

Procesamiento Digital de Imágenes

Color y espacios cromáticos

Manipulación de luminancia y saturación

Noelia Revollo

Facultad de Ingeniería– UNJU – CONICET

grevollo@fi.unju.edu.ar



PDI – Color

Hasta ahora hemos considerado el color como una simple **tupla de tres números (R, G, B)**... pero esto es únicamente un modelo de color concreto, y no el único.

¿Qué es el color? ¿Cuál es su naturaleza?

-Los **objetos** tienen color. El color es una propiedad de los objetos.

FALSO. Los objetos reflejan o absorben ciertas frecuencias

-La **luz** tiene color. El color es una propiedad de la luz.

FALSO. La luz es una radiación electromagnética en cierto rango de frecuencias

- Según los expertos, el **color** es una **sensación humana**, derivada de la capacidad del ojo de captar los niveles de radiación en 3 frecuencias diferentes.
- Por extensión, hablamos del color de la luz y de los objetos



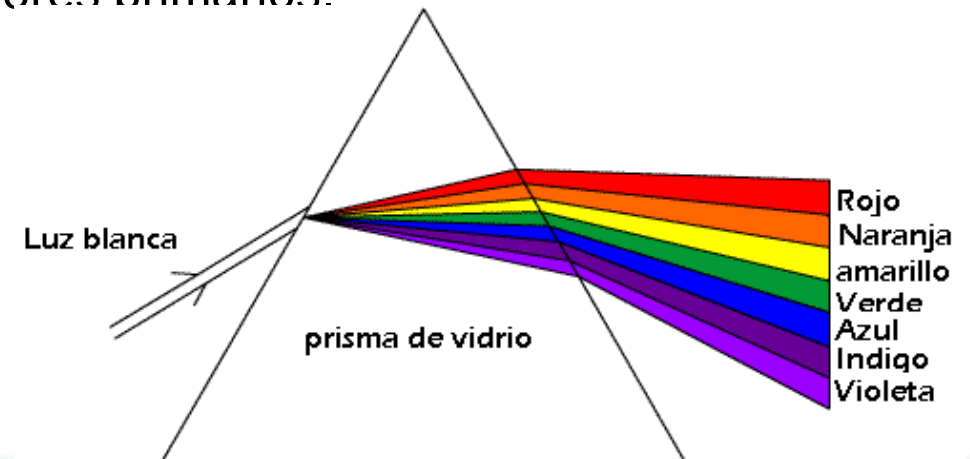
PDI – Color: Introducción

Todos conocemos que los dispositivos de reproducción de imágenes (monitores, TV, etc.) utilizan el “espacio cromático” RGB.

Espacio cromático RGB significa que cada posible estímulo cromático (“color”) puede reproducirse con una combinación de esos tres colores primarios.

Por otro lado, todos conocemos la experiencia del prisma de Newton y que la luz contiene un sinnúmero de colores.

Cómo pueden ambas cosas ser posibles?



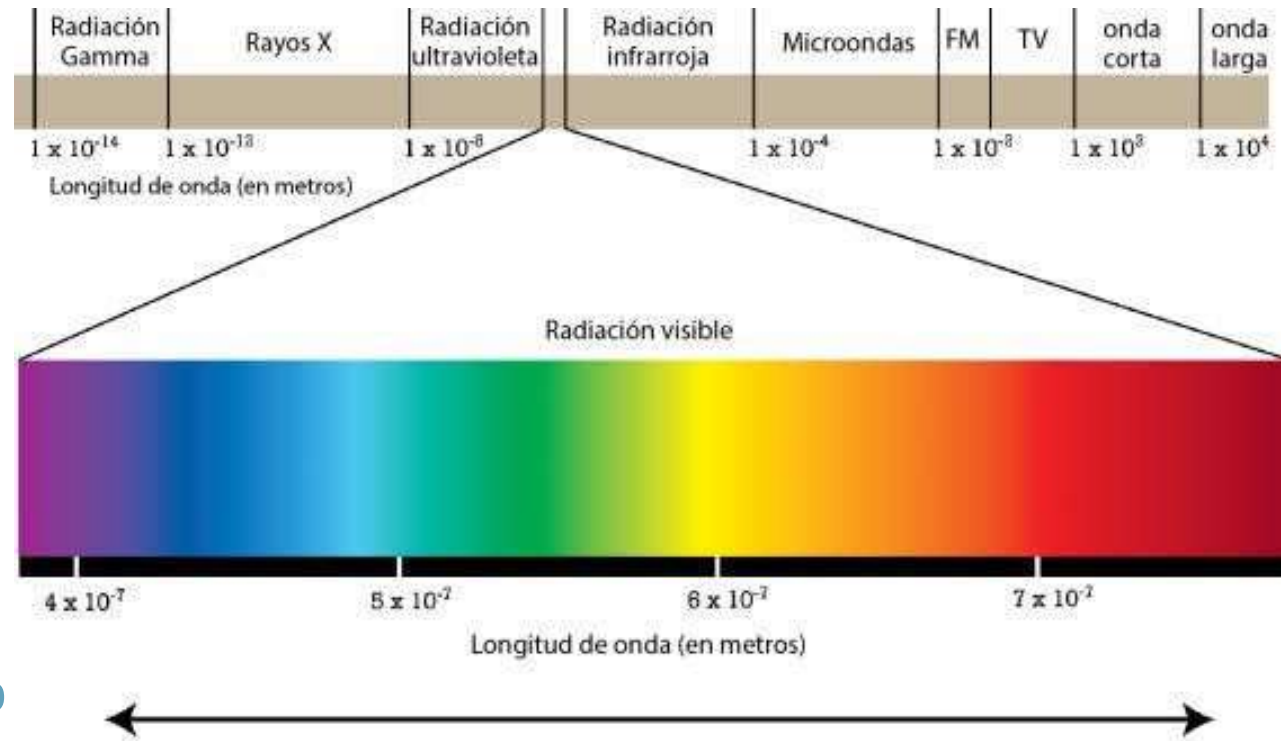
1-estímulo cromático
2-Anatomía del ojo humano



PDI – Color: Electromagnetismo

La luz visible es parte (muy pequeña!) de un fenómeno más abarcativo, conocido como *electromagnetismo*, que nos acompaña en la vida diaria en muchos aspectos.

(lectura complementaria):
https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci3n_electromagn3tica

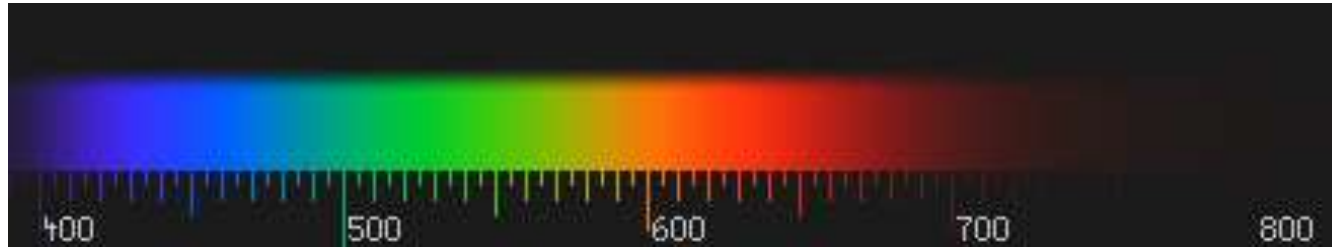


PDI – Color: Electromagnetismo

La **luz** es una **radiación electromagnética** en el rango de frecuencias de los 405 a los 790 THz. (740 a 380 nm).

Este rango de frecuencias es lo que se conoce como la **radiación visible**.

Ultra-
violetas



Infra-
rojos

- Pero la luz no es (normalmente) un simple punto en este rango, sino que se forma **combinando un poco de cada frecuencia**.
- La descomposición de una fuente de luz en sus componentes frecuenciales es lo que se conoce como el **espectro** (o **descomposición espectral**) de esa luz.

PDI – Color: Longitud de onda de la luz

Las ondas electromagnéticas pueden caracterizarse por un único parámetro, la frecuencia, o bien la longitud de onda (dado que ambos están relacionados por la velocidad de la luz).



La luz visible tiene una longitud de onda entre 380 y 730 nanómetros (milimillonésimas de metro), lo cual hace que los fotones puedan interactuar con los pigmentos ubicados en la retina y de esa forma generar un estímulo perceptible.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Color>

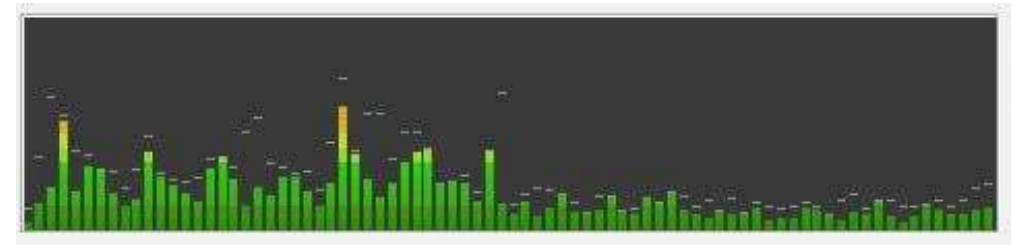
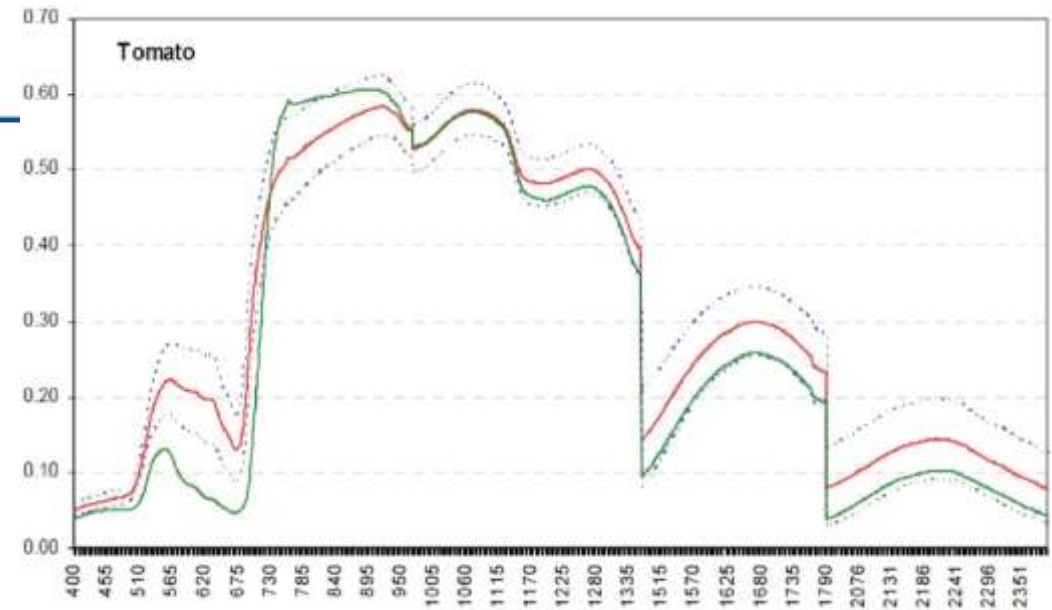


PDI – Color: Espectros

Los diferentes objetos en el mundo emiten diferentes cantidades de energía a cada una de esas longitudes de onda, conocidas como distribuciones espectrales, o *espectros*. Vemos el espectro de diversos frutos de tomate.

