0,00001

Tabla 2. Radiancias obtenidas en determinados minutos para la longitud de onda de 436 nm.

Si sobreestimamos el error de la radiancia considerando el valor más grande obtenido, que sería 0,01874 W/m²sr nm, el error de las medidas sería 0,00001 W/m²sr nm. Teniendo esto en cuenta vamos a considerar la fuente como estable cuando la variación en los datos sea menor o igual a 0,0005 W/m²sr nm respecto a la radiancia obtenida en el minuto 480, donde podemos calificar la emisión como estable. Según este criterio a partir del minuto 10 ya se podría considerar como estable la fuente.

A continuación se representó la variación de la radiancia con el tiempo para cada longitud de onda de 2 en 2 nm. Se hicieron 8 gráficas, cogiendo los valores de 50 en 50 nm, para ver que no encontráramos ninguna variación en la radiancia inesperada. Cada curva representa una longitud

de onda. Para poder ver en qué minuto se estabilizaban necesitábamos analizar los datos obtenidos para algunas de estas curvas.

Hemos elegido la curva de las longitudes de onda largas porque la emisión parece irregular, y algunas en las que se observan mayores picos en los primeros minutos. También hemos cogido la gráfica que incluye los 436 nm, ya que hemos visto anteriormente que en esta longitud de onda hay más variaciones a lo largo del tiempo. En la gráfica de los 380 a los 430 nm (Fig. 7) se observa una meseta y parece que a los 10 min aproximadamente se estabiliza, incluso antes. Esto también lo comprobamos mirando cómo varían los datos obtenidos en la radiancia. Según nuestro criterio para considerar la emisión como estable a partir de un determinado minuto la radiancia no debe variar más de $0,0005 \text{ W/m}^2 \text{ sr nm}$. Esto ocurre a partir del minuto 2 para la gráfica de 380 a 430 nm (tabla en apartado 8.1 del anexo).

En la de 432 a 482 nm (Fig. 8) vemos un pico pronunciado en los primeros 5 min y parece que estabiliza un poco más tarde. Analizando los datos y dado nuestro criterio la gráfica estabilizaría a partir de los 10 minutos (tabla en apartado 8.1 del anexo).

En la de 744-780 nm (Fig. 9) parece no verse una estabilización como tal, aunque sí se puede ver que en los primeros 5 min aproximadamente los valores son muy distintos a los registrados más adelante. Al analizar los datos nos damos cuenta de que según nuestro criterio la gráfica sería estable a partir de los 4 minutos (tabla en apartado 8.1 del anexo). Esto es debido a que no todas las gráficas tienen la misma escala en el eje vertical y aunque la emisión nos parezca muy irregular, al ser muy baja se puede considerar como estable.

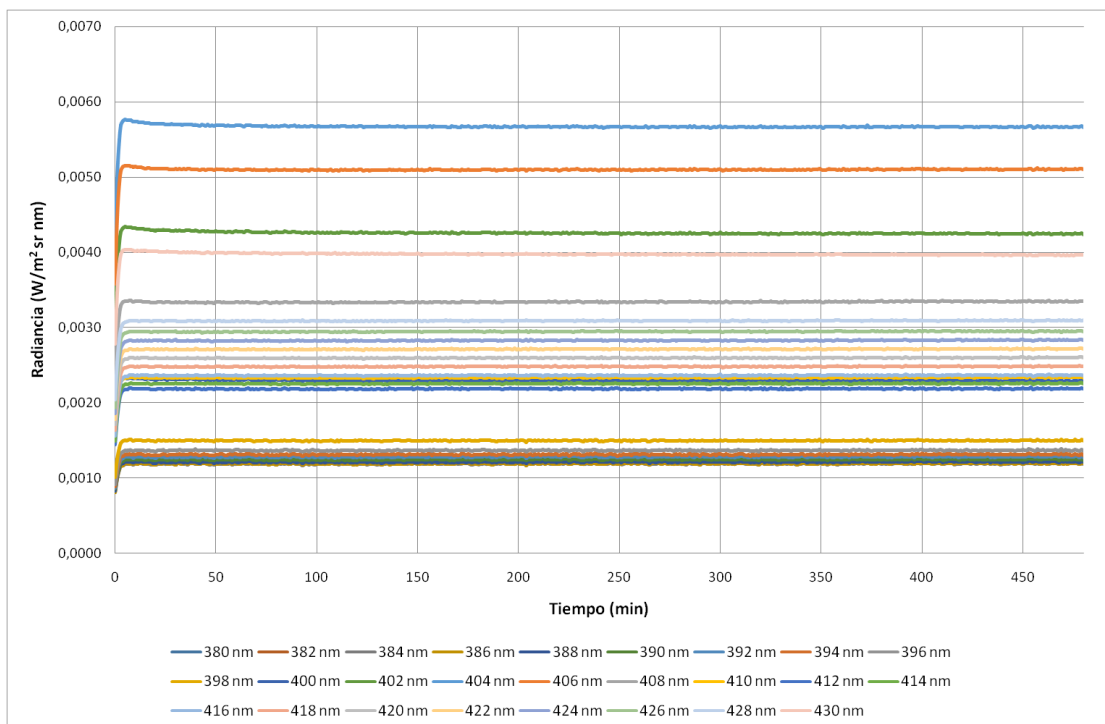


Figura 7. Representación de la radiancia ($\text{W/m}^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 380 a 430 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

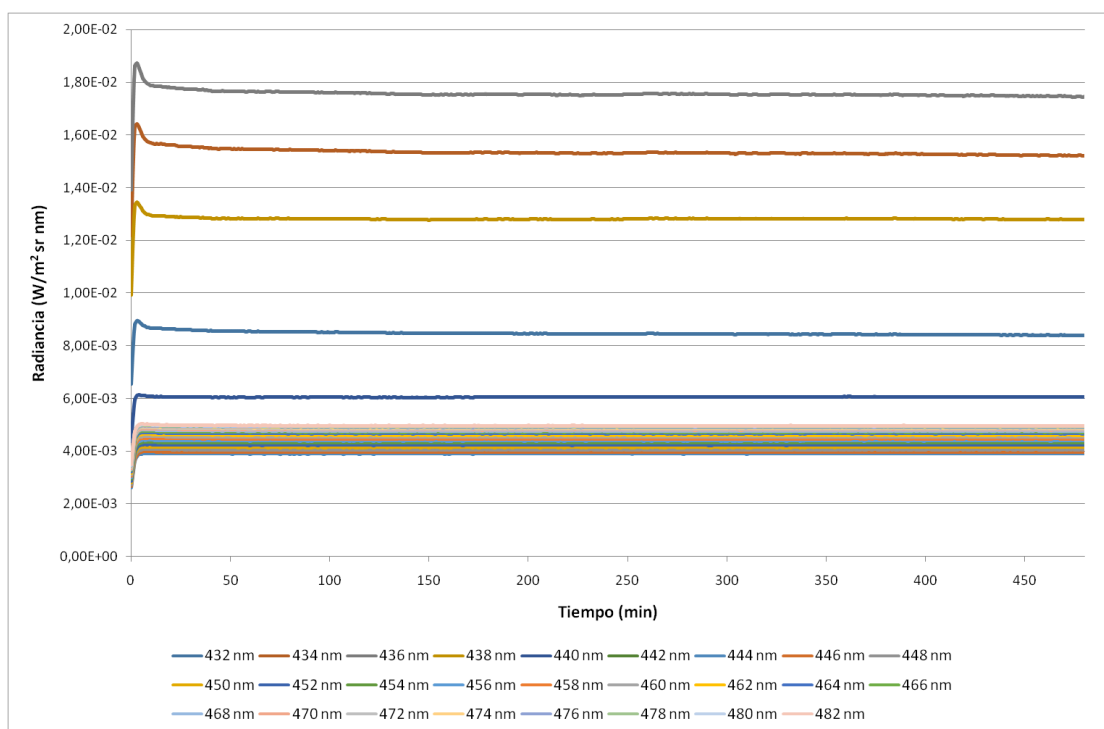


Figura 8. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 432 a 482 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

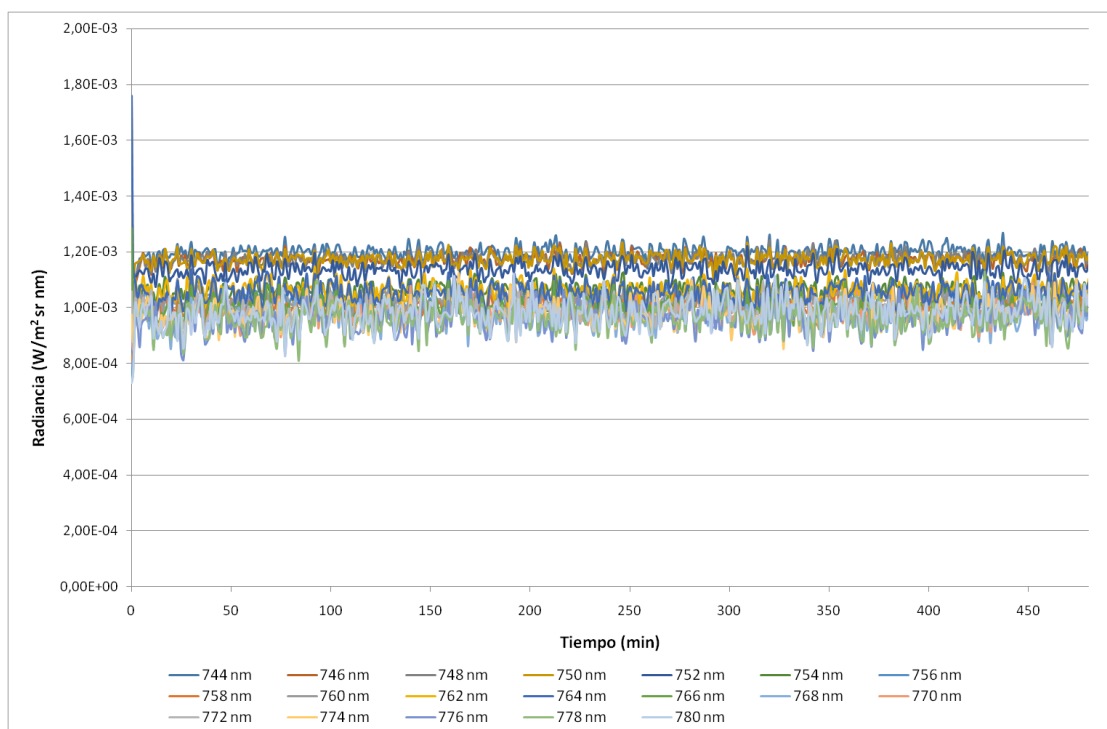


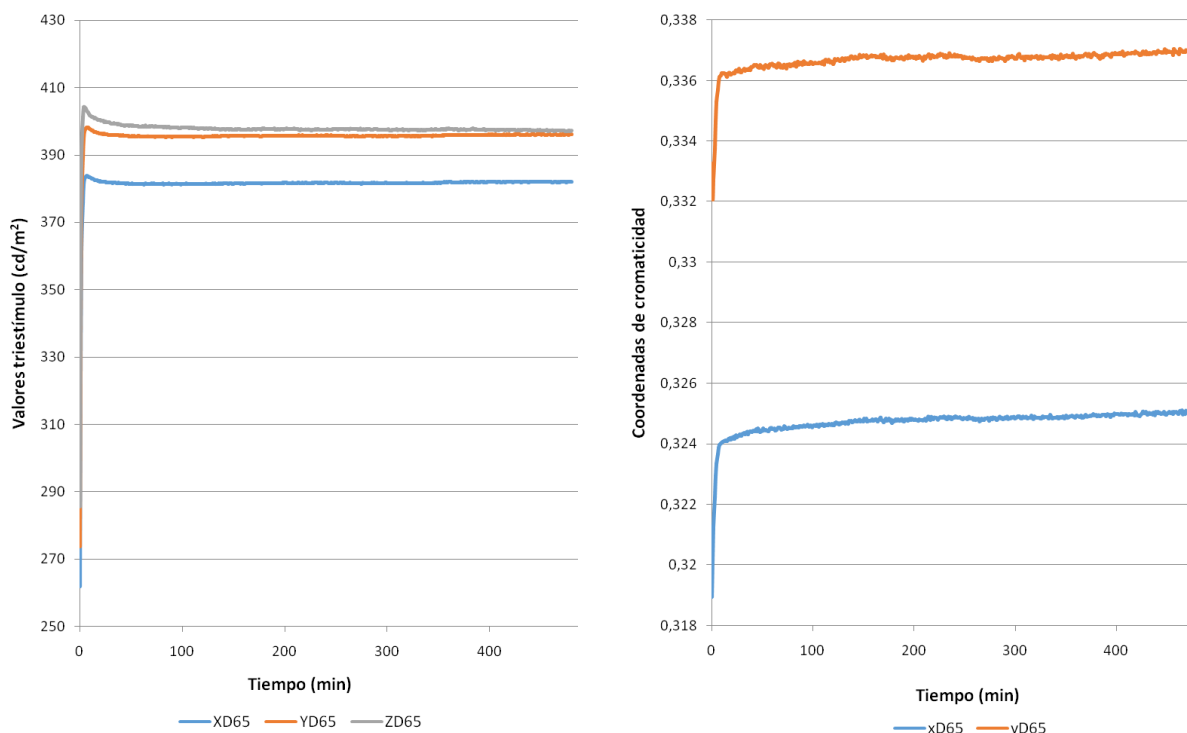
Figura 9. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 744 a 780 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Las demás gráficas se pueden ver en el apartado 8.1 del anexo.

4.1.a.2 Estudio del color

Como nuestro objetivo real es la medida del color, vamos a comprobar cómo varía este a lo largo del tiempo calculando los valores triestímulo, X, Y, Z, y las coordenadas de cromaticidad, x e y, desde el minuto 0 hasta el 480 a partir de las radiancias medidas.

Para el cálculo de X, Y, Z la magnitud radiométrica espectral ($Q_{e\lambda}$) que usamos es la radiancia espectral ($L_{e\lambda}$), medida a intervalos de longitud de onda ($\Delta\lambda$) de 2 nm. Los valores obtenidos se han representado en dos gráficas (Fig. 10 y 11), estudiadas junto a los datos obtenidos (x, y, Y) para establecer el minuto en el que la fuente se estabiliza (Tablas 3 y 4). Como criterio de estabilización se ha elegido que el valor triestímulo Y este dentro de un rango dado por la media \pm 2% de la media, considerado este 2% como el error de la medida (PR-655/670 SpectraScan User Manual). Para las coordenadas de cromaticidad x e y el valor debe estar dentro de un rango dado por la media \pm ($2 \times 0,0015$), siendo 0,0015 el error de estas medidas (PR-655/670 SpectraScan User Manual). Para asegurarnos de que a partir de un determinado minuto todos los valores están dentro de esos rangos se calculó el máximo y el mínimo para esos valores, comparándolos con la media obtenida desde el minuto 0, viendo así cuál era el minuto en el que la fuente podía considerarse como estable.



Figuras 10 y 11. Valores triestímulo X, Y, Z (izquierda) y coordenadas de cromaticidad x e y (derecha) a lo largo del tiempo para la fuente de iluminación D65. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Minuto	Y_{D65} (cd/m ²)	x_{D65}	y_{D65}
0	273,6 ± 5,5	0,3189 ± 0,0015	0,3333 ± 0,0015
1	338,1 ± 6,8	0,3201 ± 0,0015	0,3321 ± 0,0015
2	374,5 ± 7,5	0,3213 ± 0,0015	0,3328 ± 0,0015
3	389,3 ± 7,8	0,3222 ± 0,0015	0,3337 ± 0,0015
4	395,1 ± 7,9	0,3229 ± 0,0015	0,3346 ± 0,0015
5	397,1 ± 7,9	0,3234 ± 0,0015	0,3353 ± 0,0015

Tabla 3. Valor triestímulo Y y coordenadas de cromaticidad x e y desde el minuto 0 hasta el 5.

	Y_{D65}	x_{D65}	y_{D65}
Promedio (Min 0 - 480)	(395,3 ± 7,9) cd/m ²	0,3247 ± 0,0015	0,3367 ± 0,0015
	Min 3 - 480	Min 3 - 480	Min 4 - 480
Promedio	(395,8 ± 7,9) cd/m ²	0,3248 ± 0,0030	0,3367 ± 0,0030
Máximo	(398,1 ± 8,0) cd/m ²	0,3251 ± 0,0015	0,3371 ± 0,0015
Mínimo	(389,3 ± 7,8) cd/m ²	0,3222 ± 0,0015	0,3346 ± 0,0015
(Máx - Mín)/Media	2,2%	0,88%	0,72%

Tabla 4. Datos calculados para la fuente D65.

Se han tenido en cuenta dos cifras significativas para el cálculo del error (Centro Español de Metrología, 2008). En el cálculo del promedio a partir del minuto de estabilización se ha usado como error en las coordenadas de cromaticidad 0,0030, que es el valor que hemos definido para considerar el color como estable.

Para la fuente D65 el valor de Y se estabiliza a partir del minuto 3. La coordenada de cromaticidad x se estabiliza a partir del minuto 3 y la y, a partir del minuto 4. Además de los valores, se han observado las curvas de las coordenadas de cromaticidad y del valor triestímulo Y, corroborando los resultados. El máximo y el mínimo calculados son a partir del minuto en el que se considera estable la fuente, es decir, a partir del minuto 3 para Y_{D65} y x_{D65} , y a partir del minuto 4 para y_{D65} .

Además del tiempo de estabilización nos pareció interesante ver la calidad de esta. Una forma de hacerlo era viendo si los valores Y, x e y variaban mucho a partir de ese minuto en el que se consideraban estables. Para ello se calculó la diferencia entre el valor máximo encontrado a partir del minuto de estabilización y el valor mínimo, dividiéndolo entre la media calculada a partir de ese minuto y multiplicándolo por 100, para obtener el porcentaje. Cuanto mayor es ese porcentaje, mayor es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, concluyendo que la calidad de la estabilidad es menor. En este caso la calidad es bastante alta para el valor triestímulo Y (2,2%), y para las coordenadas de cromaticidad x e y (0,88% y 0,72% respectivamente), al encontrar porcentajes muy bajos.

4.1.b. Fuente de iluminación TL84

La fuente TL84 de la cabina de iluminación simula al iluminante F11 (lámpara fluorescente trifósforo de banda estrecha) (Huertas *et al.*, 2007).

4.1.b.1 Estudio de la radiancia

Primero hemos representado la variación de la radiancia con la longitud de onda en distintos momentos. De nuevo se obtuvo la curva de emisión espectral en varios minutos y la comparamos con la obtenida en los últimos 10 min. En la figura 12 se muestra la curva de emisión espectral de la fuente TL84 en el minuto 480.

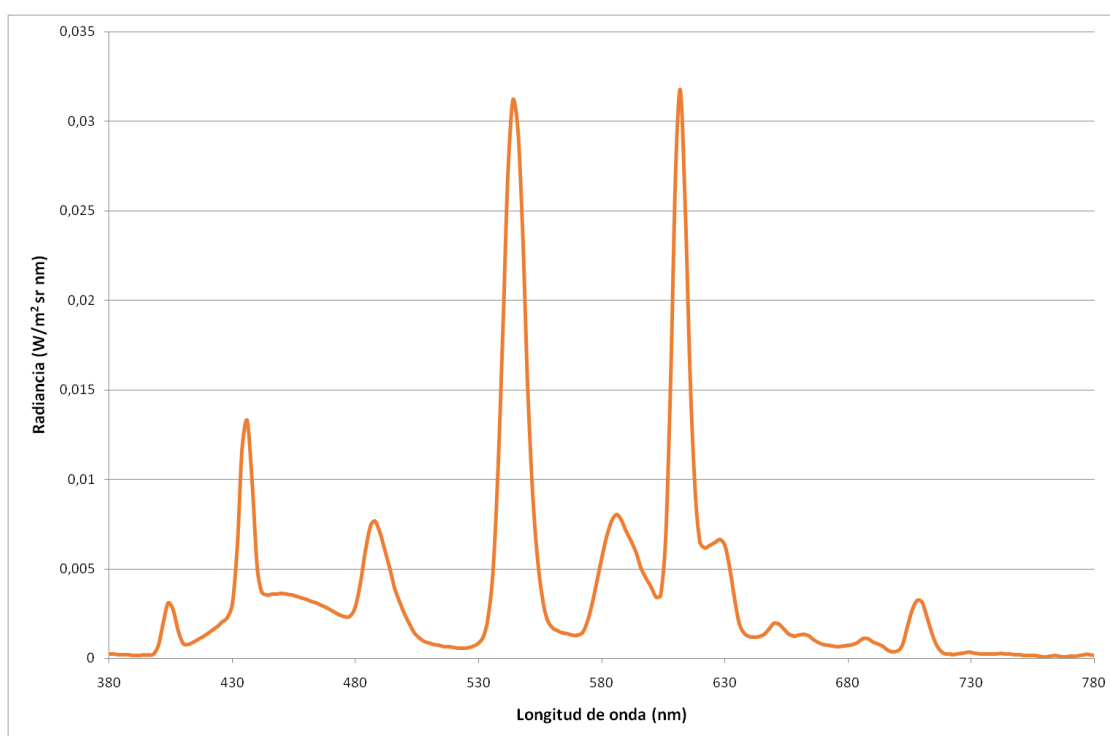


Figura 12. Curva de emisión espectral para la fuente de iluminación TL84. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Las demás gráficas se pueden ver en el apartado 8.2 del anexo. En ellas observamos que en los primeros 5 minutos hay una gran diferencia en las curvas, aumentando la radiancia con el tiempo. En el pico de 436 nm es donde se ve más variabilidad. Comparando los valores de la radiancia en esos 436 nm (Tabla 5):

Minuto	Radiancia (W/m ² sr nm)	Minuto	Radiancia (W/m ² sr nm)
0	0,01059 ± 0,00001	8	0,01378 ± 0,00001
2	0,01396 ± 0,00001	10	0,01370 ± 0,00001
4	0,01414 ± 0,00001	20	0,01355 ± 0,00001
6	0,01393 ± 0,00001	480	0,01329 ± 0,00001

Tabla 5. Radiancias obtenidas en determinados minutos para la longitud de onda de 436 nm.

En este caso el error de la radiancia es $0,00001 \text{ W/m}^2\text{sr nm}$ porque el valor más grande de esta obtenido es $0,03178 \text{ W/m}^2\text{sr nm}$ (de nuevo estamos sobreestimando el error). Teniendo en cuenta nuestro criterio (usado para la fuente D65), a partir del minuto 5 la fuente ya sería estable.

Lo siguiente fue representar la variación de la radiancia con el tiempo para cada longitud de onda de 2 en 2 nm. Se obtuvieron 8 gráficas, cogiendo los valores de 50 en 50 nm. Para ver mejor en qué minuto la fuente se estabiliza, analizamos los datos de algunas de estas gráficas.

Hemos cogido la gráfica de 380-430 nm, 432-482 nm y 744-780 nm. En la gráfica de 380 a 430 nm (Fig. 13) las curvas parecen estabilizarse antes de los 10 minutos. Comprobando los valores de radiancia vemos que son muy pequeños y teniendo en cuenta nuestro criterio podemos decir que a partir del minuto 1 la fuente ya sería estable para estas longitudes de onda (tabla en apartado 8.2 del anexo).

En la de 432 a 482 nm (Fig. 14) parece que el tiempo de estabilización es mayor, de aproximadamente 10-15 min. Analizando los datos según nuestro criterio la gráfica estabilizaría a partir del minuto 8 (tabla en apartado 8.2 del anexo).

En la última gráfica (Fig. 15) no se ve una estabilización a simple vista pero sí una diferencia clara entre los valores recogidos en los primeros 5 min y los recogidos más tarde. Analizando los datos, nuestra gráfica sería estable a partir del minuto 297 (tabla en apartado 8.2 del anexo). Esto se debe a que en las longitudes de onda más largas, de 774 a 780 nm, los valores mínimos llegan al orden de 10^{-26} y la diferencia con los valores máximos superan los $0,0005 \text{ W/m}^2\text{sr nm}$ hasta llegar al minuto 297 para los 778 nm. A partir de ese punto podríamos considerar todas las curvas dentro de nuestro criterio. Comparando los datos con la curva de emisión espectral de la fuente podemos ver que la emisión en longitudes de onda largas no es muy grande por lo que estas variaciones no van a influir significativamente en nuestras medidas. Más adelante se estudia la variación del color para comprobarlo.

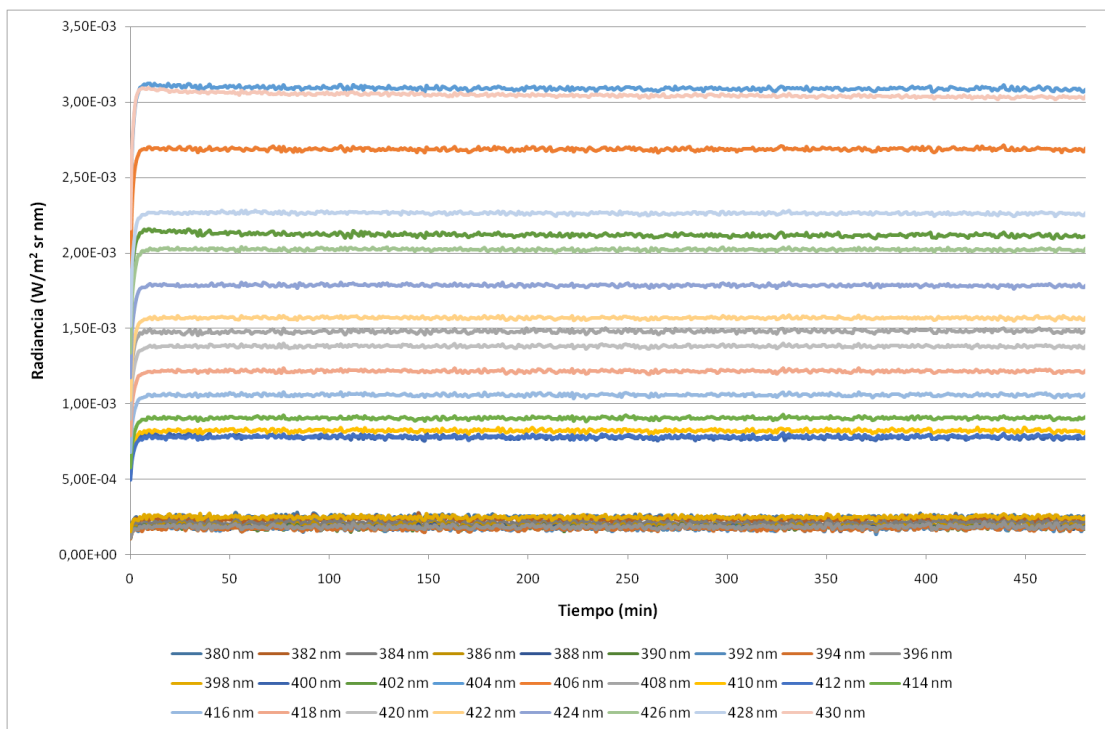


Figura 13. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 380 a 430 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

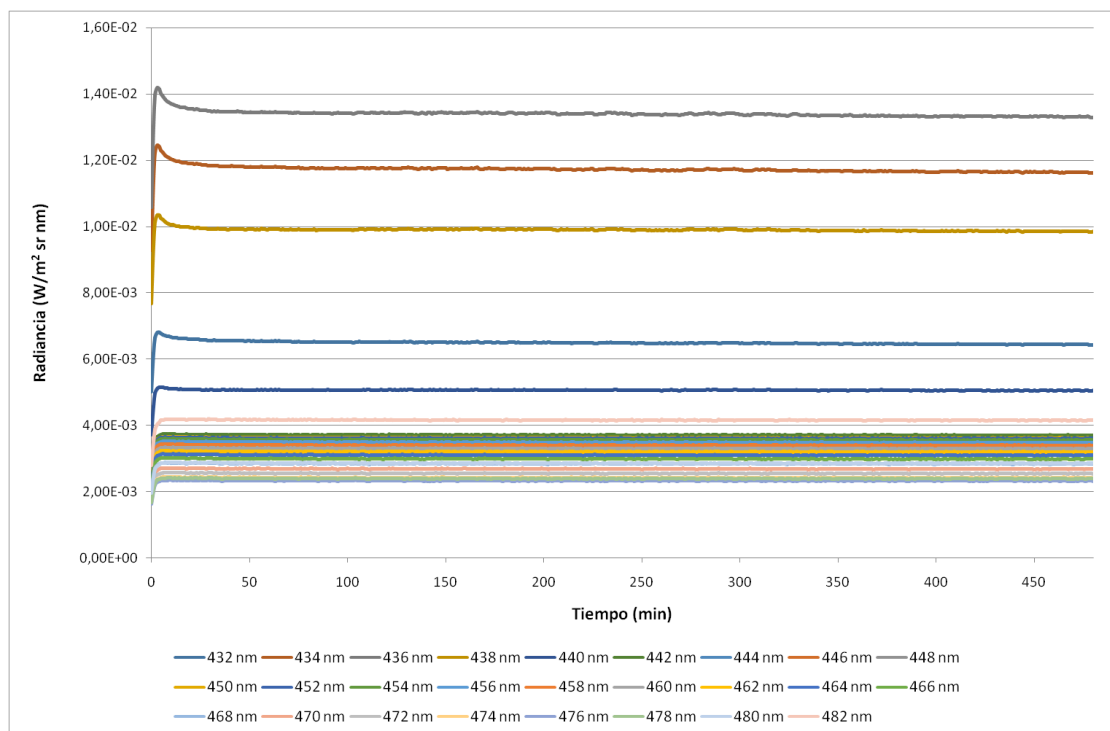


Figura 14. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 432 a 482 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

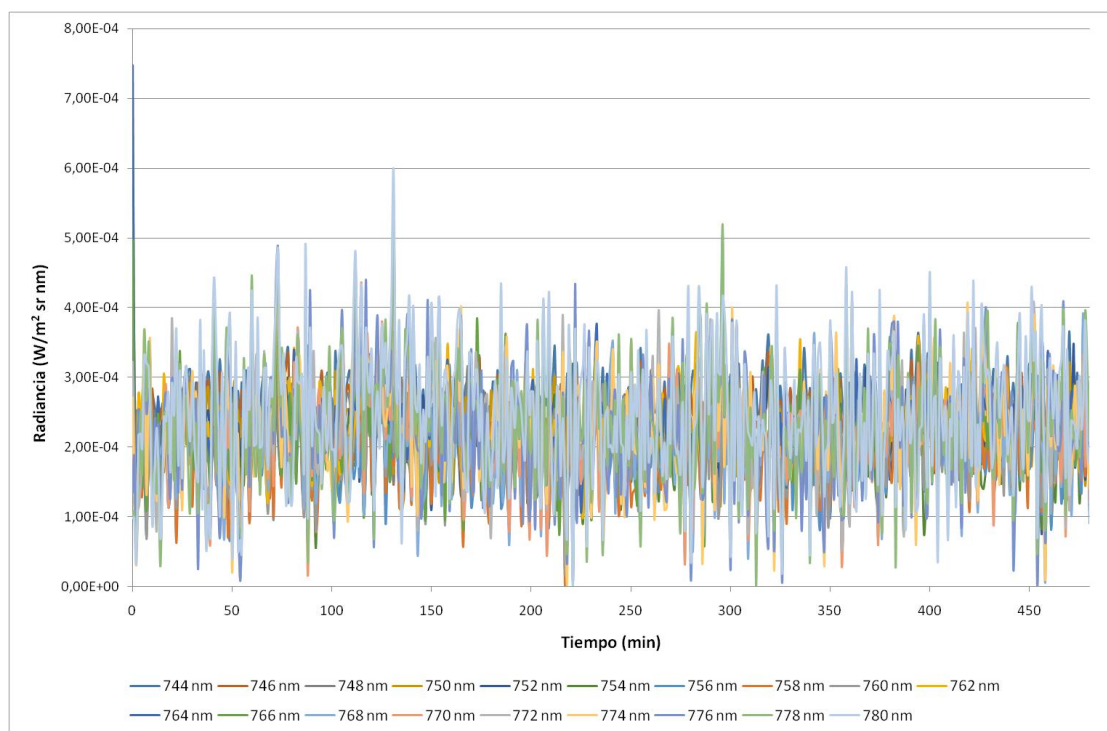


Figura 15. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 744 a 780 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Las demás gráficas se encuentran en el apartado 8.2 del anexo.

