



jidras@uvigo.es
Camilo J. Carrillo González
carrillo@uvigo.es

Grupo de investigación en e
Universidad de Vigo

Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

ILUMINACIÓN

Grupo de enerxía eléctrica. en.e

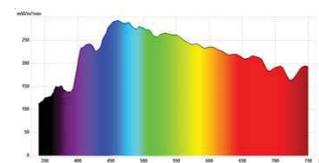
Universidad de Vigo

Vigo, 29 y 30 junio de 2015

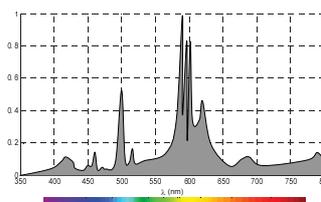
La iluminación, la luz y el color

Color blanco

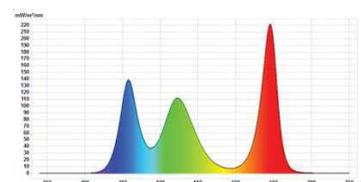
• Radiación térmica (*incandescencia*): Luz natural, lámparas de incandescencia



• Radiación en el seno de un gas + difusor corrector (*descarga*) : lámparas de descarga halógenos, LED



• Combinación de distintas fuentes de colores. Espacio RGB: LED



Índice

- Luz: radiometría y fotometría
- Color
- Espacio RGB

Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

LA LUZ

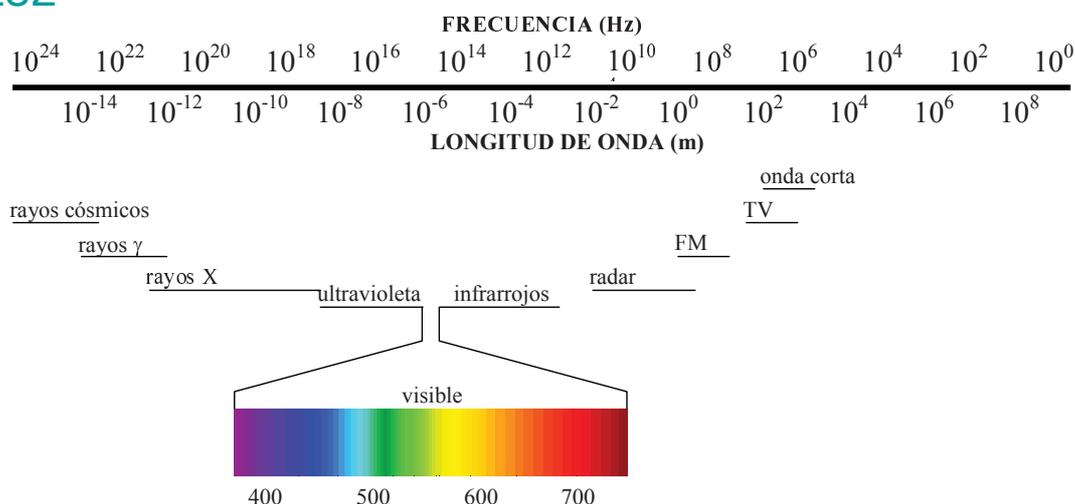
Grupo de enerxía eléctrica. en.e

Universidad de Vigo

Vigo, 29 y 30 junio de 2015

LA LUZ

ILUMINACIÓN



Se denomina luz visible al conjunto de radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda entre 380 y 770 nm, y que son las responsables de que el hombre pueda ver.

Violeta	380-436
Azul	436-495
Verde	495-566
Amarillo	566-589
Naranja	589-627
Rojo	627-770

Radiometría

- El color como onda electromagnética se puede expresar por a partir de unidades radiométricas (longitud de onda de onda nm – potencia radiante W).
- La representación del color W/λ es el denominado espectro radiométrico.
- Se distinguen los colores “monocromo” que se pueden representar por una sola longitud de onda y los “multicromáticos” que nunca pueden existir con una sola longitud de onda
- Cada longitud de onda tiene asociado un “color”. Por ejemplo para una longitud de onda de $\lambda= 590\text{nm}$ se tiene el color “ámbar”. Por eso es habitual relacionar cada color con su longitud de onda “característica”

Espectros Radiométricos

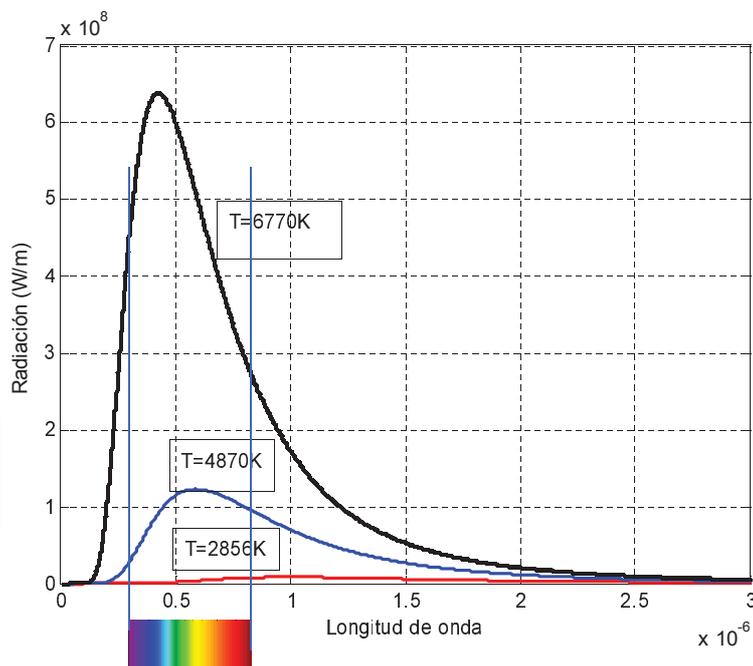
Radiación electromagnética por agitación térmica
Principio de la producción de luz por incandescencia

Luz diurna $T=6770\text{K}$
Luz solar $T=4870\text{K}$
Luz filamento $T=2856\text{K}$

Emisor ideal
Cuerpo negro

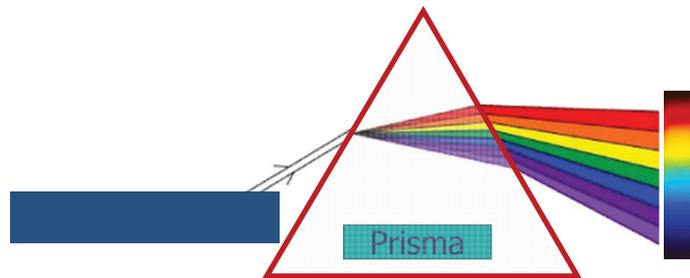
- Ley de Boltzmann

$$\Phi_{\lambda} = \varepsilon \cdot 2\pi \frac{c^2 \cdot h}{\lambda^5} \frac{s}{e^{k \cdot \lambda \cdot T} - 1} \quad (W / m)$$

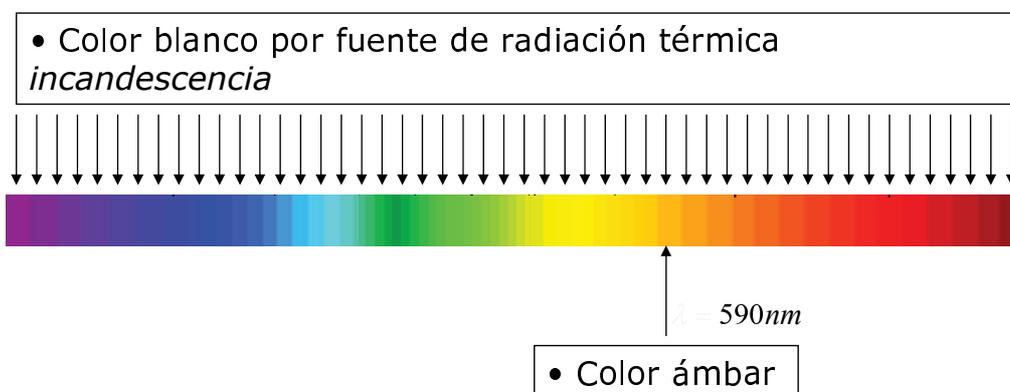


Radiometría

- Todos los colores "monocromos" se encuentran en el denominado espectro "visible" que va desde los 380nm (violeta) hasta el 770nm (rojo)
- Los colores "monocromos" se pueden obtener de la descomposición de la luz "blanca" solar mediante un prisma de cristal. Este es el fundamento de los medidores radio-espectrométricos
- La luz solar está normalizada por la ecuación del "cuerpo radiante ideal" – cuerpo negro a una temperatura de 5780K



Espectro Radiométrico

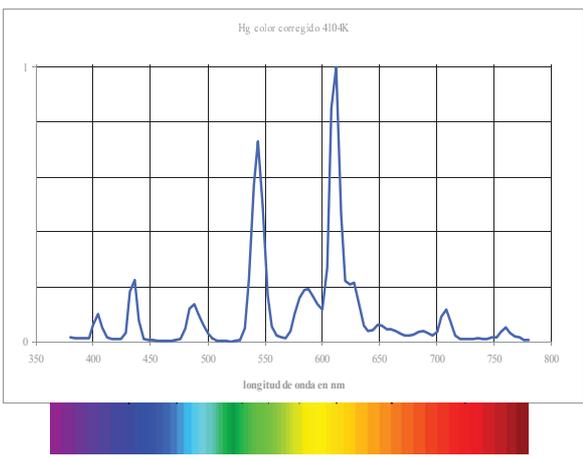
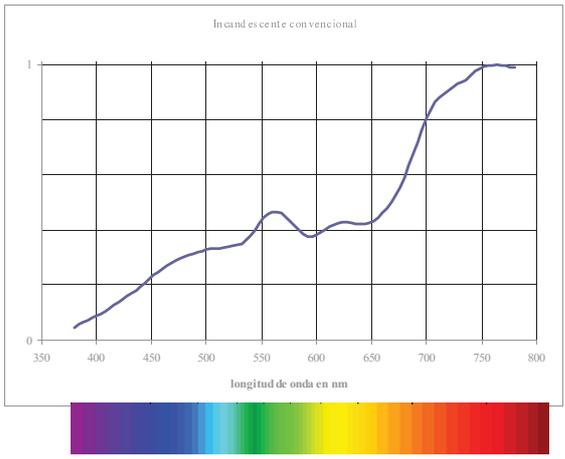


Radiometría

- Todos las fuentes de luz – lámparas- se pueden analizar a partir de medidas de eléctricas (consumo eléctrico) y de medidas radiométrica (W/m) de la luz que generan (longitudes de onda, potencia)