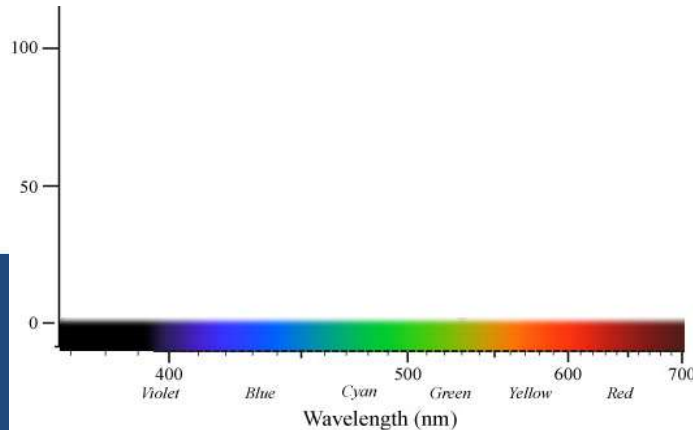
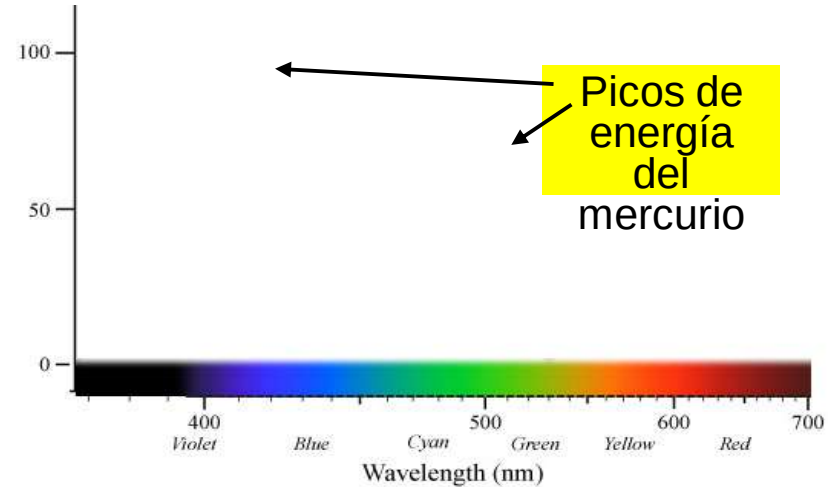
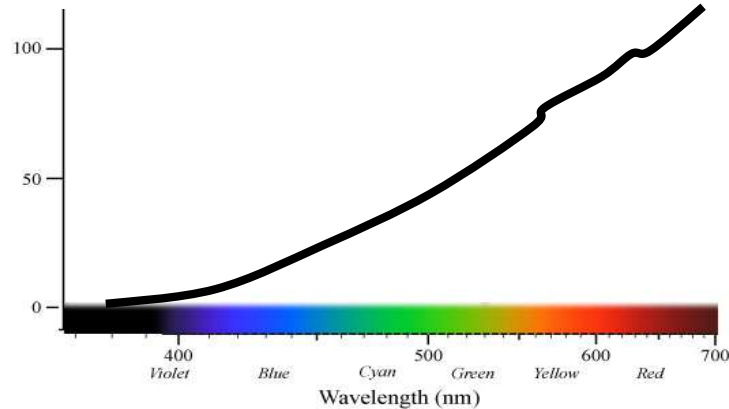
Los espectros también se utilizan en música, como se muestra en analizador de espectros de un típico reproductor de audio.

https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_fr



PDI – Color: Espectros

Ejemplo. Comparación de los espectros de luz solar, lámpara incandescente (una bombilla) y un tubo fluorescente.



Los tres espectros son muy distintos. Y, sin embargo, las tres luces nos parecen blancas...

PDI – Color: Espectros

De esa manera, el “color” con el cual se nos aparece un objeto, depende de la luz que lo ilumina, y de cómo ese objeto la refleja.

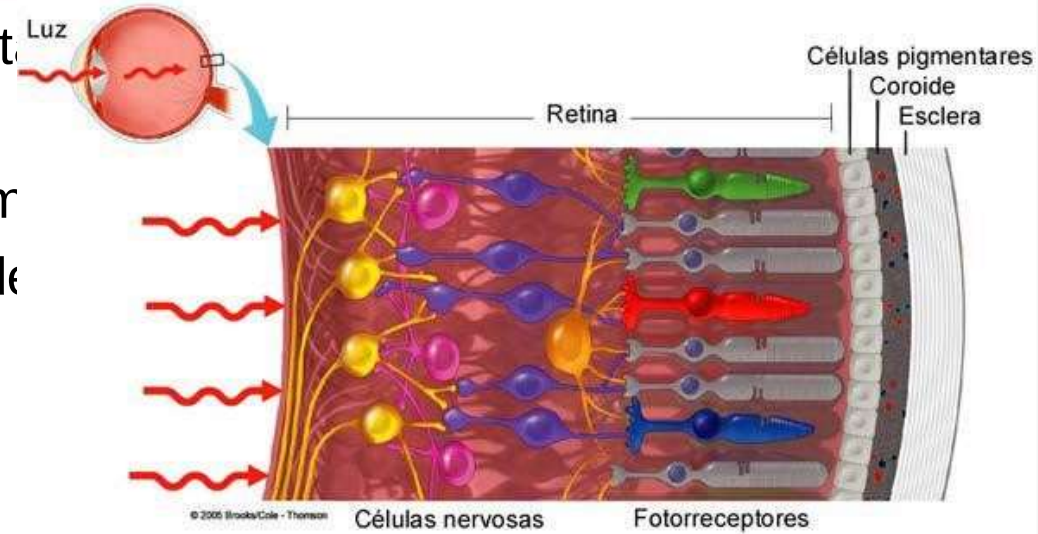
Por qué entonces si el espectro de la luz visible contiene “infinitos colores”, podemos representar cada color con solo tres valores RGB?

El hecho concreto que responde esta pregunta es que la retina humana contiene solamente tres tipos de receptores, cada uno sensible a una parte diferente del espectro, centrados aproximadamente en la zona del azul, el verde y el amarillo.



PDI – Color: La retina humana

En la figura se observa un ojo humano, y un detalle esquemático de la retina. Increíblemente los receptores están en la parte de atrás de la misma. Cada receptor cromático (conos) está pintado de color aproximado (el del amarillo está en rojo, después veremos por qué).



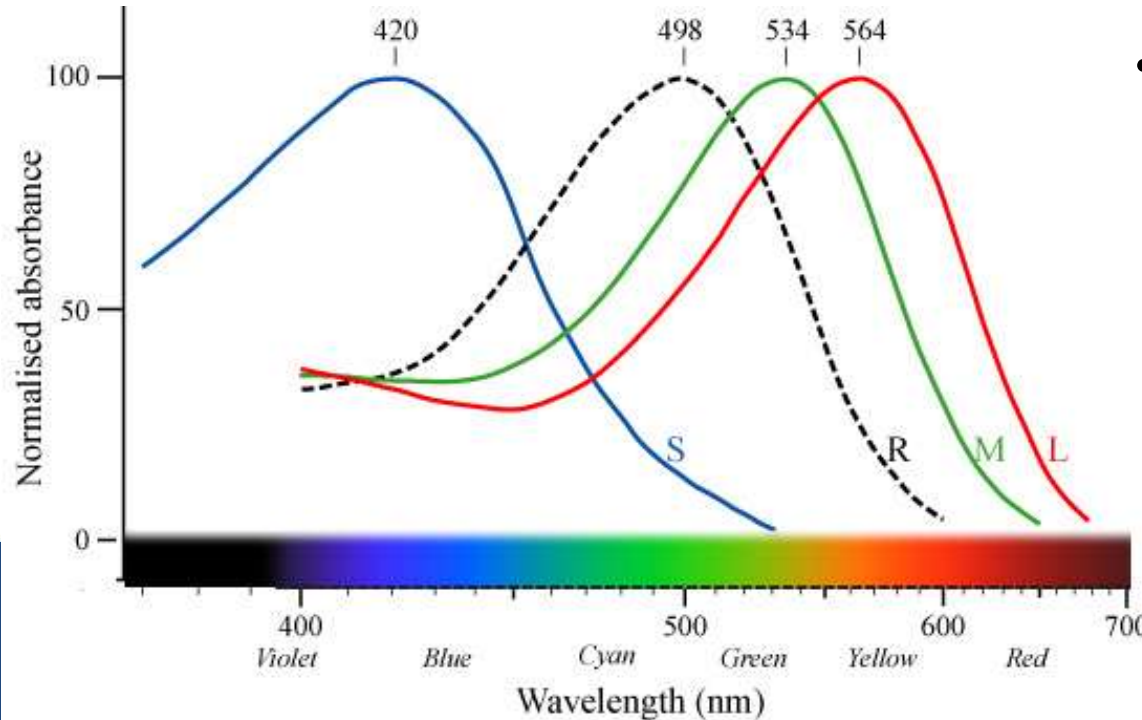
Hay además receptores acromáticos (bastones) que funcionan en condiciones de muy poca iluminación.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Retina>

PDI – Color: La retina humana

Los conos se clasifican según la longitud de onda de la radiación que captan en: bajos (**S**), medios (**M**) y altos (**L**).

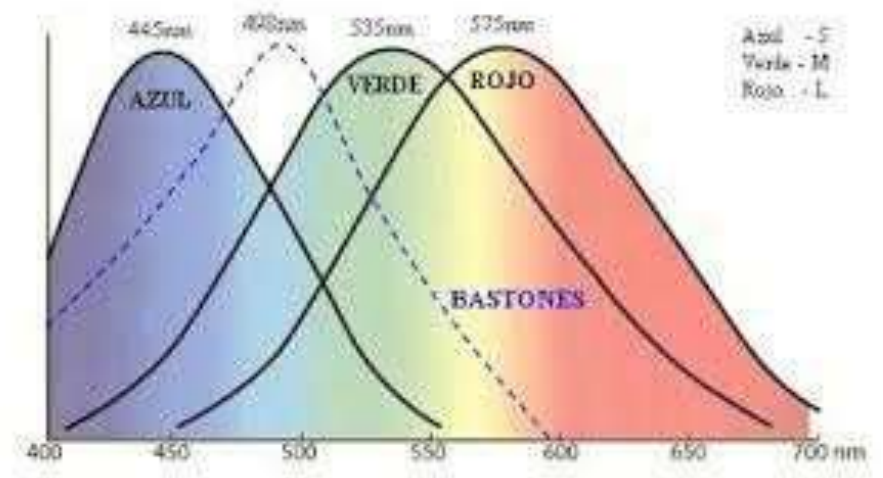
Absorción espectral de los conos (S,M,L) y los bastones (R)



- El **grado de excitación** de un receptor (cono o bastón) sería una suma, para cada frecuencia, del producto de la absorción por la intensidad de luz entrante.

PDI – Color: Los receptores retinianos

La figura muestra en forma muy idealizada las curvas de sensibilidad de cada tipo de cono (visión fotópica, ubicados mayormente en la fovea), así como la de los bastones (visión escotópica, ubicados en forma uniforme en toda la retina).