4.1.b.2 Estudio del color

Calculamos los valores triestímulo y las coordenadas de cromaticidad desde el minuto 0 hasta el 480 para comprobar la variación en cuanto a color del blanco de referencia. Representamos las dos gráficas (Fig. 16 y 17) y estudiamos los datos (Tablas 6 y 7) para establecer el minuto de estabilización.

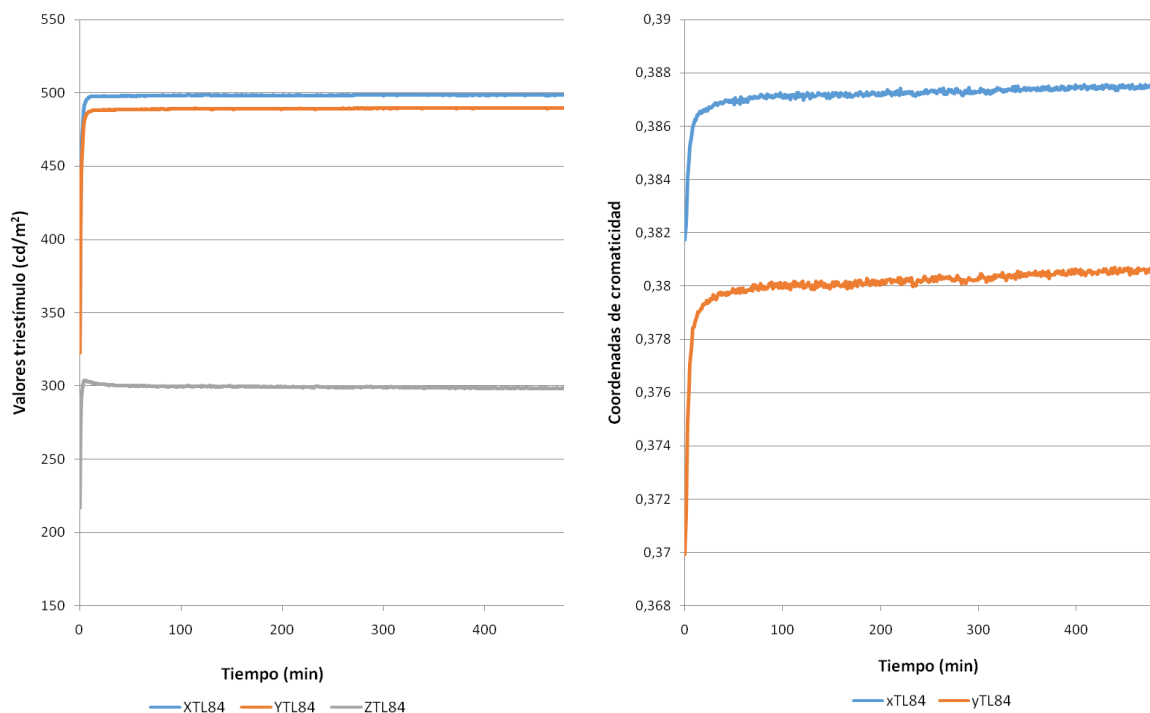


Figura 16 y 17. Valores triestímulo X, Y, Z (izquierda) y coordenadas de cromaticidad x e y (derecha) a lo largo del tiempo para la fuente de iluminación TL84. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El criterio sigue siendo el descrito en la anterior fuente: Y (media ± 2% media); x,y (media ± 0,0003) (PR-655/670 SpectraScan User Manual).

Minuto	Y _{TL84} (cd/m ²)	X _{TL84}	Y _{TL84}
0	322,6 ± 6,5	0,3817 ± 0,0015	0,3699 ± 0,0015
1	403,5 ± 8,0	0,3824 ± 0,0015	0,3714 ± 0,0015
2	445,9 ± 8,9	0,3832 ± 0,0015	0,3733 ± 0,0015
3	466,8 ± 9,3	0,3841 ± 0,0015	0,3749 ± 0,0015
4	476,5 ± 9,5	0,3848 ± 0,0015	0,3762 ± 0,0015
5	481,4 ± 9,6	0,3852 ± 0,0015	0,3770 ± 0,0015

Tabla 6. Valor triestímulo Y y coordenadas de cromaticidad x e y desde el minuto 0 hasta el 5.

	Y _{TL84}	X _{TL84}	Y _{TL84}
Promedio (Min 0 - 480)	(488,5 ± 9,8) cd/m ²	0,3872 ± 0,0015	0,3801 ± 0,0015
	Min 5 - 480	Min 4 - 480	Min 6 - 480
Promedio	(489,2 ± 9,8) cd/m ²	0,3872 ± 0,0030	0,3802 ± 0,0030
Máximo	(489,8 ± 9,8) cd/m ²	0,3876 ± 0,0015	0,3807 ± 0,0015
Mínimo	(481,4 ± 9,6) cd/m ²	0,3848 ± 0,0015	0,3776 ± 0,0015
(Máx - Mín)/Media	1,7%	0,72%	0,82%

Tabla 7. Datos calculados para la fuente TL84.

Para la fuente TL84 el valor triestímulo Y se estabiliza a partir del minuto 5, la coordenada x a partir del minuto 4 y la y, a partir del 6. También se han observado en las gráficas las curvas de las coordenadas de cromaticidad y del valor triestímulo Y, comprobando los datos obtenidos.

En cuanto a la calidad de la estabilización es bastante alta (porcentaje bajo), tanto para el valor triestímulo Y como para las coordenadas de cromaticidad.

4.1.c. Fuente de iluminación F

La fuente F de la cabina de iluminación simula al iluminante A (lámpara incandescente de tungsteno) (Huertas *et al.*, 2007).

4.1.c.1 Estudio de la radiancia

El primer paso fue representar la variación de la radiancia con la longitud de onda para distintos espacios de tiempo. En la figura 18 se muestra la curva de emisión espectral de la fuente F en el minuto 480.

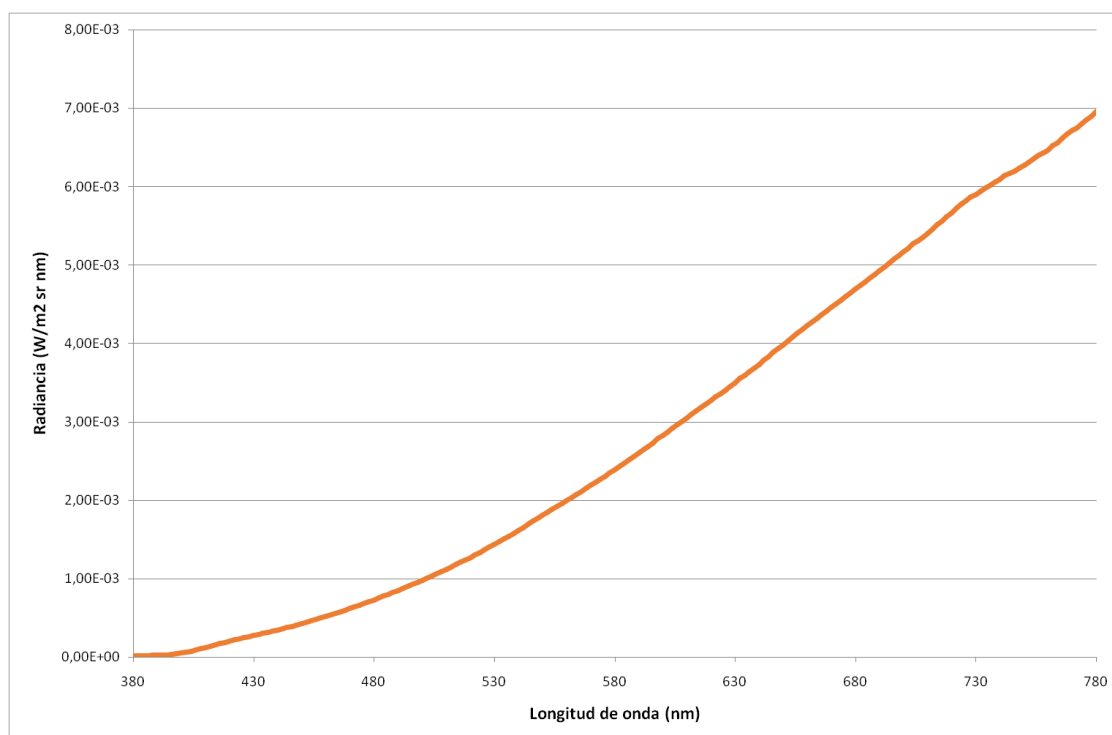


Figura 18. Curva de emisión espectral para la fuente de iluminación F.

Las demás gráficas se pueden ver en el apartado 8.3 del anexo. En ellas vemos como los mayores cambios de la radiancia se sitúan en las longitudes de onda largas. Considerando la fuente estable cuando la variación de los datos (valor máximo - valor mínimo de radiancia) es menor o igual a $0,0005 \text{ W/m}^2 \text{ sr nm}$, si comparamos los valores de radiancia recogidos para la longitud de onda de 780 nm, nos sale un tiempo de estabilización de 393 minutos para esta longitud de onda (Tabla 8).

$\lambda = 780 \text{ nm}$	Radiancia ($\text{W/m}^2\text{sr nm}$)
Máximo (393-480)	$0,00726 \pm 0,00001$
Mínimo (393-480)	$0,00679 \pm 0,00001$
Diferencia (393-480)	$0,00047 \pm 0,00002$

Tabla 8. Valor máximo, mínimo y diferencia de radiancia desde el minuto 393 para la longitud de onda de 780 nm.

A continuación representamos la variación de la radiancia con el tiempo para cada longitud de onda. Obtuvimos 9 gráficas. Debido a que la emisión en las longitudes de onda cortas es muy baja y para poder ver mejor las distintas curvas, se cogió un intervalo de 16 y 18 nm para las dos primeras gráficas, y las siguientes con intervalos de 50 nm. En la figura 19 tenemos un ejemplo de estas gráficas, desde los 418 hasta los 468 nm.

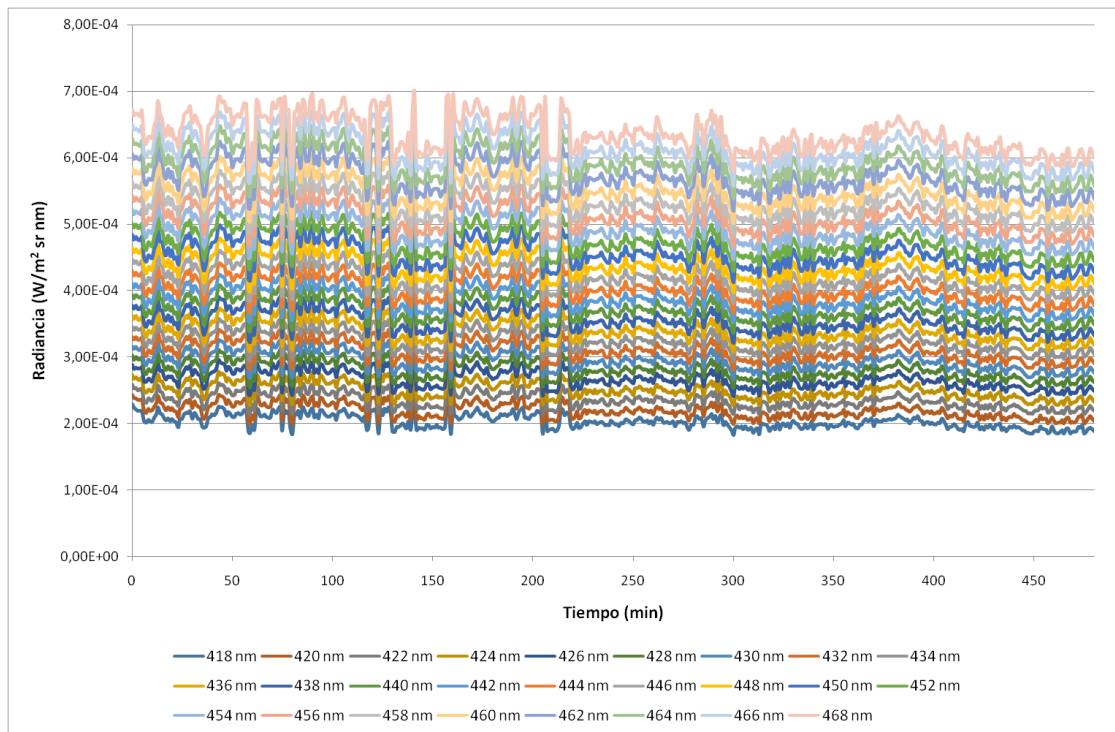


Figura 19. Representación de la radiancia ($\text{W/m}^2\text{sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 418 a 468 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El resto de gráficas se pueden consultar en el apartado 8.3 del anexo. En ellas vemos que la emisión es bastante irregular a lo largo del tiempo, siendo difícil percibir una estabilización clara a partir de un minuto concreto como ocurría con las otras dos fuentes.

4.1.c.2 Estudio del color

A continuación se han calculado los valores triestímulo y las coordenadas de cromaticidad del minuto 0 al 480, y se han representado en dos gráficas (Fig. 20 y 21). En la representación de los valores triestímulo, X e Y presentan una distribución bastante irregular a lo largo del tiempo, sin

poder observar una estabilización en sus valores, y Z tiene unos valores más estables, aunque presenta pequeñas variaciones. En cuanto a las coordenadas de cromaticidad, observamos que ambas curvas tienen una distribución bastante rectilínea, aunque la y parece más estable que la x. Para establecer un minuto de estabilización estudiamos los datos calculados (Tablas 9 y 10), usando el criterio descrito en las anteriores fuentes.

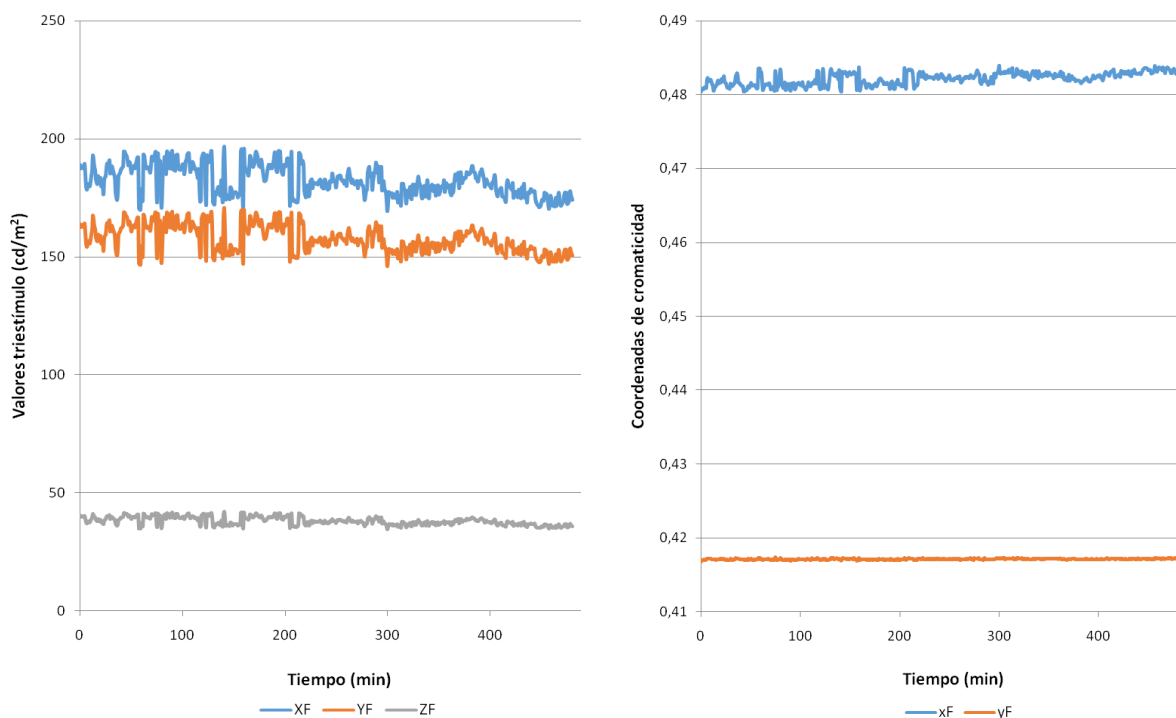


Figura 20 y 21. Valores triestímulo X, Y, Z (izquierda) y coordenadas de cromaticidad (derecha) a lo largo del tiempo para la fuente de iluminación F. Autora: Ana Belén López Baldomero

Minuto	Y _F (cd/m ²)	X _F	y _F
0	163,8 ± 3,3	0,4805 ± 0,0015	0,4168 ± 0,0015
1	162,6 ± 3,3	0,4808 ± 0,0015	0,4170 ± 0,0015
2	163,4 ± 3,3	0,4808 ± 0,0015	0,4169 ± 0,0015
3	163,0 ± 3,3	0,4809 ± 0,0015	0,4170 ± 0,0015
4	162,6 ± 3,3	0,4810 ± 0,0015	0,4170 ± 0,0015
5	164,1 ± 3,3	0,4809 ± 0,0015	0,4170 ± 0,0015
476	148,9 ± 3,0	0,4835 ± 0,0015	0,4172 ± 0,0015
477	150,3 ± 3,0	0,4833 ± 0,0015	0,4173 ± 0,0015
478	153,5 ± 3,1	0,4828 ± 0,0015	0,4172 ± 0,0015
479	152,2 ± 3,0	0,4831 ± 0,0015	0,4172 ± 0,0015
480	150,4 ± 3,0	0,4833 ± 0,0015	0,4173 ± 0,0015

Tabla 9. Valor triestímulo Y y coordenadas de cromaticidad x e y desde el minuto 0 hasta el 5 y desde el 476 hasta el 480.

	Y_F	x_F	y_F
Promedio (Min 0 - 480)	$(157,7 \pm 3,2) \text{ cd/m}^2$	$0,4822 \pm 0,0030$	$0,4171 \pm 0,0030$
Máximo	$(170,3 \pm 3,4) \text{ cd/m}^2$	$0,4839 \pm 0,0015$	$0,4173 \pm 0,0015$
Mínimo	$(146,1 \pm 2,9) \text{ cd/m}^2$	$0,4804 \pm 0,0015$	$0,4168 \pm 0,0015$
(Máx - Mín)/Media	15%	0,71%	0,13%

Tabla 10. Datos calculados para la fuente F.

Para la fuente de iluminación F, según nuestro criterio, el valor de Y nunca se estabiliza. Esto se puede ver en la tabla 9, donde incluso en los últimos minutos hay variaciones entre los datos mayores al 2%. Sin embargo, las coordenadas de cromaticidad se consideran estables desde el minuto 0.

La calidad de la estabilización para el valor triestímulo Y es más baja que en las fuentes anteriores pero la calidad para las coordenadas de cromaticidad es bastante alta.

En este caso al no haber una estabilización clara en el valor Y se ha calculado la calidad de la estabilización, el máximo y el mínimo a partir del minuto 0.

4.1.d. Fuente de iluminación LED

Para completar el estudio hemos usado 6 bombillas LED (light-emitting diode).

4.1.d.1 Estudio de la radiancia

Antes de comenzar a realizar medidas mantuvimos las bombillas encendidas durante 100 horas para 'envejecerlas' ('seasoning'), ya que eran nuevas. Aunque según las normas de iluminación LM 79 (IESNA, 2007) y LM 80 (IESNA, 2008) para SSL, esto no es necesario en los ledes (Castañeda *et al*, 2012), nosotros lo hicimos ya que el flujo luminoso que proporciona el fabricante corresponde al valor medido luego de 100 horas de uso (Mockey y Manzano, 2013).

Como con todas las fuentes primero se representó la variación de la radiancia con la longitud de onda para distintos espacios de tiempo. En la figura 22 se muestra la curva de emisión espectral de la fuente de iluminación LED en el minuto 480. Se observan dos picos de emisión, uno en los 462 nm y otro en los 606 nm.

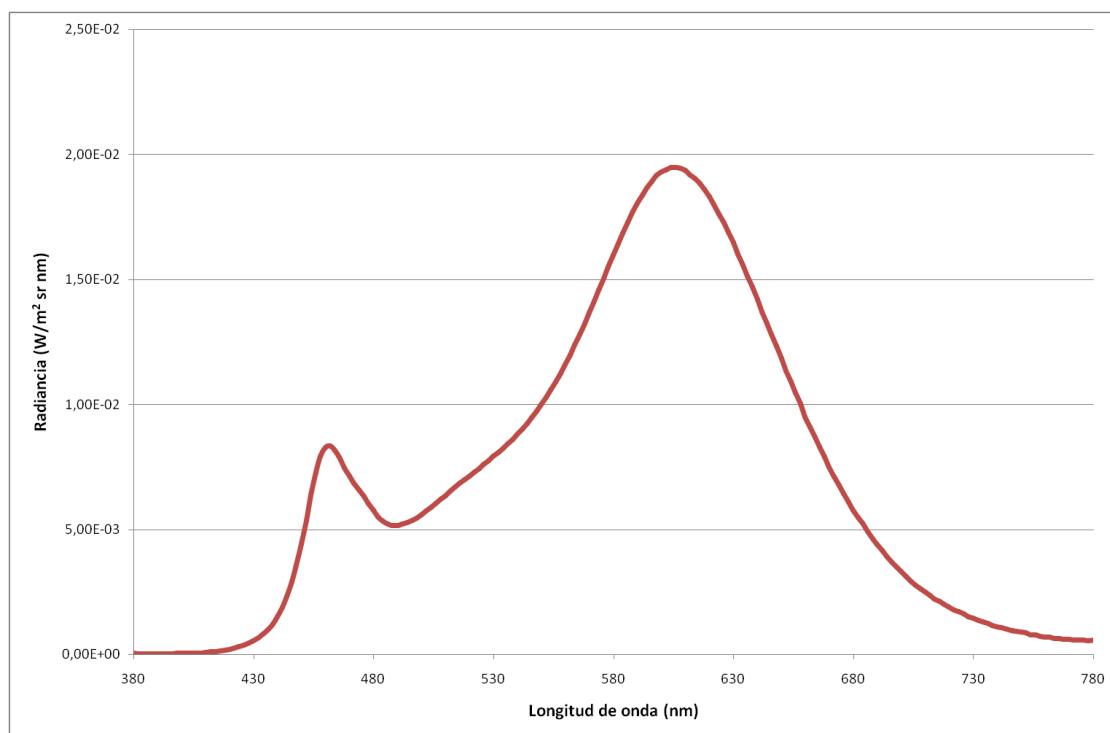


Figura 22. Curva de emisión espectral para la fuente de iluminación LED. Autora: Ana Belén López Baldomero.

El resto de gráficas se pueden ver en el apartado 8.4 del anexo. El cambio más notable de emisión se observa en los primeros 15 minutos, disminuyendo la radiancia con el tiempo, y en el pico de los 606 nm. Comparando los valores de radiancia recogidos en ese pico (Tabla 11) obtenemos la siguiente tabla:

Minuto	Radiancia (W/m ² sr nm)
0	0,02318 ± 0,00001
10	0,02091 ± 0,00001
20	0,02031 ± 0,00001
30	0,01997 ± 0,00001
40	0,01986 ± 0,00001
480	0,01949 ± 0,00001

Tabla 11. Radiancias obtenidas en determinados minutos para la longitud de onda de 606 nm.

Sobreestimando de nuevo el error de la radiancia considerando el valor más grande obtenido, que sería 0,02321 W/m²sr nm, el error de las medidas volvería a ser 0,00001 W/m²sr nm. Vamos a considerar la fuente como estable usando el mismo criterio que en las anteriores fuentes. Según esto, a partir del minuto 30 se podría considerar la fuente como estable en los 606 nm (Tabla 11).

Lo siguiente fue representar la variación de la radiancia con el tiempo para cada longitud de onda, de 2 en 2 nm. Se hicieron 9 gráficas. Debido a que en los extremos del espectro la emisión es muy irregular, se cogieron intervalos de 30 y 40 nm para las dos primeras gráficas, las siguientes de 50 en 50 nm y la última con un intervalo de 34 nm.

Para poder ver cuál es el minuto en el que se estabiliza la fuente necesitamos analizar los datos obtenidos en algunas de estas curvas. Hemos elegido la curva de las longitudes de onda cortas, porque la emisión es muy irregular, y las dos gráficas que contienen las longitudes de onda de los dos picos de mayor radiancia que se observan en la curva de emisión espectral.