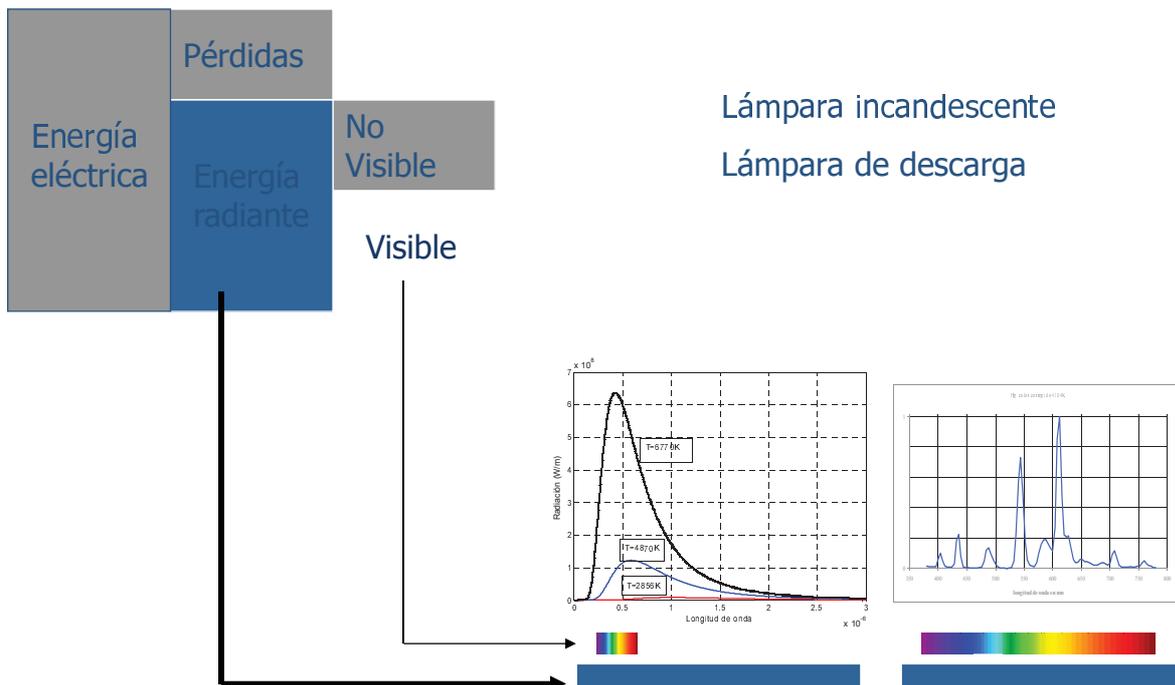
• Lámpara incandescente

• Lámpara de descarga



Radiometría

- Análisis energético espectral de una lámpara



Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

LA VISIÓN HUMANA: EL OJO

Grupo de enerxía eléctrica. en.e

Universidad de Vigo

Vigo, 29 y 30 junio de 2015

LA LUZ: Visión del ojo humano

ILUMINACIÓN

En la retina del ojo humano se tienen dos tipos de células relacionadas con la visión: Los *bastones (rods)* y los *conos (cones)*. aproximadamente ciento quince millones de y 7 millones.

Los *conos* son los encargados de la visión de luz natural-día (superior a 3 cd/m²) y del color y representan la denominada *visión fotópica*. Existen alrededor de 7 millones de conos en la retina. Su ángulo percepción es muy bajo 1°.

Los *bastones* son los encargados de la visión de luz nocturna (0.001 cd/m²) y representan la denominada *visión escotópica*. Existen alrededor de 115 millones de bastones en la retina. Su ángulo de visión es muy extensa 80°

Los *conos* además de representar la visión *fotópica* son los encargados de la visión del color y para ello presentan tres tipos diferentes de foto-pigmentación:

- Sensibilidad Onda *Corta* (S). Color azul *Blue*
- Sensibilidad Onda *Media* (M). Color verde *Green*
- Sensibilidad Onda *Larga* (L). Color Rojo *Red*

La existencia de los distintos tipos de conos (S, M y L) están en una relación de: 1:20:40; es decir aproximadamente del 2%: 33%: 65%

Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

LA VISIÓN: CURVA DE VISIBILIDAD. FOTOMETRÍA

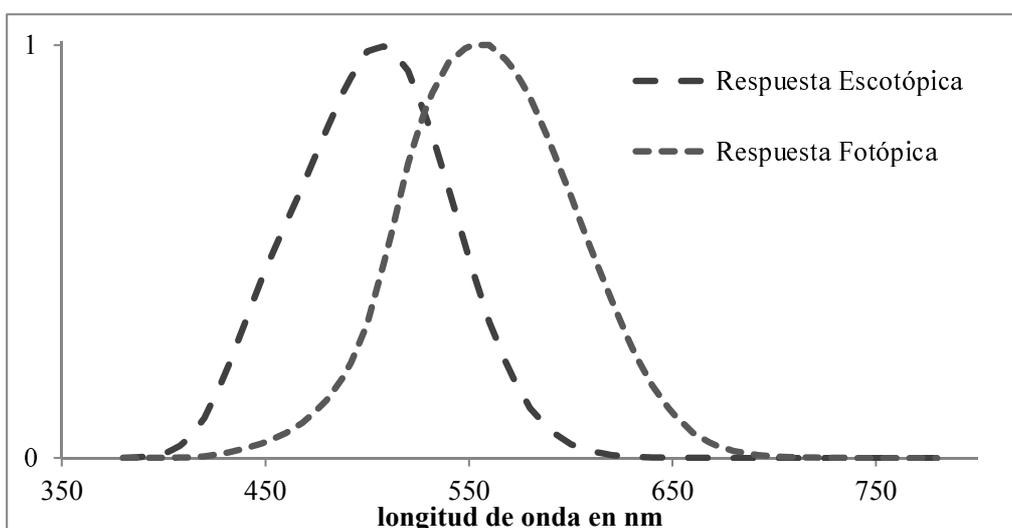
Fotometría

- La fotometría estudia y "mide" la luz y el color desde el punto de vista del ojo humano. Como el ojo "percibe" la luz y los colores, a diferencia de la radiometría que analiza la luz y los colores como radiaciones electromagnéticas
- En primer lugar el ojo humano no "percibe" como un medidor radiométrico. Por tanto, la luz y los colores deben ser analizados "buscando" las "sensaciones", "sensibilidades",,.. del ojo humano
- En la luz que percibe el ojo se debe distinguir entre "luminancia-luminosidad" y "color".
- La luminancia es equivalente a la "cantidad de luz" que una fuente emite: más de 3cd/m^2 se tiene visión "fotópica"(diurna) y se distinguen los colores; menos de 3cd/m^2 se tiene visión "escotópica" (nocturna) y no se distinguen colores, solo luminosidad en tonos grises.

Modelos de visión del color

Visión:

- fotópica



Luz-Color

Fotometría:

ILUMINACIÓN

Curva de visibilidad fotópica $V(\lambda)$

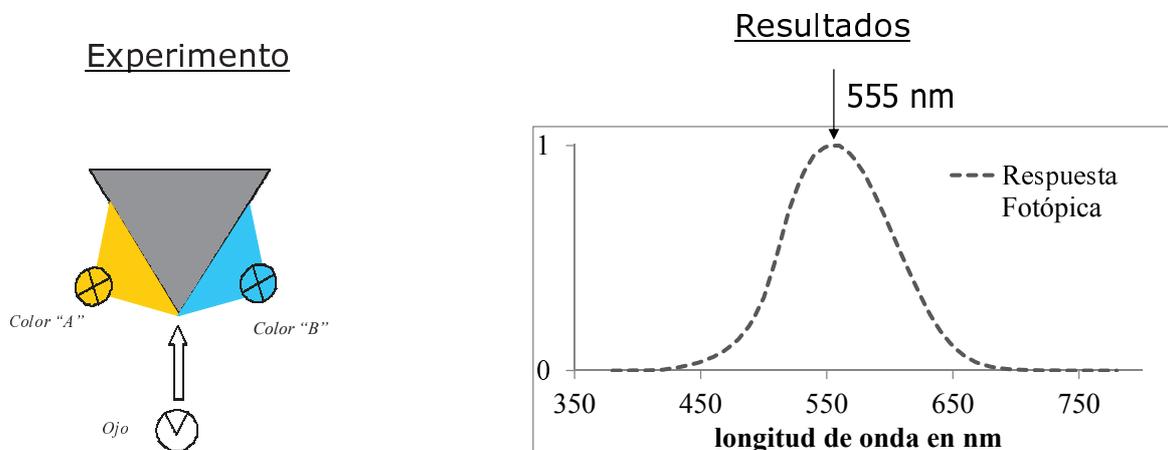
- Para distinguir colores se requiere una luminancia superior a 3cd/m^2 y la presencia de una fuente de luz "cromática"
- En primer análisis se realiza sobre el efecto de la luz-luminosidad-luminancia de una fuente sobre el ojo: Curva de visibilidad fotópica $V(\lambda)$
- 1) El ojo humano no tiene la misma "sensibilidad" para todos los colores
- 2) La curva de visibilidad $V(\lambda)$ se realiza experimentalmente sobre "observadores con visión normal" y son los valores medios obtenidos
- 3) La curva de visibilidad presenta valores relativos entre la "sensibilidad" del ojo a los distintos colores (longitudes de onda)

Luz-Color

Fotometría:

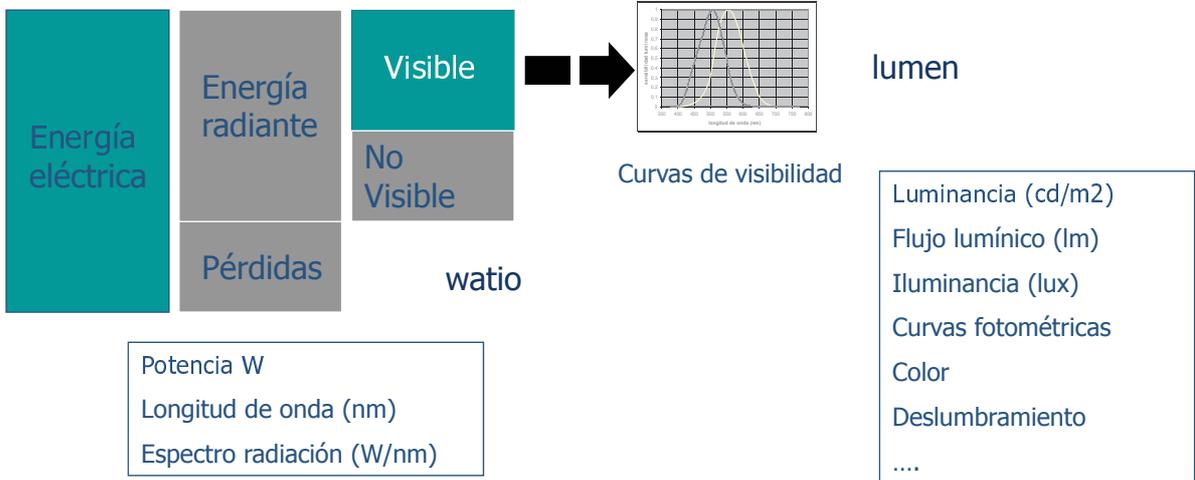
ILUMINACIÓN

Curva de visibilidad fotópica $V(\lambda)$



Radiometría

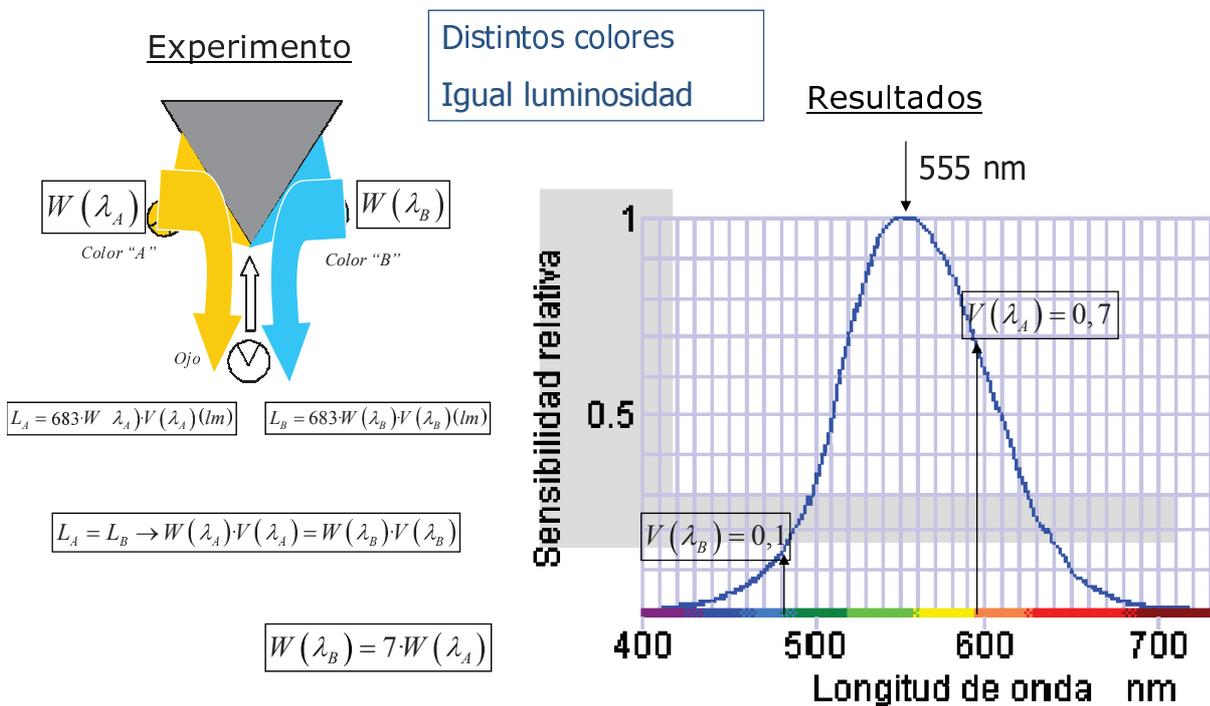
Fotometría



1 watio = 683 lúmenes de $\lambda=555\text{nm}$
= $683 \cdot V(\lambda_0)$ para λ_0

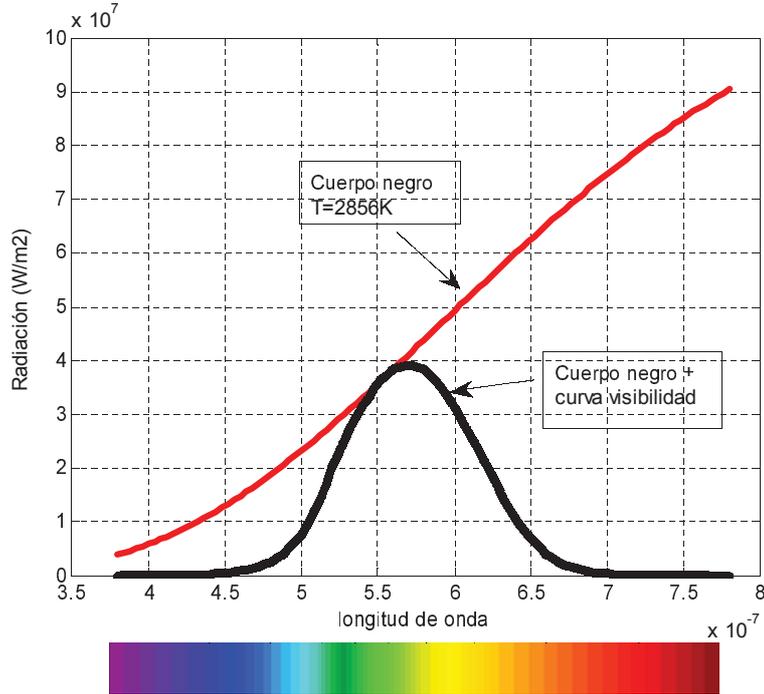
Fotometría:

Curva de visibilidad fotópica $V(\lambda)$



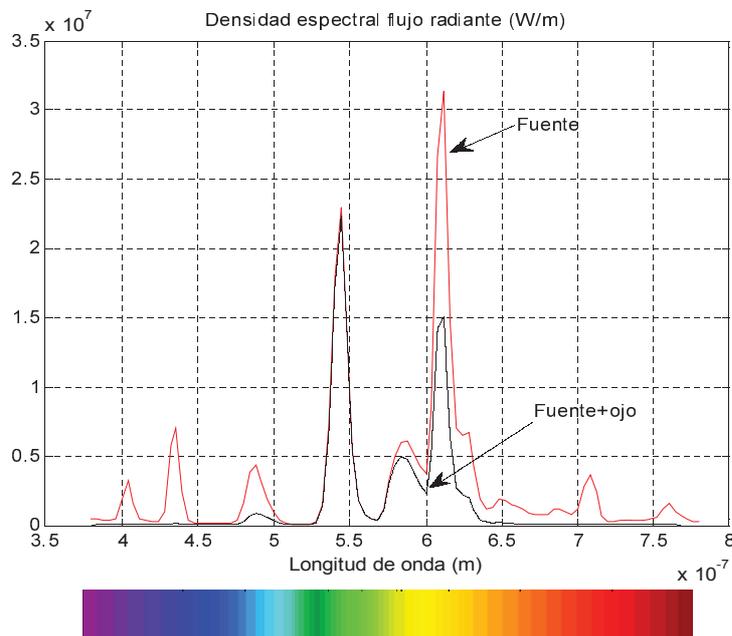
Espectro Radiométrico y fotometría

- Luz solar: Descomposición espectral y fotometría



Espectro Radiométrico-Fotometría

- Luz de descarga: Descomposición espectral y fotometría



Radiometría y Fotometría

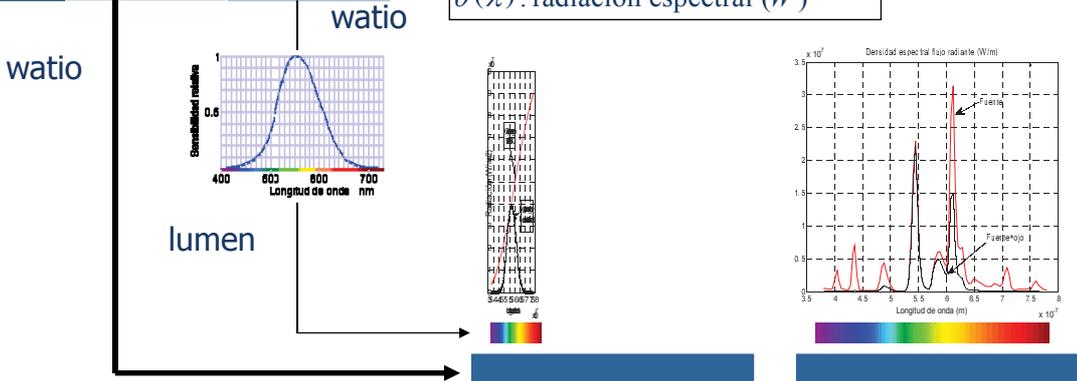
- Análisis energético y fotométrico de una lámpara



Lámpara incandescente: 2%, 10lm/W
 Lámpara de descarga: 10%; 50lm/W
 LED: 20%; 100lm/W

$$\phi = 683 \cdot \int_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} V(\lambda) \cdot \theta(\lambda) \cdot d\lambda \quad (lm)$$

$\theta(\lambda)$: radiación espectral (W)

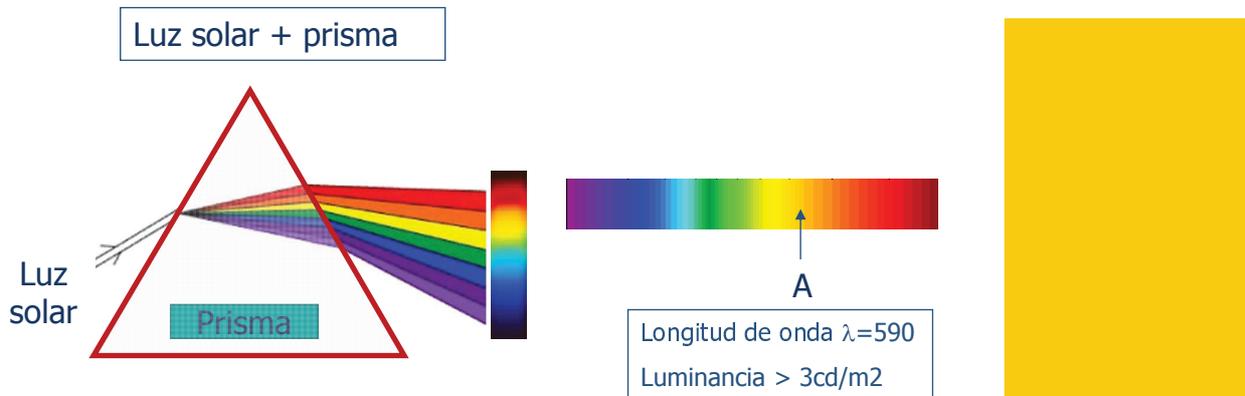


Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

ESPACIO CROMÁTICO RGB

Color monocromáticos



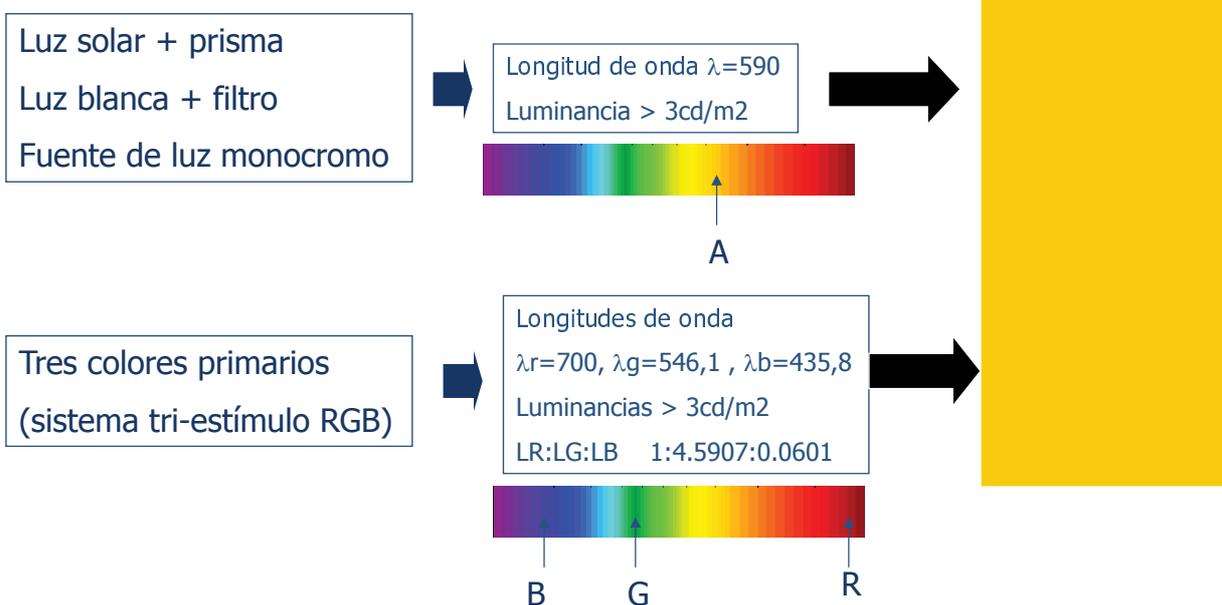
Todos los colores que presentan una única longitud de onda (λ) en su espectro son colores monocromos. Pero no necesariamente al revés