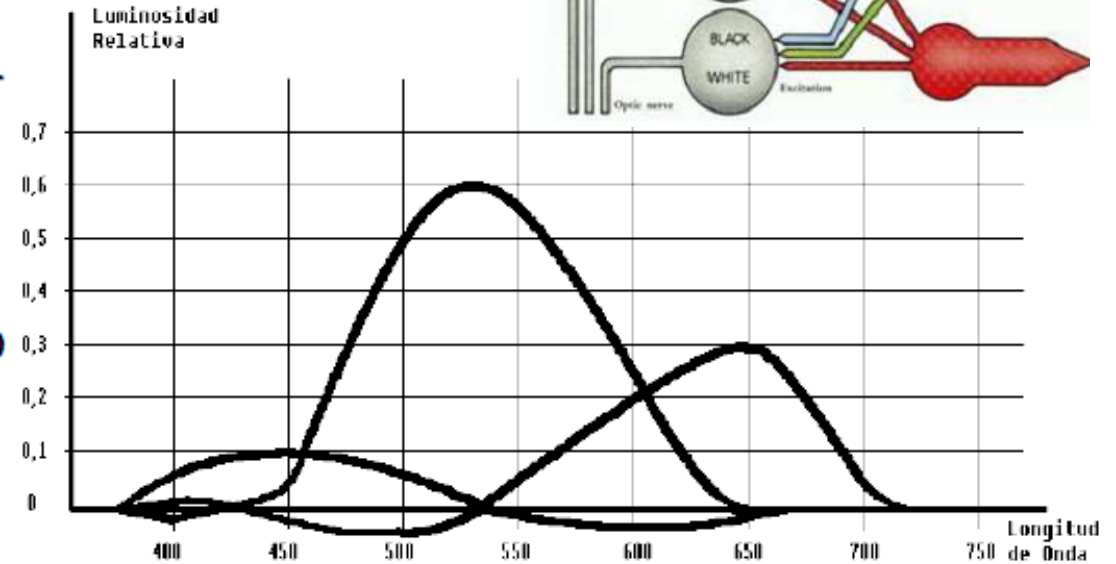


https://es.wikipedia.org/wiki/Percepción_del_color

PDI – Color: Los receptores retinianos

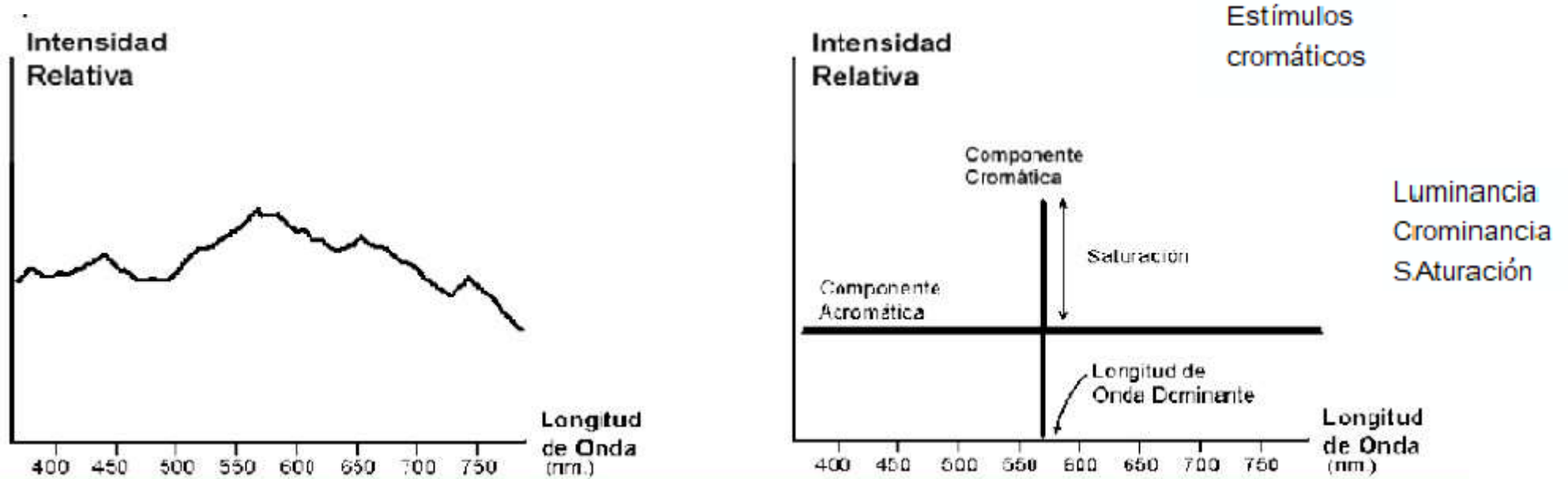
La sensibilidad absoluta es mucho mayor en el verde, mediana en el “rojo”, y muy baja en el azul.

En algunas longitudes de onda, cada uno de los receptores generan un estímulo inhibitor en vez de excitador.



PDI – Color: Metamerismo

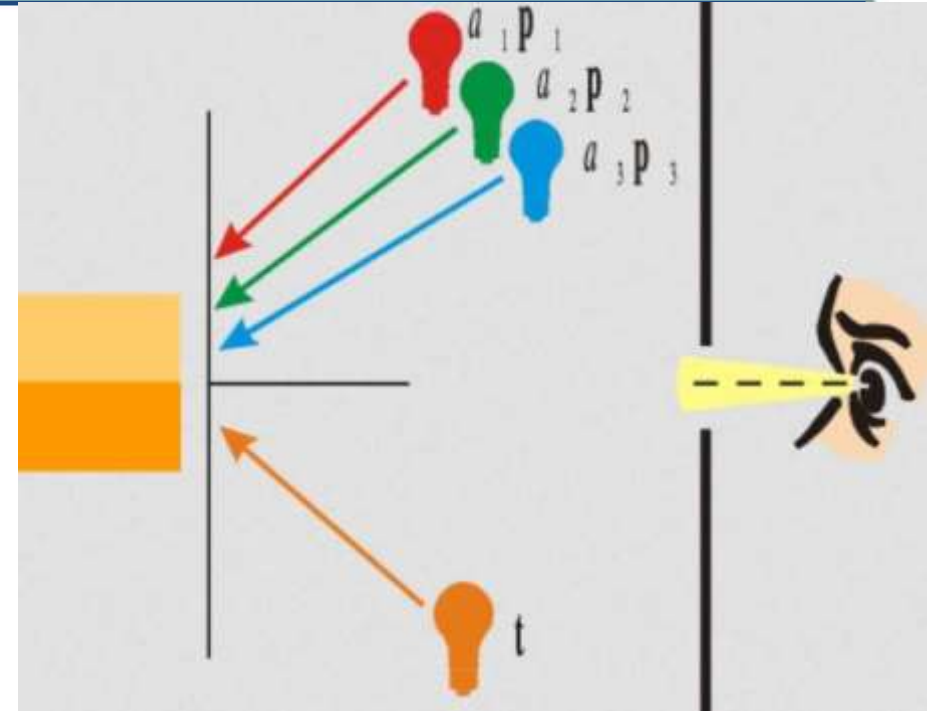
La percepción del color parece organizarse alrededor de una abstracción conocida como equivalente metamérico:



PDI – Color: Metamerismo

De esa forma, es posible engañar al ojo humano, haciéndole creer que percibe un color que en realidad no existe, simplemente generando un estímulo que produzca la percepción deseada en la retina.

Como el color depende también del iluminante, una situación común es que dos objetos parezcan del mismo color bajo un iluminante (p. ej., luz fluorescente), pero diferente bajo otro iluminante.



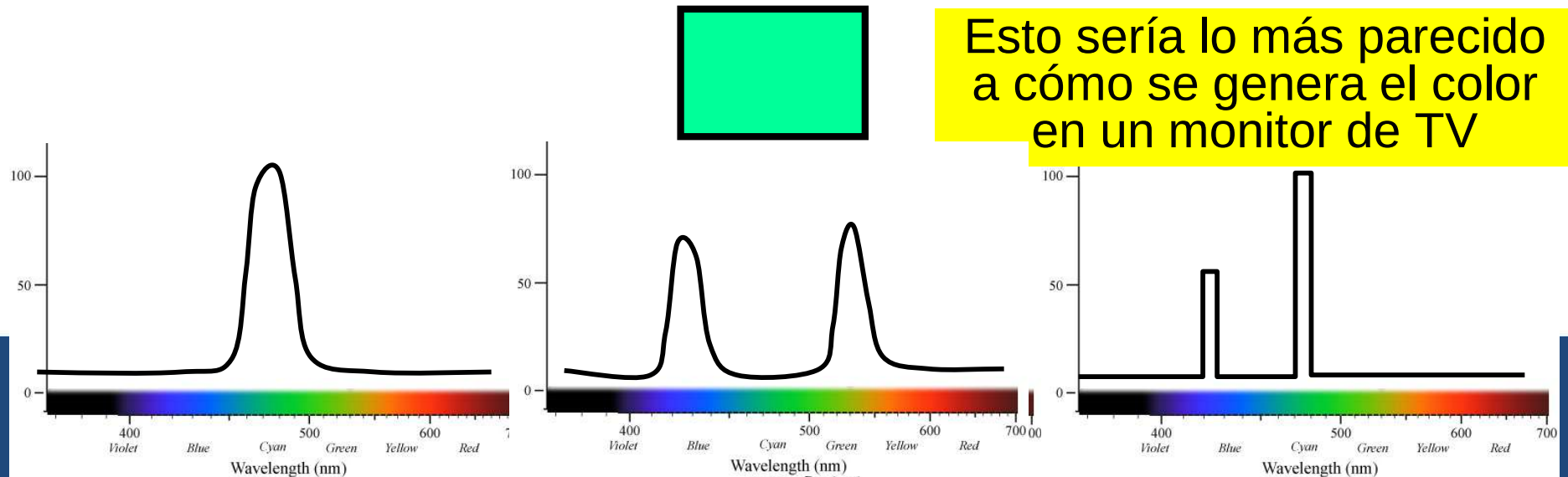
PDI – Color

Los **conos M** y **L** están muy correlacionados entre sí. Los **M** son más próximos al **verde**, y los **L** al **rojo**.

Los **conos S** responden principalmente al **azul**. Existen muchos menos. Pero el cerebro se encarga de compensarlo.

Así que el ojo humano es capaz de detectar menos colores que combinaciones espectrales existen.

Ejemplo. Todos estos espectros de luz son percibidos como si fueran el mismo color.

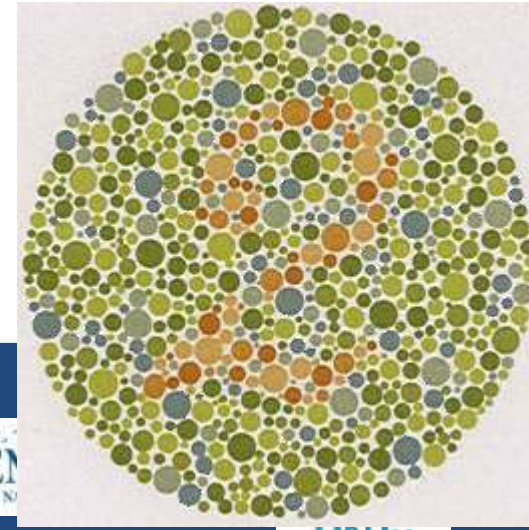
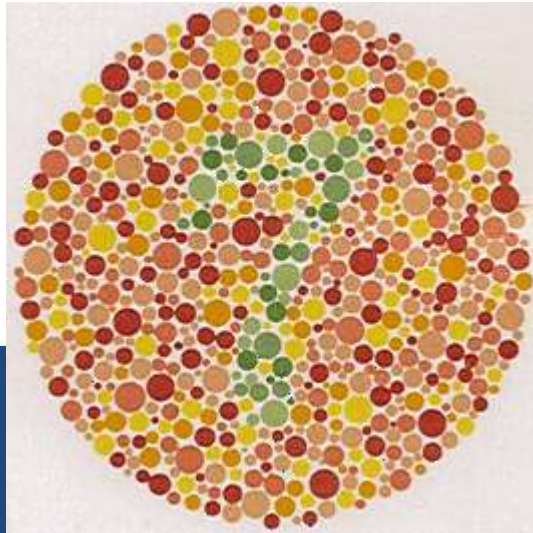


PDI – Color

Formalmente, se puede decir que un **color** es la **variedad de espectros** (en principio, infinita) que dan lugar a la misma excitación de los conos y bastones del ojo humano.

- El color es fruto de una **sensación humana**, no de la naturaleza intrínseca de la luz.
- Un modelo de color completo debería tener por lo menos **tres dimensiones**.

... un ojo humano medio, porque hay ojos y ojos...

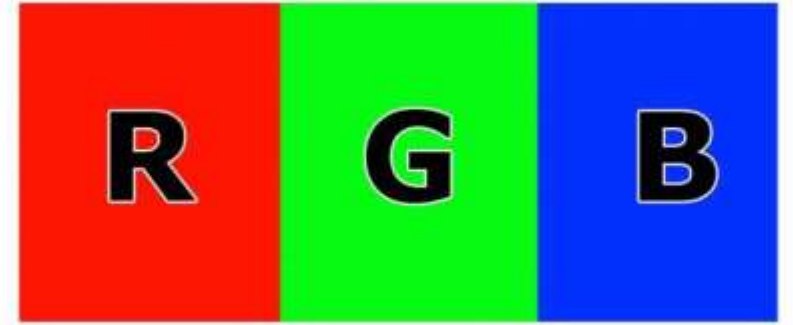


PDI – Color: Metamerismo

El metamerismo explica por qué es posible un espacio cromático como el RGB, en el cual colores como el amarillo o el cyan no existen, pero el ojo humano los percibe igualmente.

Sin embargo, el espacio RGB no permite reproducir a la perfección TODOS los colores visibles por el ser humano.

Esto se debe a que en algunas longitudes de onda los receptores producen estímulos inhibidores, lo cual no puede ser físicamente reproducido.

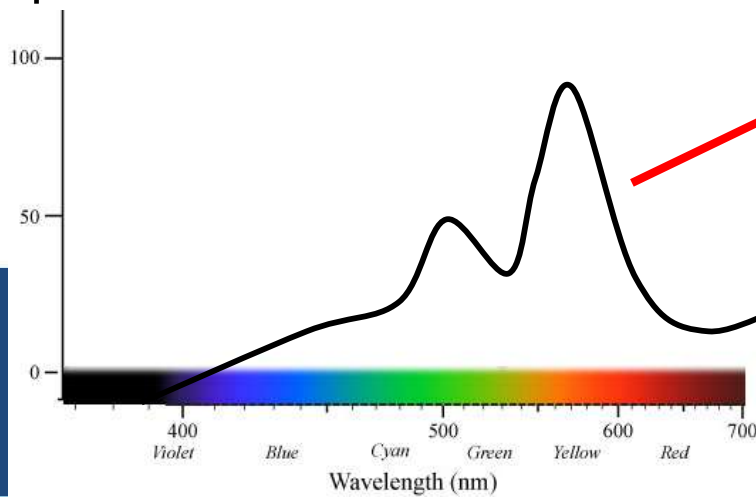


PDI – Modelos y espacios de color

Definición: un **modelo de color** es un modelo matemático abstracto, que describe la forma en que se representan los colores mediante tuplas de números (normalmente 3 ó 4).