En la gráfica de los 380 a los 410 nm (Fig. 23) no se ve a simple vista una estabilización, aunque los valores de radiancia en los primeros 10 min de algunas curvas son muy distintos a los registrados más adelante. Si analizamos los datos, en función de nuestro criterio (la radiancia no debe variar más de $0,0005 \text{ W/m}^2 \text{ sr nm}$), para estas longitudes de onda la fuente sería estable desde el minuto 0. Esto es comprensible ya que aunque en la gráfica los valores varían bastante, la emisión realmente es muy baja (tabla en apartado 8.4 del anexo).

En la de 444 a 484 nm (Fig. 24) vemos dos tendencias: de los 444 a los 462 nm la radiancia va aumentando cada 2 nm, siendo mayor en los primeros minutos y disminuyendo hasta estabilizarse aproximadamente a los 30 min. De los 460 a los 484 nm la radiancia disminuye cada 2 nm y la curva es distinta. Por lo general, para este rango de longitudes de onda la emisión es menor en los primeros minutos y aumenta hasta estabilizarse. Si analizamos los datos (tabla en apartado 8.4 del anexo) y dado nuestro criterio, las curvas estabilizarían a partir del minuto 23.

Por último, en la gráfica de 590 a 640 nm (Fig. 25) vemos que en los primeros minutos la radiancia es mayor a la obtenida más adelante. De los 590 a los 606 nm la radiancia va aumentando y de los 608 hasta los 640 nm va disminuyendo. Analizando los datos vemos que la fuente estabilizaría tras pasar 96 minutos. En esta gráfica se obtienen los valores más altos de radiancia y aunque en la representación nos pueda parecer que las curvas no varían demasiado, realmente los valores son los que nos indican si la fuente está estable o no. En función de los datos tendría que pasar aproximadamente 1 hora y media para que estas longitudes de onda se estabilizaran (tabla en apartado 8.4 del anexo).

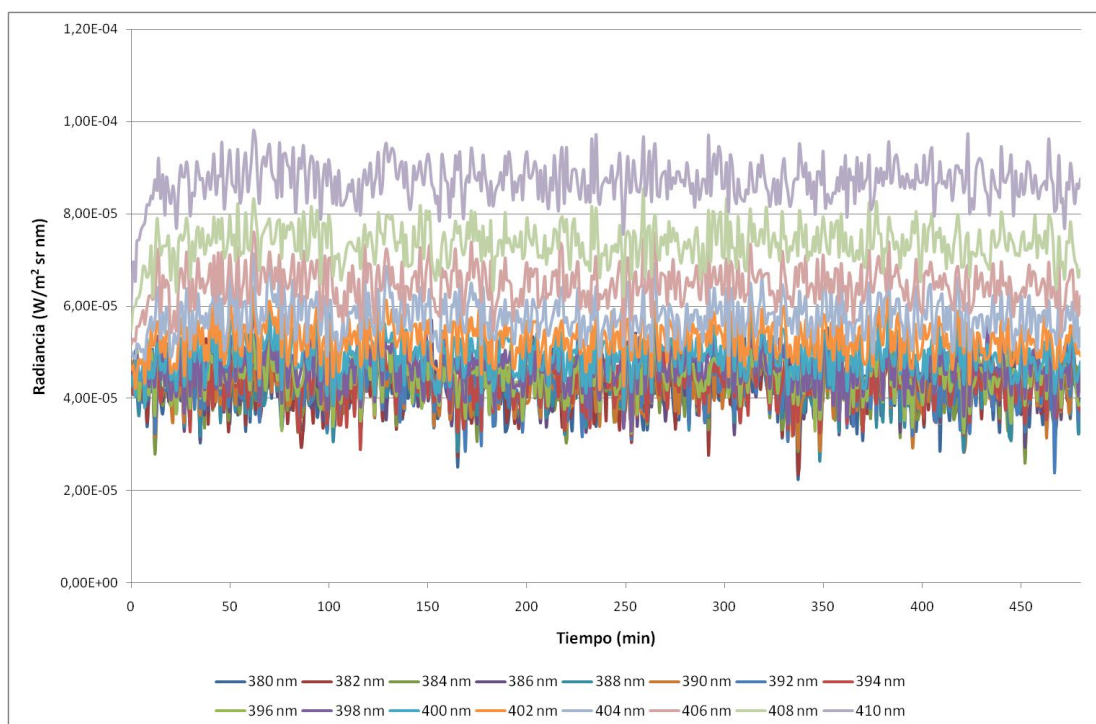


Figura 23. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 380 a 410 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

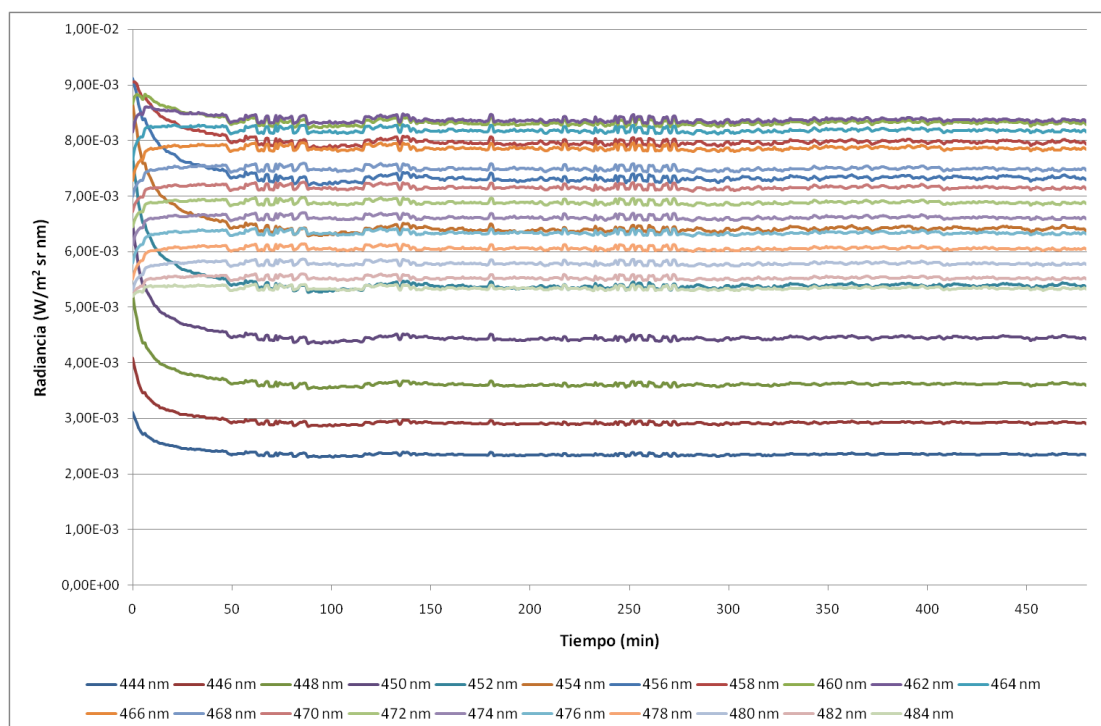


Figura 24. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 444 a 484 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

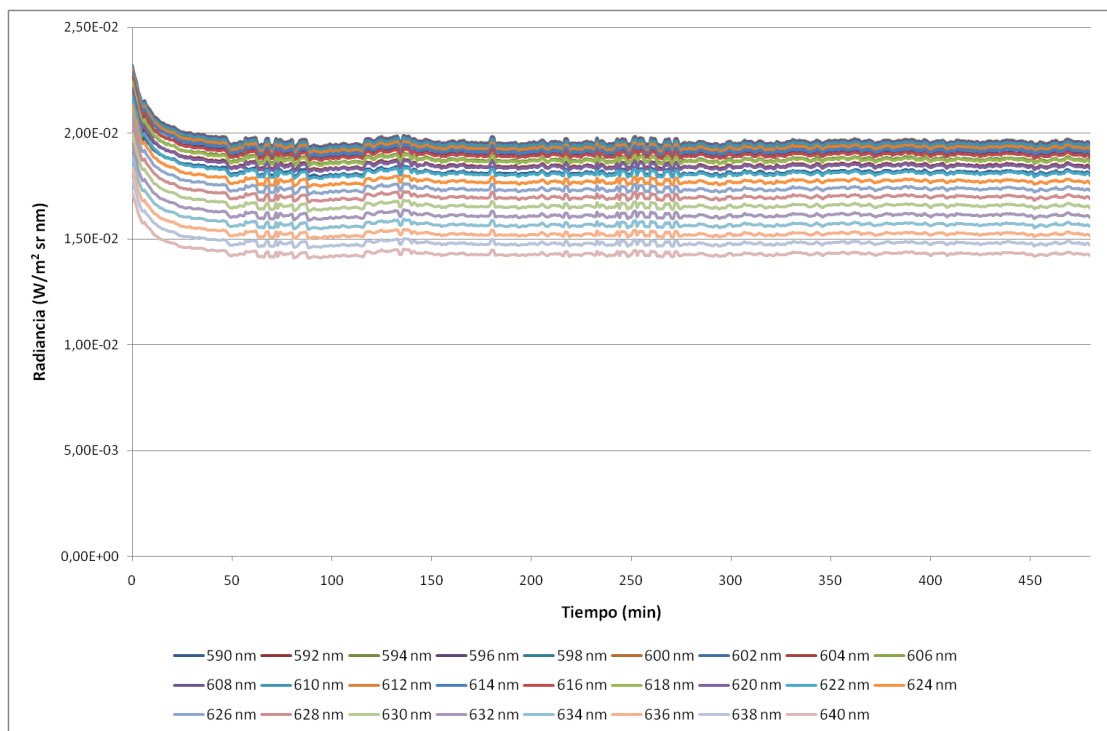


Figura 25. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 590 a 640 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Las demás gráficas se pueden ver en el apartado 8.4 del anexo.

4.1.d.2 Estudio del color

Se han calculado los valores triestímulo X, Y, Z y las coordenadas de cromaticidad x e y para los valores de radiancia desde el minuto 0 hasta el minuto 480 y se han representado en dos gráficas (Fig. 26 y 27). Estas se han estudiado junto con los datos obtenidos de x, y, Y (Tablas 12, 13 y 14) para establecer el minuto de estabilización. El criterio usado para ver si el color es estable es el descrito en las anteriores fuentes.

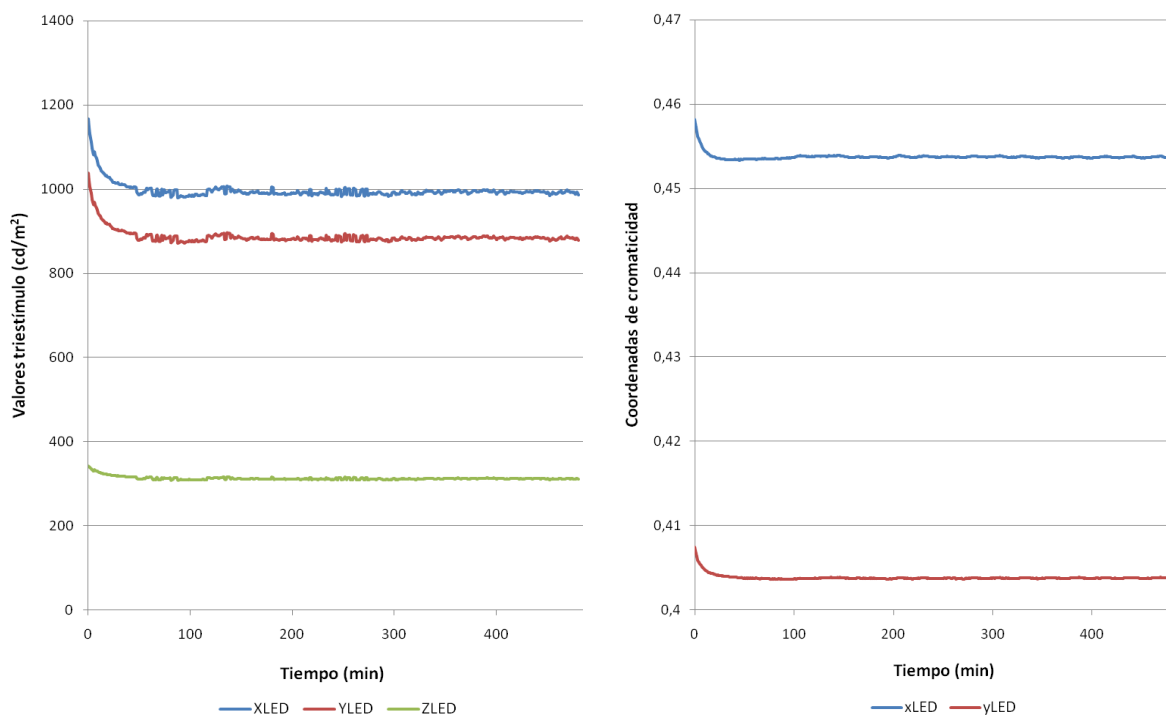


Figura 26 y 27. Valores triestímulo X, Y, Z (izquierda) y coordenadas de cromaticidad x e y (derecha) a lo largo del tiempo para la fuente de iluminación LED. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Minuto	X _{LED}	Y _{LED}
0	0,4582 ± 0,0015	0,4074 ± 0,0015
1	0,4572 ± 0,0015	0,4067 ± 0,0015
2	0,4567 ± 0,0015	0,4063 ± 0,0015
3	0,4562 ± 0,0015	0,4059 ± 0,0015

Tabla 12. Coordenadas de cromaticidad en los primeros 3 minutos.

Minuto	Y _{LED} (cd/m ²)	Minuto	Y _{LED} (cd/m ²)
0	1038 ± 21	28	903 ± 18
4	976 ± 20	32	901 ± 18
8	955 ± 19	36	900 ± 18
12	935 ± 19	468	887 ± 18
16	923 ± 18	472	883 ± 18
20	916 ± 18	476	883 ± 18
24	906 ± 18	480	878 ± 18

Tabla 13. Valor triestímulo Y desde el minuto 0 hasta el 36 y del 468 al 480, en intervalos de 4 minutos.

	Y_{LED}	X_{LED}	Y_{LED}
Promedio (Min 0 - 480)	887 ± 18	$0,4537 \pm 0,0015$	$0,4038 \pm 0,0015$
	Min 34 - 480	Min 2 - 480	Min 1 - 480
Promedio	$(883 \pm 18) \text{ cd/m}^2$	$0,4537 \pm 0,0030$	$0,4038 \pm 0,0030$
Máximo	$(901 \pm 18) \text{ cd/m}^2$	$0,4567 \pm 0,0015$	$0,4067 \pm 0,0015$
Mínimo	$(872 \pm 17) \text{ cd/m}^2$	$0,4533 \pm 0,0015$	$0,4036 \pm 0,0015$
(Máx - Mín)/Media	3,3%	0,74%	0,77%

Tabla 14. Datos calculados para la fuente LED.

El valor triestímulo Y puede considerarse estable a partir del minuto 34, la coordenada x a partir del minuto 2 y la y, a partir del minuto 1. También se pueden observar estos tiempos en las gráficas de las coordenadas de cromaticidad y de los valores triestímulo.

La calidad de la estabilización es también bastante buena tanto para las coordenadas de cromaticidad como para el valor triestímulo Y.

4.2 Resultados en el cálculo del CRI

En el Excel se ha introducido la media de la radiancia calculada a partir del minuto de estabilización para cada fuente, excepto para la fuente F, que se ha calculado desde el minuto 0 ya que no existe un minuto a partir del cual se pueda considerar estable.

Los datos obtenidos de Ra y CRI2012 para nuestras cuatro fuentes fueron los siguientes:

Fuente de iluminación	Ra	CRI2012
D65	93	96
TL84	84	79
F	99	100
LED	82	83

Tabla 15. Índice de rendimiento del color para las fuentes de iluminación D65, TL84, F y LED.

No hemos considerado los errores debido a que en el artículo (Smet *et al.*, 2013) y en la calculadora del índice de rendimiento del color (Smet *et al.*, 2015) no se dice nada sobre el error de los cálculos.

Para realizar medidas de color se recomienda un $CRI > 90$ (Wee *et al.*, 2016), por lo que serían útiles la fuente D65 y la F, desde el punto de vista del rendimiento del color.

Podemos comparar nuestros resultados con los obtenidos por otros autores. Respecto al CRI de la fuente de iluminación D65, el valor es muy parecido al obtenido por otros investigadores con la misma cabina de iluminación (Jafari *et al.*, 2016) (Luo *et al.*, 2013), con valores de 97 y 95,4

respectivamente. Para la fuente TL84, Luo *et al.* (Luo *et al.*, 2013) obtuvieron un CRI de 83,5 y para la fuente A, un CRI de 98, ambos muy parecidos a los que nosotros hemos obtenido. Respecto a los ledes que hemos usado, presentan una temperatura de color de 2734 K, calculada también con el mismo Excel que calcula el CRI. La fuente estudiada por Luo *et al.* (Luo *et al.*, 2013) con una temperatura más cercana a la nuestra es la de 2812 K, que presenta un CRI de 88,7, superior al que nosotros hemos obtenido.

4.3 Elección de la fuente

A continuación elegimos una de las cuatro fuentes para realizar las medidas de color del patrón obtenido por distintas impresoras y en distintos papeles en función de todos los datos y gráficas descritas anteriormente.

Para la fuente D65 se podría establecer un tiempo de estabilización de unos 10-15 minutos, aunque el color estabiliza a partir de los 5 minutos aproximadamente. La fuente TL84 estabilizaría a partir de unos 10 minutos. Respecto a al iluminante F, no lo usaríamos para realizar nuestras medidas ya que la emisión a lo largo del tiempo es muy inestable y las medidas del color no serían fiables. Para el LED podemos establecer un tiempo de una hora y media, aunque el color estabilizaría a los 35 minutos.

En cuanto a la calidad de la estabilización, tenemos que el TL84 tiene mejor calidad (porcentaje más bajo de variación respecto a la media una vez estable) que las demás fuentes, con un 1,7%, y la que tiene menor calidad es la fuente F, con un 15%. Respecto a las coordenadas de cromaticidad, todas las fuentes presentan porcentajes muy bajos.

Respecto al índice de rendimiento del color, la mejor fuente sería la F, pero esta está descartada debido a su inestabilidad temporal. Seguidamente estaría la D65, y después, la TL84 o el LED, dependiendo del índice en el que nos fijemos.

Analizados todos estos datos podemos concluir que la mejor fuente para realizar nuestras medidas es la D65, con una gran fiabilidad a la hora de reproducir el color, además de su gran estabilidad. Por tanto, antes de realizar cualquier medida con esta fuente debemos dejar encendida la cabina de iluminación como mínimo 15 minutos.

4.4 Resultados y elección del tipo de papel

Se ha medido la radiancia en cada punto del papel usando la fuente D65, elegida en el apartado anterior. A la hora de analizar los datos, calculamos la diferencia de color, tono, croma y luminosidad media, los valores máximos encontrados y entre qué puntos se encontraban esos valores (Tabla 16). Estas diferencias se expresan en unidades CIELAB.

	Folio	Papel fotográfico	Papel de dibujo
Media ΔE^*ab	0,82 ± 0,59	0,41 ± 0,30	0,87 ± 0,64
Media ΔL^*ab	0,78 ± 0,61	-0,36 ± 0,32	0,86 ± 0,64
Media ΔC^*ab	-0,15 ± 0,11	0,099 ± 0,075	0,071 ± 0,054
Media ΔH^*ab	0,048 ± 0,041	-0,069 ± 0,053	0,049 ± 0,043
ΔE^*ab máxima	4,04 (1277-91)	2,41 (748-18)	3,91 (1327-129)
ΔL^*ab máxima	4,04 (1277-91)	-2,41 (748-18)	3,90 (1327-129)
ΔC^*ab máxima	-0,84 (1293-55)	0,586 (581-12)	-0,439 (660-2)
ΔH^*ab máxima	0,245 (640-19)	-0,446 (963-749)	0,265 (1251-14)

Tabla 16. Media y valor máximo de diferencias de color, luminosidad, croma y tono en el sistema CIELAB para diferentes tipos de papel.

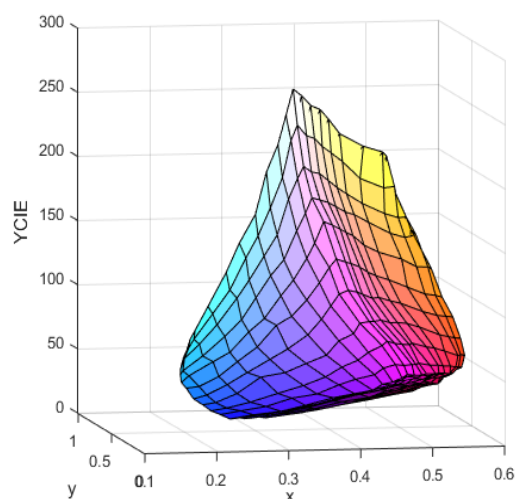
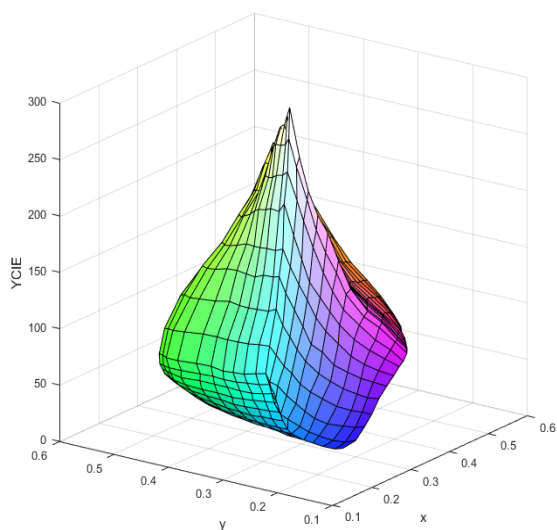
Se ha usado como error de las medias la desviación estándar. Entre paréntesis se ha puesto entre qué puntos se ha encontrado la diferencia máxima. La numeración de las muestras en el patrón de color se puede consultar en el apartado 8.5 del anexo. La componente que tiene un mayor peso es la diferencia de luminosidad. El valor medio y el valor máximo más pequeño de diferencia de color lo tiene el papel fotográfico. Sin embargo, respecto al croma y al tono este es el que tiene mayores diferencias. Si consideramos las medias de los tres tipos de papel, las diferencias de color no superan las 2,3 unidades CIELAB que corresponden aproximadamente a la diferencia justamente perceptible, es decir, a la mínima diferencia de color que es capaz de distinguir el ojo humano (aunque esta va variando en el espacio de color) (Sharma y Bala, 2003). Sin embargo, las diferencias de color máximas encontradas sí superan esas 2,3 unidades CIELAB y habría que tenerlo en cuenta.

Finalmente hemos elegido para nuestras medidas el papel fotográfico ya que es el que tiene la media y el valor máximo de diferencia de color más pequeño y, por tanto, el más uniforme.

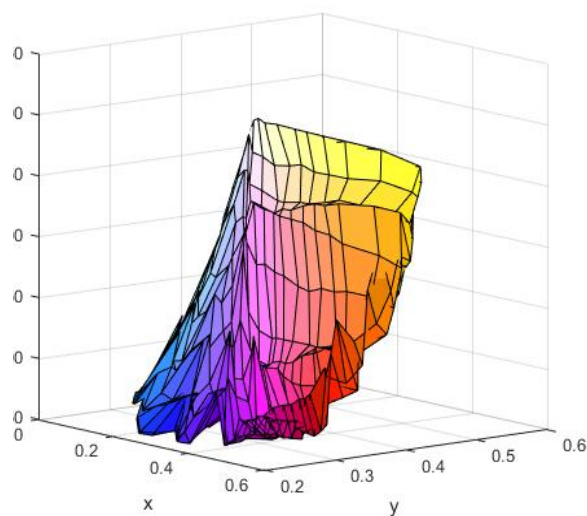
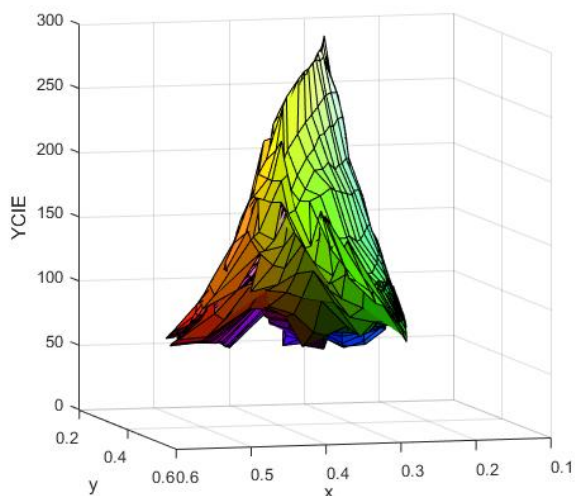
4.5 Resultados y discusión de la gama de color

El patrón de color con 1331 muestras se ha impreso en dos tipos de papel fotográfico A4 mate: marca Epson, 167 g/m²; y marca Ice Professional Inkjet Photo Paper (marca blanca), 190 g/m².

Al representar gráficamente en un mapa 3D con Matlab la gama de color que es capaz de reproducir cada dispositivo de impresión gráfica con cada papel fotográfico en valores x, y, Y obtenemos las siguientes figuras (Fig. 28, 29, 30 y 31):



Figuras 28 y 29. Representación 3D de la gama de color obtenida con la impresora de inyección de tinta en el papel de marca blanca (izquierda) y de marca Epson (derecha). Autora: Ana Belén López Baldomero.



Figuras 30 y 31. Representación 3D de la gama de color obtenida con la impresora láser en el papel de marca blanca (izquierda) y de marca Epson (derecha). Autora: Ana Belén López Baldomero.

A simple vista podemos ver una clara diferencia en la forma de las figuras 3D obtenidas. En la impresora de inyección de tinta estas formas son más suaves, mientras que en la impresora láser encontramos unos picos inesperados, más acentuados en la zona de los colores oscuros (zona inferior).

Podemos comparar las primeras figuras con las obtenidas por Salas en 2016 (Salas, 2016) con una impresora de inyección de tinta y vemos que las gamas presentan formas parecidas.

Respecto a la impresora láser, pensamos que estas formas tan irregulares, obtenidas en ambos papeles, pueden deberse a los perfiles de reproducción del color de la impresora. El calibrado de la impresora mediante el perfil ICC (Consortio Internacional del Color) permite relacionar las señales enviadas al dispositivo cuando queremos imprimir alguna imagen y el color producido. El objetivo del perfil ICC es proporcionar los datos necesarios para transformar los colores de una imagen con las características de un dispositivo, por ejemplo, un ordenador, a otro dispositivo, como podría ser una impresora. Hay que tener en cuenta que sin el perfil correcto la diferencia de color entre lo que queremos imprimir y lo que obtenemos puede ser bastante grande (Green y MacDonald, 2002). Por tanto, estos pueden estar modificando la cantidad de magenta, amarillo y cian en cada muestra del patrón de tal forma que no se corresponden con los valores que nosotros introducimos. De hecho, al poner ambos patrones impresos uno al lado del otro se hace notable la diferencia de color entre las muestras (Fig. 32).



Figura 32. Patrón de 1331 muestras impreso en papel de marca blanca con impresora láser (izquierda) y con impresora de inyección de tinta (derecha). Autora: Ana Belén López Baldomero.

Para estudiar la información de forma más detallada vamos a ver los valores de las coordenadas de cromaticidad obtenidas con la máxima cantidad de magenta, amarillo y cian puro. También nos ha parecido interesante estudiar los extremos, valores máximos y mínimos, para las coordenadas x e y , y ver a qué valores corresponden de CMY (Tablas 17, 18, 19 y 20).

Inyección -190 g/m ²	x	y	C	M	Y
Magenta	0,4884 ± 0,0015	0,2532 ± 0,0015	0	100	0
Amarillo	0,4817 ± 0,0015	0,4883 ± 0,0015	0	0	100
Cian	0,1822 ± 0,0015	0,2617 ± 0,0015	100	0	0
Rojo (máx. x)	0,5760 ± 0,0015	0,3408 ± 0,0015	0	80	100
Verde (máx. y)	0,3535 ± 0,0015	0,5547 ± 0,0015	60	0	100
Azul claro (mín. x)	0,1720 ± 0,0015	0,2436 ± 0,0015	100	30	0
Azul oscuro (mín. y)	0,2344 ± 0,0015	0,1763 ± 0,0015	100	100	0

Tabla 17. Coordenadas x e y para los colores primarios de la mezcla sustractiva y para los extremos de la gama de color de la impresora de inyección de tinta con el papel de marca blanca.