El radio-foto-espectrómetro funciona con la descomposición de la luz

Para evitar las "sensaciones" cada *color monocromo* queda definido por su *longitud de onda* obtenida de la descomposición

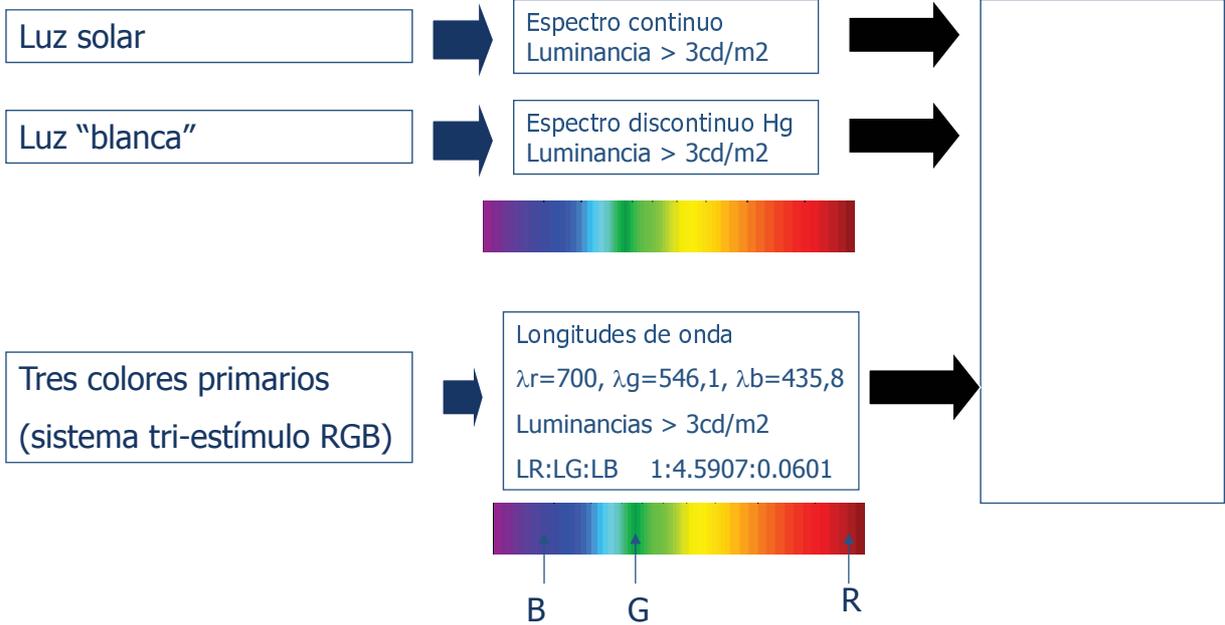
Color: Producción de color monocromático

Fotometría fotópica



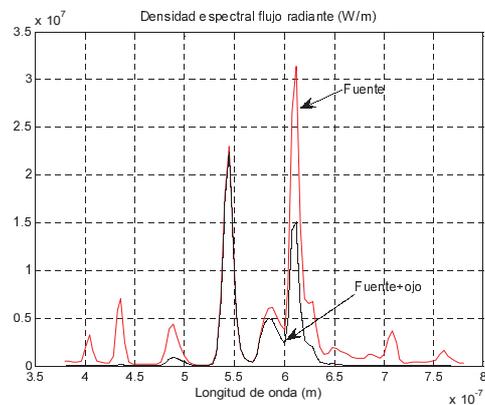
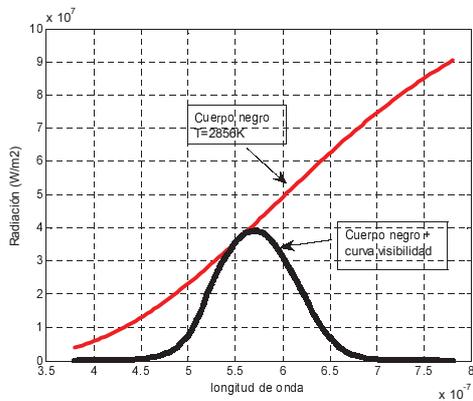
Color: Producción de color "blanco"

Fotometría fotópica



Espectro Radiométrico y Fotométrico

- Luz solar y lámpara de descarga (blanca): Descomposiciones espectrales

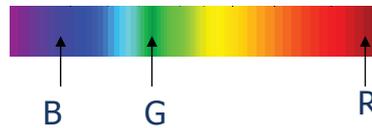


Color: Producción de color

Fotometría fotópica

Cualquier color es la combinación (mezcla) de otros colores monocromáticos o multicromáticos. Esta mezcla la realiza el ojo humano a partir de la "curva de sensibilidad" y de "leyes de la combinación de colores" (matching colors)

Un color puede ser obtenido mediante combinación (mezcla) de tres colores primarios RGB.
Este procedimiento se denomina sistema tri-estímulo RGB y da lugar al diagrama RGB de espacio de colores



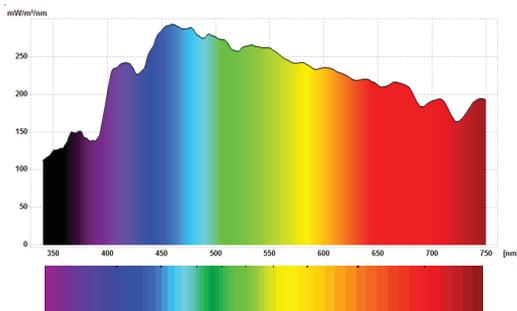
Ejemplo Radiometría y Fotometría fotópica

El color blanco

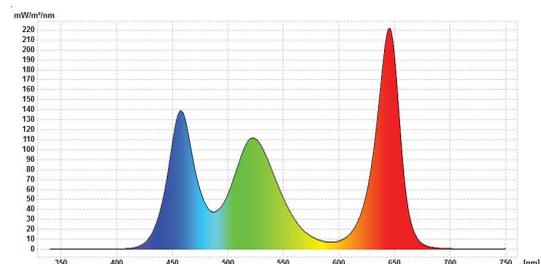
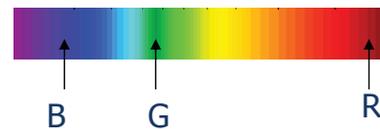
Espectro radiométrico del blanco

Con una combinación adecuada de luces RGB se obtiene el color blanco equivalente

Ra 98.8
CCT 6285

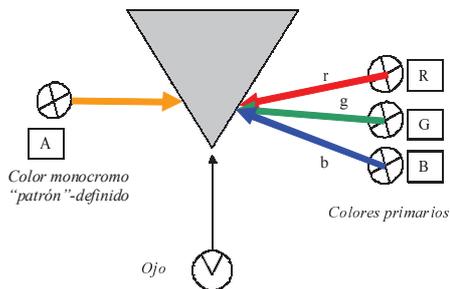


Ra 57.6
CCT 8792



- El color puede ser "obtenido por la combinación" (matches) de 3 colores independientes Rojo (Red), Verde (Green) y Azul (Blue): sistema RGB
- Esto se relaciona con la existencia de los tipos de conos en la retina (L, M y S)
- Los 3 colores independientes se definen por: *Rojo (Red) 700nm, Verde (Green) 546,1nm y Azul (Blue) 435,8 nm.*

Experimento



$$\text{Color} : A \Leftarrow R + G + B$$

$$\text{Luminancia} : L_A = L_R + L_G + L_B$$

$L(A)$ Luminancia del color A

$L(R)$ Luminancia del color R(700nm)

$L(G)$ Luminancia del color G (546,1nm)

$L(B)$ Luminancia del color B (435,8nm)

Modelos de visión del color: CIE

Commission International de l'Éclairage.
International Commission on Illumination

- Se admite el modelo de visión de color RGB
- Los 3 colores independientes se definen por: Rojo (Red) 700nm, Verde (Green) 546,1nm y Azul (Blue) 435,8nm.
- La relación de intensidad luminosa (cd/m²) de los colores primarios es: R=1 (1cd/m²), G=4,5907, B=0,0601

$$C \Leftarrow r(R) + g(G) + b(B)$$

$$L_{\lambda_i} = k' \cdot (R_{\lambda=700} + G_{\lambda=546,1} + B_{\lambda=435,8})$$

$$\begin{aligned} R &= R' \\ G &= 4,5907 \cdot G' \\ B &= 0,0601 \cdot B' \end{aligned}$$

$$r = \frac{R'}{R' + G' + B'}$$

$$g = \frac{G'}{R' + G' + B'}$$

$$b = \frac{B'}{R' + G' + B'}$$

$$r + g + b = 1$$

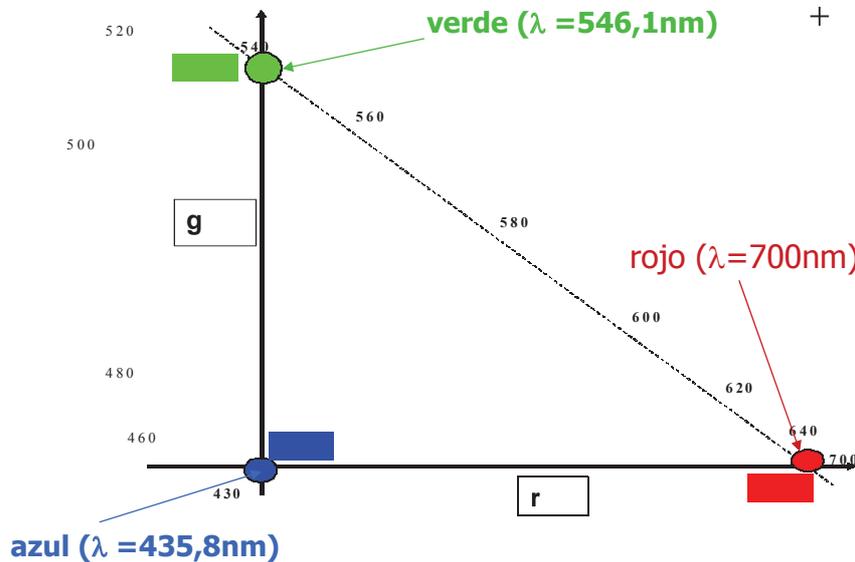
$$R' = r \frac{V(\lambda)}{r \cdot \alpha + g \cdot \beta + b \cdot \gamma}$$

$$G' = g \frac{V(\lambda)}{r \cdot \alpha + g \cdot \beta + b \cdot \gamma}$$

$$B' = b \frac{V(\lambda)}{r \cdot \alpha + g \cdot \beta + b \cdot \gamma}$$

Diagrama cromático. Espacio RGB

- Representación en dos ejes (r,g) del resultado de las distintas combinaciones de colores en el espacio RGB
- El valor de b se obtiene por diferencia: $b=1-r-g$
- Se definen los vértices (r,g,b): Azul=(0,0,1), Verde=(0,1,0), Rojo=(1,0,0)