El **conjunto de colores** posibles que surgen de estas tuplas es conocido como el **espacio de color**.

El **modelo matemático** diría: dado un espectro de luz, ¿cómo se obtiene la tupla de color correspondiente?



Ejemplo, en el modelo **RGB** esto es: (14, 26, 17)

En el modelo **Pepito** es: (29, 14, 73)

PDI – Modelos y espacios de color

El estudio de los modelos de color es importante, porque el modelo condiciona cómo se **captura, almacena, procesa, transmite y genera** el color.

Existen muchos modelos de color. Algunos son mejores para ciertas aplicaciones. **No todos son completos.**

- RGB es el que más se ajusta al modo de captura (filtros de color) y de generación (píxeles del monitor) en imagen digital.
- CMYK se relaciona con la generación de color en impresoras.
- YIQ y YUV separan crominancia (color) y luminancia (brillo).
- XYZ está relacionado con la sensación humana de color.

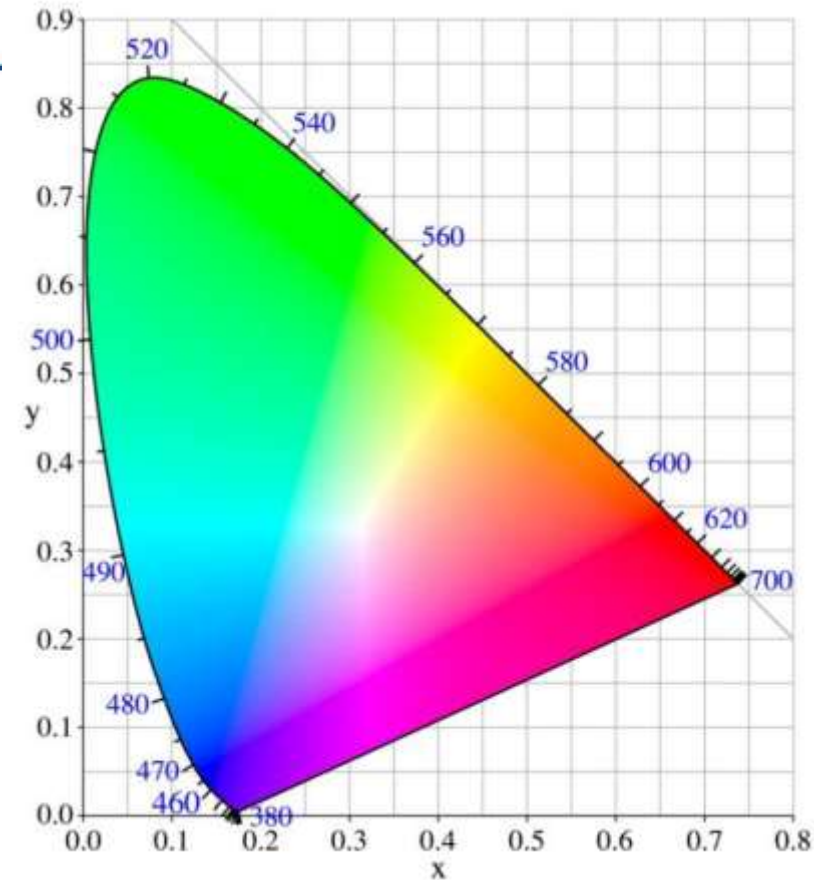


PDI – Color: el espacio XYZ

Los colores perceptibles por el ser humano se pueden representar con un espacio cromático que tiene en cuenta la sensibilidad (positiva y negativa) de los receptores retinianos.

Este espacio cromático se denomina XYZ, y da origen al diagrama de cromaticidades llamado diagrama CIE.

https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_color_CIE_1931

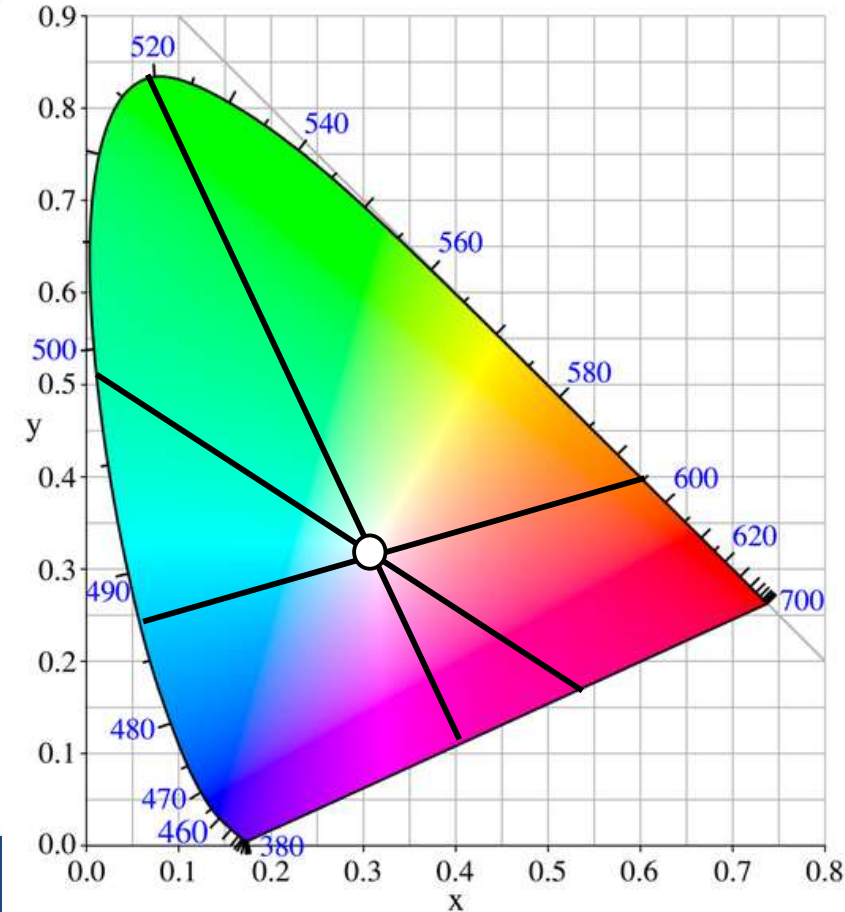


PDI – Color: el espacio CIE XYZ

Propiedades del diagrama cromático:

- La curva exterior son los **colores espectrales**. El resto son colores **no espectrales** (o colores compuestos).
- La **suma** de dos colores se encuentra en la línea que los une.
- El **blanco** se encuentra en $x = 1/3$, $y = 1/3$. La línea que une dos colores **complementarios** pasa por ese punto.
- El diagrama es **completo**, contiene todos los colores visibles por los humanos.

Diagrama cromático CIE



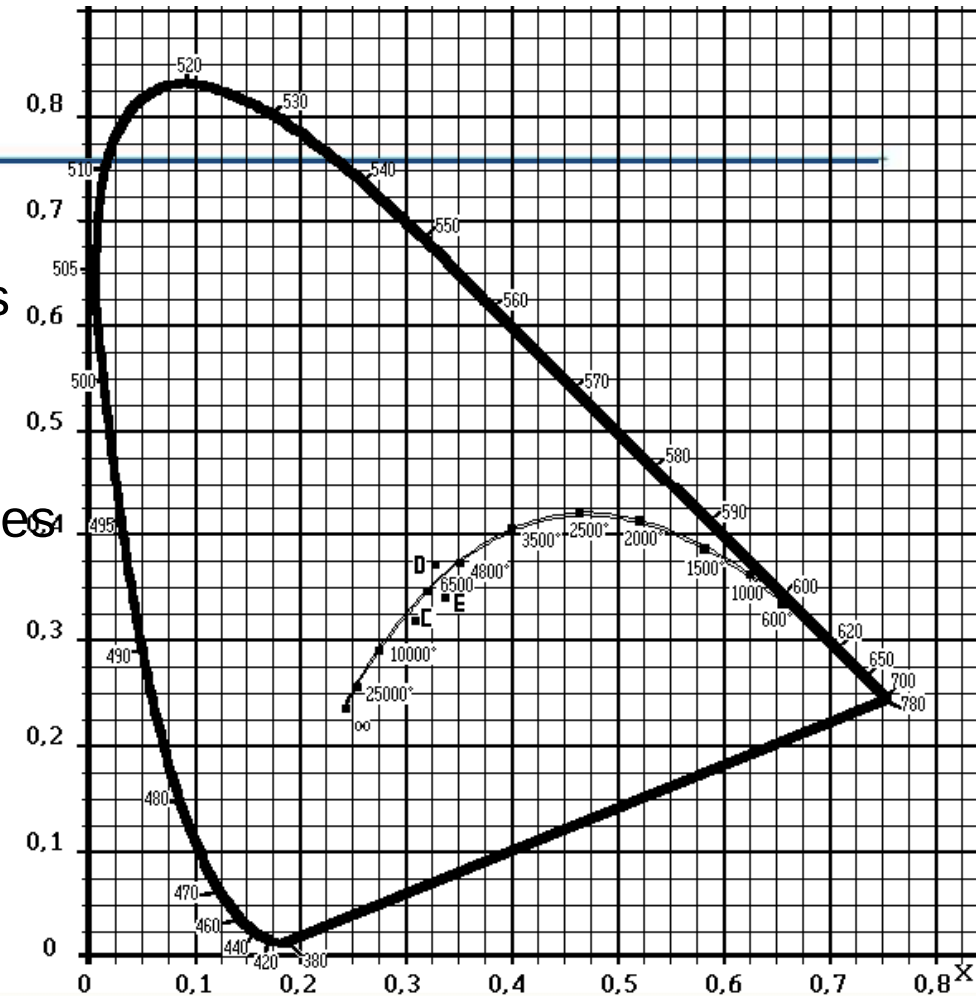
PDI – Color: el espacio XYZ

Una “cartografía” del diagrama XYZ muestra varios aspectos reveladores:

La parte coloreada muestra todas las cromaticidades físicamente realizables.

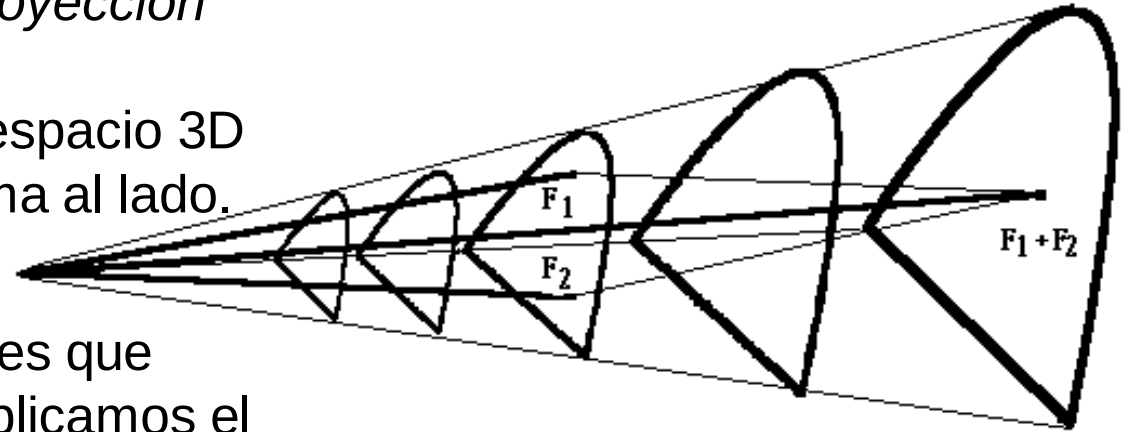
La parte curva de la frontera corresponde a los estímulos espectrales puros.

La curva de la radiación del cuerpo negro.



PDI – Color: el espacio XYZ

En realidad el diagrama anterior es una *proyección* del espacio XYZ 3D a un plano arbitrario, denominado *plano de cromaticidades*. El espacio 3D completo se intenta graficar con el diagrama al lado.