Inyección - 167 g/m²	x	y	C	M	Y
Magenta	0,5235 ± 0,0015	0,2673 ± 0,0015	0	100	0
Amarillo	0,4862 ± 0,0015	0,4870 ± 0,0015	0	0	100
Cian	0,1795 ± 0,0015	0,2635 ± 0,0015	100	0	0
Rojo (máx. x)	0,5925 ± 0,0015	0,3406 ± 0,0015	0	80	100
Verde (máx. y)	0,3511 ± 0,0015	0,5573 ± 0,0015	60	0	100
Azul claro (mín. x)	0,1704 ± 0,0015	0,2413 ± 0,0015	100	30	0
Azul oscuro (mín. y)	0,2438 ± 0,0015	0,1835 ± 0,0015	100	100	0

Tabla 18. Coordenadas *x* e *y* para los colores primarios de la mezcla sustractiva y para los extremos de la gama de color de la impresora de inyección de tinta con el papel de la marca Epson.

Láser - 190 g/m²	x	y	C	M	Y
Magenta	0,4806 ± 0,0015	0,2653 ± 0,0015	0	100	0
Amarillo	0,4411 ± 0,0015	0,5093 ± 0,0015	0	0	100
Cian	0,1900 ± 0,0015	0,2281 ± 0,0015	100	0	0
Rojo (máx. x)	0,5224 ± 0,0015	0,3172 ± 0,0015	20	100	90
Verde (máx. y)	0,3919 ± 0,0015	0,5120 ± 0,0015	50	10	100
Azul claro (mín. x)	0,1755 ± 0,0015	0,2192 ± 0,0015	100	30	20
Azul oscuro (mín. y)	0,2196 ± 0,0015	0,2037 ± 0,0015	100	80	0

Tabla 19. Coordenadas *x* e *y* para los colores primarios de la mezcla sustractiva y para los extremos de la gama de color de la impresora láser con el papel de marca blanca.

Láser -167 g/m²	x	y	C	M	Y
Magenta	0,4751 ± 0,0015	0,2754 ± 0,0015	0	100	0
Amarillo	0,4420 ± 0,0015	0,5056 ± 0,0015	0	0	100
Cian	0,2022 ± 0,0015	0,2440 ± 0,0015	100	0	0
Rojo (máx. x)	0,5247 ± 0,0015	0,3198 ± 0,0015	20	100	100
Verde (máx. y)	0,4165 ± 0,0015	0,5067 ± 0,0015	30	0	100
Azul claro (mín. x)	0,1881 ± 0,0015	0,2352 ± 0,0015	100	30	20
Azul oscuro (mín. y)	0,2260 ± 0,0015	0,2205 ± 0,0015	100	80	0

Tabla 20. Coordenadas *x* e *y* para los colores primarios de la mezcla sustractiva y para los extremos de la gama de color de la impresora láser con el papel de la marca Epson.

Si comparamos los resultados obtenidos con los dos tipos de papel para la impresora de inyección de tinta (Tablas 17 y 18) vemos que son muy parecidos. Podemos destacar que el papel de marca Epson abarca un poco más la zona de los rojos y el de marca blanca, la zona del azul. Si comparamos los dos tipos de papel para la impresora láser (Tablas 19 y 20), el papel de marca blanca nos da una gama más amplia de magenta, cian, verde y azules. En este caso la diferencia entre los dos papeles es más notable.

Al comparar los dos tipos de dispositivos de impresión gráfica para el mismo papel encontramos que la impresora láser produce una gama más reducida de magenta, rojo, verde y azul.

Algunos investigadores representan la gama de color en el diagrama de cromaticidad CIE xy como un hexágono uniendo los colores primarios, CMY, y secundarios, RGB, de las mezclas sustractivas (Green y MacDonald, 2002). Hemos realizado esto para cada impresora y papel (Fig. 33, 34, 35 y 36), cogiendo los colores primarios, señalizados con C, M, A, y los colores secundarios, rojo (C=0, M=100, Y=100), verde (C=100, M=0, Y=100) y azul (C=100, M=100, Y=0), señalizados como R, V y A.

CIE 1931	x	y
Magenta	0.48844282	0.2532296
Amarillo	0.48168992	0.48827995
Cian	0.18216926	0.26167358
Rojo	0.55286316	0.31298985
Verde	0.26331527	0.52361053
Azul	0.23439824	0.17628086

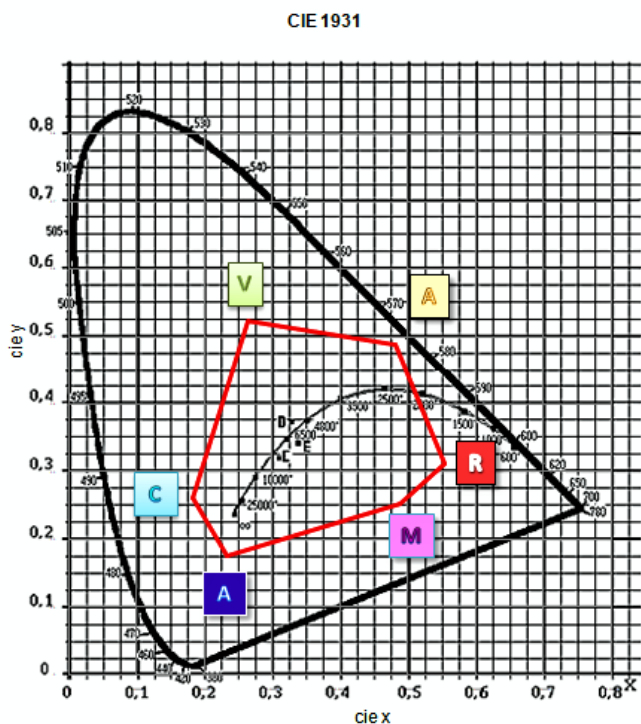


Figura 33. Representación de la gama de color en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 para la impresora de inyección de tinta con el papel de marca blanca. Autora: Ana Belén López Baldomero.

CIE 1931	x	y
Magenta	0.52348404	0.26725874
Amarillo	0.48616953	0.48702945
Cian	0.17947413	0.2634511
Rojo	0.57748467	0.31662982
Verde	0.25673925	0.52414775
Azul	0.24379566	0.18347055

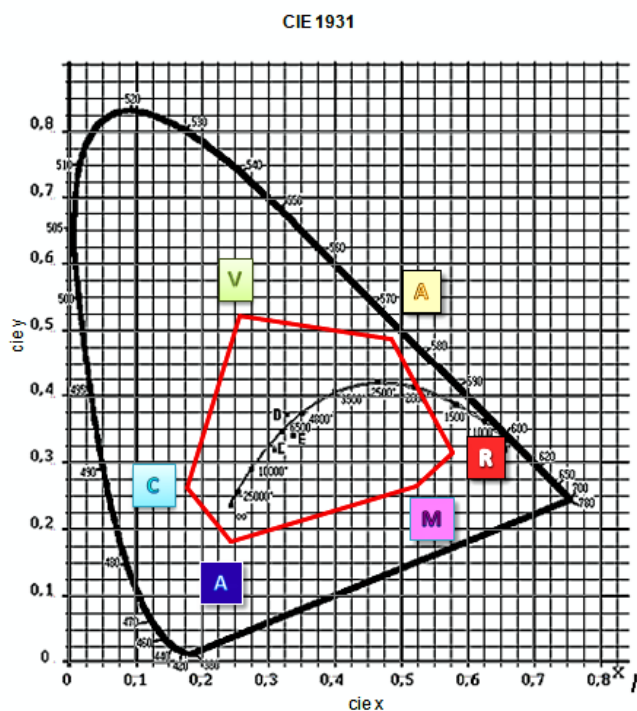


Figura 34. Representación de la gama de color en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 para la impresora de inyección de tinta con el papel de la marca Epson. Autora: Ana Belén López Baldomero.

CIE 1931	x	y
Magenta	0.48062996	0.26532092
Amarillo	0.44111432	0.50926695
Cian	0.18999673	0.22809293
Rojo	0.49499139	0.34474602
Verde	0.23814012	0.39897435
Azul	0.28489748	0.22104078

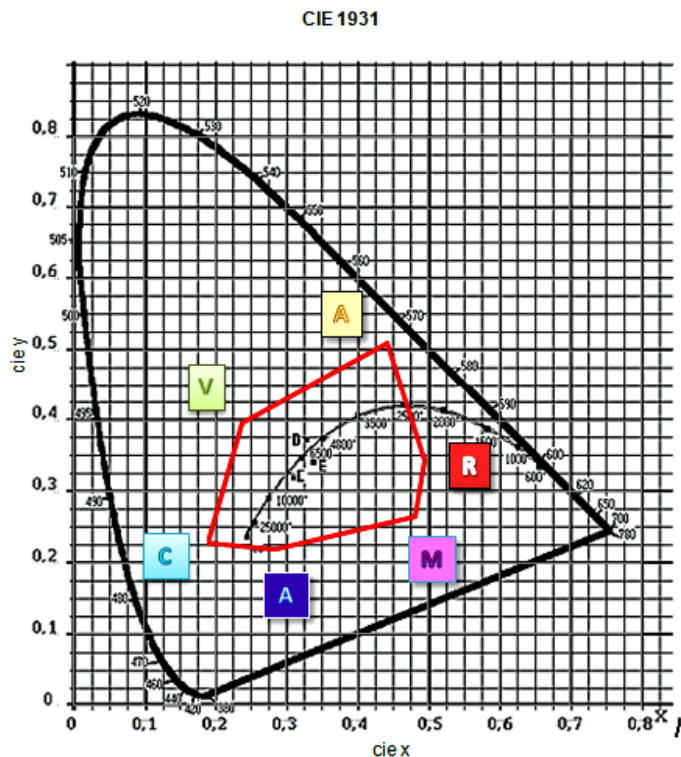


Figura 35. Representación de la gama de color en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 para la impresora láser con el papel de marca blanca. Autora: Ana Belén López Baldomero.

CIE 1931	x	y
Magenta	0.47510234	0.27541514
Amarillo	0.44202435	0.50564856
Cian	0.20224528	0.24396149
Rojo	0.4945926	0.34130081
Verde	0.24266406	0.38454924
Azul	0.29468441	0.23602895

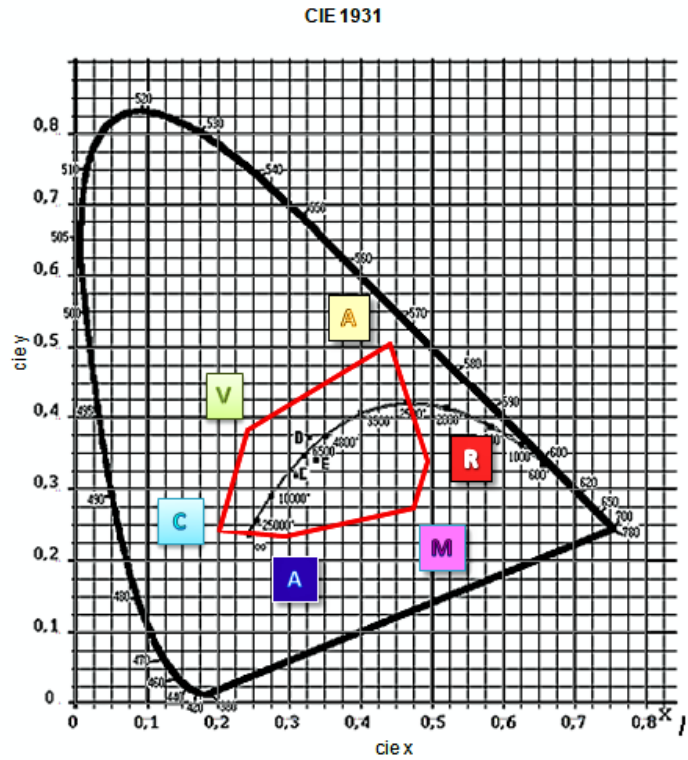


Figura 36. Representación de la gama de color en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 para la impresora láser con el papel de la marca Epson. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Con estas representaciones se hace mucho más visual la comparación entre las distintas impresoras y los distintos tipos de papel, sacando las mismas conclusiones que del análisis de los valores de las coordenadas de cromaticidad. Sin embargo, estas representaciones sólo nos dan una idea general del rango de color, ya que la gama de color es un espacio tridimensional, como ya hemos visto (Green y MacDonald, 2002).

En función de los resultados, para conseguir la gama de color más amplia deberíamos usar la impresora de inyección de tinta. Ambos papeles fotográficos proporcionan una gama parecida, un poco más amplia en los rojos y más reducida en los azules para el papel de la marca Epson.

Aunque nosotros hemos obtenido la gama de color con papel fotográfico, también es interesante ver la gama obtenida por otros autores con distintos tipos de papel y con otros métodos de impresión. Yang *et al.* (Yang *et al.*, 2011) compararon la gama de color conseguida con folios y papel de dibujo en función de sus propiedades. Representaron la gama en el diagrama de cromaticidad CIE 1931, obteniendo que el papel de dibujo proporcionaba una gama mayor que los folios. Li *et al.* (Li *et al.*, 2016) compararon también distintos tipos de papel (fotográfico, de impresión, mate y con brillo) y relacionaron los resultados obtenidos en la gama de color usando una impresora de inyección de tinta con las propiedades ópticas del papel: opacidad, luminosidad y cromaticidad. Concluyeron que a mayor luminosidad del papel, mejor era la reproducción del color y que la opacidad parecía no influir. Perales *et al.* (Perales *et al.*, 2009) también compararon las gamas de color obtenidas con distintos tipos de papel, concluyendo que un acabado brillante (glossy) era mejor a la hora de reproducir el color que un acabado semi-mate. Ambos papeles

usados en nuestro trabajo eran mate, por lo que quizás sería interesante ver también la gama conseguida con un papel de acabado brillante o semi-glossy.

Perales *et al.* (Perales *et al.*, 2008) compararon las gamas de color obtenidas con distintos dispositivos de impresión gráfica, láser, de inyección de tinta y offset, concluyendo que el método que proporcionaba una gama de color más amplia era la impresión láser. Es interesante destacar que nuestros resultados se oponen a los encontrados por Perales *et al.* en 2008. Esto puede deberse, como hemos dicho antes, a los perfiles de la impresora. Por ello será conveniente repetir estas medidas buscando una forma de eliminar el perfil de la impresora para que reproduzca exactamente la cantidad de CMY que le indicamos.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados obtenidos hemos podido extraer las siguientes conclusiones:

- Del estudio de la estabilidad temporal de diversas fuentes, LED, F, D65 y TL84, podemos concluir que estas dos últimas son las que presentan un tiempo de estabilización más corto, de entre 10 y 15 minutos y que la fuente F no sería recomendable para la medida del color, debido a su gran inestabilidad en la emisión.
- Respecto a la calidad en la estabilización, la fuente TL84 sería la mejor opción y después, la D65, ya que sufren muy pocas variaciones una vez consideradas como estables.
- Si nos fijamos en el índice de rendimiento del color, la fuente que reproduciría de forma más fiable la cromaticidad de nuestras muestras sería la D65 (sin considerar la F). Es por ello que en este estudio nos hemos decantado por esta fuente, además de por su estabilidad.
- En cuanto al tipo de papel, el papel fotográfico es el que presenta una mayor uniformidad.
- Al obtener la gama de color producida por una impresora láser y una impresora de inyección de tinta en el espacio 3D xyY vemos que la figura para la primera de ellas es muy irregular, presentando picos inesperados en su superficie, mientras que para la segunda es más regular. Creemos que esto se debe al perfil de la impresora láser.
- Al comparar la gama de color conseguida con la impresora de inyección de tinta y dos tipos de papel fotográfico obtenemos una gama más amplia en los rojos y más reducida en los azules con el papel de la marca Epson respecto a un papel de marca blanca.
- Al comparar la gama conseguida con la impresora láser y los dos tipos de papel fotográfico vemos que con el papel de marca blanca conseguimos una mayor gama de magenta, cian, verde y azul.
- Si comparamos la gama de color con los dos tipos de dispositivos de impresión gráfica para los papeles de la misma marca, encontramos que la impresora láser produce una gama más reducida de magenta, rojo, verde y azul.

Como vemos este trabajo arroja nuevas incógnitas sobre las que se pueden seguir profundizando. Sería interesante ver la gama conseguida con papeles de acabado brillante, además de eliminar el perfil de la impresora láser, o bien usar otros modelos de dispositivos de impresión gráfica. También sería útil ver los cambios en el color al ir secándose la tinta, ya que nosotros no hemos tenido estos cambios en cuenta.

6. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mis agradecimientos, primero de todo, a mis tutores, D. Antonio Manuel Rubiño López y D. Carlos Salas Hita. Gracias por confiar en mí desde el primer momento, por ayudarme siempre que lo he necesitado y resolver todas mis dudas. Por enseñarme tantas cosas sobre la colorimetría e impulsarme siempre a mejorar. Es difícil expresar con palabras mi agradecimiento por todo el esfuerzo que habéis hecho y la dedicación para que esto salga adelante.

A todos los profesores que me han enseñado durante estos cuatro años lo apasionante que puede llegar a ser la Óptica y la Optometría. Cada uno de ellos ha sido importante en este proceso y se merecen mi admiración.

Gracias al Departamento de Óptica por permitirme el uso las instalaciones y la instrumentación para el desarrollo de este TFG.

Por último, pero no menos importante, me gustaría dar las gracias a mi familia y amigos, por su cariño y apoyo incondicional. Porque sin ellos esto no hubiera sido posible.

7. REFERENCIAS

- Berns RS. Billmeyer and Saltzman's principles of color technology. 3ª ed. Nueva York: John Wiley & Sons; 2000.
- Castañeda DF, Cárdenas HA, Sáenz GA. Estudio comparativo de características eléctricas y fotométricas de LEDs de iluminación de estado sólido y CFLs para iluminación interior. *Tekhnê*. 2012; 9: 79-90.
- Centro Español de Metrología. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. 1ª ed. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio: JCGM; 2008.
- Fairchild MD. Color Appearance Models. 2ª ed. Chichester: : John Wiley & Sons; 2005.
- Fernández-Rechea J, Uroz J, Díaz JA, García-Beltrán A. Color reproduction on inkjet printers and paper colorimetric properties. *Color Imaging IX: Processing, Hardcopy, and Applications*. 2003; 5293: 101-10.
- Green P, MacDonald L. Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour. Chichester: John Wiley & Sons; 2002.
- Huertas R, Roa R, López-Álvarez MA, Robledo L, Melgosa M. Comparación entre fuentes simuladoras e iluminantes. En: Libro de Actas: VII Congreso Nacional de Color. Madrid; Dpto. de Óptica, Universidad de Granada; 2007. p. 37-38.
- Hunt RWG. The reproduction of colour. 6ª ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2004.
- Jafari R, Amirshahi SH, Ravandi SA. Colorimetric analysis of black coated fabrics. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016; 13(5): 871-82.
- Li C, Ronnier Luo M, Li C, Cui G. The CRI-CAM02UCS colour rendering index. *Color Research & Application*. 2012; 37(3): 160-67.
- Li Y, Cui X, Zhang S, Sun Q, Liu C. Effect of paper optical characteristics on tonal gradation reproduction in inkjet printing. En: Ouyang Y, Xu M, Yang L, Ouyang Y, editores. *Advanced Graphic Communications, Packaging Technology and Materials*. Singapore: Springer; 2016. p. 453-59.
- Luo MR, Gu H, Liu X, Wang B, Liu H. Evaluation of colour fidelity based colour rendering indices. En: 10th China International Forum on Solid State Lighting. Beijing: IEEE; 2013. p. 284-87.
- Malacara D. Color Vision and Colorimetry: theory and applications. 2ª ed. Bellingham: Spie; 2011.
- Mockey IO, Manzano ER. Tendencias en la consideración de la depreciación luminosa de las lámparas empleadas en alumbrado viario. *Ingeniería Energética*. 2013; 34(1): 21-32.
- Perales E, Chorro E, Viqueira V, Martínez-Verdú FM, Otero S, Gracia V. New method for comparing colour gamuts among printing technologies. *The Imaging Science Journal*. 2008; 56(3): 145-52.
- Perales E, Martínez-Verdú FM, Viqueira V, Fernández-Reche J, Díaz JA, Uroz J. Comparison of color gamuts among several types of paper with the same printing technology. *Color Research & Application*. 2009; 34(4): 330-36.
- Photo Research, Inc. PR-655/670 SpectraScan User Manual. 2009. p. 140.

- Reilly ED. Milestones in computer science and information technology. Westport: Greenwood Press; 2003.
- Salas Hita C. Nuevo test para la detección y evaluación de anomalías en la visión del color. [tesis doctoral]. Granada: Universidad de Granada; 2016.
- Schanda J. Colorimetry: understanding the CIE System. New Jersey: John Wiley & Sons; 2007.
- Sharma G, Bala R. Digital Color Imaging. 1ª ed. Handbook. Nueva York: CRC press; 2003.
- Shibata T, Maeda K, Tsuboi H, inventores; Canon Inc, titular. Inkjet printing method and inkjet printing apparatus. Patente de Estados Unidos. US 7585038B2. 8-9-2009.
- Smet KAG, Schanda J, Whitehead L, Luo RM. CRI2012: A proposal for updating the CIE colour rendering index. Lighting Research and Technology. 2013; 45(6): 689-709.
- Smet KAG, Schanda J, Whitehead L, Luo RM. "CRI calculator", ResearchGate, Enero de 2015, en: https://www.researchgate.net/publication/272161893_CRI2012_calculator
- Wee AG, Meyer A, Wu W, Wichman CS. Lighting conditions used during visual shade matching in private dental offices. The Journal of photosthetic dentistry. 2016; 115(4): 469-74.
- Yang YG, Gao QZ, Liu FP. Effects of paper properties on printing dot gain and color gamut. Advanced Materials Research. 2011; 236: 1238-41.

8. ANEXOS

8.1 Gráficas fuente de iluminación D65

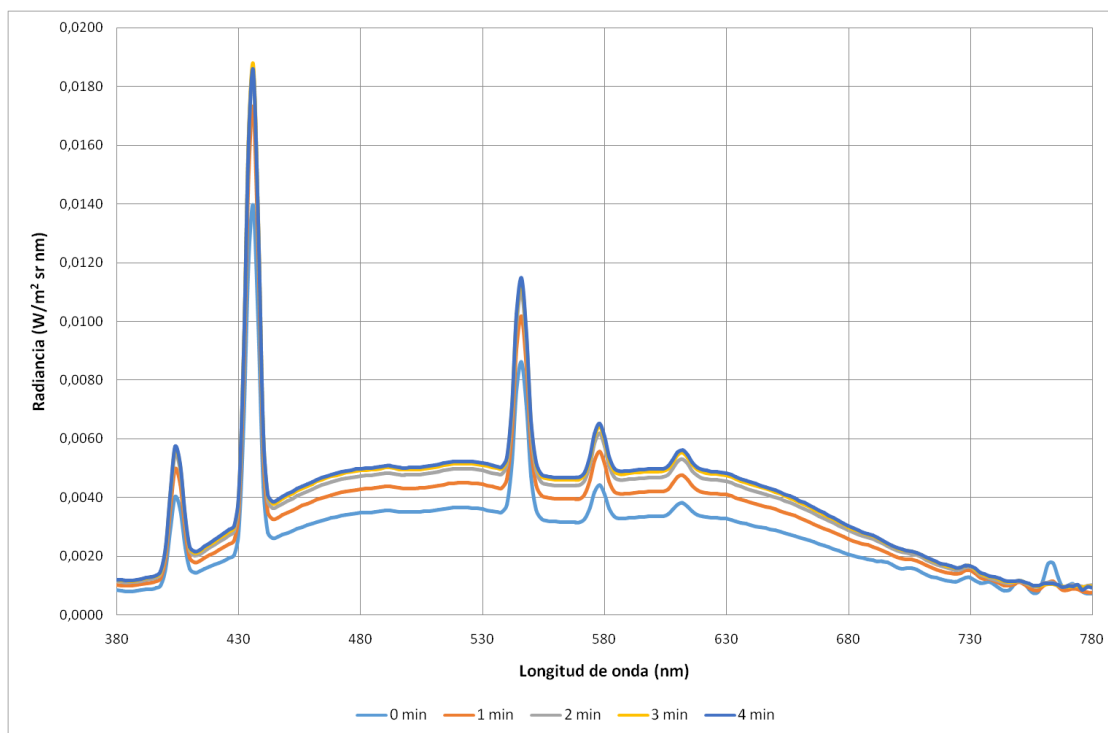


Figura 37. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 0 al 4. Autora: Ana Belén López Baldomero.

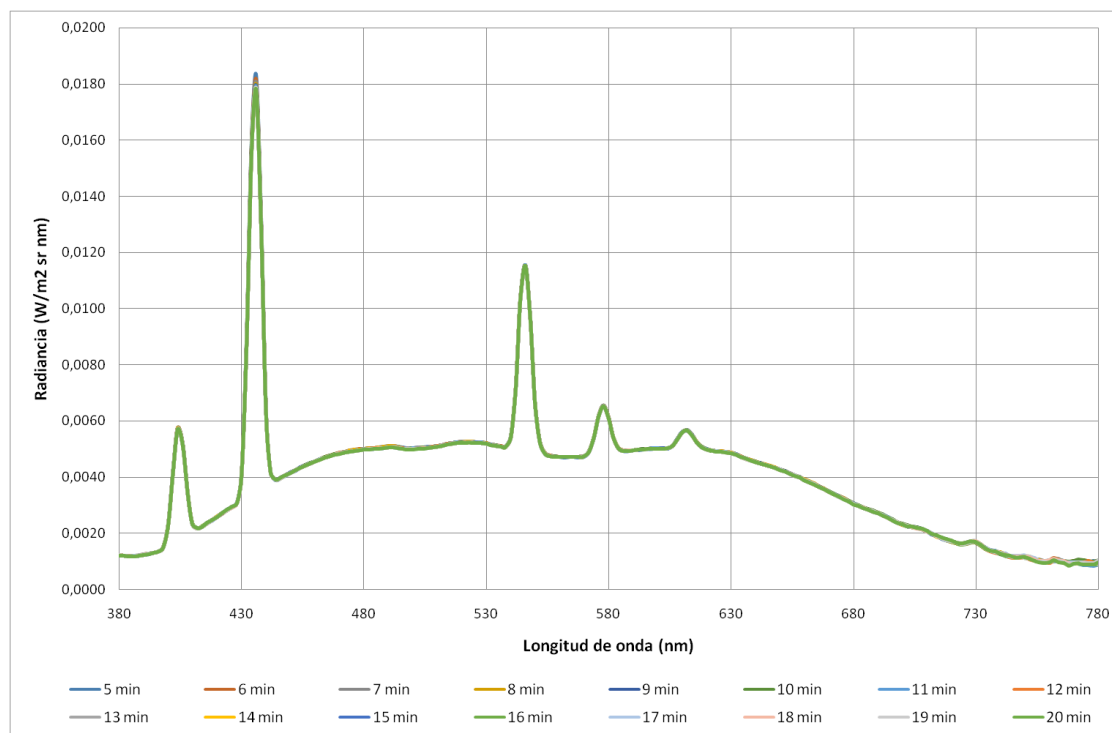


Figura 38. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 5 al 20. Autora: Ana Belén López Baldomero.

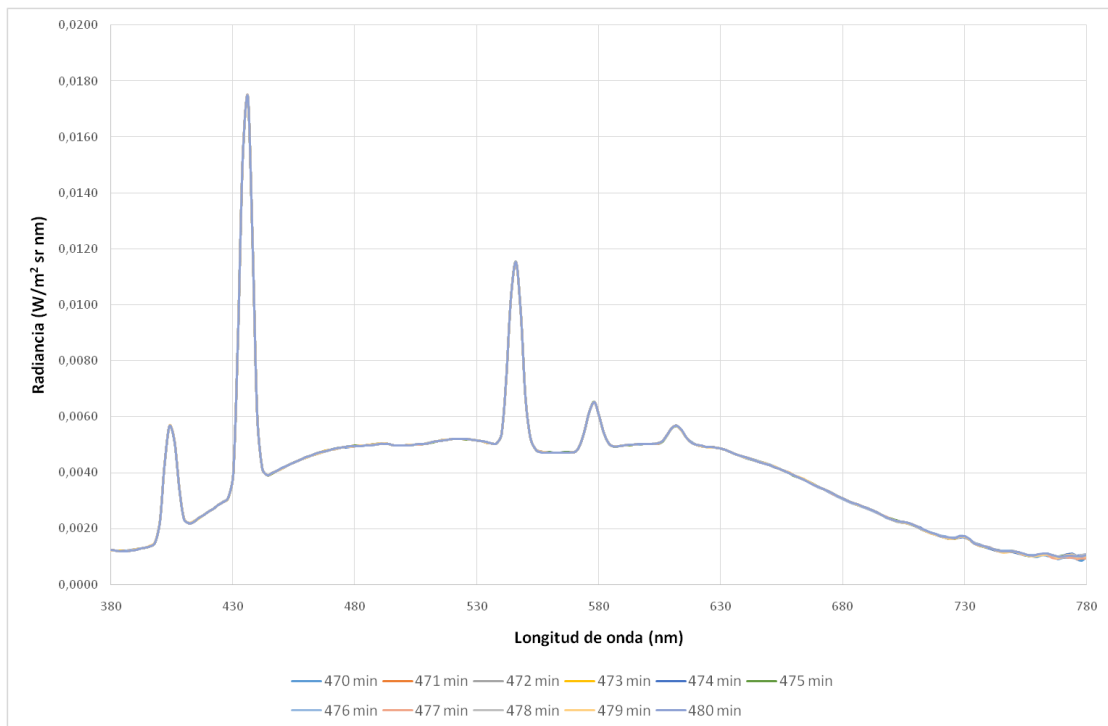


Figura 39. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 470 al 480. Autora: Ana Belén López Baldomero.

