



Color

Espacios de representación



Índice

1. **Introducción**
 - Color
 - Luz visible
 - Interacción con la materia
2. Sistema visual humano
3. Percepción del color
 - Teoría tricromática
 - Componentes opuestos
4. Representación del color



Introducción

- Color: qué es; cómo lo percibimos
- Luz visible
 - Espectro electromagnético
 - Definiciones básicas
- Interacción con la materia: reflexión, transmisión y refracción



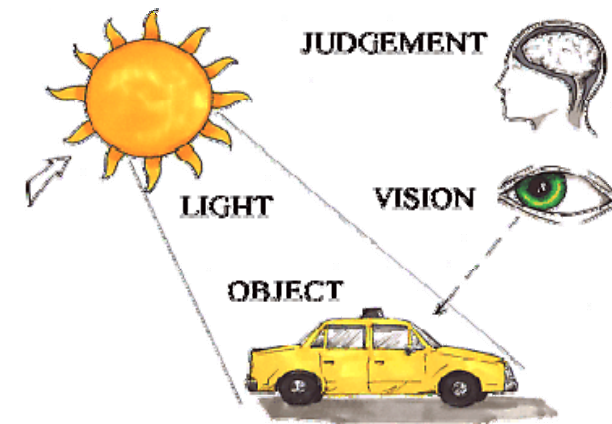
Qué es el color?

- Sensación producida por los rayos luminosos que impresionan los órganos visuales y que depende de la longitud de onda (RAE)
- Es el efecto visual causado por la composición espectral de la luz emitida, transmitida o reflejada por los objetos.
- Fenómeno por el cual percibimos visualmente alguna función del contenido espectral que emana de un objeto
- Es el resultado de la naturaleza del mundo físico, la respuesta fisiológica de la retina a la luz y el proceso neuronal de la respuesta de la retina por el cerebro.

Qué es el color?

- No es únicamente una propiedad de los objetos
- Depende de los siguientes factores:
 - Mundo físico
 - Luz
 - Materia
 - Respuesta fisiológica
 - Ojo humano
 - Respuesta neurológica
 - Cerebro humano

Qué es el color

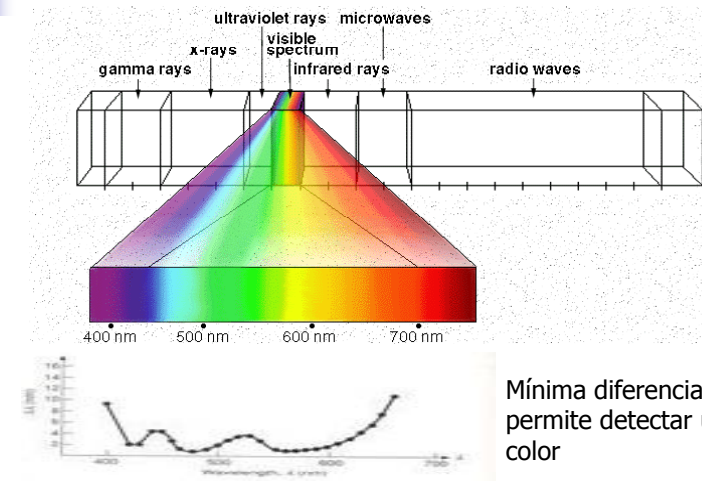


Luz visible

- El espectro electromagnético
 - Ondas de radio: varios kilómetros
 - Microondas
 - Infrarrojos
 - Espectro visible
 - Ultravioletas
 - Rayos X
 - Rayos gamma: menos de 0,1 nm
- El ojo humano es sensible a radiaciones electromagnéticas de 380-780nm
- A esto le llamamos luz (visible)