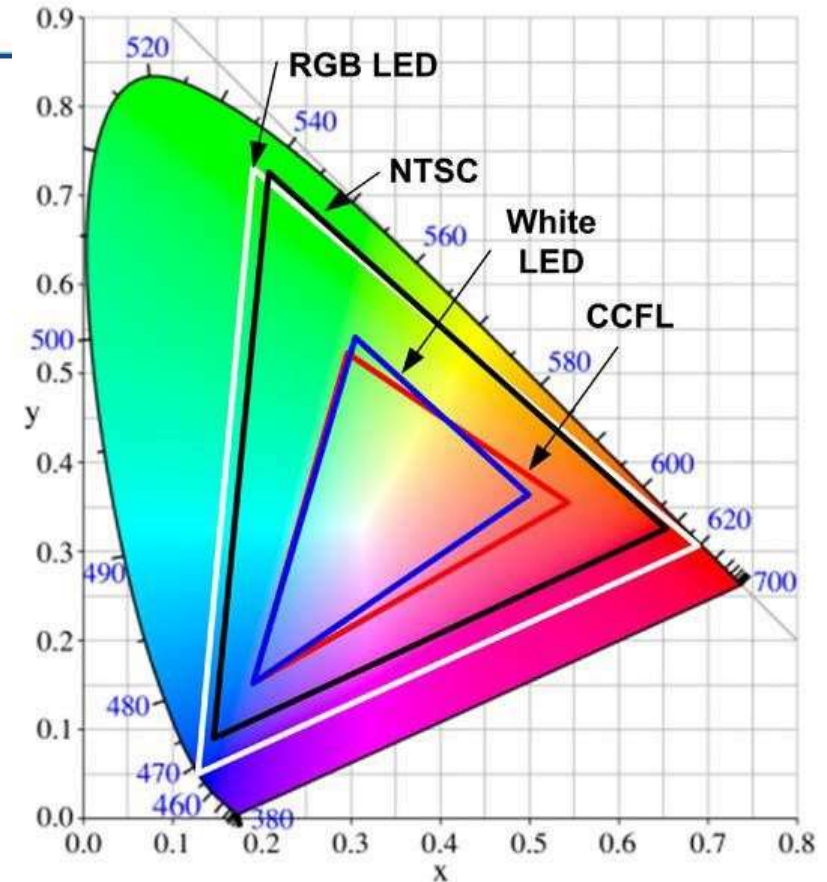
Un aspecto fundamental del espacio XYZ es que permite separar la cromaticidad (ahora explicamos el concepto) de la intensidad luminosa o *luminancia*, lo cual explica por qué cuando subimos o bajamos el *brillo* de monitor o TV, la apariencia de los colores no cambia.

PDI – Color: el espacio XYZ

En el diagrama anterior se intenta ilustrar (con dudoso éxito, que un plano a luminancia constante intersecta el paralelogramo en una línea recta.

Por lo tanto la cromaticidad de la suma de dos estímulos es una combinación convexa de las cromaticidades de cada uno de ellos.

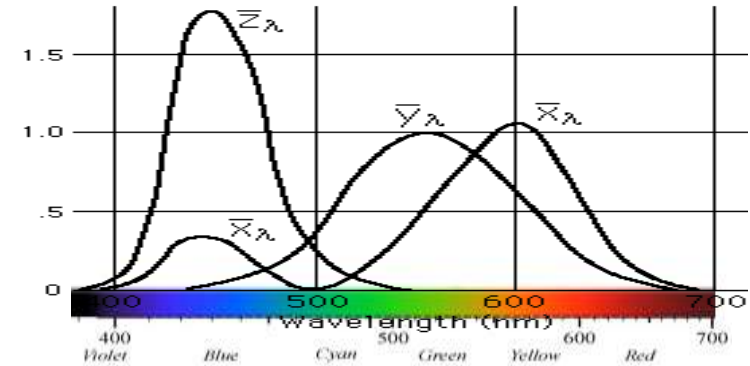
El concepto puede extenderse a TRES puntos y sus combinaciones convexas, dando por resultado la GAMA CROMÁTICA (color gamut).



PDI – Color: el espacio XYZ

Ejemplo. Descomposición en canales XYZ de una imagen.

Imagen
de
entrada



PDI – Color: el modelo RGB

Los modelos anteriores son poco prácticos en aplicaciones como adquisición y generación de color en TV, impresoras...

Se usa más el **RGB**, basado en un **modelo aditivo de mezcla**, con 3 **colores primarios**: **R-rojo, G-verde, B-azul**.

La combinación aditiva de estos colores primarios produce todo el rango de colores representables en RGB.

(R,G,B)	Long. de onda	Frecuencia
(255,0,0)	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
(255,128,0)	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
(255,255,0)	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
(0,255,0)	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz
(0,255,255)	~ 485-500 nm	~ 620-600 THz
(0,0,255)	~ 440-485 nm	~ 680-620 THz
(0,139,255)	~ 380-440 nm	~ 790-680 THz

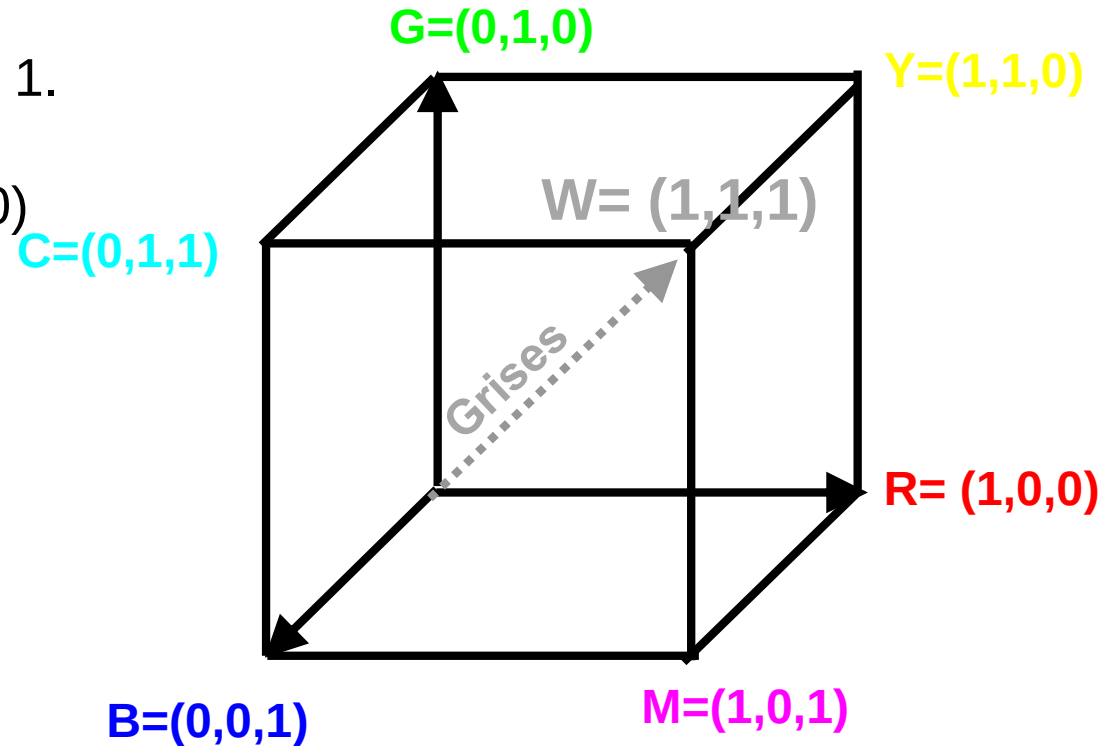


PDI – Color: el espacio RGB

El **espacio RGB** tiene forma de **cubo** de lado 1.

El punto $(R=0, G=0, B=0)$ es el **negro**, y el $(R=1, G=1, B=1)$ es el **blanco**.

Surgen tres **colores secundarios**: cian, magenta y amarillo.



Recorriendo las aristas exteriores del cubo sale algo "parecido" a un espectro

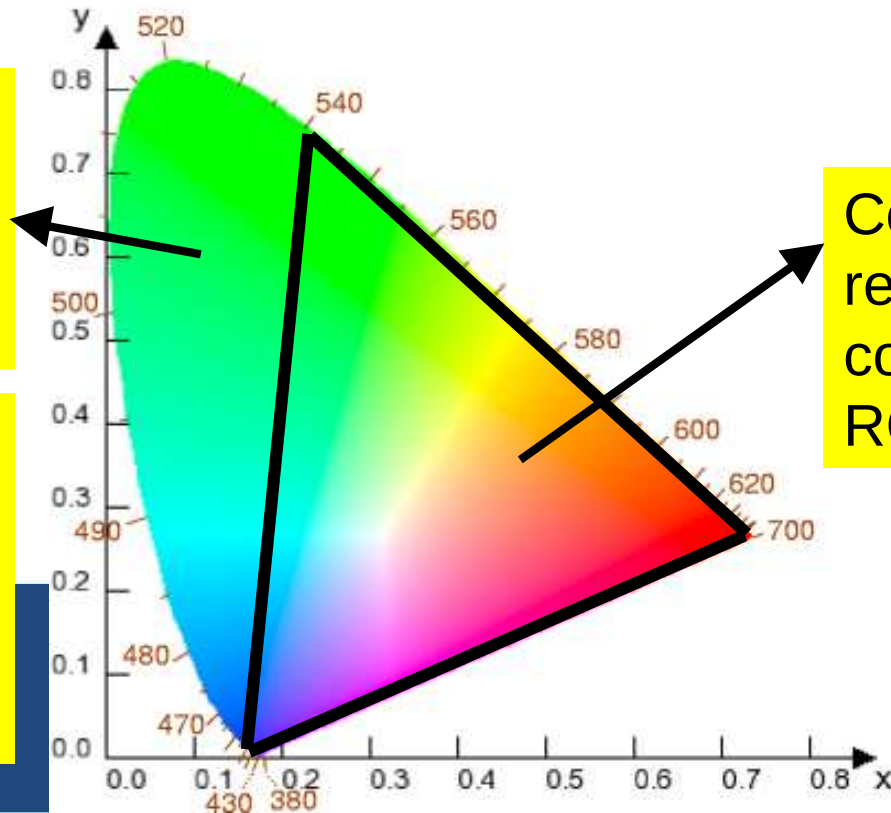
PDI – Color: el espacio RGB

El espacio RGB es el más utilizado en la práctica.

Pero **no es completo**: existen colores que no se pueden obtener con la combinación de R, G y B. Se puede comprobar en el diagrama cromático CIE.

Colores visibles por los humanos pero no representables en el modelo RGB

De hecho no podrías verlos aquí, porque estas transparencias usan el modelo RGB...



Colores representables con el modelo RGB

PDI – Color: el espacio RGB

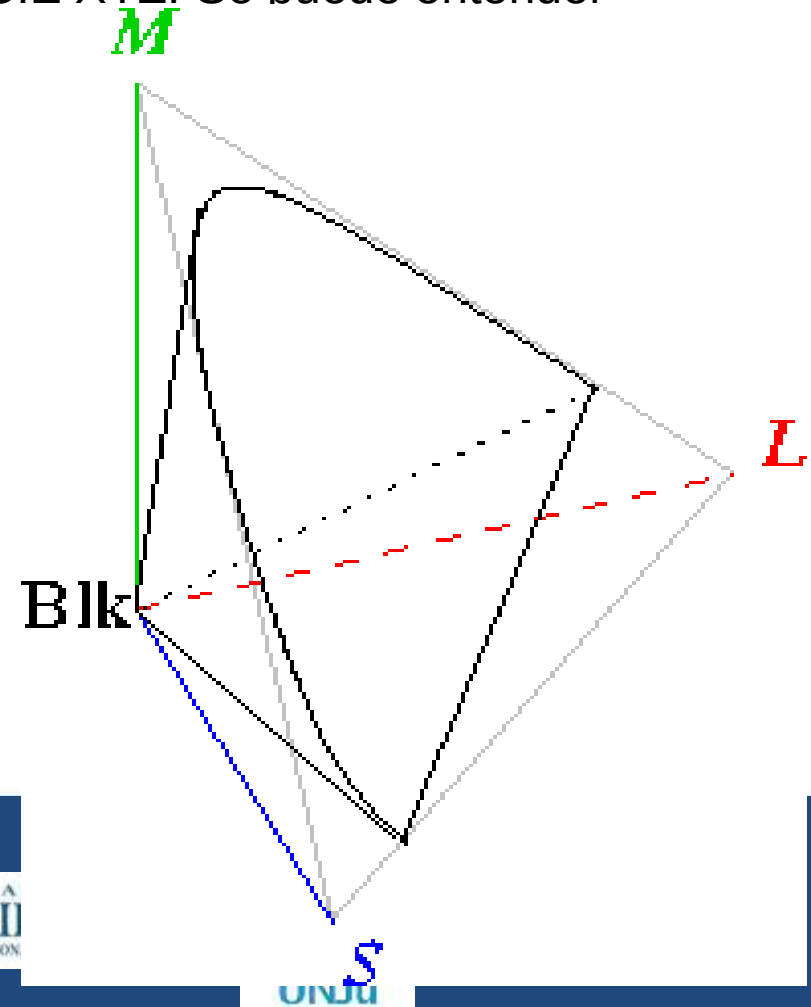
El espacio RGB se relaciona de manera **lineal** con el CIE XYZ. Se puede entender como una rotación del espacio XYZ.