+ + =

$$C \leftarrow r(R) + g(G) + b(B)$$

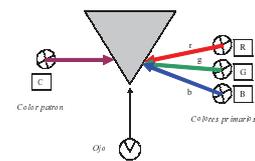
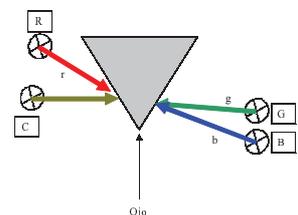
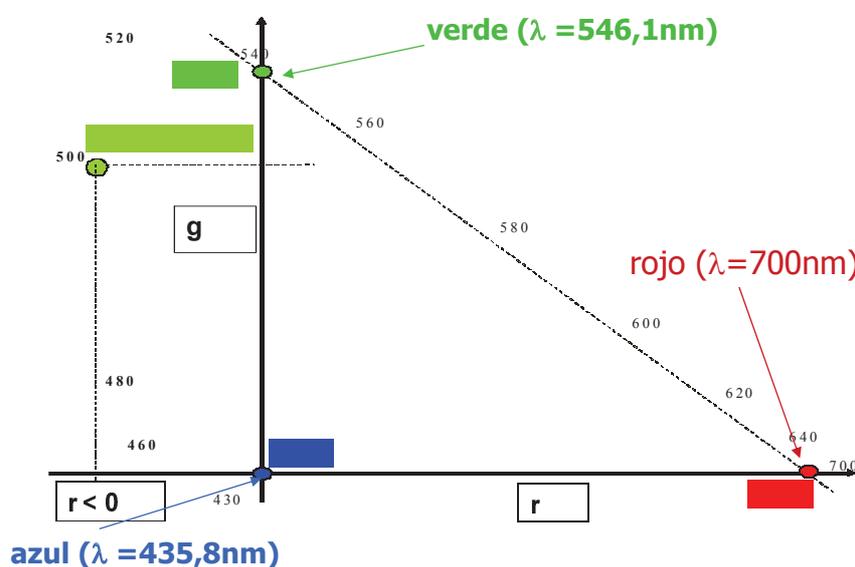


Diagrama cromático. Espacio RGB

- Existen colores que no se pueden obtener por combinación de r, g, y b. Son los que están fuera del triángulo RGB
- Estos colores "no factibles" presentan otro tipo de combinación

$$C + R(R) \leftarrow G(G) + B(B)$$



$$C \leftarrow -r(R) + g(G) + b(B)$$

$$r = \frac{R'}{R'+G'+B'} < 0$$

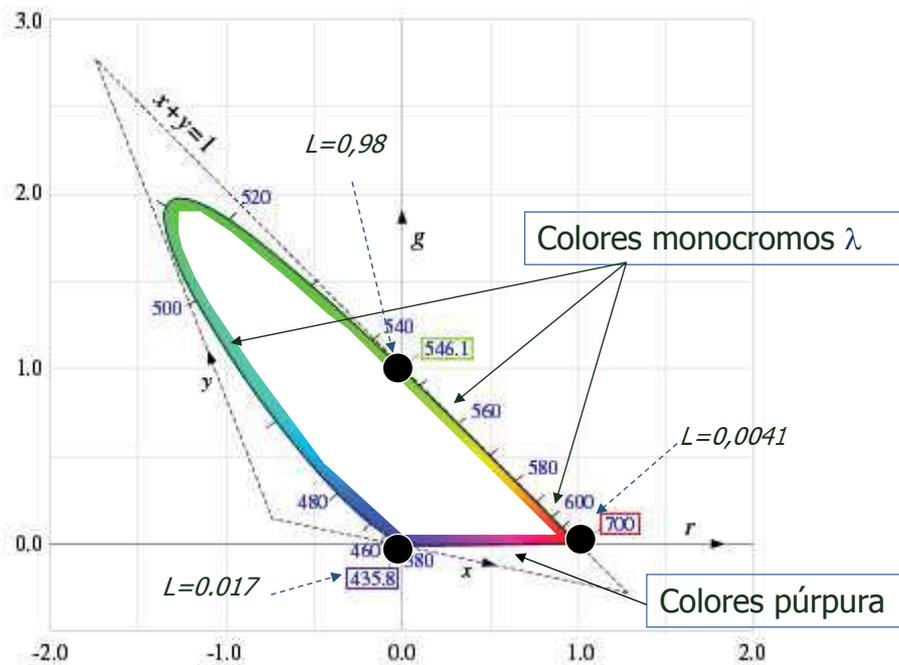
$$g = \frac{G'}{R'+G'+B'} > 0$$

$$r + g + b = 1$$

Curva mono-cromática. Espacio RGB

$$C \Leftarrow r(R) + g(G) + b(B)$$

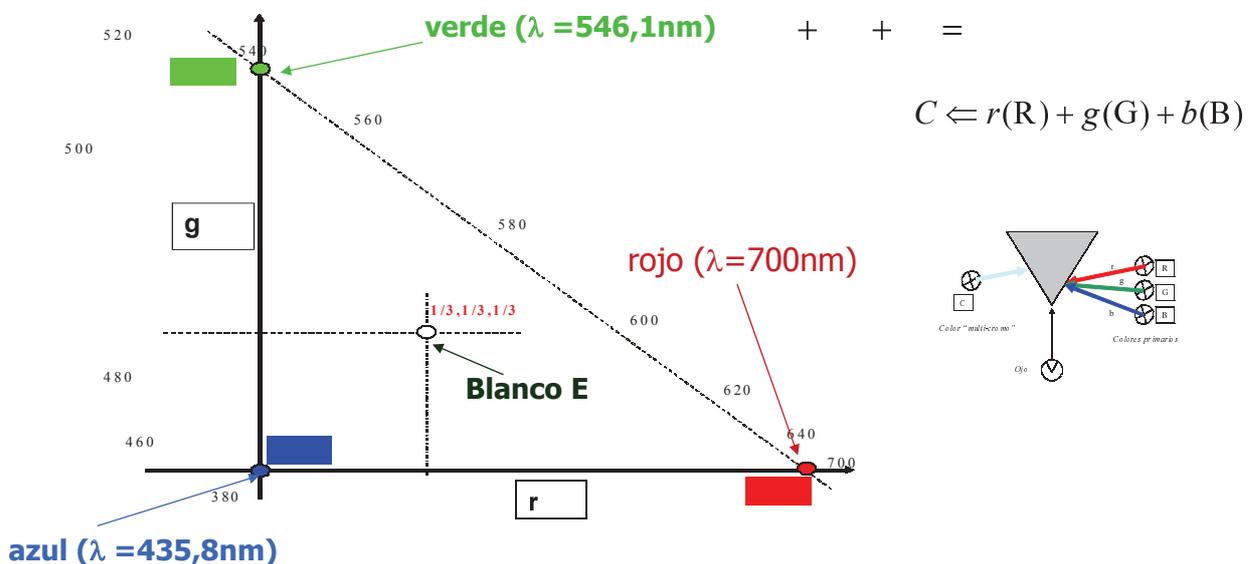
$$r_{\lambda} + g_{\lambda} + b_{\lambda} = 1$$



Wikipedia. CIE 1931 color space

Diagrama cromático. Espacio RGB

- Cualquier color puede ser obtenido a partir de otros colores
- Cualquier color dentro del triángulo, puede ser obtenido con los colores primarios RGB. Pueden existir colores "mono-cromo" en el borde del triángulo
- El punto del color "blanco iluminante E" T=5500K equi-energético: $(r,g,b)=(1/3,1/3,1/3)$



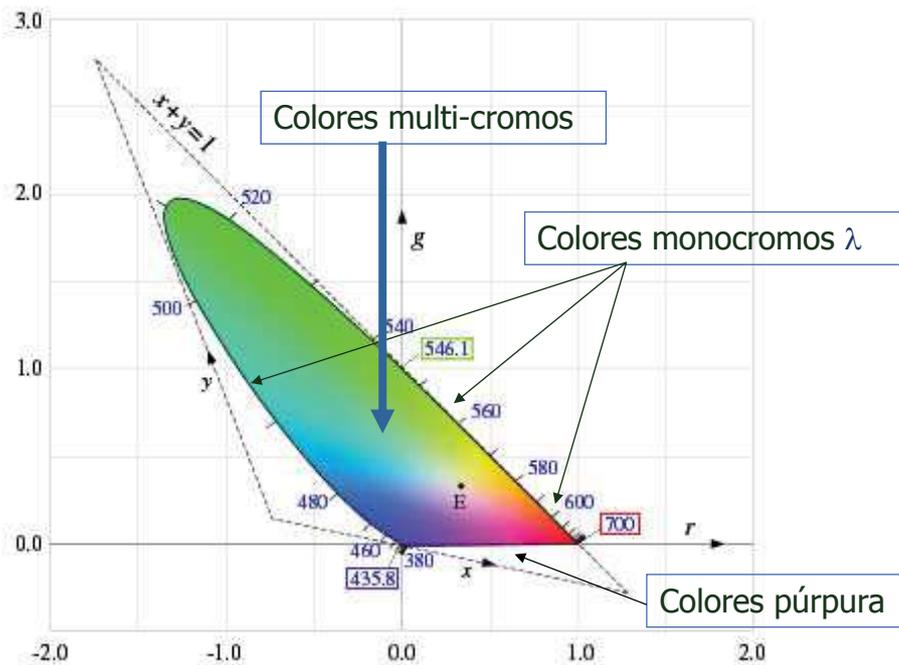
Modelos de visión del color: CIE - 1931

Diagrama cromático. Espacio RGB

ILUMINACIÓN

$$C \Leftarrow r(R) + g(G) + b(B)$$

$$r_{\lambda} + g_{\lambda} + b_{\lambda} = 1$$

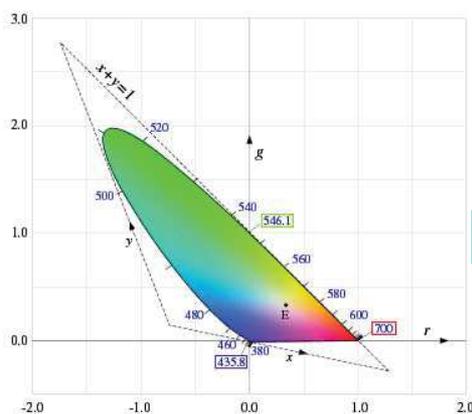


Wikipedia. CIE 1931 color space

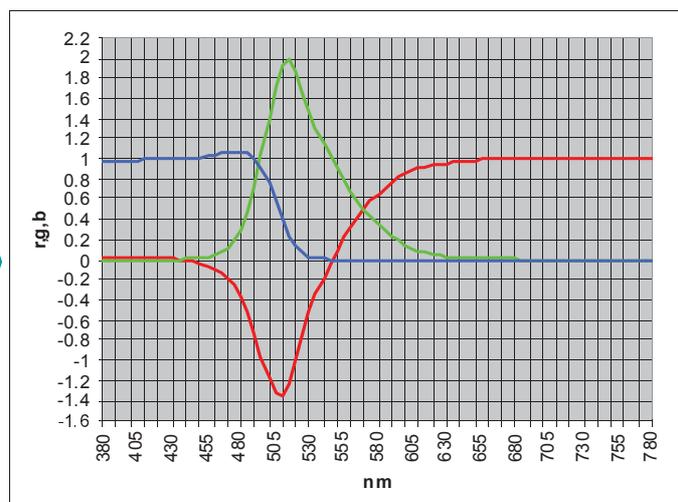
Modelos de visión del color: CIE - 1931

Diagrama cromático. Espacio RGB

ILUMINACIÓN



Wikipedia. CIE 1931 color space



CIE 1931 color space rgb:

Valores (r,g,b) de los colores mono-cromáticos (borde del espacio RGB)

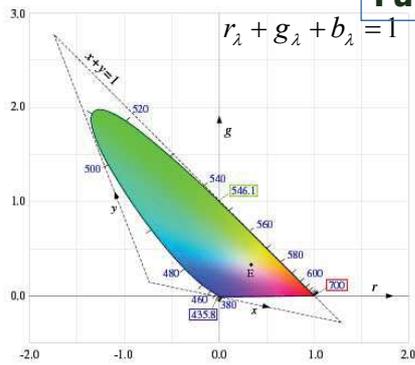
$$r_{\lambda} + g_{\lambda} + b_{\lambda} = 1$$

Modelos de visión del color: CIE - 1931

Diagrama cromático. Espacio RGB

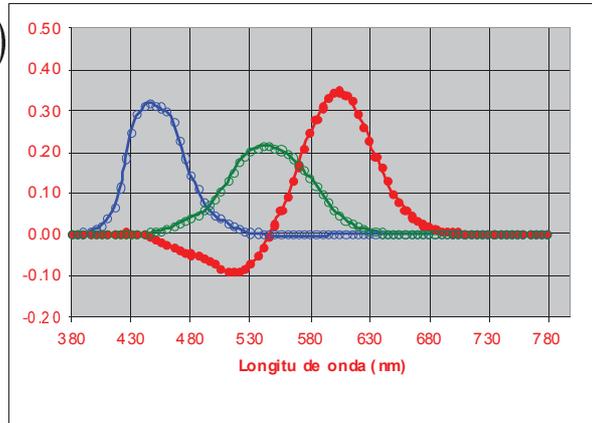
ILUMINACIÓN

Funciones cromáticas básicas (Color matching function)

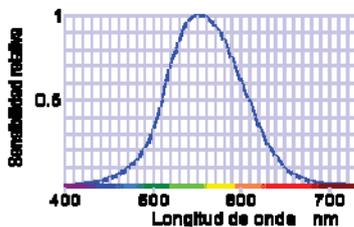


Wikipedia. CIE 1931 color space

$$(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$$



$V(\lambda)$



Curva de visibilidad

$$L_\lambda = k(\bar{r}_\lambda \cdot \alpha + \bar{g}_\lambda \cdot \beta + \bar{b}_\lambda \cdot \gamma)$$

$$\bar{r}_\lambda = \frac{r_\lambda \cdot V(\lambda)}{r_\lambda \cdot \alpha + g_\lambda \cdot \beta + b_\lambda \cdot \gamma}$$

$$\bar{g}_\lambda = \frac{g_\lambda \cdot V(\lambda)}{r_\lambda \cdot \alpha + g_\lambda \cdot \beta + b_\lambda \cdot \gamma}$$

$$\bar{b}_\lambda = \frac{b_\lambda \cdot V(\lambda)}{r_\lambda \cdot \alpha + g_\lambda \cdot \beta + b_\lambda \cdot \gamma}$$

$$(\alpha : \beta : \gamma) = (1 : 4,507 : 0,061)$$

Modelos de visión del color: CIE - 1931

Standard Colorimetric Observer

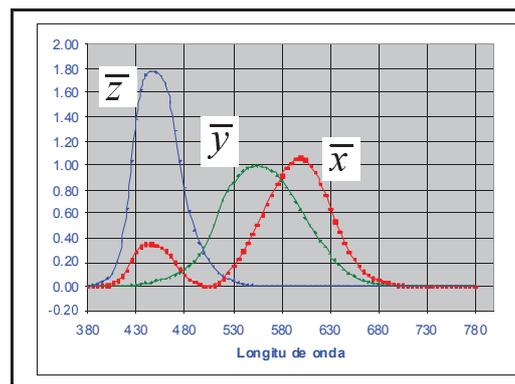
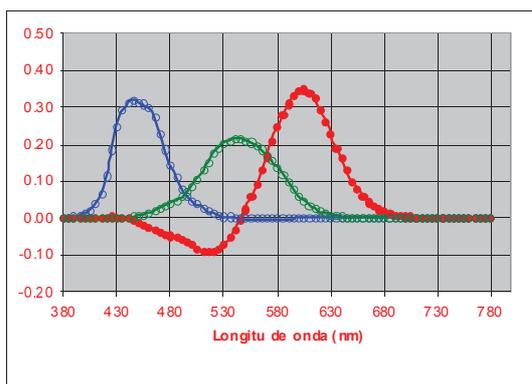
ILUMINACIÓN

CIE 1931 color space: funciones cromáticas básicas (Color matching function)

$$(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}) \rightarrow (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

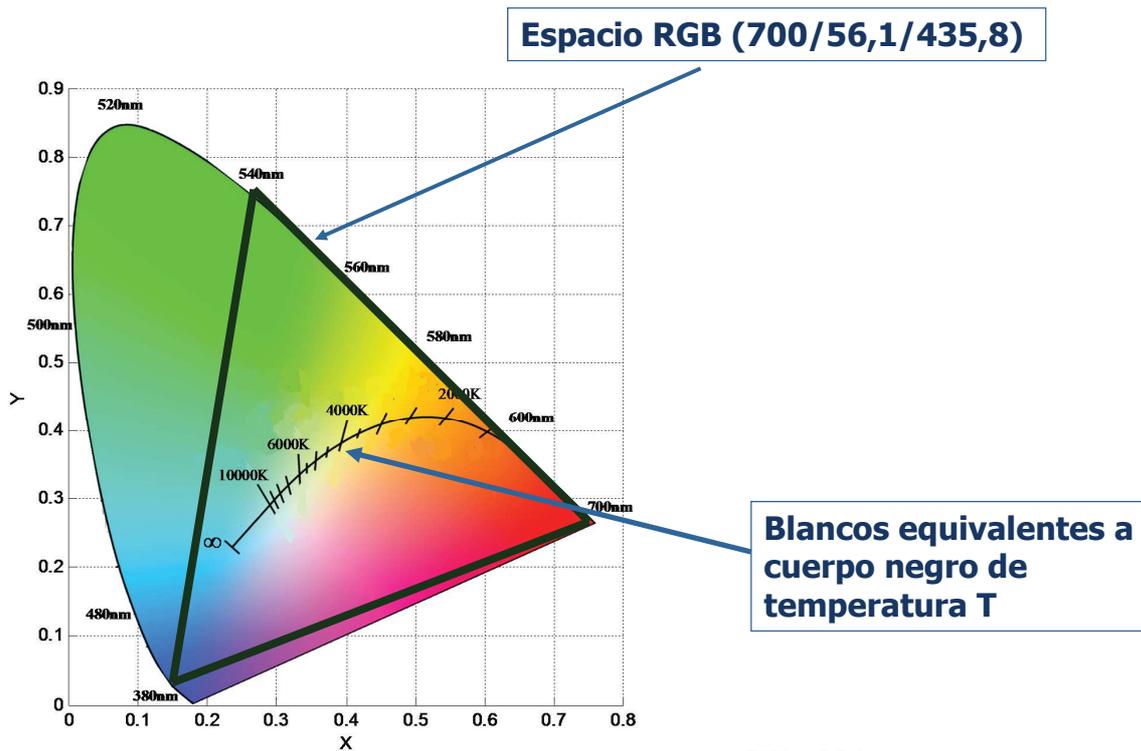
$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,76888 & 1,75175 & 1,13016 \\ 1 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0 & 0,05651 & 5,59427 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r} \\ \bar{g} \\ \bar{b} \end{bmatrix}$$

$$V(\lambda) = \bar{y}_\lambda$$



LA LUZ: El color

ILUMINACIÓN



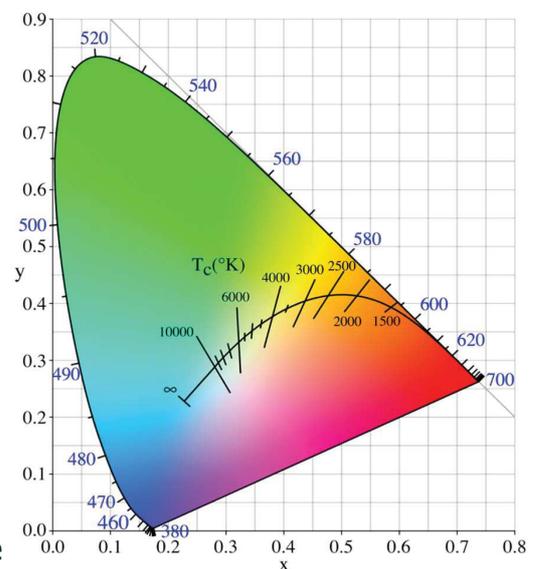
CIE 1931 color space

Magnitudes Luminotécnicas

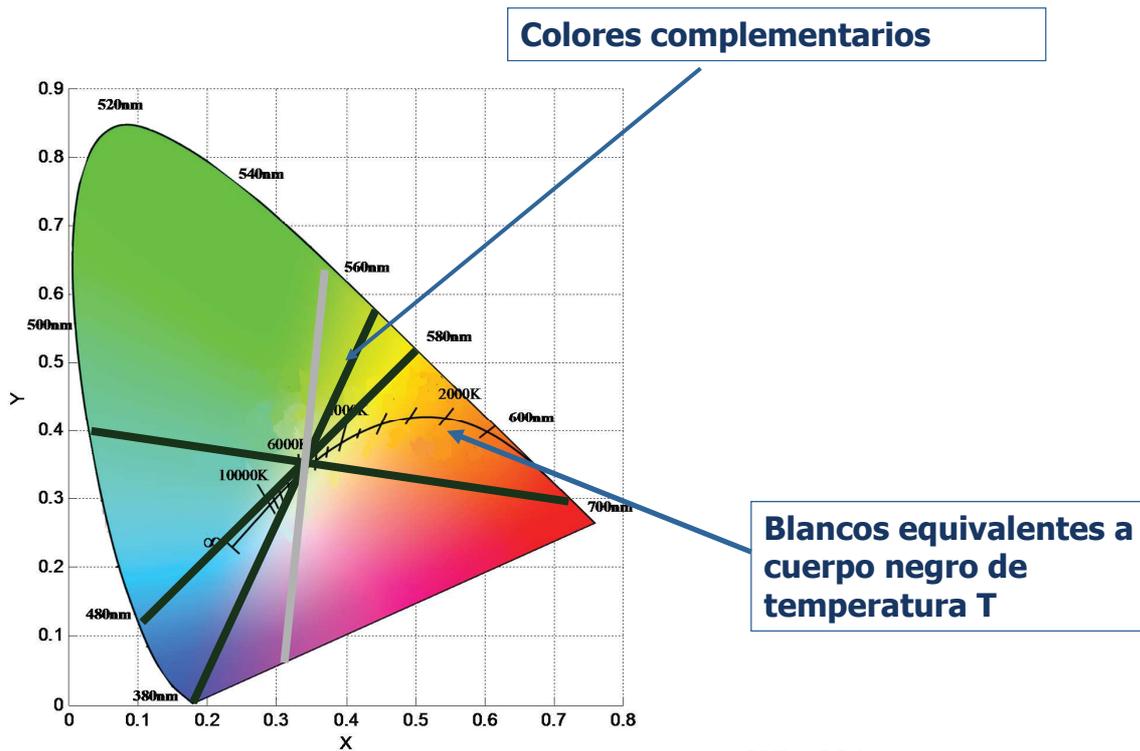
ILUMINACIÓN

El triangulo cromático CIE

Tª de color	Apariencia	tono
$T_c > 5300 \text{ K}$	Fría	Blanco azulado
$3300 \text{ K} \leq T_c \leq 5300 \text{ K}$	Intermedia	Neutro
$T_c < 3300 \text{ K}$	Cálida	Blanco rojizo