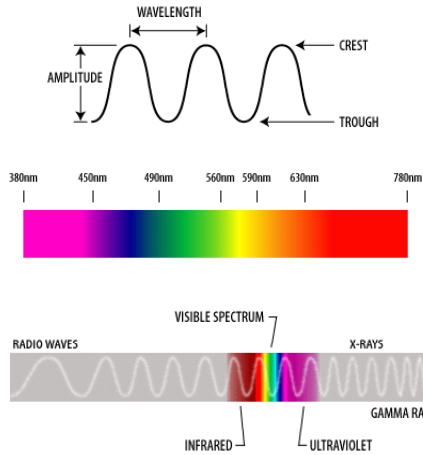


Luz



Mínima diferencia en λ que permite detectar un cambio de color

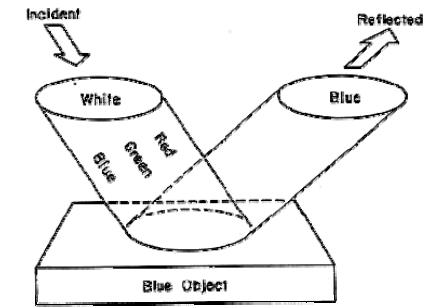
Luz



- $c = f \cdot \lambda$
 - $c =$ velocidad luz (vacío)
 - $f =$ frecuencia
 - $\lambda =$ longitud de onda
- Longitud de onda: Distancia entre 2 crestas
- Frecuencia: Ciclos por unidad de tiempo (Hz o ciclos por segundo)
- Energía:
 - Longitudes más cortas
 - > Energía más alta

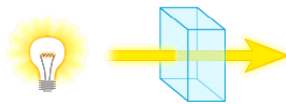
Interacción luz-materia

- Cuando la luz incide sobre un objeto se puede producir
 - Transmisión
 - Reflexión
 - Absorción
- El color viene determinado por las longitudes de onda que se reflejan

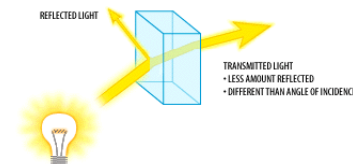


Transmisión

- La luz pasa a través del objeto sin ser esencialmente cambiada: Objeto transparente. En el caso de que el objeto filtre (absorba) de forma diferente luz de distintas longitudes de onda, aparecerá como coloreado



- Alteraciones según el índice refractivo:
 - $IR = (\text{velocidad luz vacío}) / (\text{velocidad luz material})$



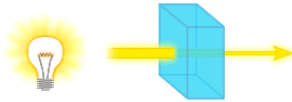
Transmisión

- Índices refractivos:
 - Aire: 1.0003
 - Agua: 1.333
 - Cristal: 1.5 – 1.96
- En la frontera de 2 sustancias con distinto IR, el rayo de luz cambia de dirección. Refracción
- El IR de una sustancia depende de la longitud de onda de la luz incidente.
 - Longitudes de onda cortas se refractan más.
 - Separación visible de las longitudes de onda (arco iris)



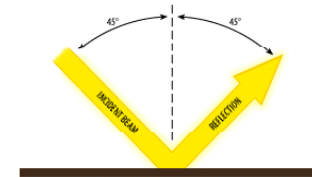
Transmisión

- Objetos traslúcidos: La luz se transmite sólo parcialmente y el resto se absorbe.
- Refracción y reflexión siguen las mismas pautas que un objeto transparente



Reflexión

- Objeto opaco
 - Reflexión
 - Difusión
- Superficie pulida, brillante: Partículas con IR similar
 - Reflexión en mismo ángulo e intensidad que el rayo incidente.