Transformación **XYZ a RGB**:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,24 & -1,5 & -0,5 \\ -0,9 & 1,88 & 0,04 \\ 0,06 & -0,2 & 1,05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

• Transformación **RGB a XYZ**:

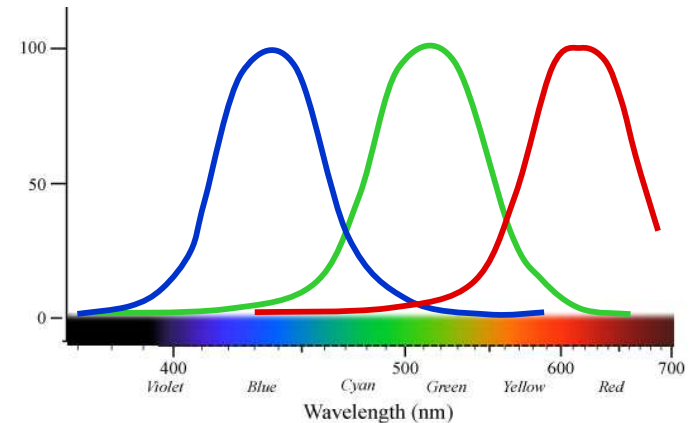
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,41 & 0,36 & 0,18 \\ 0,21 & 0,72 & 0,07 \\ 0,02 & 0,12 & 0,95 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



PDI – Color: el espacio RGB

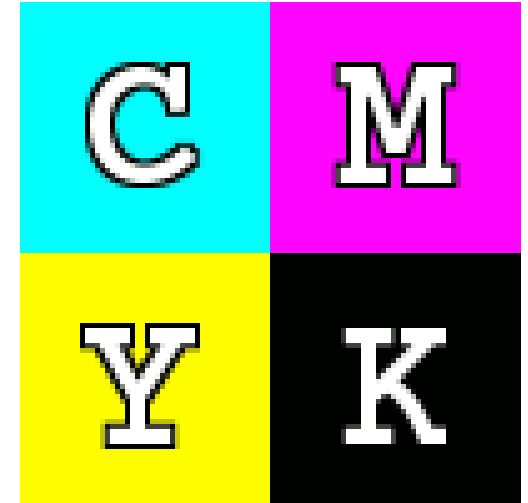
Ejemplo. Descomposición en canales RGB de una imagen.

Imagen
de
entrada



PDI – Color: el espacio CMY

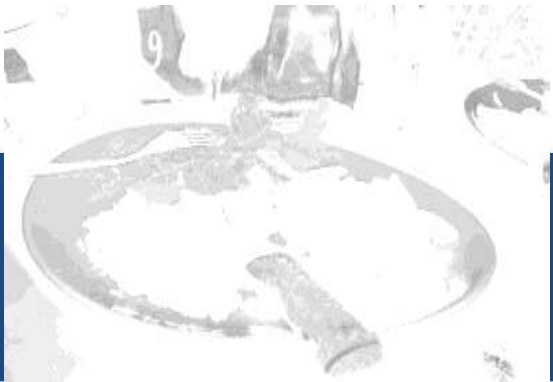
- En ciertas aplicaciones, como por ejemplo **impresión de imágenes**, se utiliza más el modelo **CMY** (o **CMYK**).
- **CMY** está basado en un **modelo sustractivo de mezcla**, con 3 **colores primarios**: **C**-cian, **M**-magenta, **Y**-amarillo.
- La combinación sustractiva (**tintas de color**) de estos colores primarios produce todo el rango de colores representables en CMY.
- En la práctica, la mezcla de **C**, **M** e **Y** no llega a producir **negro**, sino una especie de **gris marengo**.
- El modelo **CMYK** soluciona el problema, añadiendo el **negro** como color primario.



PDI – Color: el espacio CMYK

Ejemplo. Descomposición en canales CMYK de la imagen.

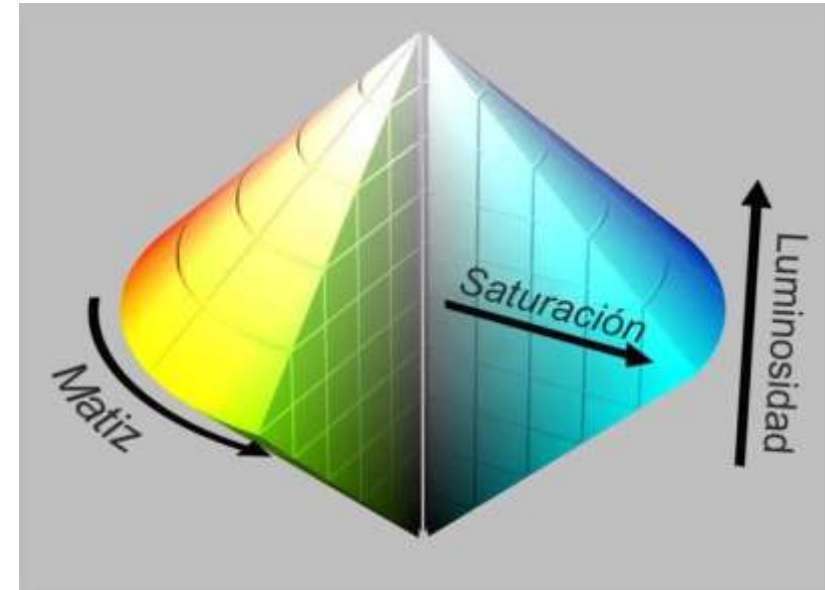
Imagen
de
entrada



PDI – Color: espacio HLS

Lo que recién denominamos “apariencia que no cambia” de un color cuando se cambia su brillo (*luminancia*) es precisamente la cromaticidad, la cual engloba dos características de la apariencia del color: la pureza (*saturación*) y el “color propiamente dicho” (*crominancia*).

Estas tres características del color (crominancia, luminancia, saturación), da origen a OTRO! espacio cromático, el HSL. Ver que el nombre de la crominancia en este espacio es *Hue*, lo cual es traducido como “matiz” (??).

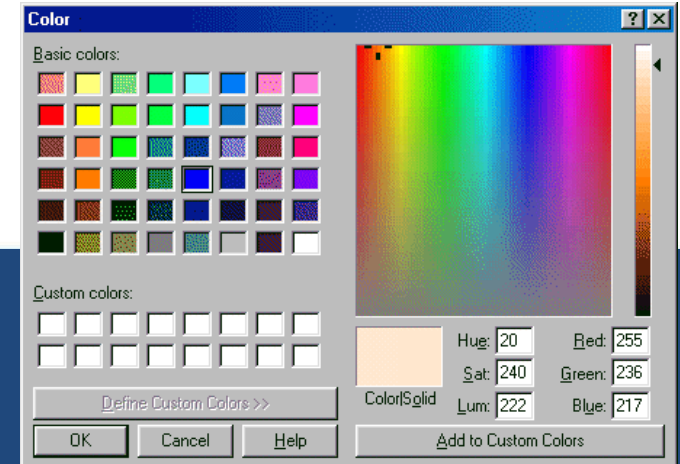


PDI – Color: espacio HLS

El espacio HLS y sus variantes son los más prácticos en el diseño gráfico y artes visuales, por lo que está “naturalizado” en muchos sistemas (vemos acá por ejemplo el de Rudolf Arnheim).

Asimismo en interfases gráficas se utilizan representaciones al estilo del espacio HLS (es interesante saber cuántos grados tiene el círculo en Microsoft!!).

Otros programas, como el Photoshop muestran cartillas más adecuadas para los diseñadores gráficos.



PDI – Color: espacio HLS



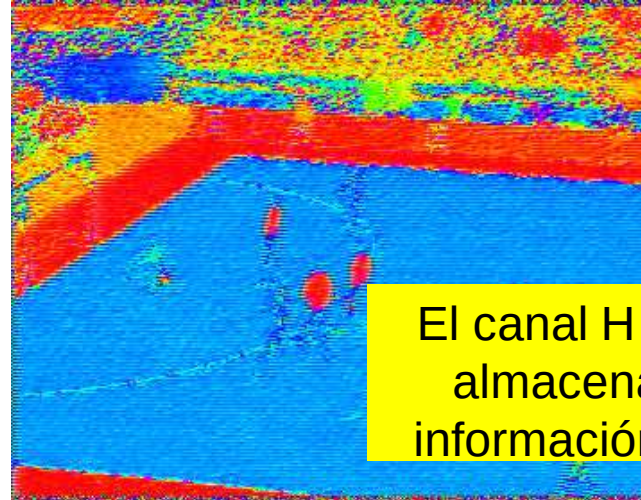
Canal H



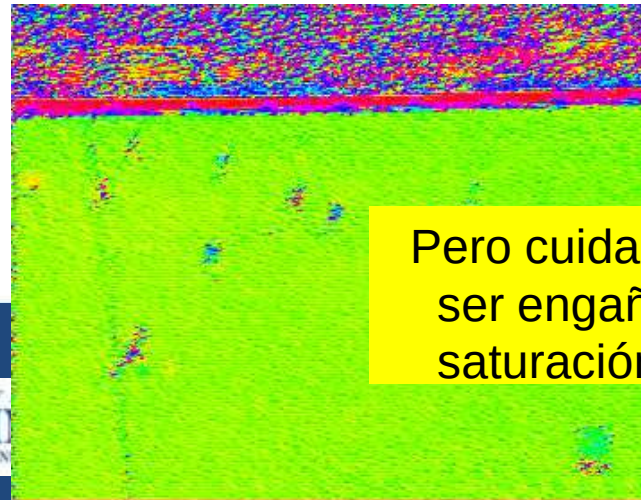
Canales de S y L de HLS



PDI – Color: espacio HLS



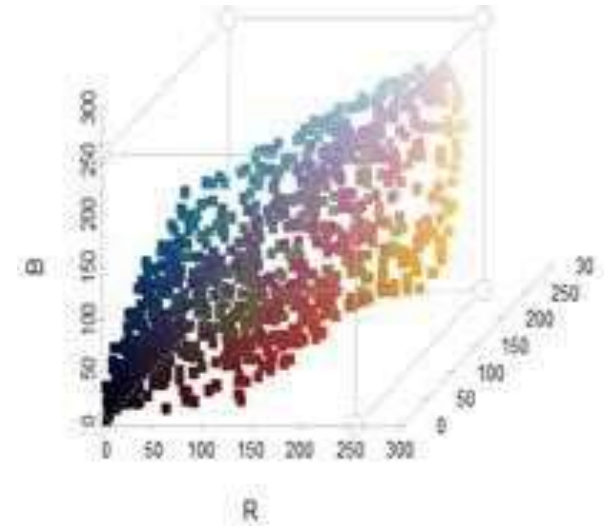
El canal H es el que almacena mayor información de color



Pero cuidado, puede ser engañoso si la saturación es baja

PDI – Color: el espacio YIQ

Cuál espacio cromático entonces es adecuado para el procesamiento de imágenes? Un punto a tener en cuenta es que si se analiza un gran conjunto de imágenes y se observa cómo se distribuyen los colores de sus pixels en el espacio RGB, se observa una gran correlación mútua (altos R correlacionan con altos G y B, y viceversa).



Por eso se estudió la distribución de la variancia de los colores de los pixels, encontrándose una representación que elimina la correlación. Nace así el espacio cromático con el cual vamos a trabajar en la materia.

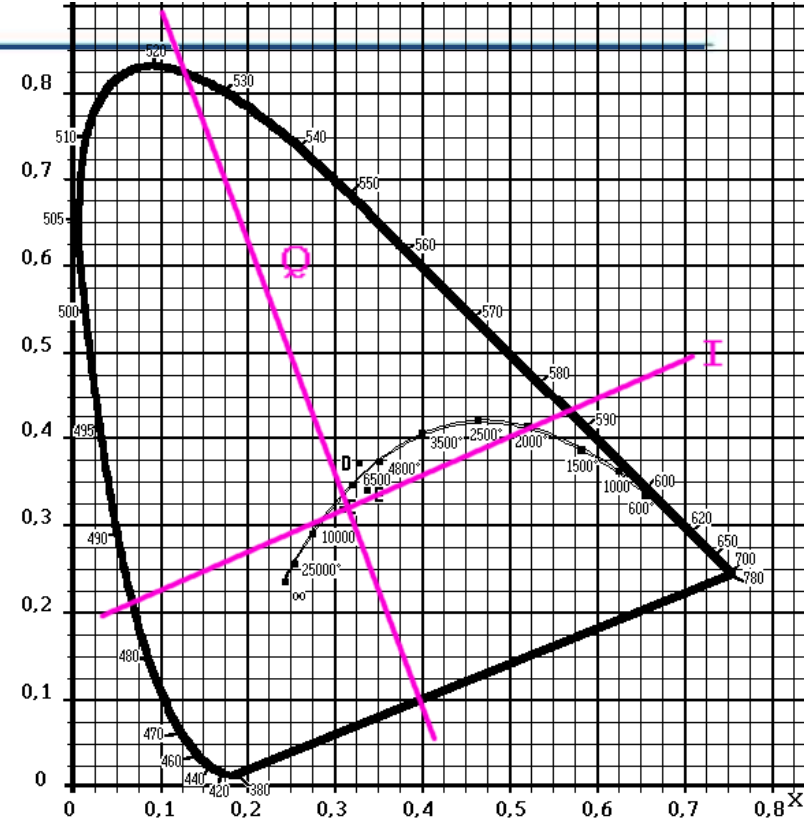
PDI – Color: el espacio YIQ

Los tres ejes de este nuevo espacio se denominan YIQ. Y coincide con el eje de luminancia del espacio XYZ. I y Q están como se muestra en el diagrama.