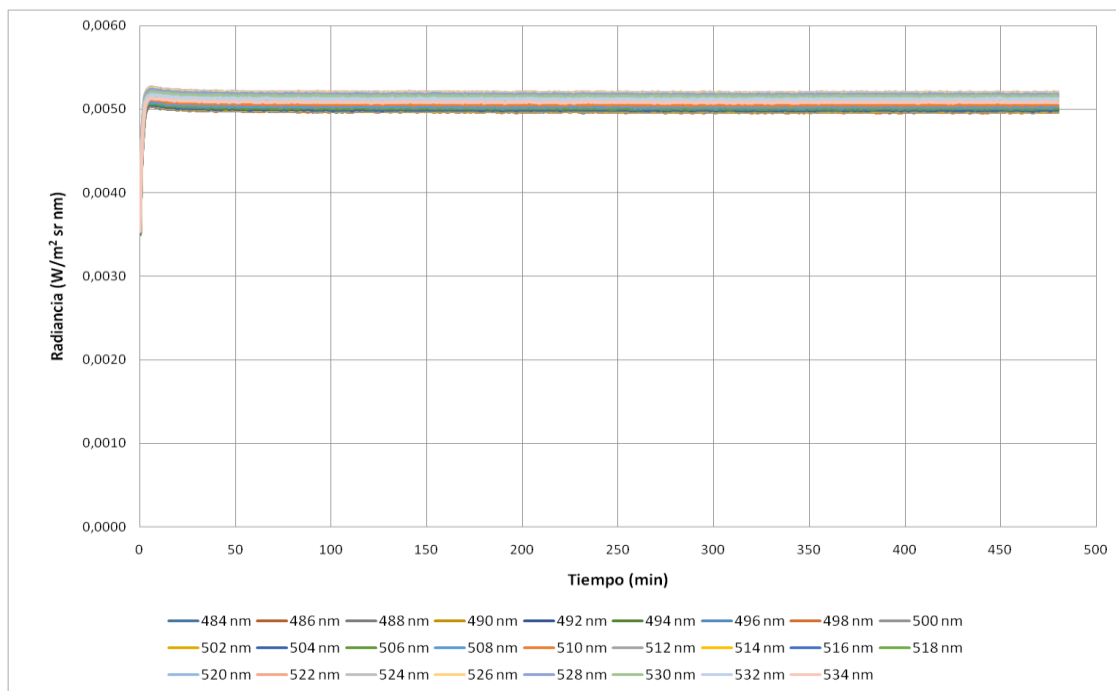


Figura 40. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 484 a 534 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

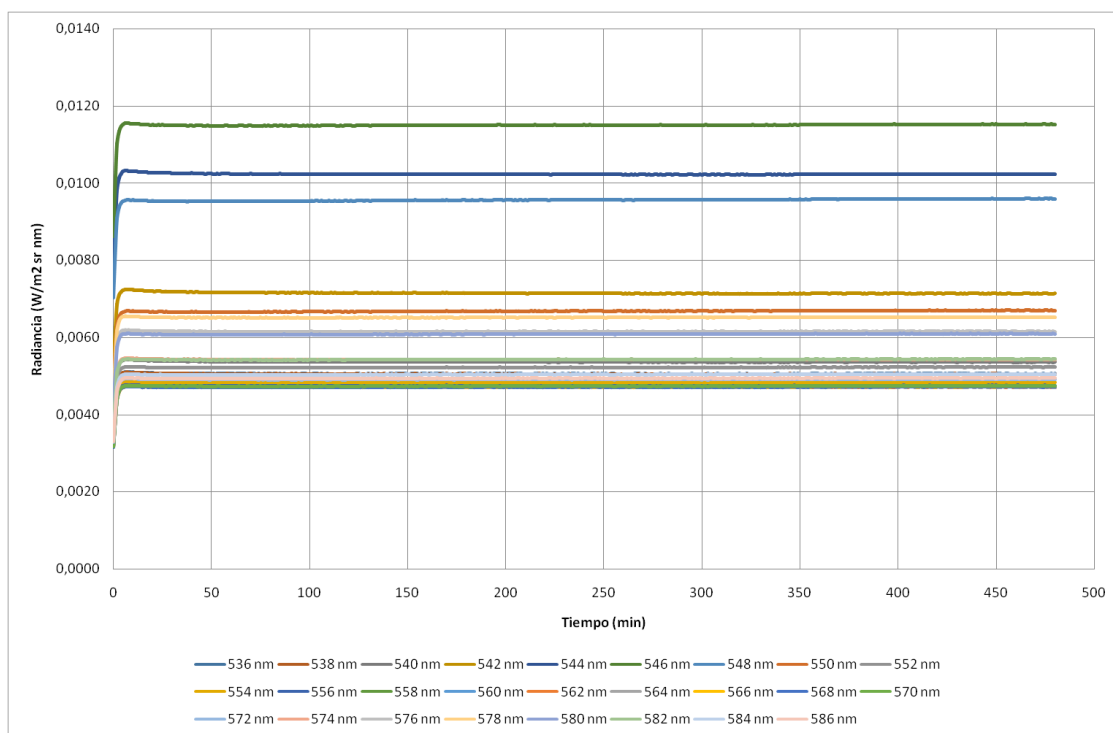


Figura 41. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 536 a 586 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

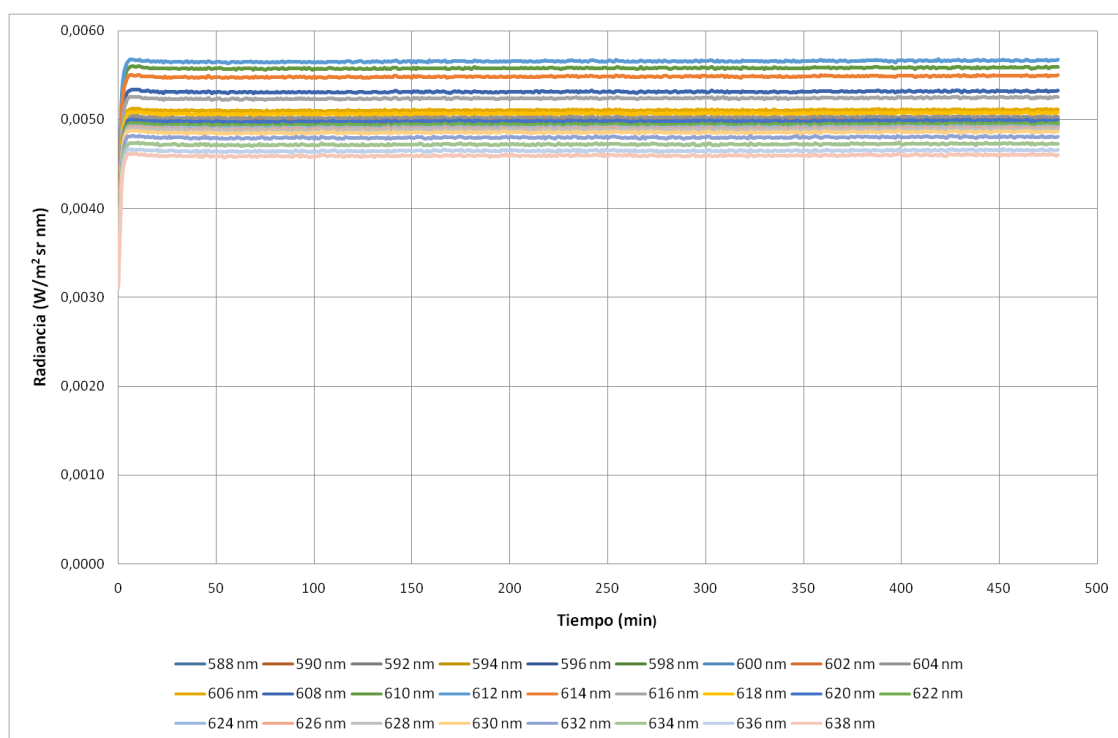


Figura 42. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 588 a 638 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

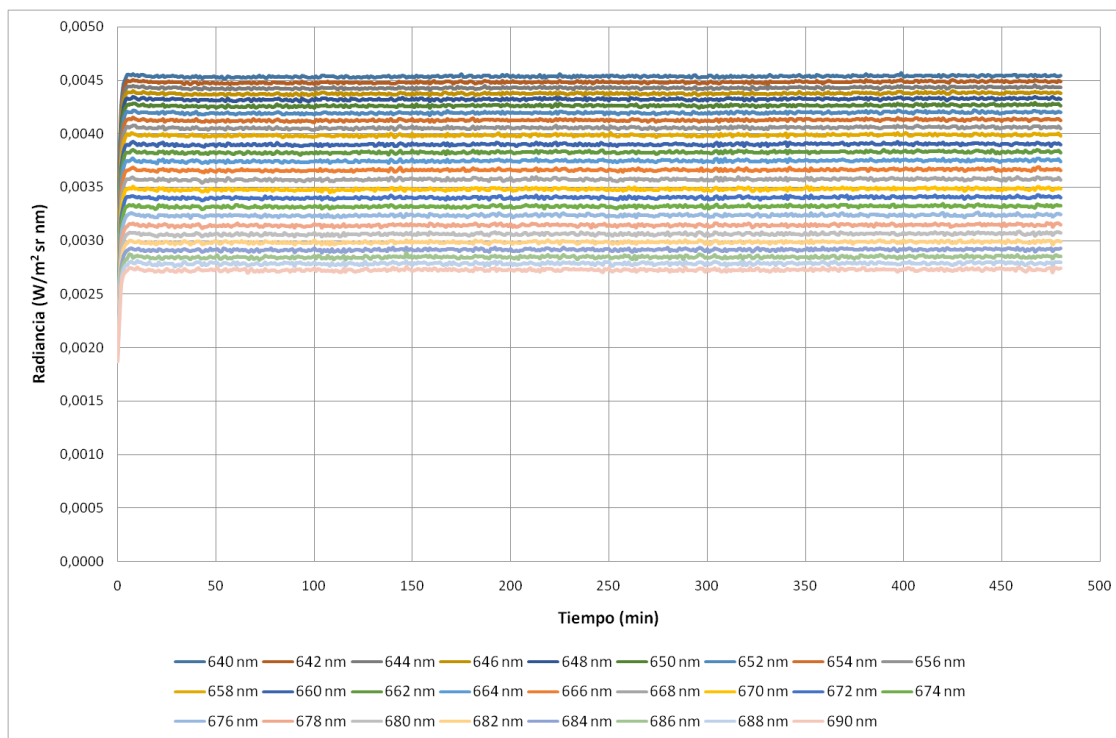


Figura 43. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 640 a 690 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

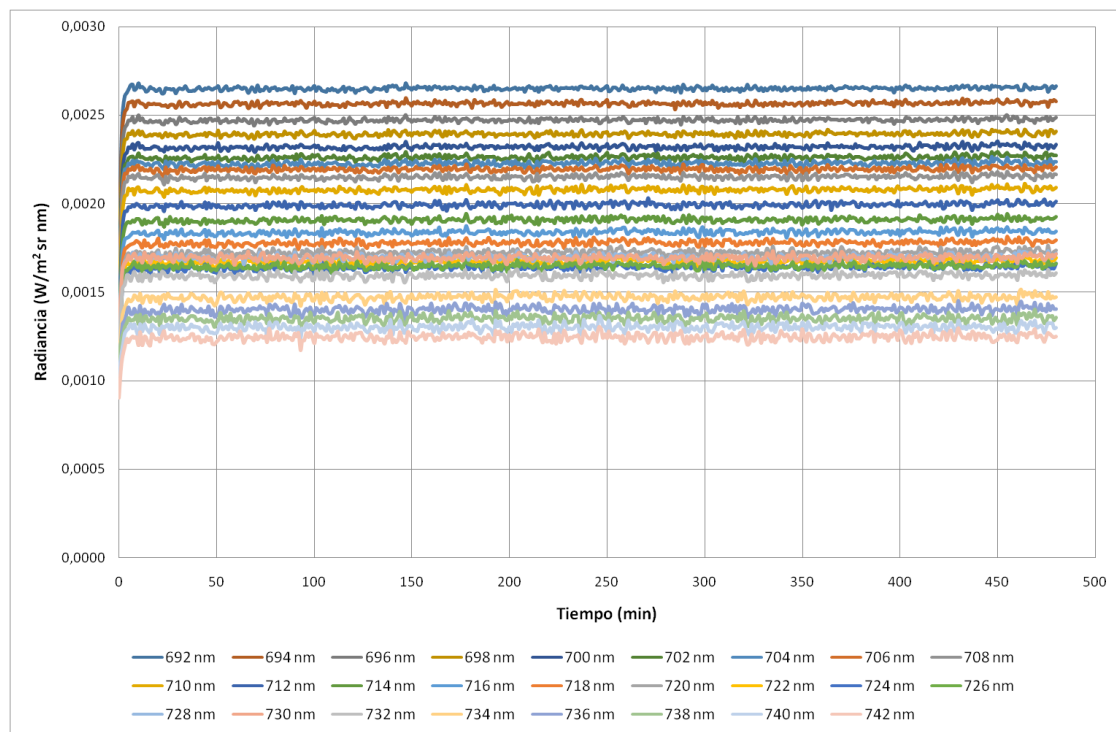


Figura 44. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 692 a 742 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Mínimo (2-480)	Máximo (2-480)	Diferencia (2-480)	λ
0,00115 ± 0,00001	0,00124 ± 0,00001	0,00009 ± 0,00002	380 nm
0,00113 ± 0,00001	0,00122 ± 0,00001	0,00009 ± 0,00002	382 nm
0,00111 ± 0,00001	0,00120 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	384 nm
0,00111 ± 0,00001	0,00121 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	386 nm
0,00113 ± 0,00001	0,00123 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	388 nm
0,00116 ± 0,00001	0,00126 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	390 nm
0,00120 ± 0,00001	0,00129 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	392 nm
0,00122 ± 0,00001	0,00133 ± 0,00001	0,00011 ± 0,00002	394 nm
0,00128 ± 0,00001	0,00138 ± 0,00001	0,00011 ± 0,00002	396 nm
0,00140 ± 0,00001	0,00151 ± 0,00001	0,00011 ± 0,00002	398 nm
0,00219 ± 0,00001	0,00233 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00002	400 nm
0,00413 ± 0,00001	0,00434 ± 0,00001	0,00022 ± 0,00002	402 nm
0,00550 ± 0,00001	0,00576 ± 0,00001	0,00026 ± 0,00002	404 nm
0,00491 ± 0,00001	0,00515 ± 0,00001	0,00024 ± 0,00002	406 nm
0,00318 ± 0,00001	0,00336 ± 0,00001	0,00018 ± 0,00002	408 nm
0,00218 ± 0,00001	0,00235 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	410 nm
0,00203 ± 0,00001	0,00220 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	412 nm
0,00208 ± 0,00001	0,00227 ± 0,00001	0,00019 ± 0,00002	414 nm
0,00218 ± 0,00001	0,00237 ± 0,00001	0,00020 ± 0,00002	416 nm
0,00229 ± 0,00001	0,00249 ± 0,00001	0,00021 ± 0,00002	418 nm
0,00239 ± 0,00001	0,00260 ± 0,00001	0,00022 ± 0,00002	420 nm
0,00250 ± 0,00001	0,00272 ± 0,00001	0,00023 ± 0,00002	422 nm
0,00260 ± 0,00001	0,00284 ± 0,00001	0,00024 ± 0,00002	424 nm
0,00271 ± 0,00001	0,00296 ± 0,00001	0,00025 ± 0,00002	426 nm
0,00285 ± 0,00001	0,00310 ± 0,00001	0,00025 ± 0,00002	428 nm
0,00384 ± 0,00001	0,00403 ± 0,00001	0,00020 ± 0,00002	430 nm

Tabla 21. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 2 para la fuente D65 desde 380 hasta 430 nm.

Mínimo (10-480)	Máximo (10-480)	Diferencia (10-480)	λ
0,00839 ± 0,00001	0,00868 ± 0,00001	0,00029 ± 0,00002	432 nm
0,01521 ± 0,00001	0,01570 ± 0,00001	0,00049 ± 0,00002	434 nm
0,01745 ± 0,00001	0,01789 ± 0,00001	0,00044 ± 0,00002	436 nm
0,01277 ± 0,00001	0,01295 ± 0,00001	0,00018 ± 0,00002	438 nm
0,00603 ± 0,00001	0,00608 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	440 nm
0,00412 ± 0,00001	0,00415 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00002	442 nm
0,00389 ± 0,00001	0,00391 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00002	444 nm
0,00396 ± 0,00001	0,00398 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	446 nm
0,00405 ± 0,00001	0,00407 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	448 nm
0,00413 ± 0,00001	0,00416 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	450 nm
0,00422 ± 0,00001	0,00425 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	452 nm
0,00431 ± 0,00001	0,00434 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	454 nm

0,00438 ± 0,00001	0,00442 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	456 nm
0,00446 ± 0,00001	0,00450 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	458 nm
0,00453 ± 0,00001	0,00457 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	460 nm
0,00460 ± 0,00001	0,00464 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	462 nm
0,00466 ± 0,00001	0,00471 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	464 nm
0,00471 ± 0,00001	0,00476 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	466 nm
0,00476 ± 0,00001	0,00481 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	468 nm
0,00480 ± 0,00001	0,00486 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	470 nm
0,00484 ± 0,00001	0,00490 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	472 nm
0,00487 ± 0,00001	0,00493 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	474 nm
0,00490 ± 0,00001	0,00496 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	476 nm
0,00492 ± 0,00001	0,00499 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	478 nm
0,00494 ± 0,00001	0,00501 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	480 nm
0,00495 ± 0,00001	0,00501 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	482 nm

Tabla 22. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 10 para la fuente D65 desde 432 hasta 482 nm.

Mínimo (3-480)	Máximo (3-480)	Diferencia(3-480)	λ
0,00112 ± 0,00001	0,00127 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00002	744 nm
0,00110 ± 0,00001	0,00123 ± 0,00001	0,00013 ± 0,00002	746 nm
0,00110 ± 0,00001	0,00124 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00002	748 nm
0,00110 ± 0,00001	0,00123 ± 0,00001	0,00013 ± 0,00002	750 nm
0,00107 ± 0,00001	0,00122 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00002	752 nm
0,00100 ± 0,00001	0,00114 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00002	754 nm
0,00096 ± 0,00001	0,00111 ± 0,00001	0,00016 ± 0,00002	756 nm
0,00091 ± 0,00001	0,00111 ± 0,00001	0,00020 ± 0,00002	758 nm
0,00095 ± 0,00001	0,00114 ± 0,00001	0,00019 ± 0,00002	760 nm
0,00098 ± 0,00001	0,00115 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	762 nm
0,00097 ± 0,00001	0,00114 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	764 nm
0,00091 ± 0,00001	0,00110 ± 0,00001	0,00018 ± 0,00002	766 nm
0,00085 ± 0,00001	0,00111 ± 0,00001	0,00025 ± 0,00002	768 nm
0,00088 ± 0,00001	0,00109 ± 0,00001	0,00021 ± 0,00002	770 nm
0,00087 ± 0,00001	0,00110 ± 0,00001	0,00024 ± 0,00002	772 nm
0,00085 ± 0,00001	0,00112 ± 0,00001	0,00027 ± 0,00002	774 nm
0,00081 ± 0,00001	0,00110 ± 0,00001	0,00029 ± 0,00002	776 nm
0,00081 ± 0,00001	0,00113 ± 0,00001	0,00032 ± 0,00002	778 nm
0,00083 ± 0,00001	0,00112 ± 0,00001	0,00029 ± 0,00002	780 nm

Tabla 23. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 3 para la fuente D65 desde 744 hasta 780 nm.

8.2 Gráficas fuente de iluminación TL84

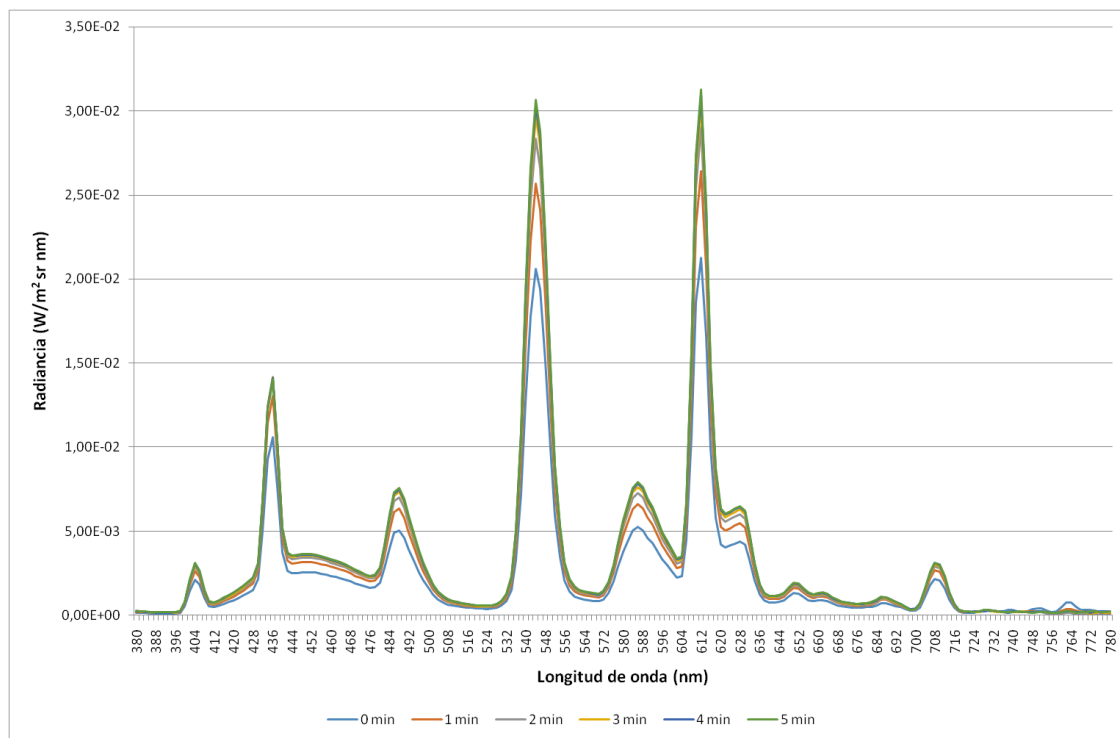


Figura 45. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 0 al 5. Autora: Ana Belén López Baldomero.

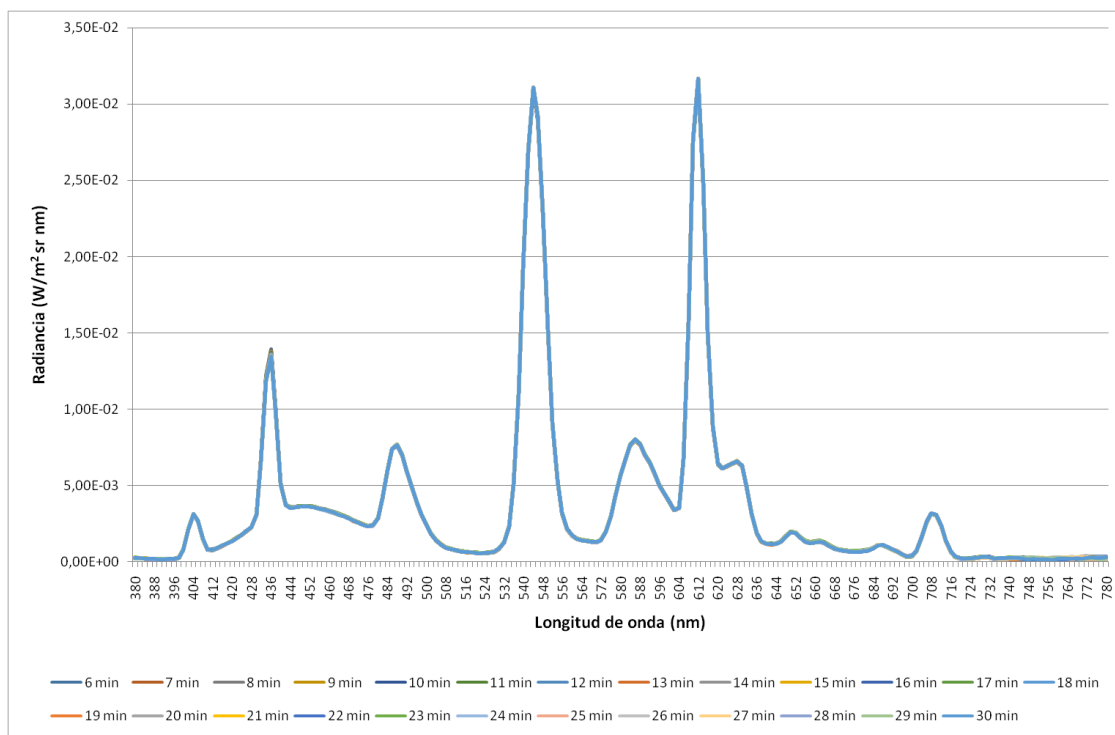


Figura 46. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 6 al 30. Autora: Ana Belén López Baldomero.

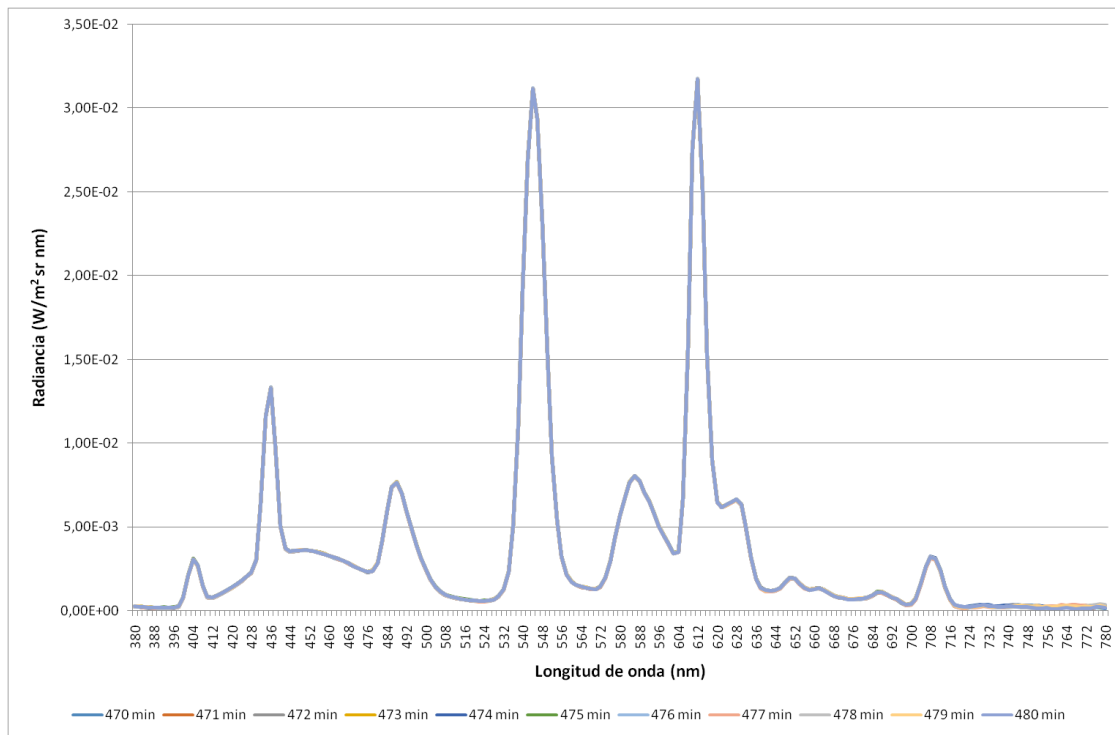


Figura 47. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 470 al 480. Autora: Ana Belén López Baldomero.