Reflexión

- Sustancias con partículas con distinto IR: La luz se dispersa (difusión).
 - La cantidad de luz dispersada depende de la diferencia de IR y del tamaño de las partículas
 - Se suele producir una combinación de reflexión + difusión



Absorción

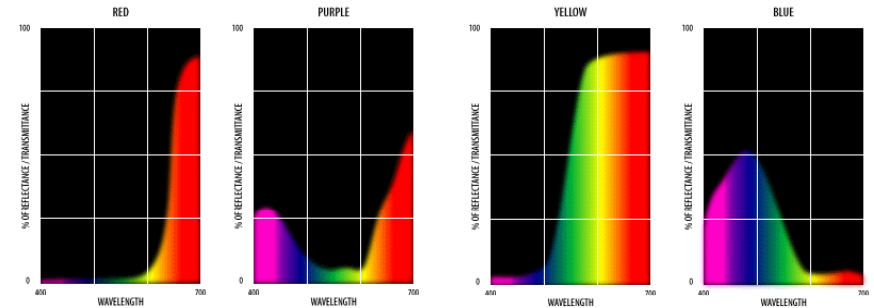
- Parte o la totalidad de las longitudes de onda puede ser absorbidas por un objeto
- Depende de la pigmentación del objeto
- Veremos como color, las longitudes de onda NO absorbidas



Curvas de reflexión-transmisión espectral

- Curvas de reflexión espectral: Cantidad de cada longitud de onda reflejada en comparación con la reflejada por un objeto blanco puro (refleja 100% de todas las longitudes de onda)
- Curvas de transmisión espectral: Cantidad de cada longitud de onda transmitida por un objeto transparente coloreado, comparándolo con un medio como el aire
- Expresan la contribución de los materiales a la percepción del color
- El color final percibido depende tanto de la composición de la luz incidente como de las propiedades de transmisión y reflexión espectral de los objetos vistos

Curvas de reflexión-transmisión espectral

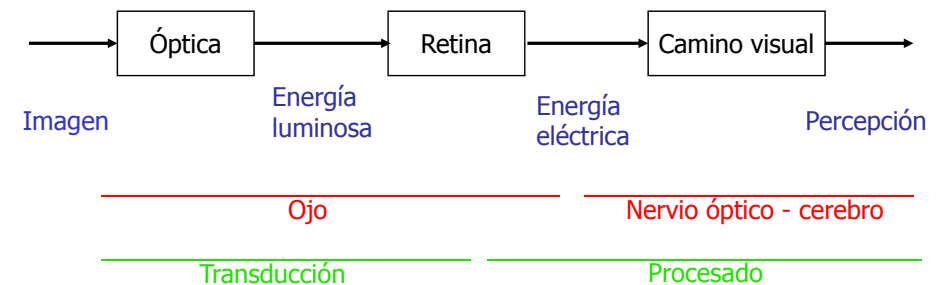


Índice

1. Introducción
 - Color
 - Luz visible
 - Interacción con la materia
2. Sistema visual humano
3. Percepción del color
 - Teoría tricromática
 - Componentes opuestos
4. Representación del color

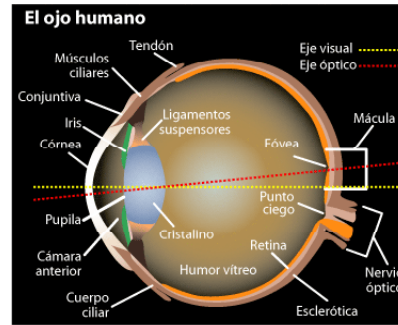
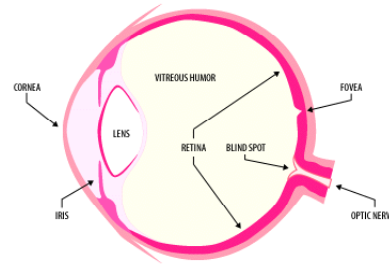
Sistema visual humano