La importancia de la información perceptual que transmite cada uno de esos valores es aproximadamente 80% Y, 15% I, y 5% Q.

Tampoco es un detalle menor que estos ejes coinciden con los canales oponentes que veremos.

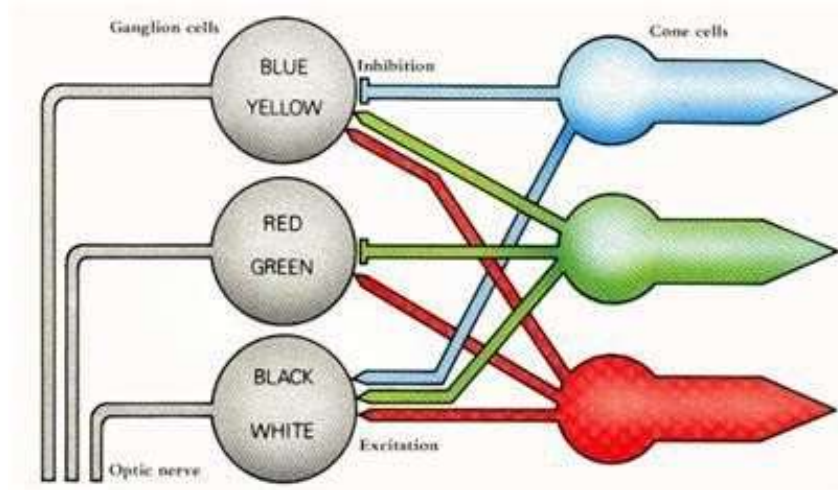
<https://es.wikipedia.org/wiki/YIQ>



PDI – Color: canales oponentes

Las células nerviosas ganglionares mostradas en la figura de la retina se combinan los estímulos de cada cono como se muestra en esta figura.

La suma de los tres conos produce el canal blanco-negro, el cono “rojo” menos el verde produce el canal rojo-verde, y el “rojo” más verde menos azul produce el canal amarillo-azul. Estos canales son denominados “canales oponentes”.



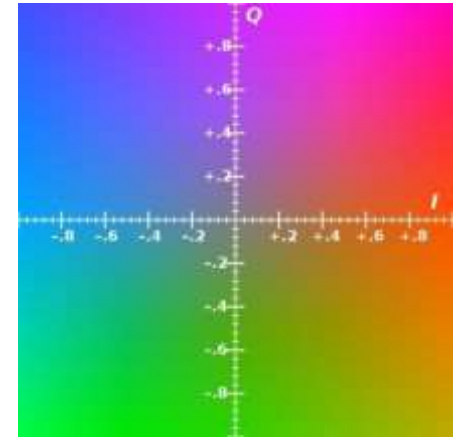
https://en.wikipedia.org/wiki/Opponent_process

PDI – Color: el espacio YIQ

La representación en el espacio YIQ es práctica dado que separa la luminancia (Y) de la cromaticidad. Esta última queda representada como se muestra en el diagrama. Afortunadamente la transformación entre el espacio RGB y el YIQ se basa en un sencillo sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9663 & 0.6210 \\ 1 & -0.2721 & -0.6474 \\ 1 & -1.1070 & 1.7046 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.595716 & -0.274453 & -0.321263 \\ 0.211456 & -0.522591 & 0.311135 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

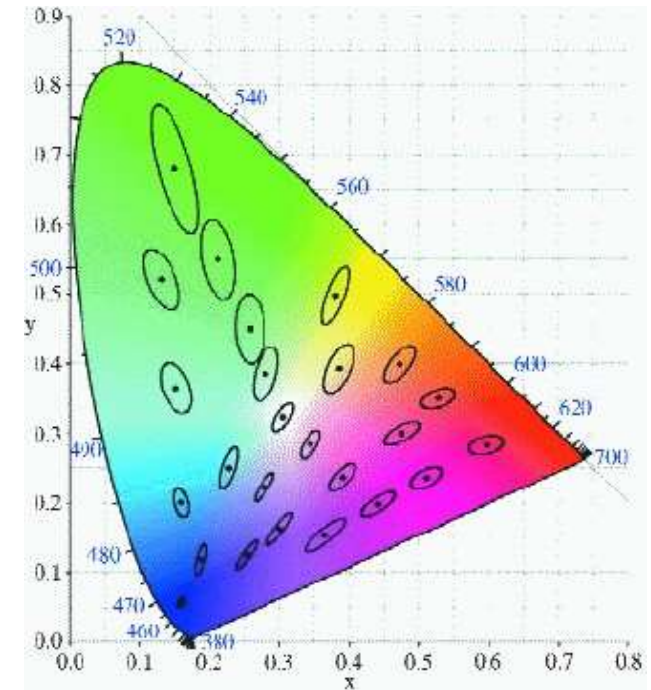


Al utilizar estas ecuaciones, tener en cuenta que los valores de RGB deben estar normalizados (en $[0, 1]$).
Ver la primera fila de la 2da. matriz.

PDI – Color: el espacio YIQ

Si bien el espacio YIQ separa la luminancia de la cromaticidad en ejes ortogonales, la distancia métrica entre dos estímulos distintos puede ser muy diferente a la distancia perceptual.

El diagrama a la derecha ilustra las “elipses de McAdams” que contienen los estímulos cromáticos a iguales distancias perceptuales de sus centros.



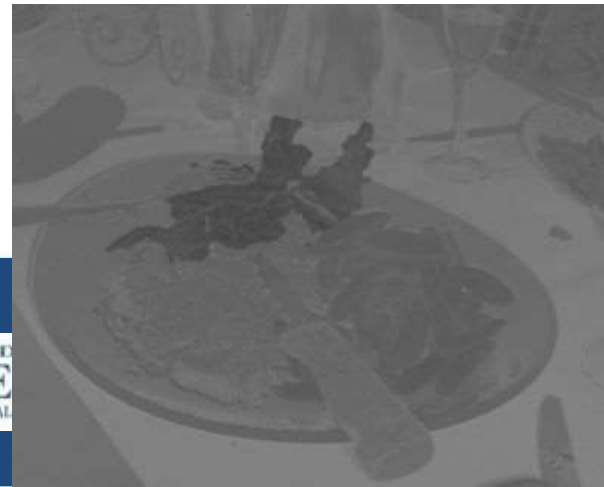
PDI – Color: el espacio YIQ



Canales de I

Canal Y

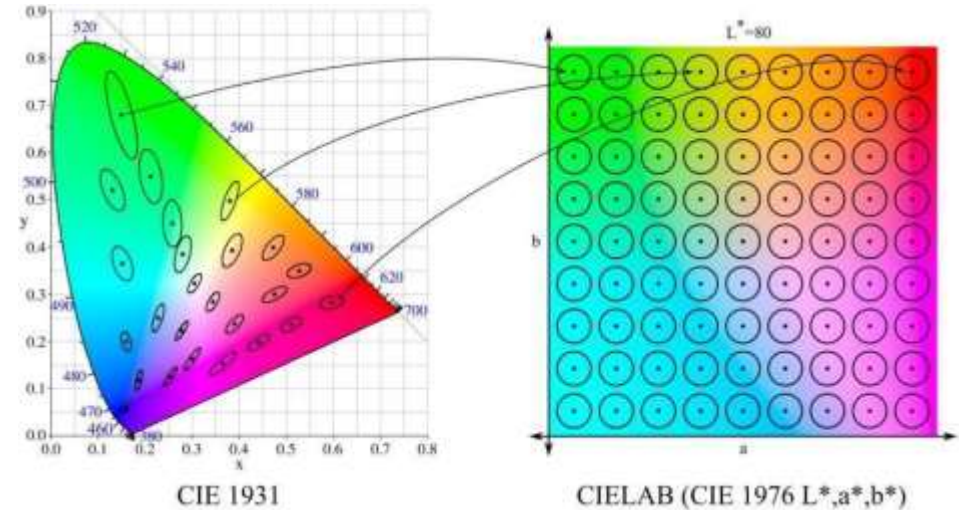
Q



PDI – Color: Más espacios cromáticos

Para mitigar la dificultad antedicha, se han propuesto espacios cromáticos que intentan uniformar la distancia métrica con la perceptual, entre ellos el más utilizado es el $L^*a^*b^*$ (CIE 1976). Otros “primos” de este espacio son: Lab, Luv, $L^*u^*v^*$.

Para streaming de video se utiliza YCrCb (norma MPEG2).



$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.183 & 0.614 & 0.062 \\ -0.101 & -0.339 & 0.439 \\ 0.439 & -0.399 & -0.040 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Ranges:
R/G/B [0 ... 255]
Y [16 ... 235]
Cb/Cr [16 ... 240]

RGB to YCbCr color conversion for HDTV

PDI – Color: Otros modelos de color

Existen **otros muchos modelos de color**, algunos de ellos creados para aplicaciones específicas: YIQ, YUV, YCrCb, YCC, CIE Lab, CIE LUV, y otros muchos.

Por ejemplo, **YIQ** y **YUV** se crearon para transmisión de vídeo (TV analógica); **YIQ** en el estándar americano (**NTSC**), y **YUV** en el europeo (**PAL**). **YUV** se puede ver como una rotación del **YIQ** en 33°.

La mayoría de estos espacios se basan en **separar** por un lado el canal de **luminosidad** o **brillo**, **Y**, y por otro dos canales de **color** o **crominancia**.

El ojo humano es mucho más sensible al brillo que al color, por lo que **Y** es más prioritario (necesita más resolución).



PDI – Color: Actividad práctica

La propuesta para esta actividad consiste en manipular independientemente la luminancia y la saturación de una imagen.

Para ello convertimos cada pixel de la imagen del espacio RGB al espacio YIQ, luego alteramos los valores de Y (para cambiar la luminancia) o de IQ (para cambiar la saturación).

Con los nuevos valores de YIQ, convertimos a RGB nuevamente y obtenemos una nueva imagen.



PDI – Color: Actividad práctica

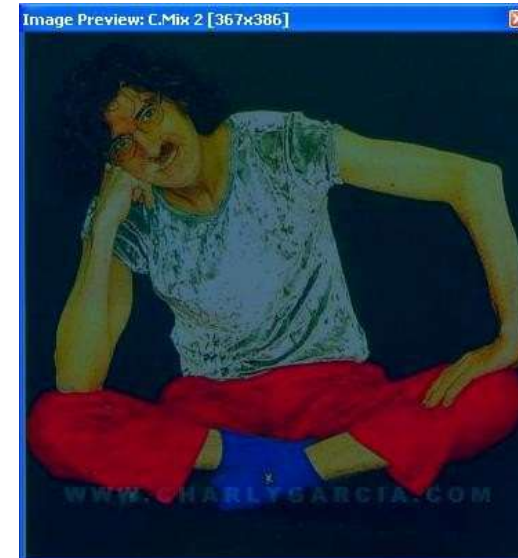
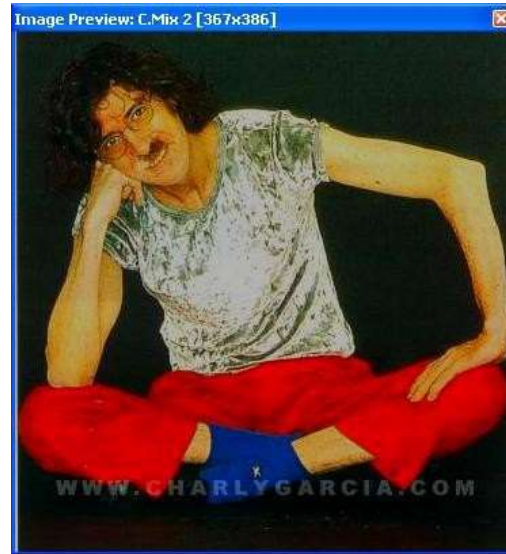
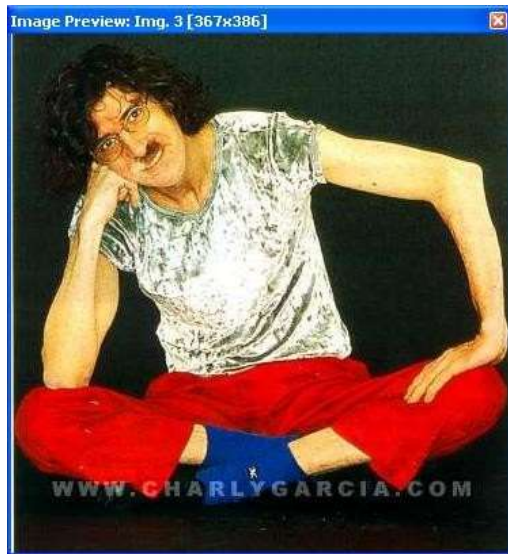
Podríamos llamar a al coeficiente de luminancia (si es menor que uno, baja la luminancia, y viceversa), y b al coeficiente de saturación (si es menor que uno baja la saturación, y viceversa). El workflow a implementar consiste en los siguientes pasos:

1. Normalizar los valores de RGB del pixel
2. RGB $\rightarrow$ YIQ (utilizando la segunda matriz)
3. $Y' := aY$;
4. $I' := bI$; $Q' := bQ$;
5. Chequear que $Y' \leq 1$ (para que no se vaya de rango)
6. Chequear $-0.5957 < I' < 0.5957$ y $-0.5226 < Q' < 0.5226$
7. $Y'I'Q' \rightarrow R'G'B'$ (el RGB normalizado del pixel procesado)
8. Convertir $R'G'B'$ a bytes y graficar el pixel



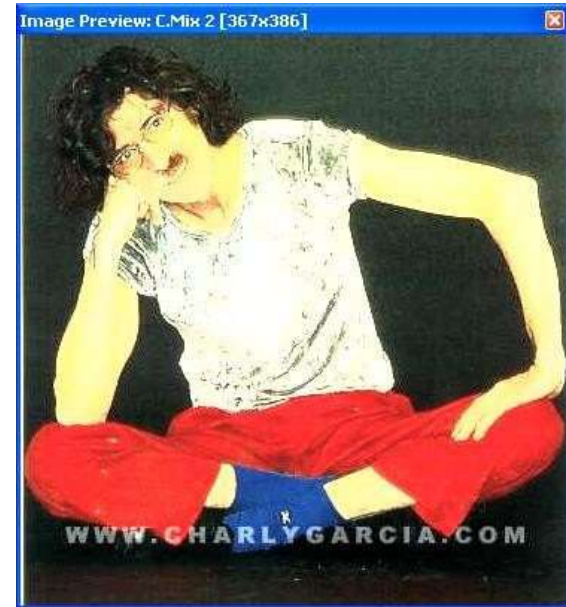
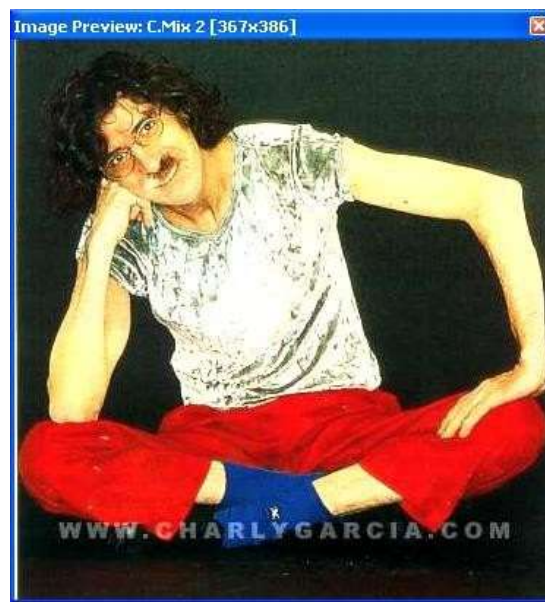
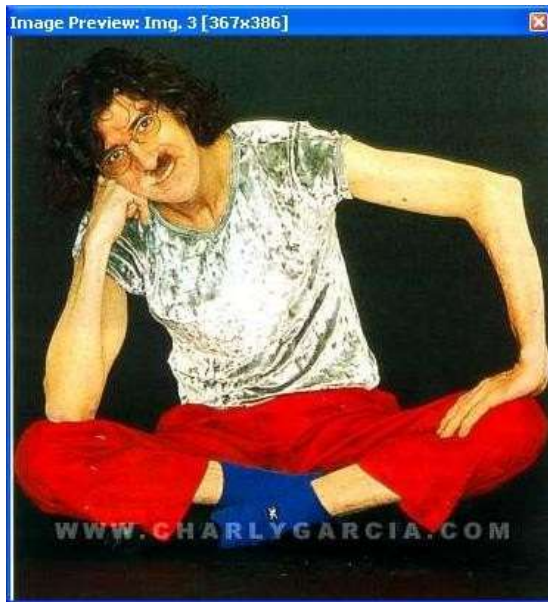
PDI – Color: Actividad práctica

Qué podemos esperar al cambiar a o b? Como dijimos, un valor de a menor que 1 reducirá la luminancia de la imagen. Vemos abajo la imagen original, y con a 0.7 y 0.4.



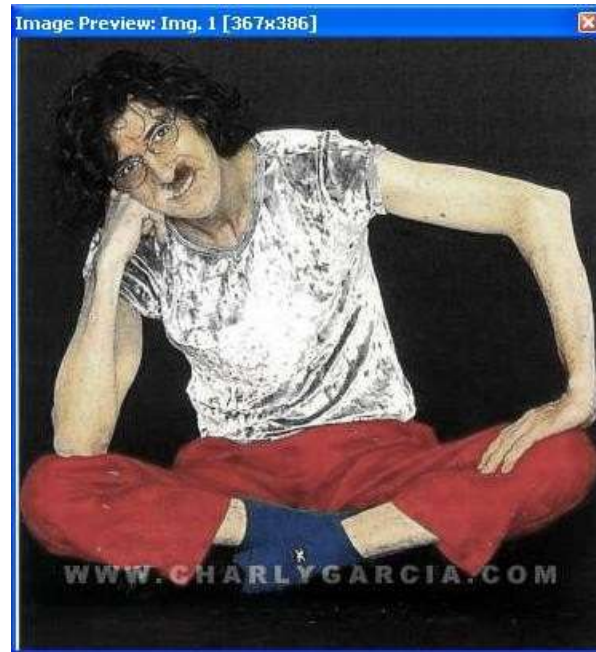
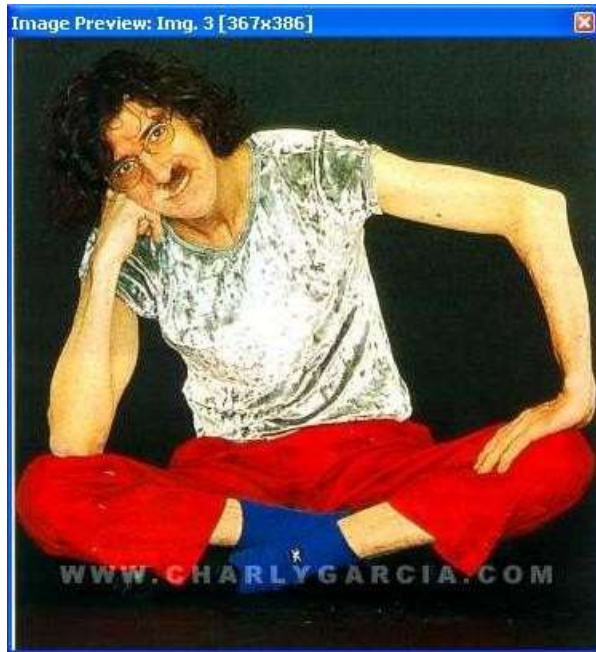
PDI – Color: Actividad práctica

Un valor de a mayor que 1 aumenta la luminancia de la imagen, pero no podemos pasar el valor $Y=1$, lo cual genera “artefactos”. Imagen original, y con a 1.2 y 1.5.



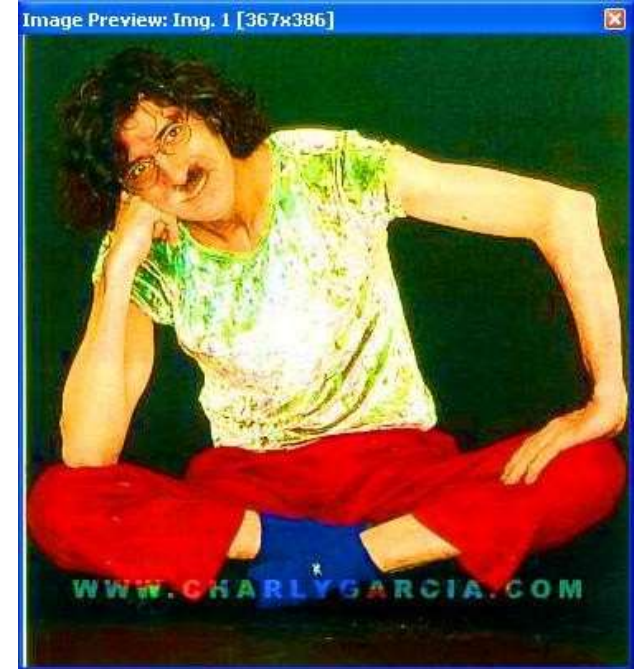
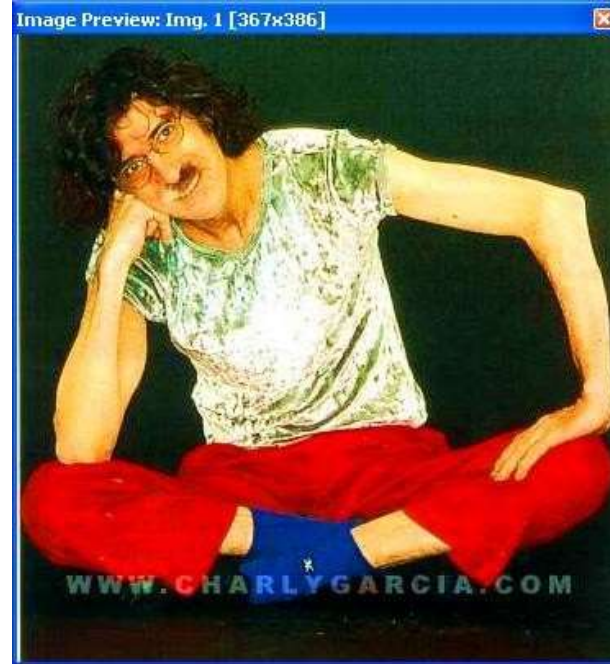
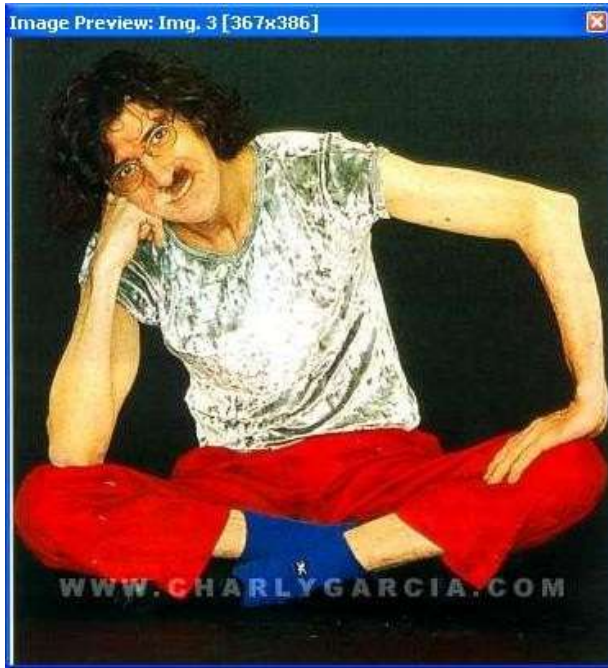
PDI – Color: Actividad práctica

Valores de b menores que 1 disminuyen la saturación (inclusive lleva la imagen a blanco y negro). Imagen original, y con b 0.5 y 0.



PDI – Color: Actividad práctica

Valores de b mayores que 1 aumentan la saturación. Imagen original, y con b 1.2 y 1.5.



PDI – Color: Actividad práctica

Los valores de a y b pueden combinarse. Qué valores creen que tienen estas imágenes (siempre la de la izquierda es la original)? Ver cómo la manipulación puede hacer notorios los artefactos de la compresión en la imagen original.