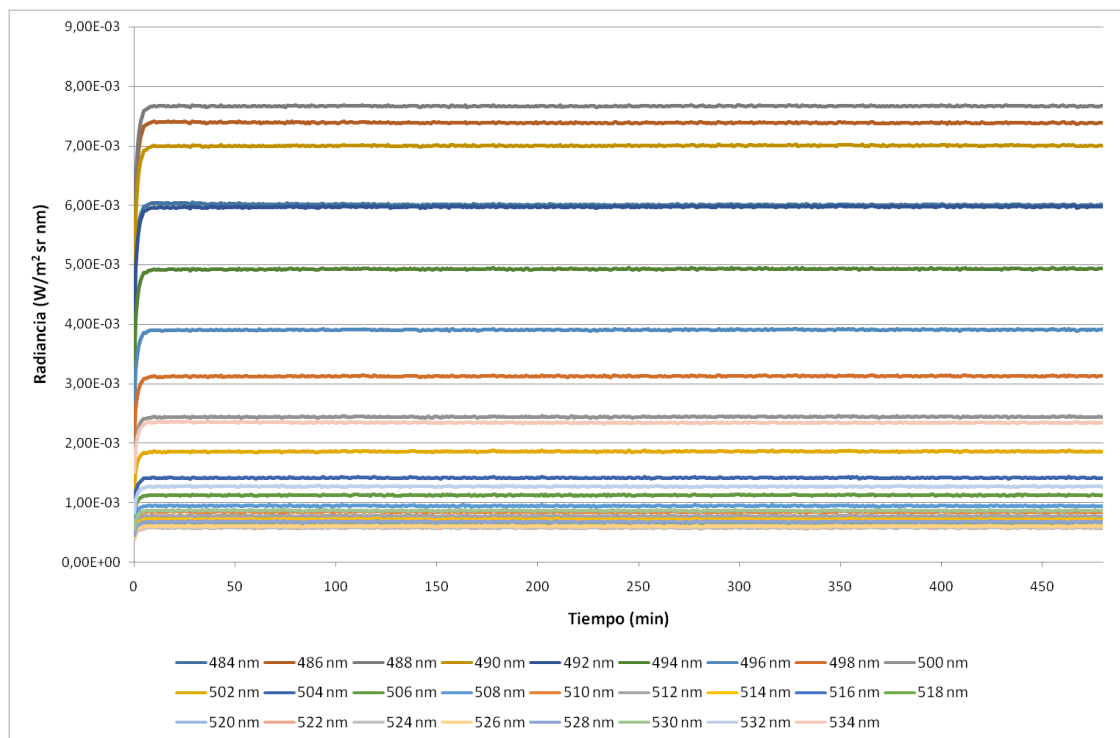


Figura 48. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 484 a 534 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

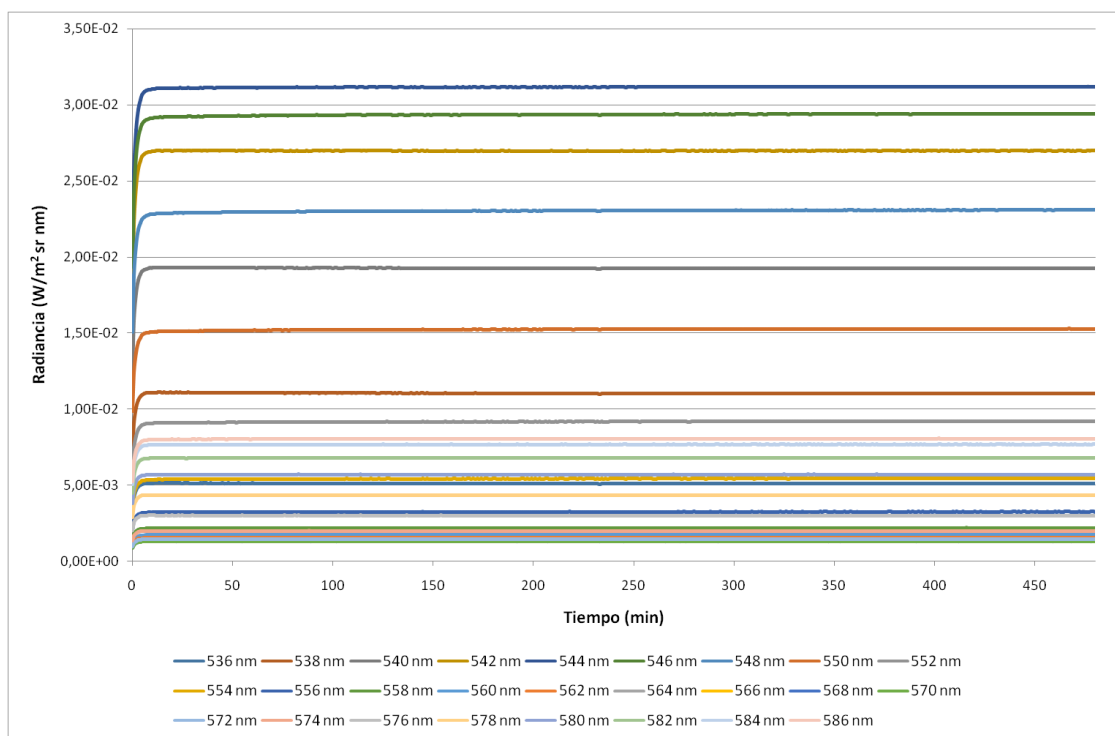


Figura 49. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 536 a 586 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

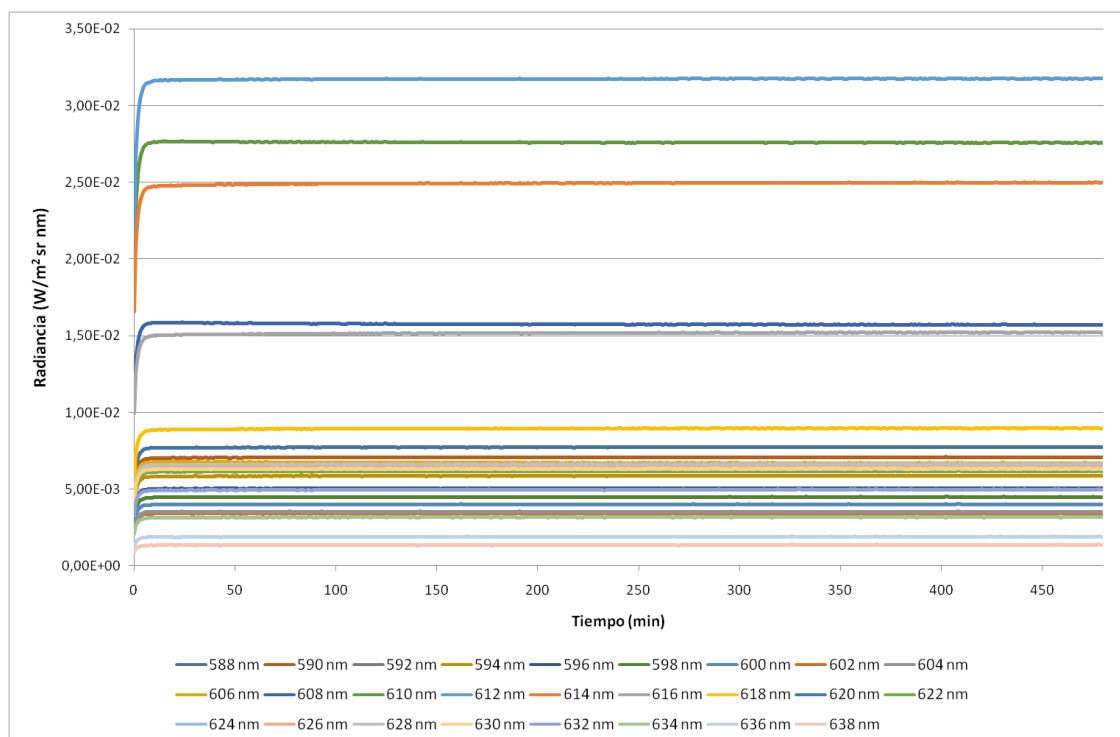


Figura 50. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 588 a 638 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

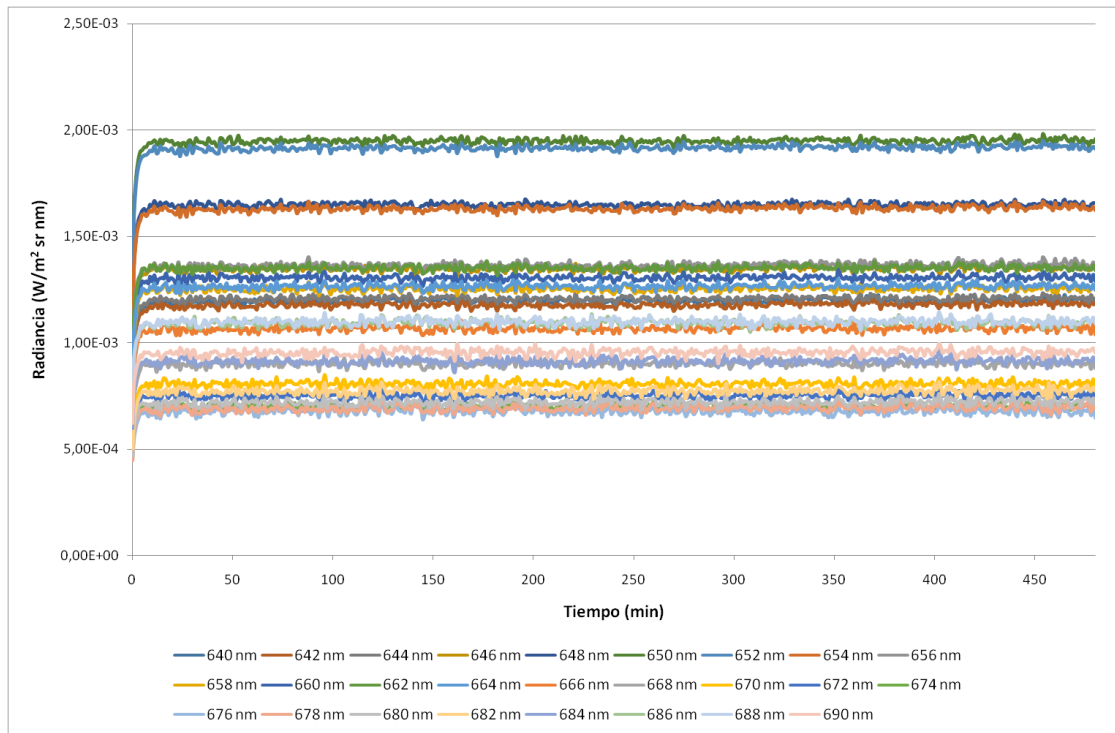


Figura 51. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 640 a 690 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

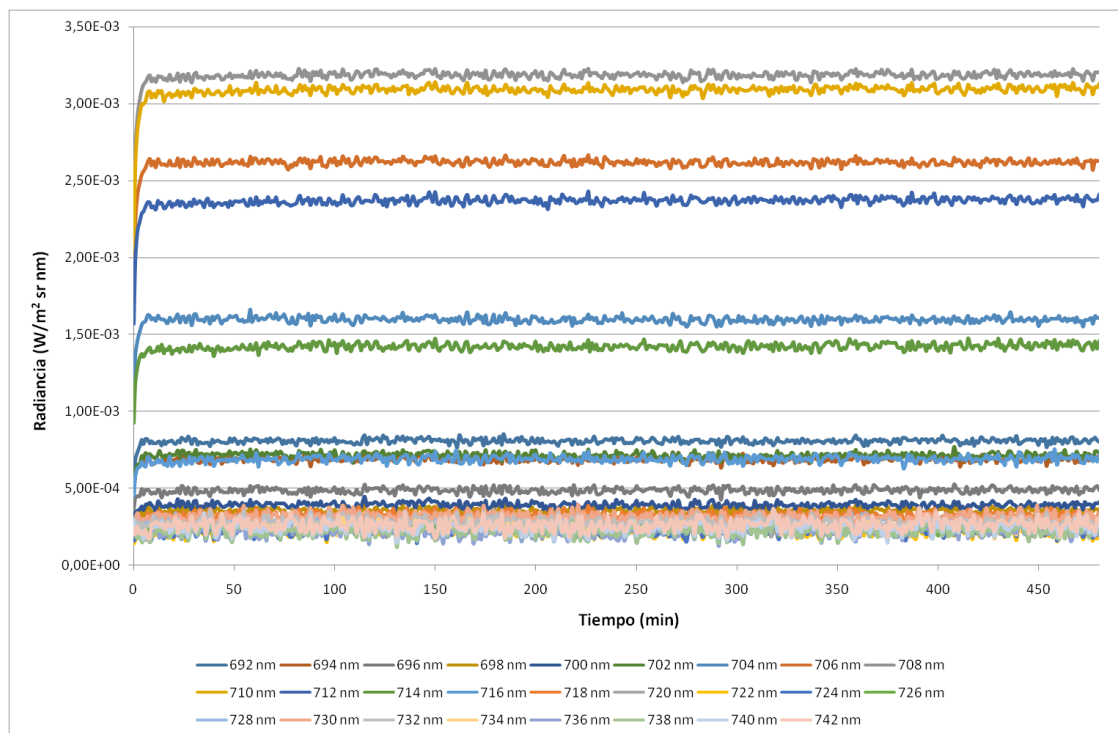


Figura 52. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 692 a 742 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Máximo (1-480)	Mínimo (1-480)	Diferencia (1-480)	λ
0,00028 ± 0,00001	0,00021 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	380 nm
0,00027 ± 0,00001	0,00020 ± 0,00001	0,00008 ± 0,00002	382 nm
0,00024 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	384 nm
0,00022 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	386 nm
0,00020 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	388 nm
0,00020 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	390 nm
0,00020 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	392 nm
0,00020 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	394 nm
0,00022 ± 0,00001	0,00014 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	396 nm
0,00027 ± 0,00001	0,00020 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	398 nm
0,00080 ± 0,00001	0,00066 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00002	400 nm
0,00216 ± 0,00001	0,00181 ± 0,00001	0,00035 ± 0,00002	402 nm
0,00312 ± 0,00001	0,00264 ± 0,00001	0,00049 ± 0,00002	404 nm
0,00271 ± 0,00001	0,00229 ± 0,00001	0,00043 ± 0,00002	406 nm
0,00150 ± 0,00001	0,00124 ± 0,00001	0,00026 ± 0,00002	408 nm
0,00084 ± 0,00001	0,00067 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	410 nm
0,00080 ± 0,00001	0,00062 ± 0,00001	0,00018 ± 0,00002	412 nm
0,00093 ± 0,00001	0,00072 ± 0,00001	0,00021 ± 0,00002	414 nm
0,00108 ± 0,00001	0,00085 ± 0,00001	0,00023 ± 0,00002	416 nm
0,00123 ± 0,00001	0,00098 ± 0,00001	0,00025 ± 0,00002	418 nm
0,00140 ± 0,00001	0,00112 ± 0,00001	0,00028 ± 0,00002	420 nm
0,00159 ± 0,00001	0,00128 ± 0,00001	0,00030 ± 0,00002	422 nm
0,00181 ± 0,00001	0,00147 ± 0,00001	0,00034 ± 0,00002	424 nm
0,00204 ± 0,00001	0,00168 ± 0,00001	0,00036 ± 0,00002	426 nm
0,00228 ± 0,00001	0,00189 ± 0,00001	0,00039 ± 0,00002	428 nm
0,00309 ± 0,00001	0,00268 ± 0,00001	0,00041 ± 0,00002	430 nm

Tabla 24. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 1 para la fuente TL84 desde 380 hasta 430 nm.

Máximo (8-480)	Mínimo (8-480)	Diferencia (8-480)	λ
0,00669 ± 0,00001	0,00642 ± 0,00001	0,00027 ± 0,00002	432 nm
0,01210 ± 0,00001	0,01161 ± 0,00001	0,00049 ± 0,00002	434 nm
0,01378 ± 0,00001	0,01328 ± 0,00001	0,00050 ± 0,00002	436 nm
0,01010 ± 0,00001	0,00984 ± 0,00001	0,00027 ± 0,00002	438 nm
0,00511 ± 0,00001	0,00503 ± 0,00001	0,00008 ± 0,00002	440 nm
0,00374 ± 0,00001	0,00369 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	442 nm
0,00358 ± 0,00001	0,00352 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	444 nm
0,00362 ± 0,00001	0,00356 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	446 nm
0,00365 ± 0,00001	0,00359 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	448 nm
0,00366 ± 0,00001	0,00360 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	450 nm
0,00364 ± 0,00001	0,00359 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	452 nm
0,00360 ± 0,00001	0,00354 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	454 nm

$0,00352 \pm 0,00001$	$0,00346 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00002$	456 nm
$0,00343 \pm 0,00001$	$0,00338 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00002$	458 nm
$0,00334 \pm 0,00001$	$0,00328 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00002$	460 nm
$0,00324 \pm 0,00001$	$0,00318 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00002$	462 nm
$0,00314 \pm 0,00001$	$0,00308 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00002$	464 nm
$0,00302 \pm 0,00001$	$0,00296 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00002$	466 nm
$0,00287 \pm 0,00001$	$0,00282 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00002$	468 nm
$0,00271 \pm 0,00001$	$0,00267 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00002$	470 nm
$0,00257 \pm 0,00001$	$0,00253 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00002$	472 nm
$0,00244 \pm 0,00001$	$0,00240 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00002$	474 nm
$0,00235 \pm 0,00001$	$0,00231 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00002$	476 nm
$0,00242 \pm 0,00001$	$0,00237 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00002$	478 nm
$0,00288 \pm 0,00001$	$0,00283 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00002$	480 nm
$0,00419 \pm 0,00001$	$0,00413 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00002$	482 nm

Tabla 25. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 8 para la fuente TL84 desde 432 hasta 482 nm.

Máximo (297-480)	Mínimo (297-480)	Diferencia (297-480)	λ
$0,00037 \pm 0,00001$	$0,00018 \pm 0,00001$	$0,00019 \pm 0,00002$	744 nm
$0,00035 \pm 0,00001$	$0,00016 \pm 0,00001$	$0,00020 \pm 0,00002$	746 nm
$0,00033 \pm 0,00001$	$0,00013 \pm 0,00001$	$0,00020 \pm 0,00002$	748 nm
$0,00033 \pm 0,00001$	$0,00012 \pm 0,00001$	$0,00022 \pm 0,00002$	750 nm
$0,00035 \pm 0,00001$	$0,00008 \pm 0,00001$	$0,00027 \pm 0,00002$	752 nm
$0,00029 \pm 0,00001$	$0,00008 \pm 0,00001$	$0,00022 \pm 0,00002$	754 nm
$0,00028 \pm 0,00001$	$0,00006 \pm 0,00001$	$0,00021 \pm 0,00002$	756 nm
$0,00030 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00001$	$0,00026 \pm 0,00002$	758 nm
$0,00032 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00001$	$0,00027 \pm 0,00002$	760 nm
$0,00037 \pm 0,00001$	$0,00004 \pm 0,00001$	$0,00033 \pm 0,00002$	762 nm
$0,00038 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00001$	$0,00033 \pm 0,00002$	764 nm
$0,00037 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00001$	$0,00032 \pm 0,00002$	766 nm
$0,00039 \pm 0,00001$	$0,00001 \pm 0,00001$	$0,00038 \pm 0,00002$	768 nm
$0,00039 \pm 0,00001$	$0,00003 \pm 0,00001$	$0,00036 \pm 0,00002$	770 nm
$0,00041 \pm 0,00001$	$0,00005 \pm 0,00001$	$0,00036 \pm 0,00002$	772 nm
$0,00041 \pm 0,00001$	$0,00001 \pm 0,00001$	$0,00040 \pm 0,00002$	774 nm
$0,00041 \pm 0,00001$	$0,00000 \pm 0,00001$	$0,00041 \pm 0,00002$	776 nm
$0,00043 \pm 0,00001$	$0,00000 \pm 0,00001$	$0,00043 \pm 0,00002$	778 nm
$0,00046 \pm 0,00001$	$0,00003 \pm 0,00001$	$0,00043 \pm 0,00002$	780 nm

Tabla 26. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 297 para la fuente TL84 desde 744 hasta 780 nm.

8.3 Gráficas fuente de iluminación F

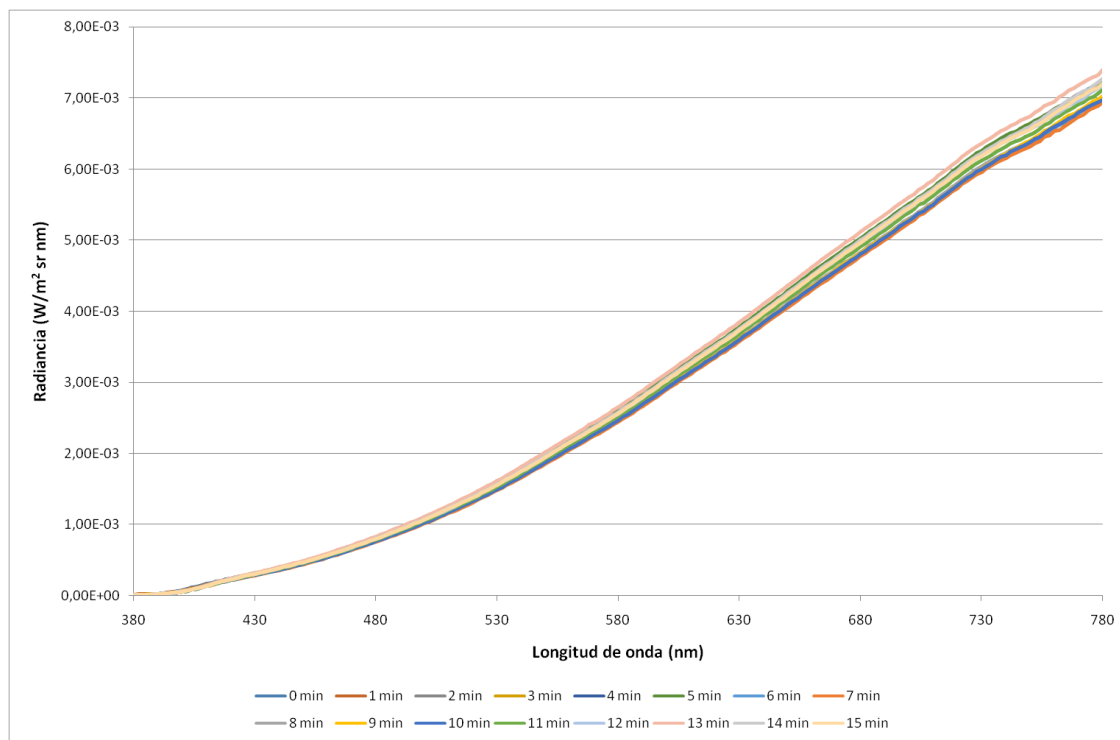


Figura 53. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 0 al 15. Autora: Ana Belén López Baldomero.

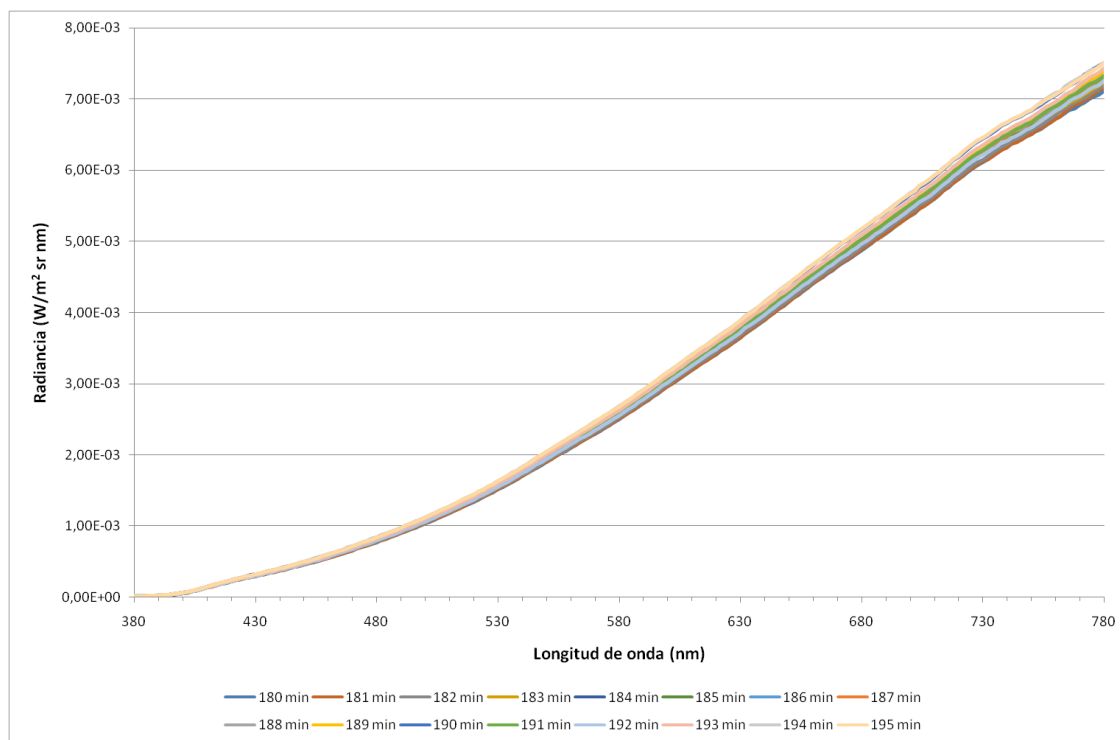


Figura 54. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 180 al 195. Autora: Ana Belén López Baldomero.

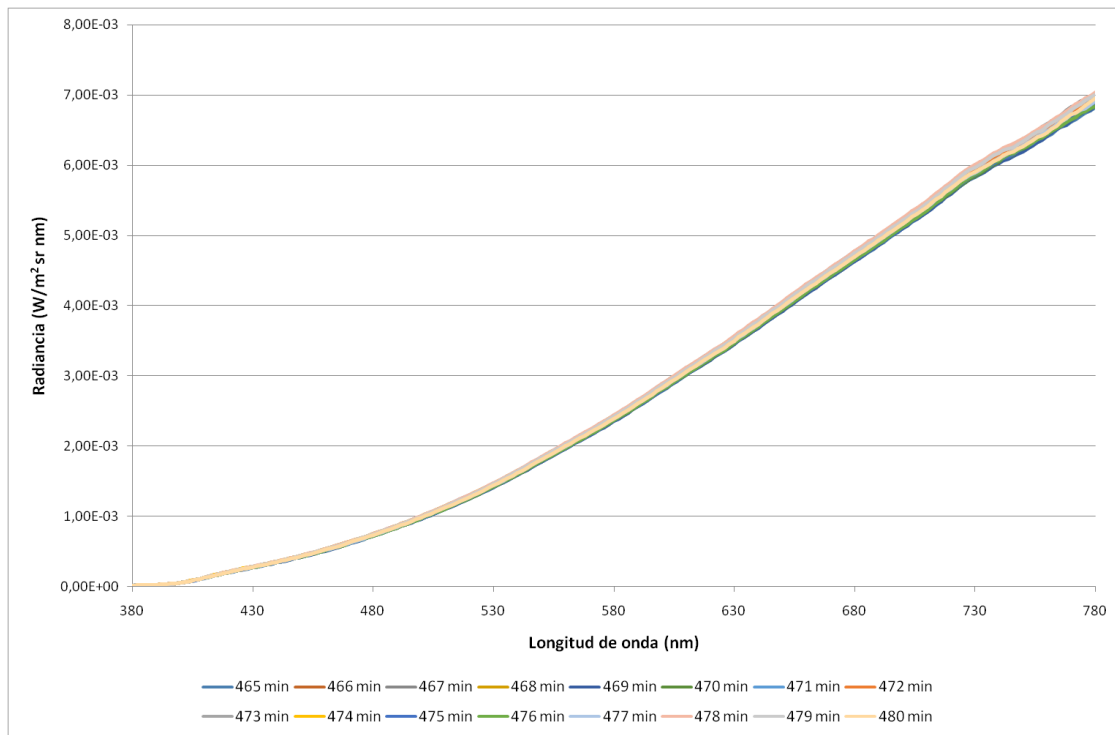


Figura 55. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 465 al 480. Autora: Ana Belén López Baldomero.