CIE 1931 color space



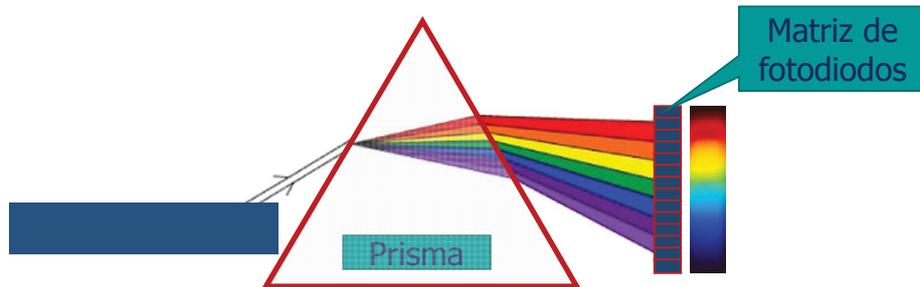
CIE 1931 color space

Seminario técnico sobre Iluminación

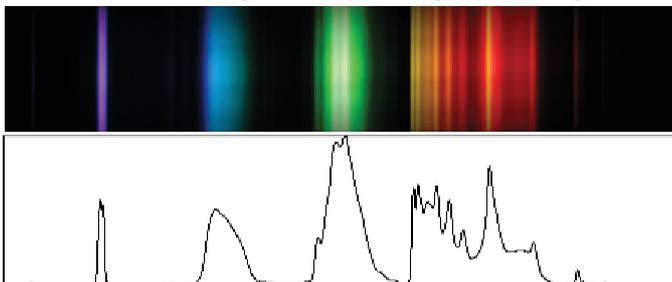
Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

Ejemplos: Utilización de radio-foto-espectrómetro y lámparas LED RGB

Medidas luminotécnicas



Fluorescente compacta - Descomposición espectral



<http://bealecorner.org/best/measure/cf-spectrum/index.html>

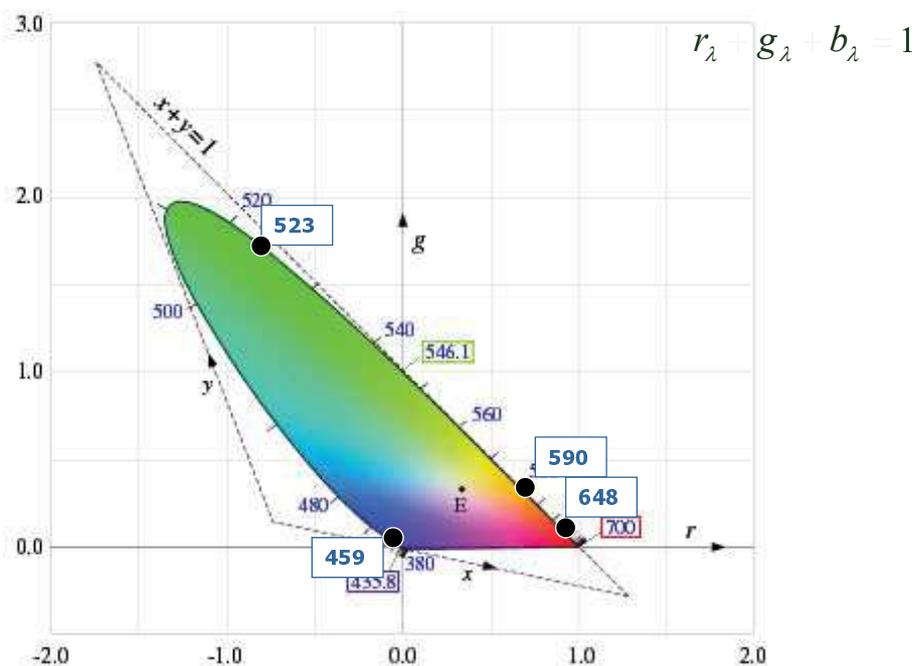
Espectrorradiómetro



Modelos de visión del color: CIE - 1931

ILUMINACIÓN

Diagrama cromático. Espacio RGB de los diodos LED del ejemplo



Wikipedia. CIE 1931 color space

Diagrama cromático. Espacio RGB de los diodos LED del ejemplo

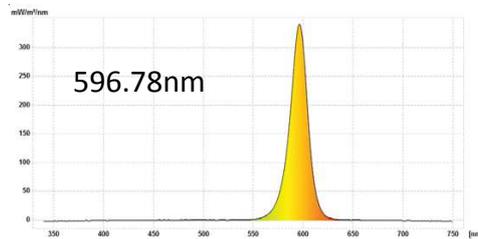
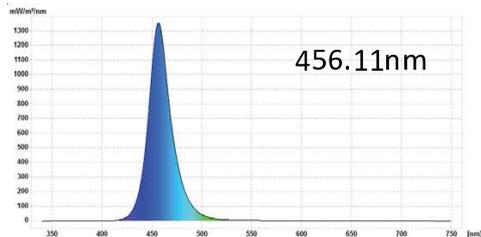
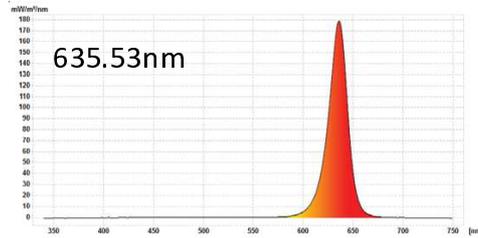
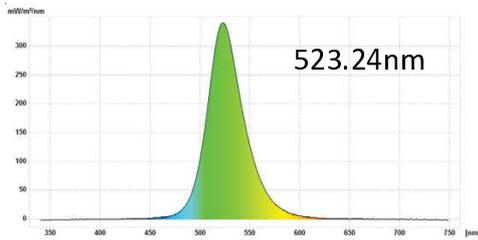
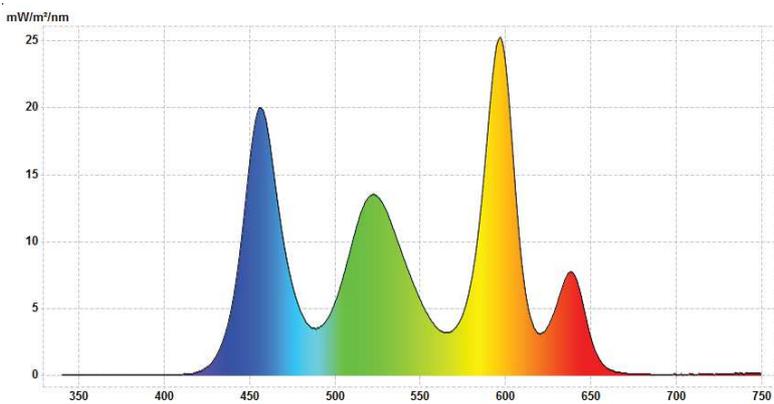


Diagrama cromático. Espacio RGB de los diodos LED del ejemplo



Ra 82.3
CCT 5155

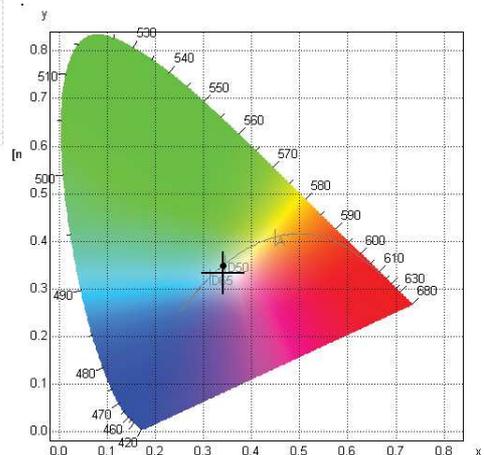
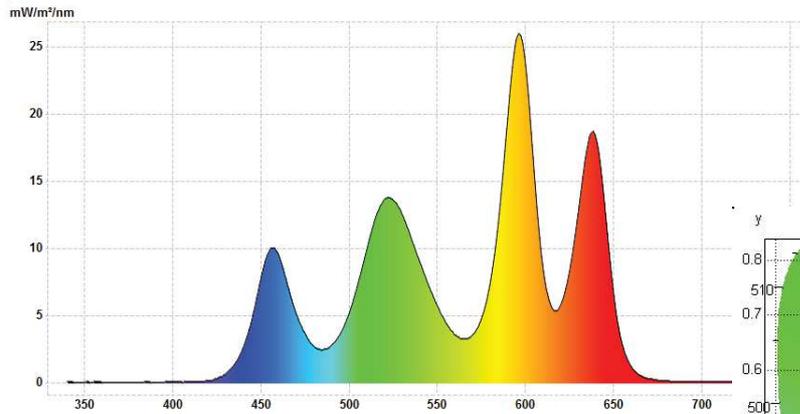
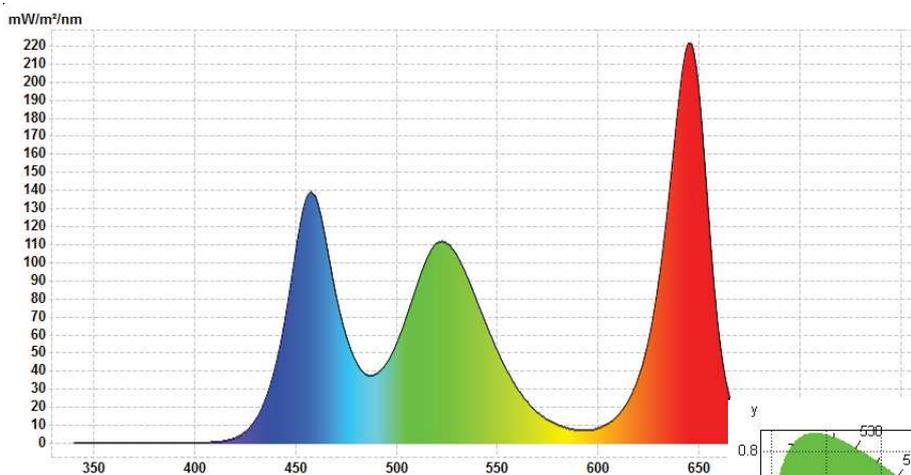
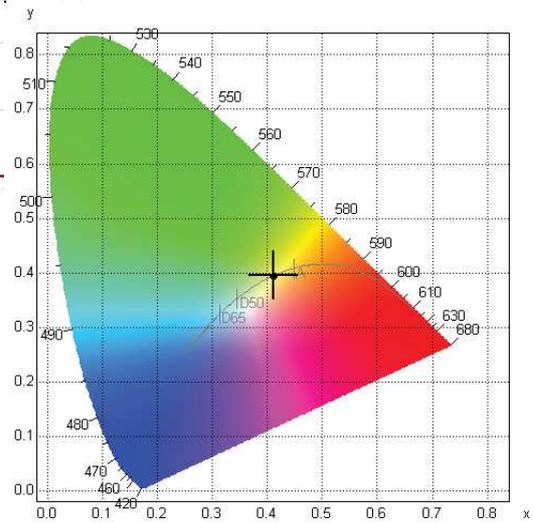