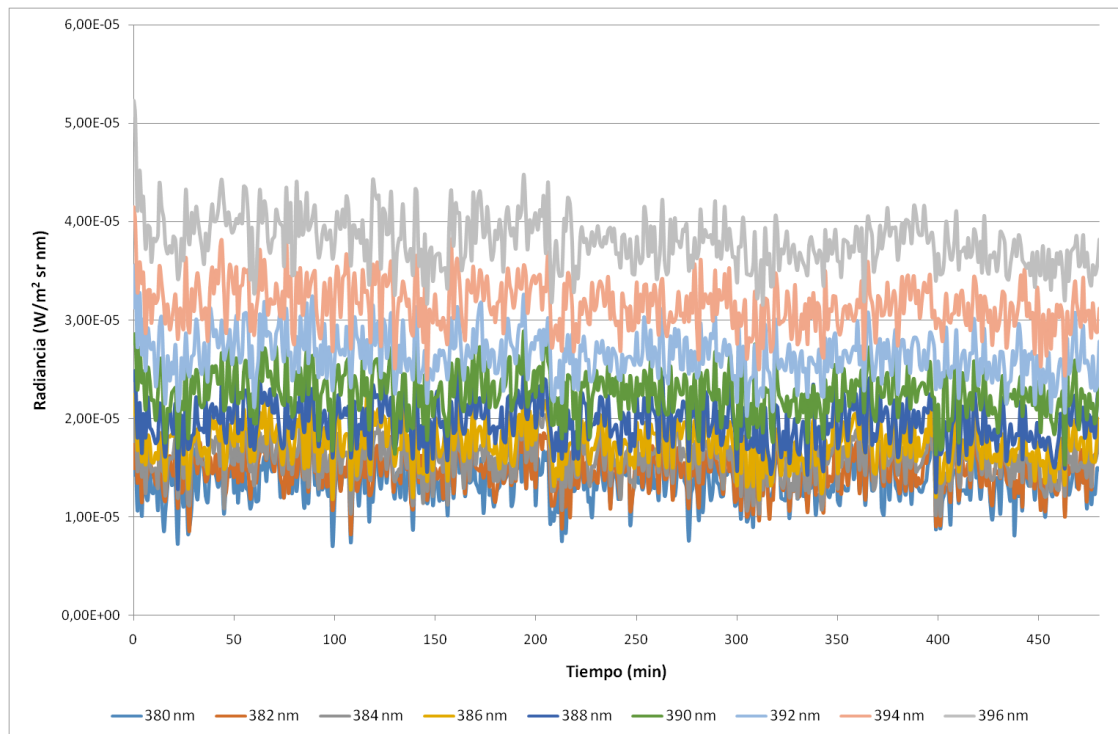


Figura 56. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 380 a 396 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

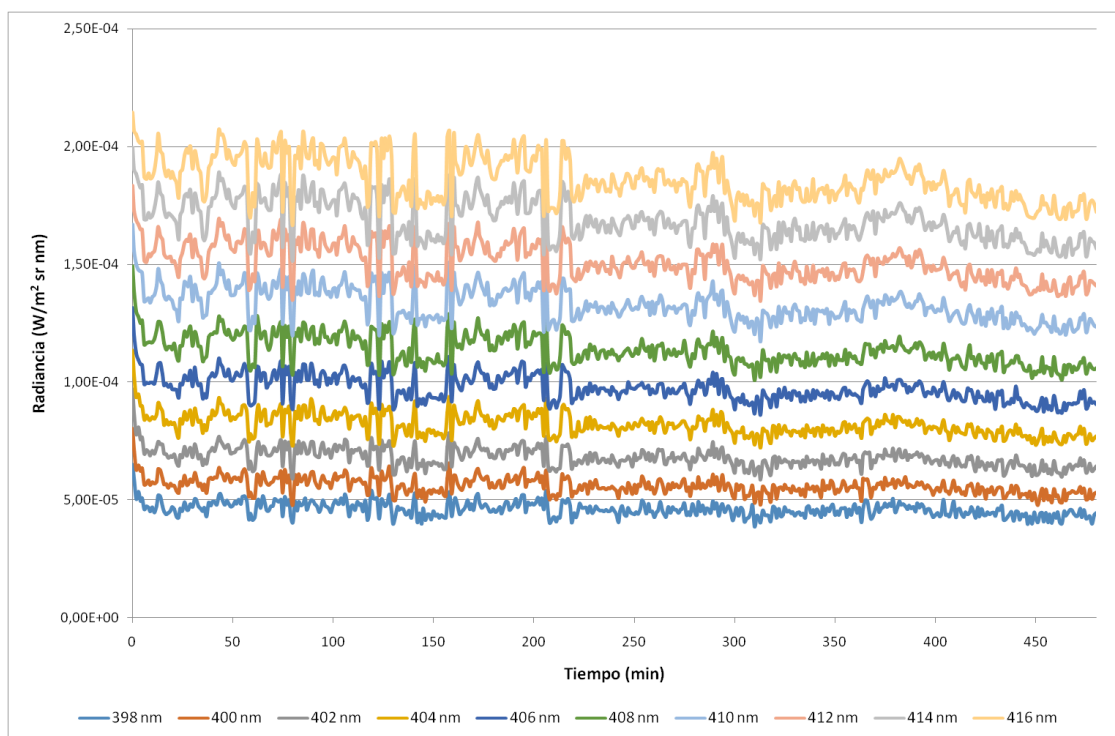


Figura 57. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 398 a 416 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

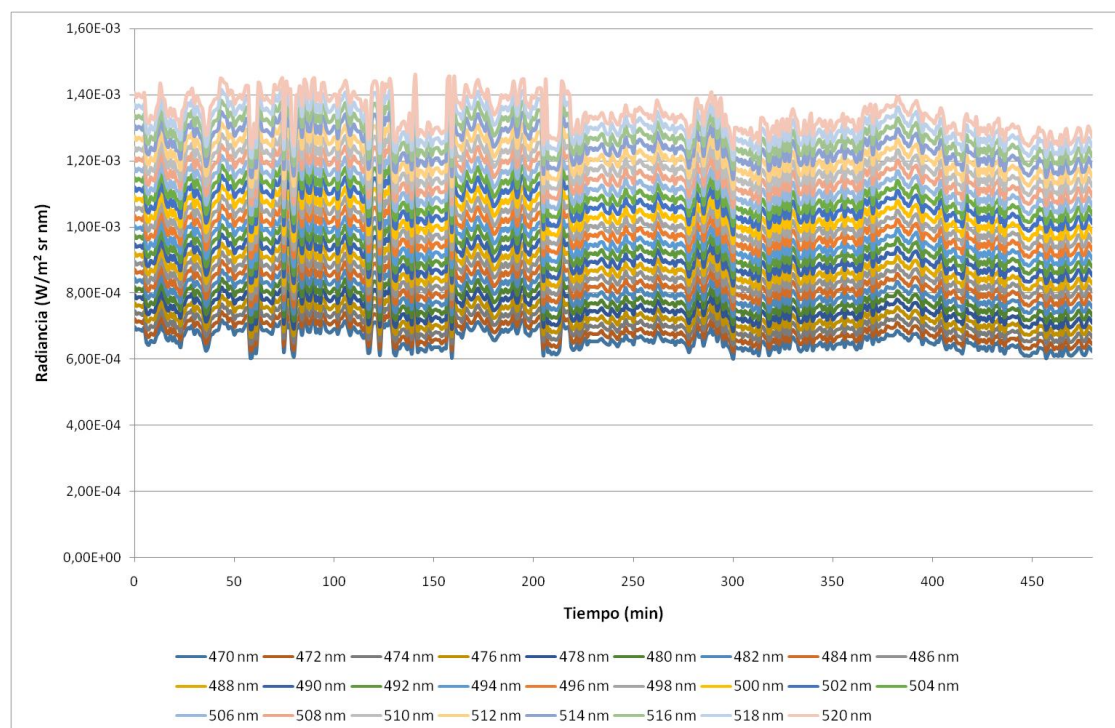


Figura 58. Representación de la radiancia ($W/m^2 sr nm$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 470 a 520 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

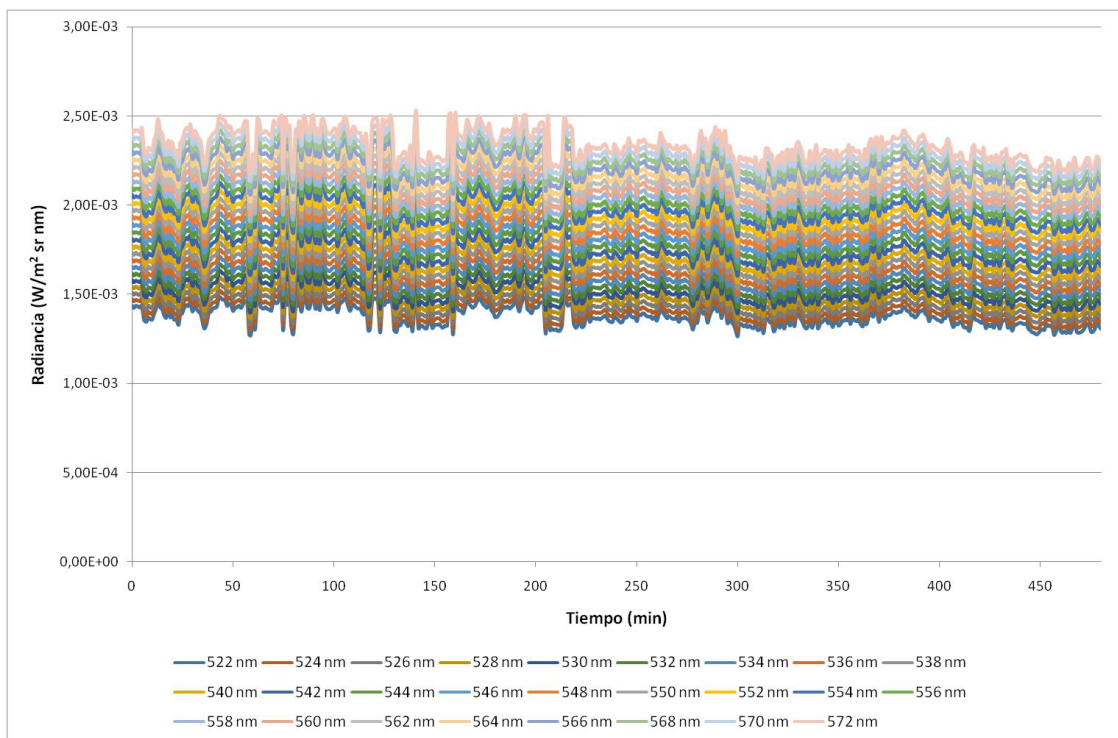


Figura 59. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 522 a 572 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

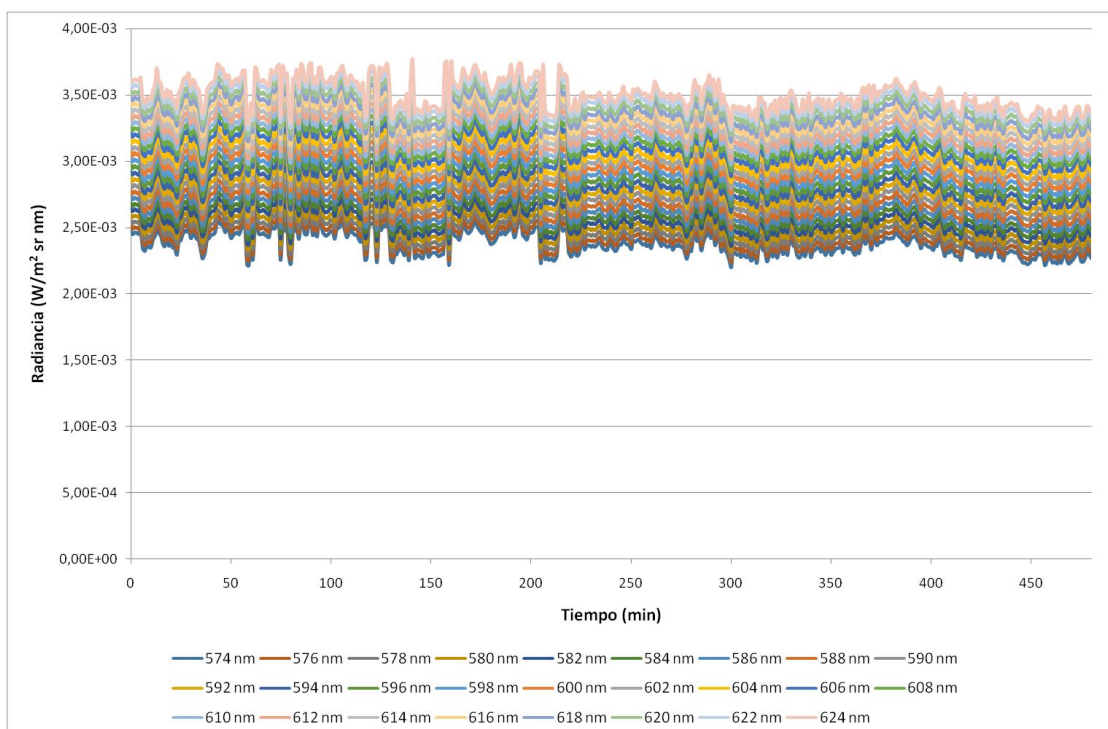


Figura 60. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 574 a 624 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

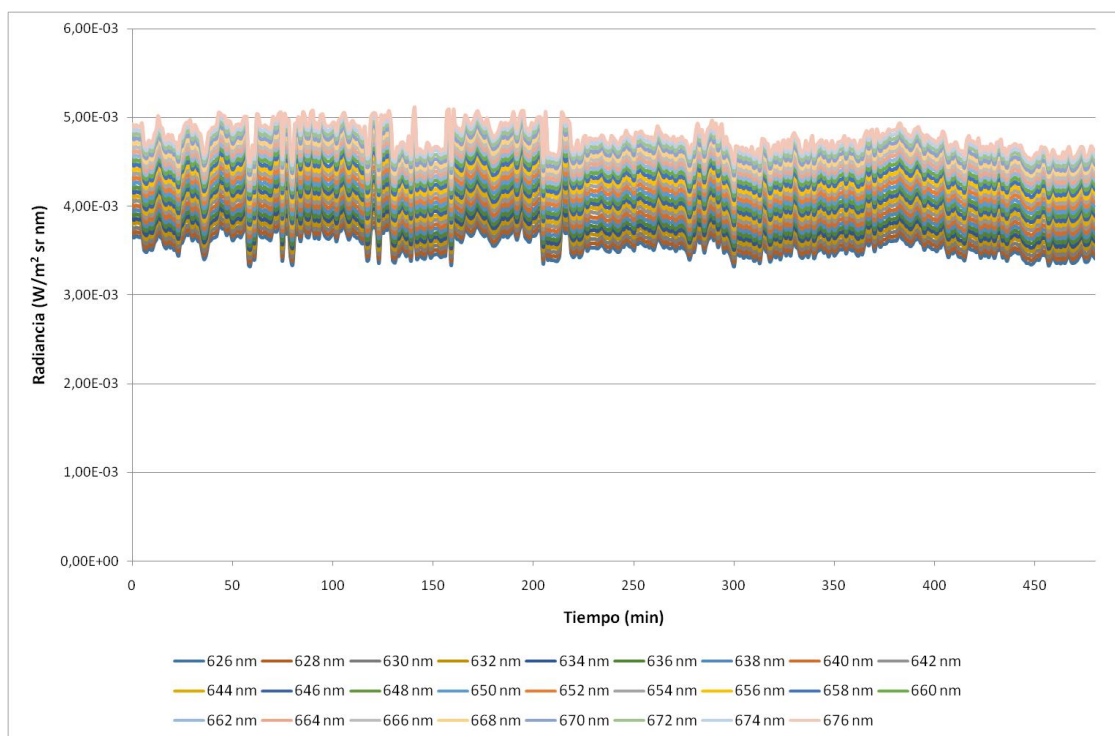


Figura 61. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 626 a 676 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

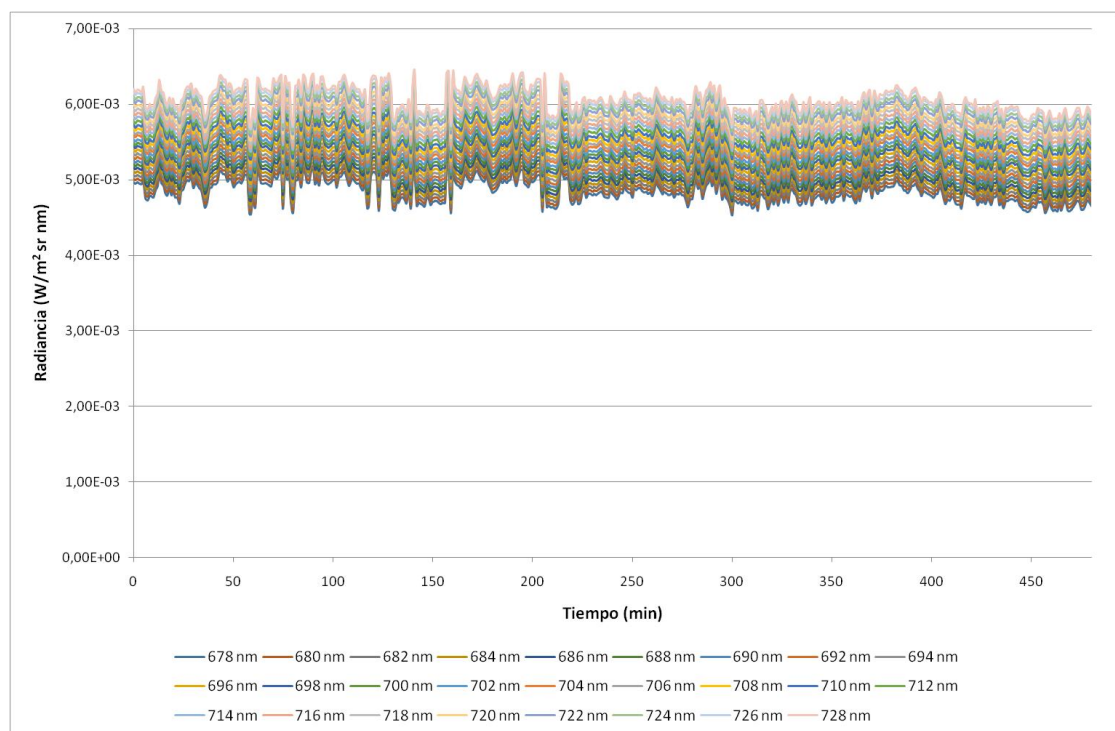


Figura 62. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 678 a 728 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

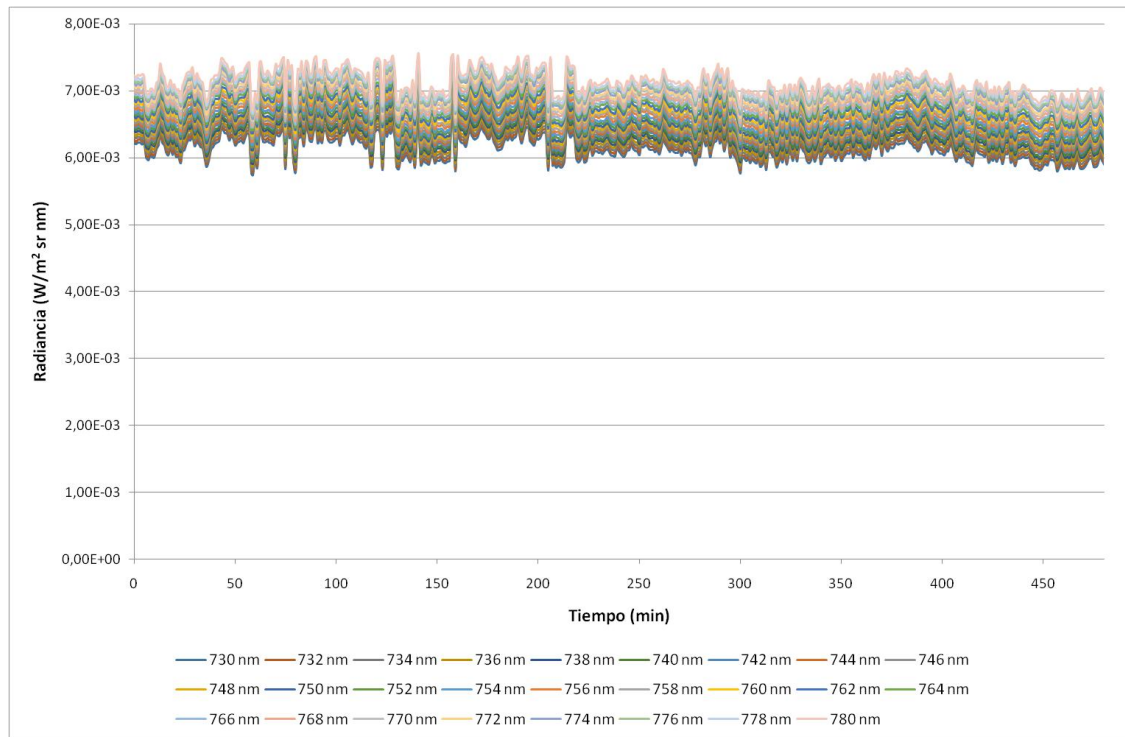


Figura 63. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 730 a 780 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

8.4 Gráficas fuente de iluminación LED

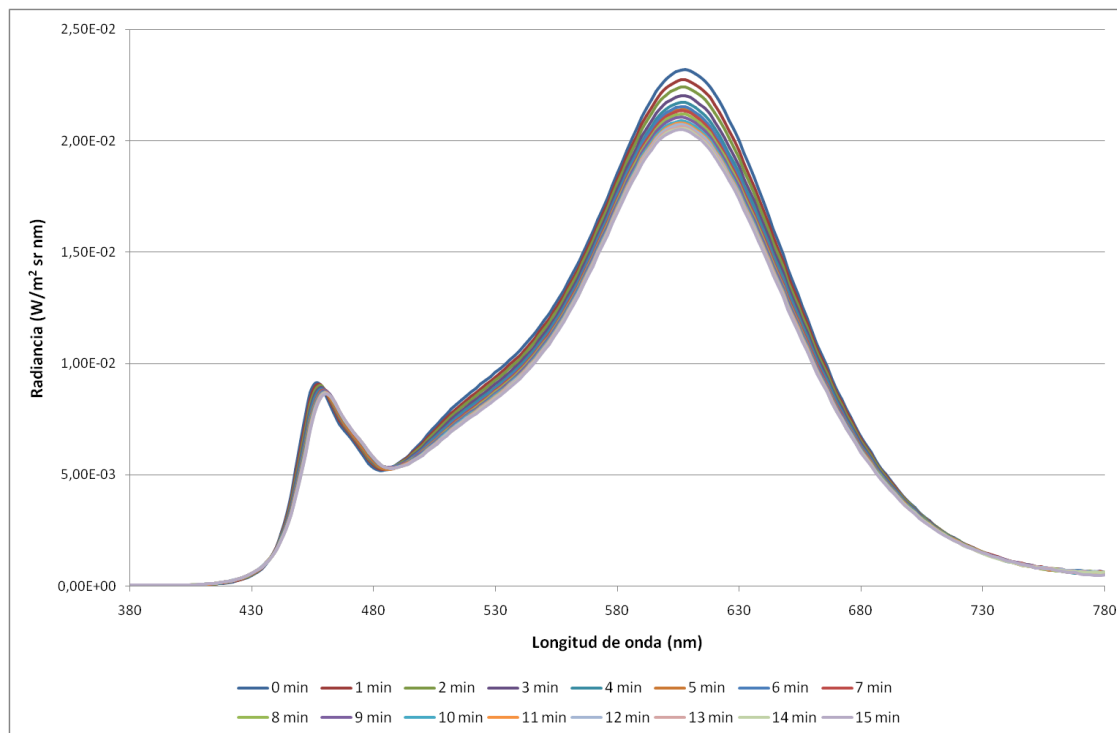


Figura 64. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 0 al 15. Autora: Ana Belén López Baldomero.

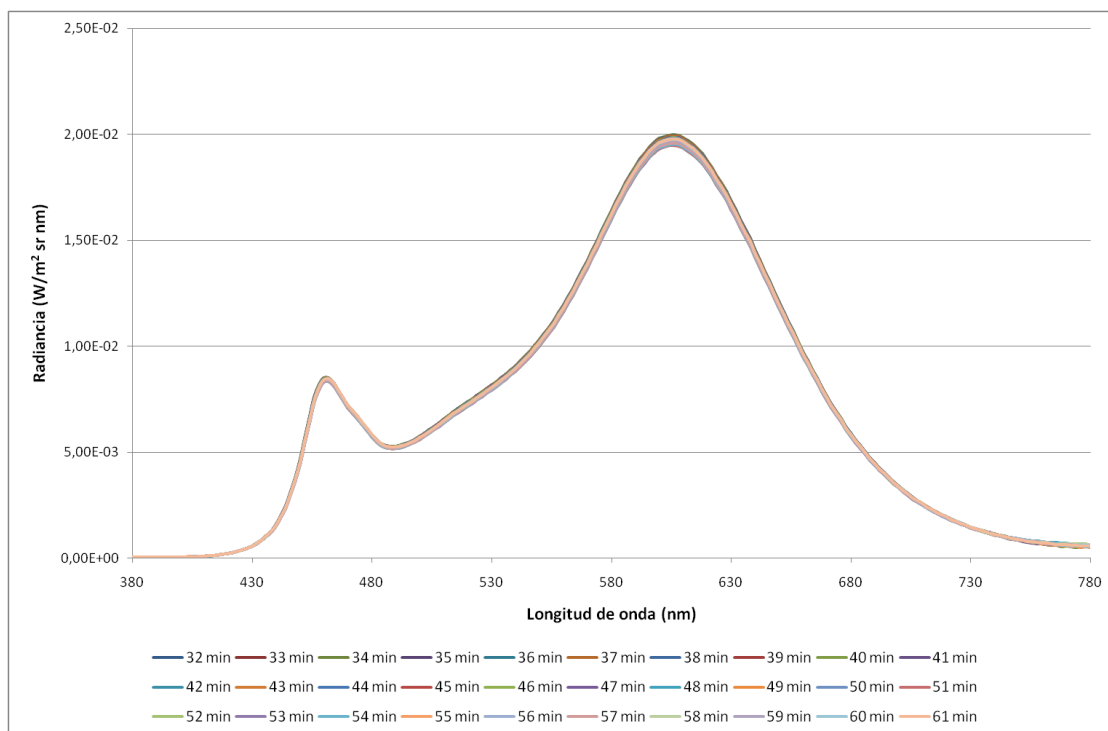


Figura 65. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 32 al 61. Autora: Ana Belén López Baldomero.

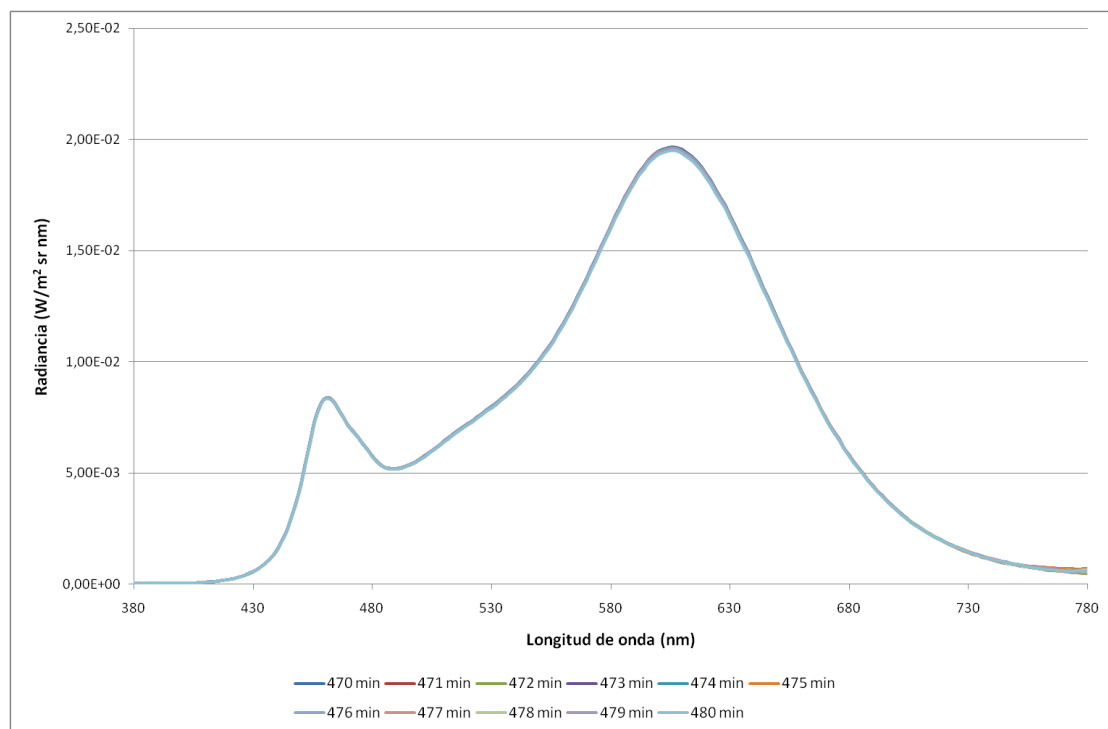


Figura 66. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función de la longitud de onda (nm) del minuto 470 al 480. Autora: Ana Belén López Baldomero.

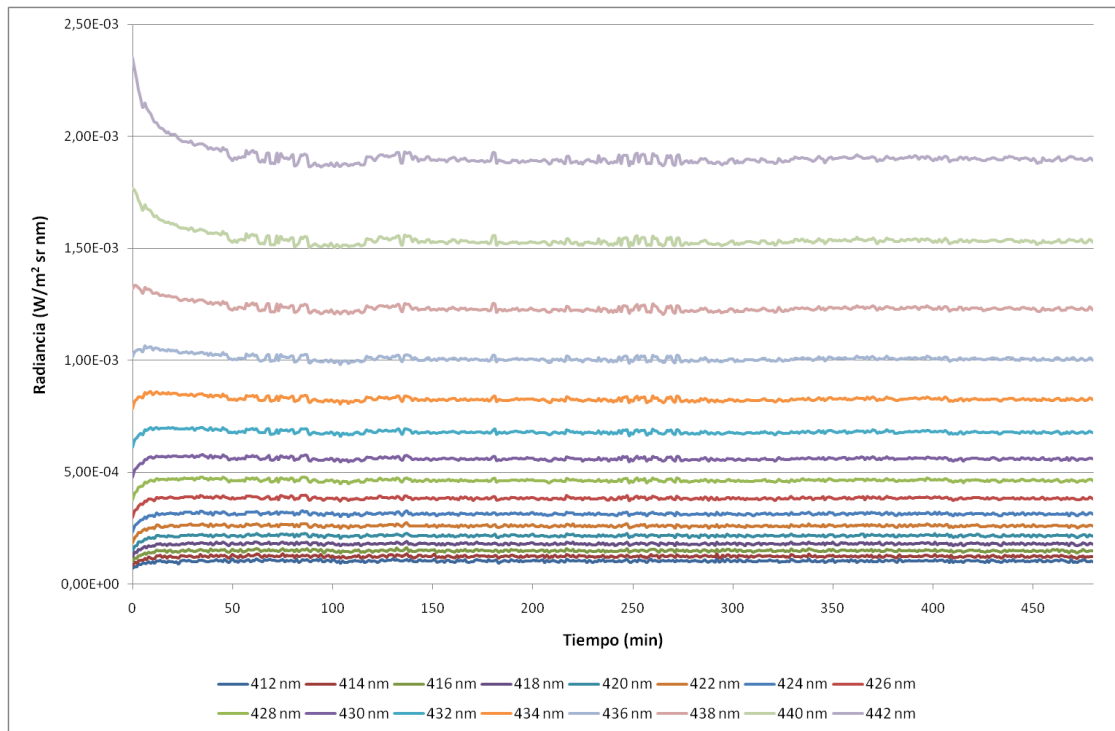


Figura 67. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 412 a 442 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

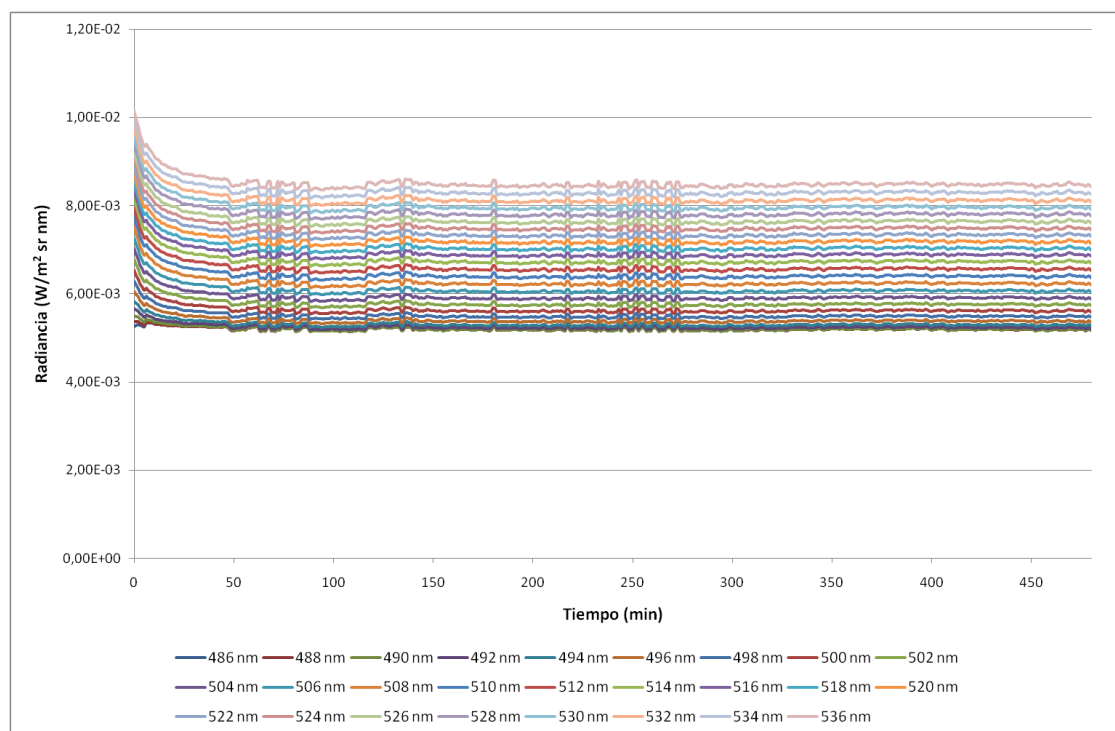


Figura 68. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 486 a 536 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

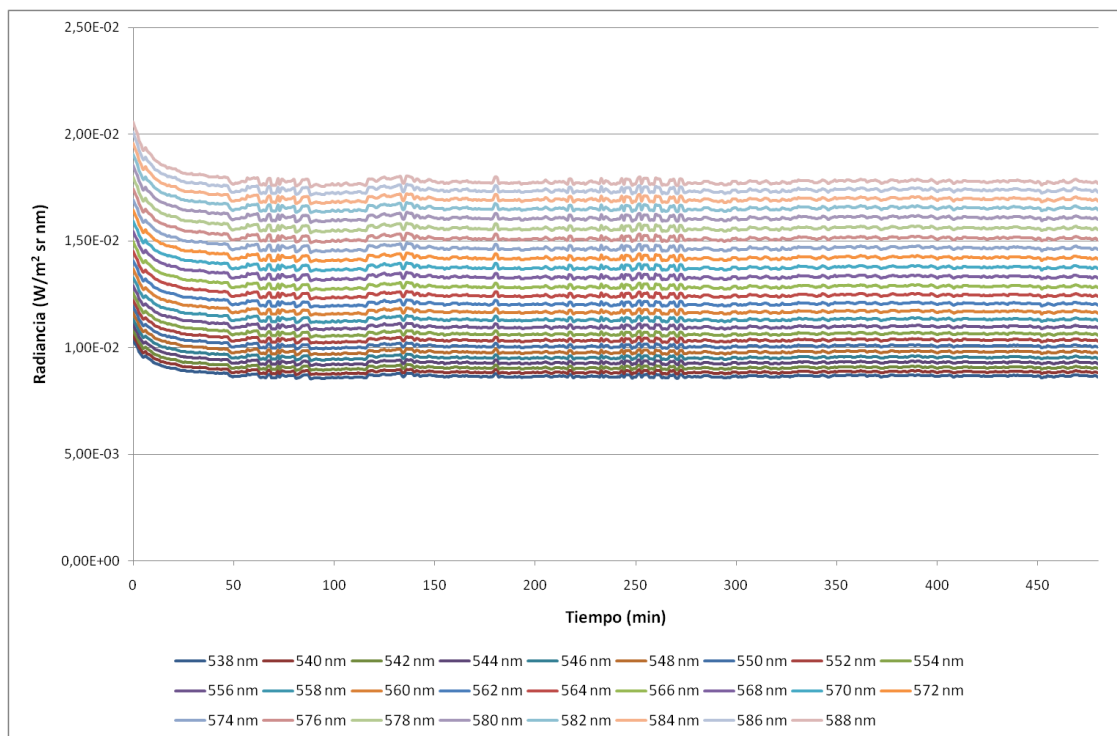


Figura 69. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 538 a 588 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

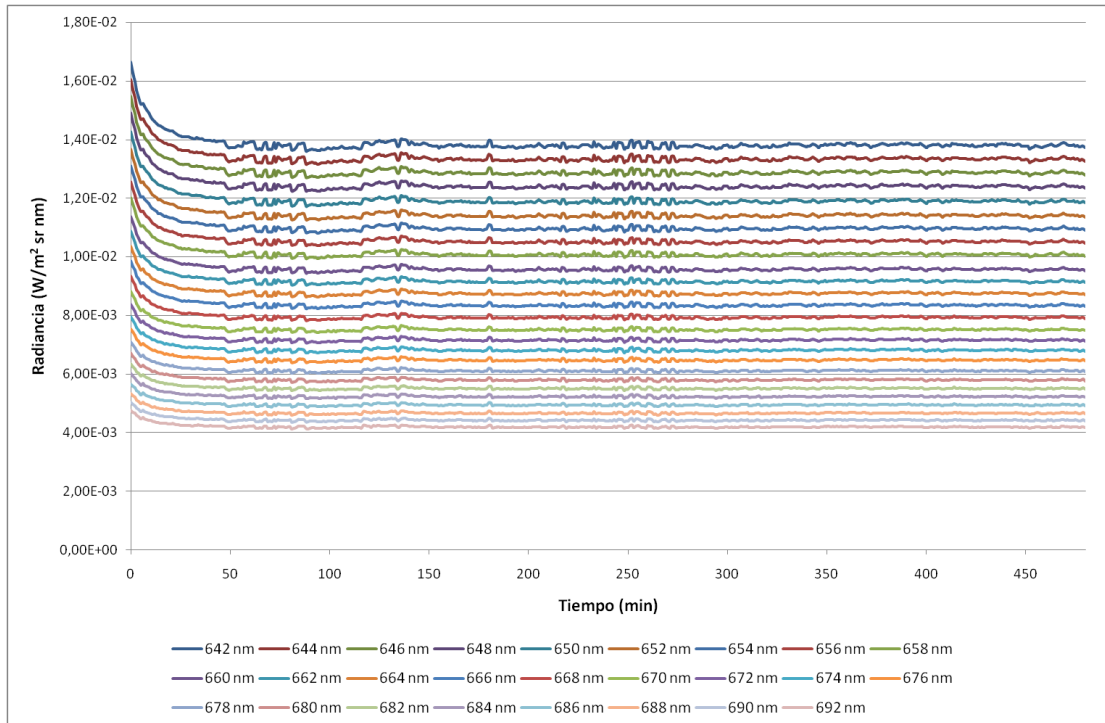


Figura 70. Representación de la radiancia ($W/m^2 \text{ sr nm}$) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 642 a 692 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

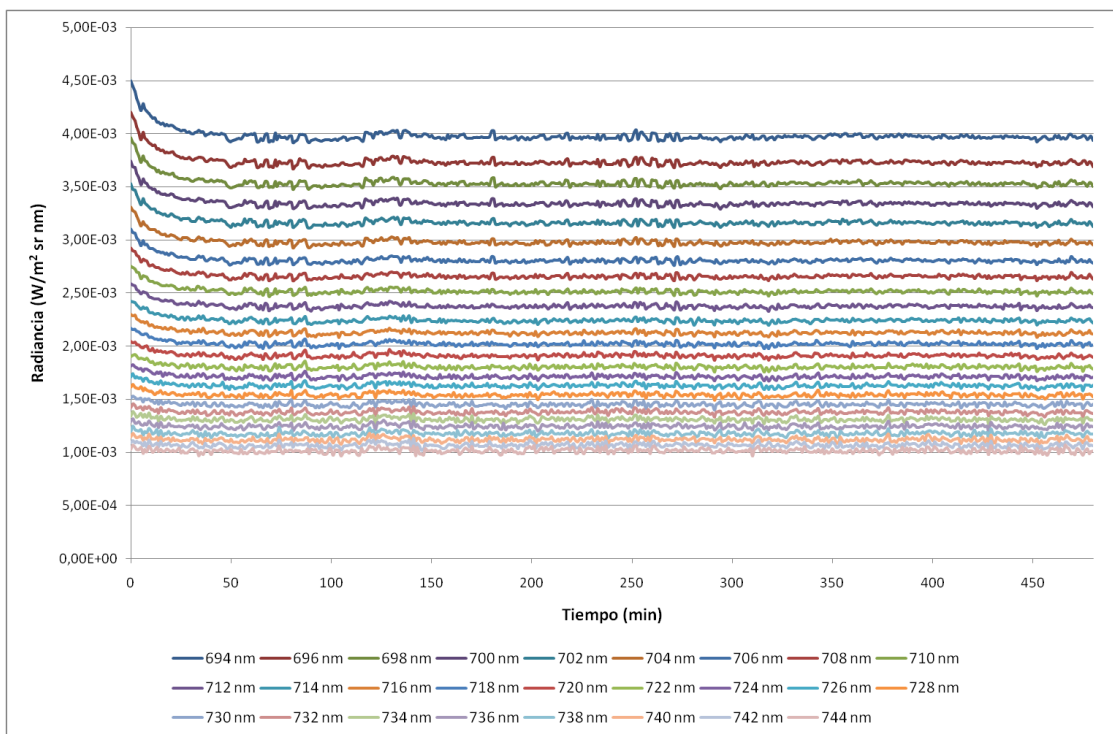


Figura 71. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 694 a 744 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

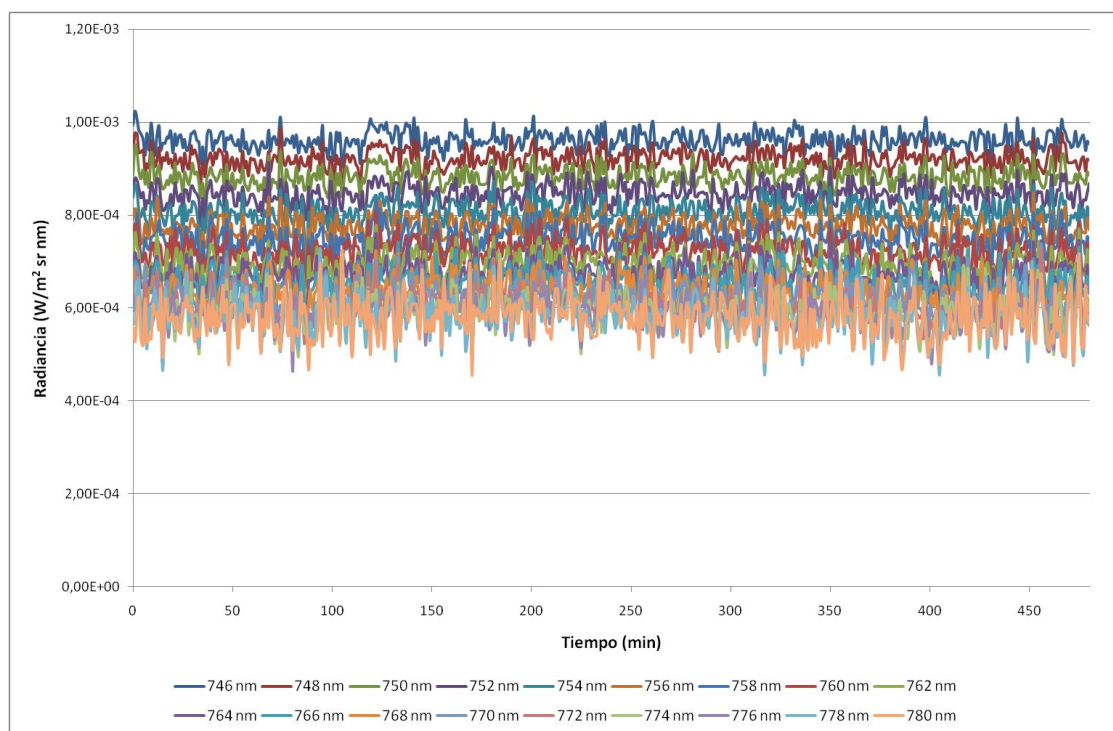


Figura 72. Representación de la radiancia (W/m² sr nm) en función del tiempo (min) para las longitudes de onda de 746 a 780 nm en pasos de 2 nm. Autora: Ana Belén López Baldomero.

Máximo (0-480)	Mínimo (0-480)	Diferencia (0-480)	λ
0,00006 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	380 nm

0,00006 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	382 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	384 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	386 nm
0,00005 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	388 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	390 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	392 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	394 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	396 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	398 nm
0,00006 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	400 nm
0,00007 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00002	402 nm
0,00007 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00002	404 nm
0,00008 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00001	0,00002 ± 0,00002	406 nm
0,00009 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00001	0,00003 ± 0,00002	408 nm
0,00010 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	410 nm
0,00011 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00001	0,00004 ± 0,00002	412 nm
0,00014 ± 0,00001	0,00008 ± 0,00001	0,00005 ± 0,00002	414 nm
0,00016 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00001	0,00006 ± 0,00002	416 nm
0,00019 ± 0,00001	0,00012 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	418 nm
0,00023 ± 0,00001	0,00015 ± 0,00001	0,00008 ± 0,00002	420 nm
0,00027 ± 0,00001	0,00018 ± 0,00001	0,00009 ± 0,00002	422 nm
0,00033 ± 0,00001	0,00023 ± 0,00001	0,00009 ± 0,00002	424 nm
0,00040 ± 0,00001	0,00030 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	426 nm
0,00048 ± 0,00001	0,00038 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	428 nm
0,00058 ± 0,00001	0,00048 ± 0,00001	0,00010 ± 0,00002	430 nm
0,00070 ± 0,00001	0,00061 ± 0,00001	0,00009 ± 0,00002	432 nm
0,00086 ± 0,00001	0,00078 ± 0,00001	0,00007 ± 0,00002	434 nm
0,00106 ± 0,00001	0,00098 ± 0,00001	0,00008 ± 0,00002	436 nm
0,00134 ± 0,00001	0,00121 ± 0,00001	0,00013 ± 0,00002	438 nm
0,00177 ± 0,00001	0,00150 ± 0,00001	0,00027 ± 0,00002	440 nm

Tabla 27. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 0 para el LED desde 380 hasta 440 nm.

Máximo (23-480)	Mínimo (23-480)	Diferencia (23-480)	λ
0,00248 ± 0,00001	0,00231 ± 0,00001	0,00017 ± 0,00002	444 nm
0,00310 ± 0,00001	0,00286 ± 0,00001	0,00023 ± 0,00002	446 nm
0,00385 ± 0,00001	0,00354 ± 0,00001	0,00031 ± 0,00002	448 nm
0,00474 ± 0,00001	0,00435 ± 0,00001	0,00039 ± 0,00002	450 nm
0,00573 ± 0,00001	0,00528 ± 0,00001	0,00046 ± 0,00002	452 nm
0,00679 ± 0,00001	0,00629 ± 0,00001	0,00050 ± 0,00002	454 nm
0,00768 ± 0,00001	0,00720 ± 0,00001	0,00048 ± 0,00002	456 nm
0,00828 ± 0,00001	0,00786 ± 0,00001	0,00042 ± 0,00002	458 nm
0,00854 ± 0,00001	0,00823 ± 0,00001	0,00031 ± 0,00002	460 nm
0,00851 ± 0,00001	0,00830 ± 0,00001	0,00021 ± 0,00002	462 nm

$0,00828 \pm 0,00001$	$0,00812 \pm 0,00001$	$0,00016 \pm 0,00002$	464 nm
$0,00796 \pm 0,00001$	$0,00780 \pm 0,00001$	$0,00016 \pm 0,00002$	466 nm
$0,00759 \pm 0,00001$	$0,00742 \pm 0,00001$	$0,00017 \pm 0,00002$	468 nm
$0,00725 \pm 0,00001$	$0,00709 \pm 0,00001$	$0,00015 \pm 0,00002$	470 nm
$0,00697 \pm 0,00001$	$0,00682 \pm 0,00001$	$0,00015 \pm 0,00002$	472 nm
$0,00670 \pm 0,00001$	$0,00656 \pm 0,00001$	$0,00014 \pm 0,00002$	474 nm
$0,00642 \pm 0,00001$	$0,00628 \pm 0,00001$	$0,00014 \pm 0,00002$	476 nm
$0,00614 \pm 0,00001$	$0,00600 \pm 0,00001$	$0,00013 \pm 0,00002$	478 nm
$0,00586 \pm 0,00001$	$0,00574 \pm 0,00001$	$0,00013 \pm 0,00002$	480 nm
$0,00560 \pm 0,00001$	$0,00548 \pm 0,00001$	$0,00012 \pm 0,00002$	482 nm
$0,00541 \pm 0,00001$	$0,00530 \pm 0,00001$	$0,00011 \pm 0,00002$	484 nm

Tabla 28. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 23 para el LED desde 444 hasta 484 nm.

Máximo (96-480)	Mínimo (96-480)	Diferencia (96-480)	λ
$0,01843 \pm 0,00001$	$0,01798 \pm 0,00001$	$0,00045 \pm 0,00002$	590 nm
$0,01876 \pm 0,00001$	$0,01831 \pm 0,00001$	$0,00045 \pm 0,00002$	592 nm
$0,01905 \pm 0,00001$	$0,01858 \pm 0,00001$	$0,00047 \pm 0,00002$	594 nm
$0,01931 \pm 0,00001$	$0,01885 \pm 0,00001$	$0,00046 \pm 0,00002$	596 nm
$0,01954 \pm 0,00001$	$0,01907 \pm 0,00001$	$0,00047 \pm 0,00002$	598 nm
$0,01971 \pm 0,00001$	$0,01923 \pm 0,00001$	$0,00048 \pm 0,00002$	600 nm
$0,01979 \pm 0,00001$	$0,01931 \pm 0,00001$	$0,00048 \pm 0,00002$	602 nm
$0,01987 \pm 0,00001$	$0,01938 \pm 0,00001$	$0,00049 \pm 0,00002$	604 nm
$0,01989 \pm 0,00001$	$0,01940 \pm 0,00001$	$0,00049 \pm 0,00002$	606 nm
$0,01987 \pm 0,00001$	$0,01938 \pm 0,00001$	$0,00049 \pm 0,00002$	608 nm
$0,01977 \pm 0,00001$	$0,01928 \pm 0,00001$	$0,00049 \pm 0,00002$	610 nm
$0,01961 \pm 0,00001$	$0,01913 \pm 0,00001$	$0,00048 \pm 0,00002$	612 nm
$0,01945 \pm 0,00001$	$0,01897 \pm 0,00001$	$0,00048 \pm 0,00002$	614 nm
$0,01925 \pm 0,00001$	$0,01878 \pm 0,00001$	$0,00047 \pm 0,00002$	616 nm
$0,01900 \pm 0,00001$	$0,01853 \pm 0,00001$	$0,00047 \pm 0,00002$	618 nm
$0,01870 \pm 0,00001$	$0,01825 \pm 0,00001$	$0,00045 \pm 0,00002$	620 nm
$0,01836 \pm 0,00001$	$0,01791 \pm 0,00001$	$0,00045 \pm 0,00002$	622 nm
$0,01798 \pm 0,00001$	$0,01754 \pm 0,00001$	$0,00044 \pm 0,00002$	624 nm
$0,01762 \pm 0,00001$	$0,01719 \pm 0,00001$	$0,00043 \pm 0,00002$	626 nm
$0,01724 \pm 0,00001$	$0,01682 \pm 0,00001$	$0,00042 \pm 0,00002$	628 nm
$0,01682 \pm 0,00001$	$0,01640 \pm 0,00001$	$0,00042 \pm 0,00002$	630 nm
$0,01636 \pm 0,00001$	$0,01596 \pm 0,00001$	$0,00040 \pm 0,00002$	632 nm
$0,01592 \pm 0,00001$	$0,01553 \pm 0,00001$	$0,00039 \pm 0,00002$	634 nm
$0,01546 \pm 0,00001$	$0,01508 \pm 0,00001$	$0,00038 \pm 0,00002$	636 nm
$0,01501 \pm 0,00001$	$0,01465 \pm 0,00001$	$0,00036 \pm 0,00002$	638 nm
$0,01451 \pm 0,00001$	$0,01415 \pm 0,00001$	$0,00036 \pm 0,00002$	640 nm

Tabla 29. Valores máximos y mínimos de radiancia ($W/m^2 sr nm$), y diferencia a partir del minuto 96 para el LED desde 590 hasta 640 nm.

8.5 Numeración en el patrón de color

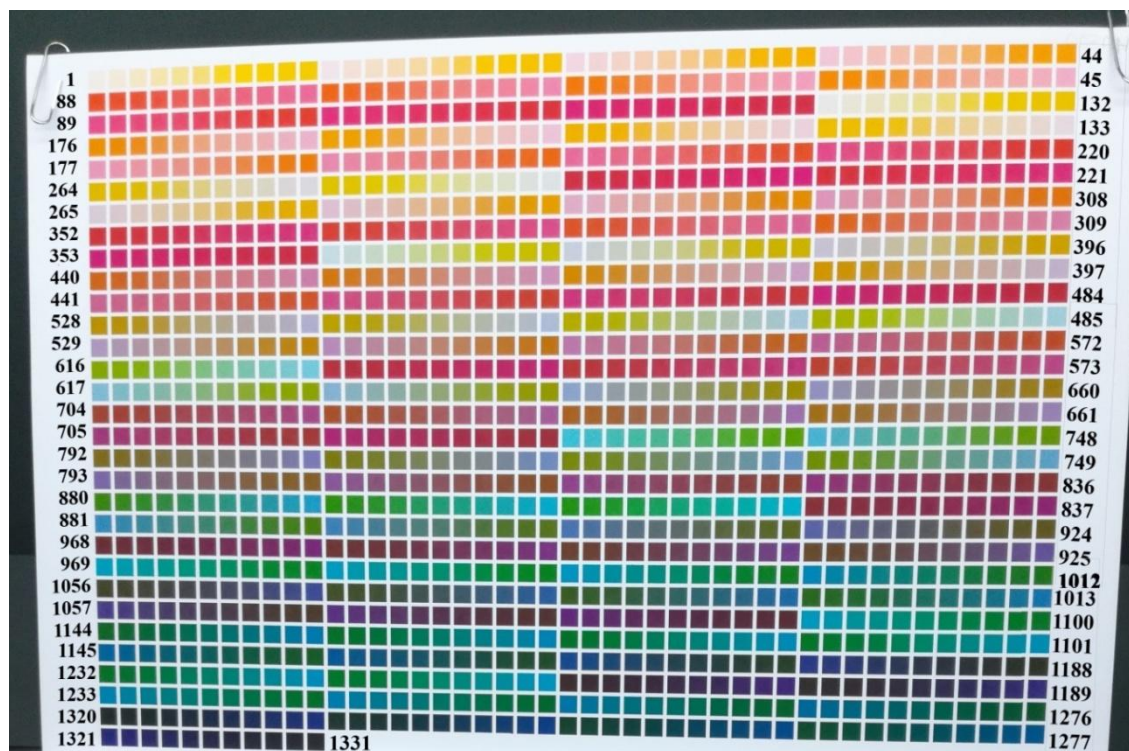


Figura 73. Numeración seguida en el patrón de color. Autora: Ana Belén López Baldomero.