Diagrama cromático. Espacio RGB de los diodos LED del ejemplo



Ra 82.3
CCT 3411



Ra 57.6
CCT 8792

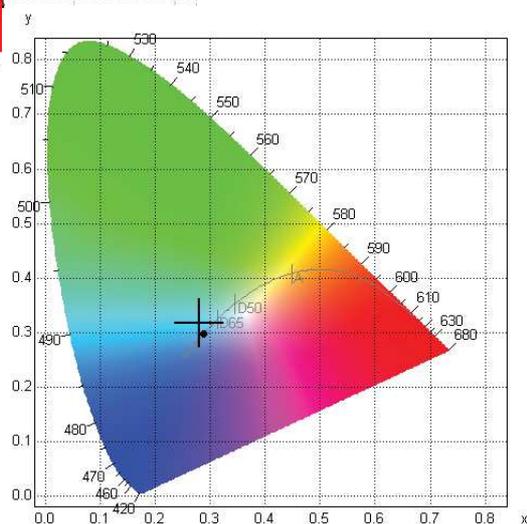
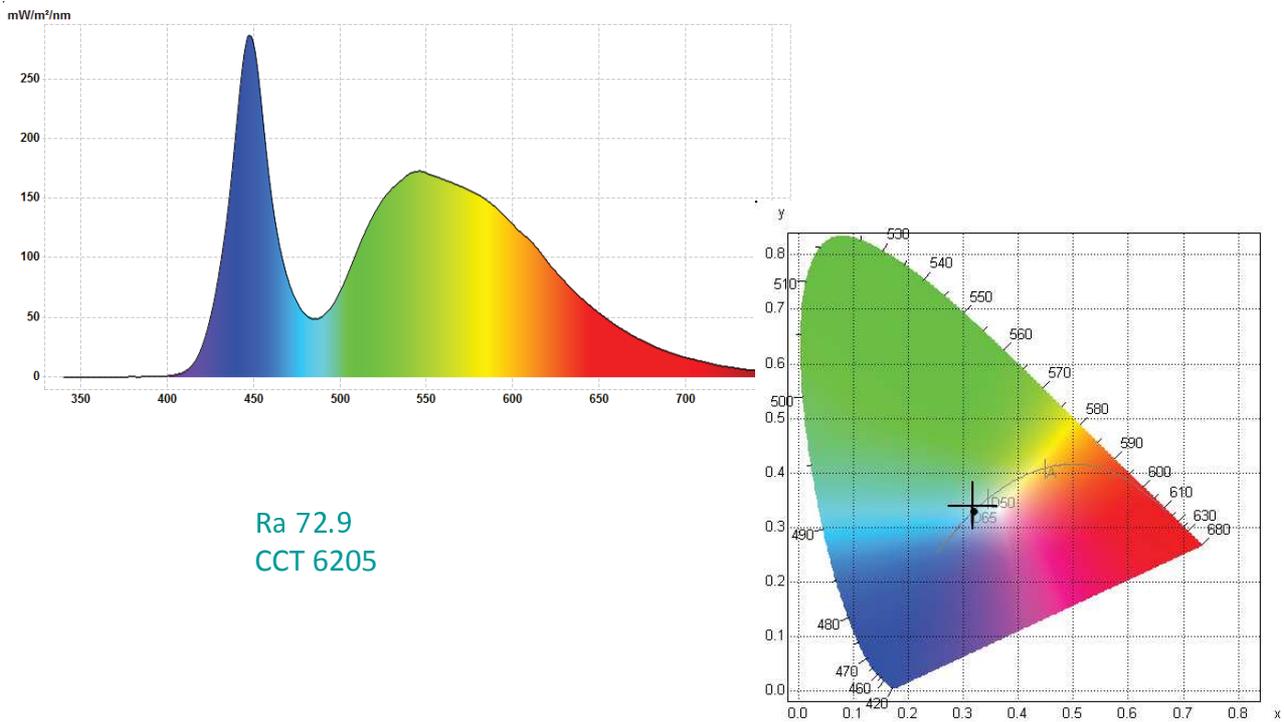


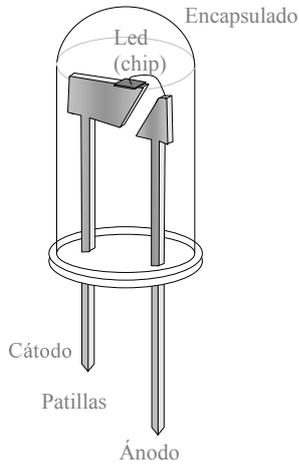
Diagrama cromático. Espacio RGB de los diodos LED del ejemplo



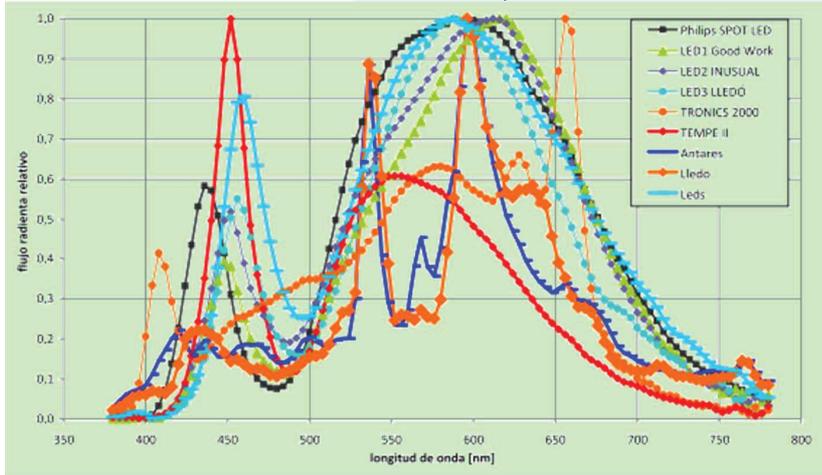
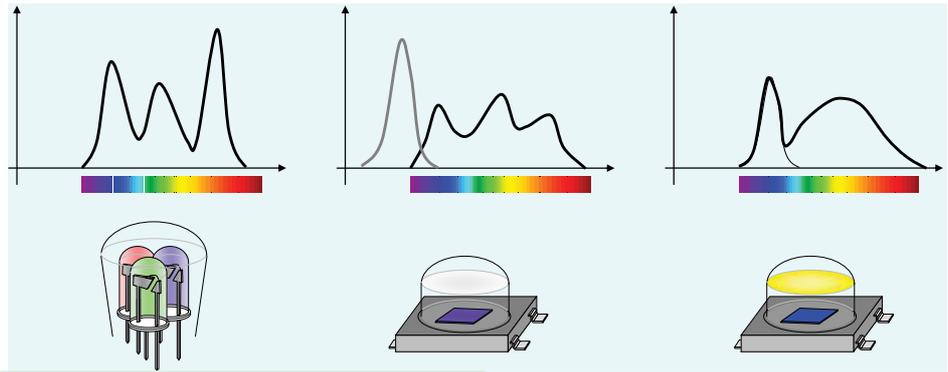
Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

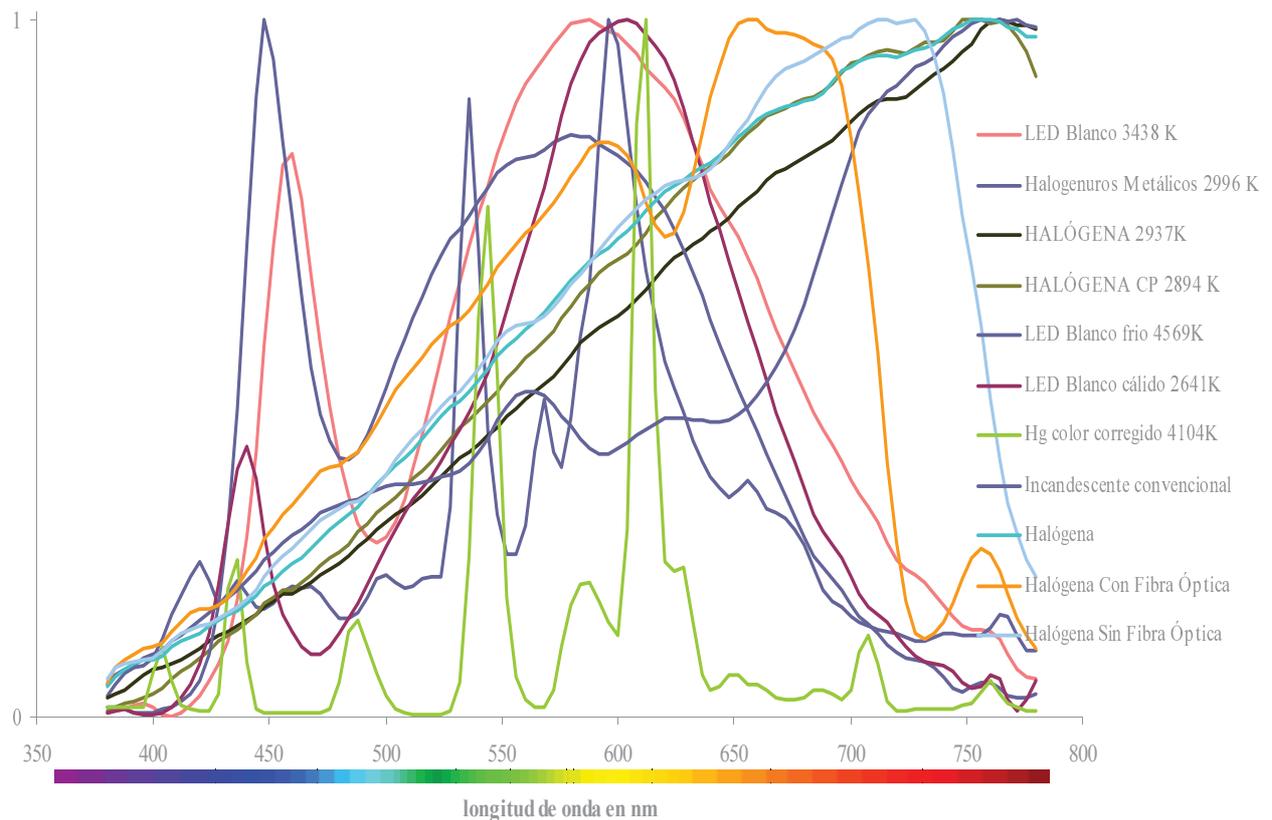
Ejemplos:
LAS LUMINARIAS Y EL COLOR



Iluminación LED



¿Todas estas lámparas emiten luz blanca?



Seminario técnico sobre Iluminación

Asociación de Ingenieros Industriales de Galicia

Iluminación

Grupo de enerxía eléctrica. en.e

Universidad de Vigo

Vigo, 29 y 30 junio de 2015

Calidad de luz

ILUMINACIÓN

La iluminación consume el 20% de toda la energía en los países desarrollados

La iluminación es una herramienta necesaria para que la sociedad: en el trabajo, en los hogares, en las comunicaciones, en los espectáculos, en el deporte,...

El ahorro energético es imprescindible pero la implantación de una iluminación adecuada es importante en la calidad de vida

La iluminación inadecuada o de baja calidad puede tener efectos negativos: dolores de cabeza, depresión, deslumbramiento, distracción, ...

Calidad de la iluminación