- Mecanismo que convierte una entrada luminosa en una percepción



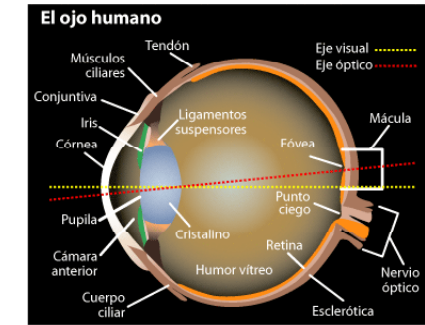
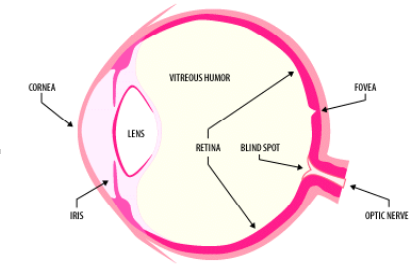
El ojo humano

- **Córnea:** Cubierta transparente en la parte delantera
 - Cubre el iris y la pupila
 - Permite el paso de la luz hacia el cristalino
 - La presión interna del humor acuoso mantiene su forma
- **Cristalino:** Es la lente del ojo
 - Redondo, transparente y flexible
 - Su deformación permite enfocar a larga, corta y media distancia.



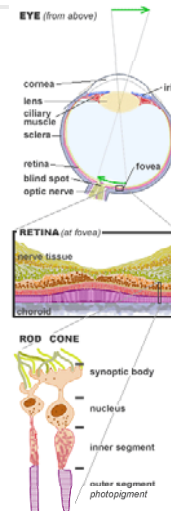
El ojo humano

- **Pupila:** Orificio que permite que la luz llegue al cristalino
- **Iris:** Controla el tamaño de la pupila para controlar la cantidad de luz que entra al interior del ojo.
- El interior del globo ocular contiene un gel transparente denominado **humor vítreo**.
- **Retina:** Película fotosensible que recubre la mayor parte del interior del globo ocular.



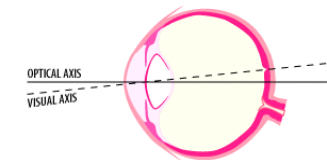
El ojo humano

- **Retina:** Compuesta por millones de células nerviosas y fotorreceptoras que recogen y procesan la información visual.
- Está estructurada en niveles. En los primates:
 - Fotorreceptores (conos y bastones)
 - Células horizontales
 - Células bipolares
 - Células amacrinas
 - Células ganglionares



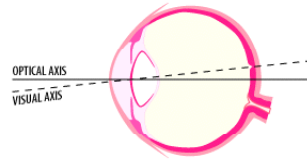
El ojo humano

- La retina recubre aproximadamente 200° del globo ocular
- **Punto ciego:** No es sensible a la luz
- La sensibilidad de la retina no es uniforme
- **Eje óptico:** Línea que pasa por el centro de la córnea, pupila y cristalino
 - Zona de enfoque óptico
 - No es la zona más sensible al color



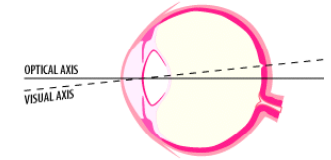
El ojo humano

- **Eje visual** del ojo: Del centro de la pupila a la fovea
- La **fovea**:
 - Zona muy reducida
 - Depresión de 1.5 mm diámetro
 - Enfoque peor que en el eje óptico
 - Sin vasos sanguíneos
 - Correspondencia de los conos con el siguiente nivel celular: 1 a 1.



El ojo humano

- **Foveola**: Situada dentro de la fovea, en su zona central
- Aproximadamente 0.3 mm de diámetro
- Existen únicamente conos
- Son más delgados y alargados que los de la periferia
- Fovea/foveola es la zona más sensible al color.



El ojo humano

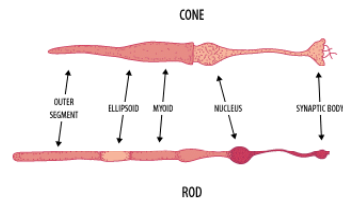
- La densidad de conos y bastones va cambiando a medida que nos alejamos concéntricamente de la fovea
 - **Parafóvea**: Aproximadamente 2.5 mm de diámetro. Ya tiene más bastones que conos
 - **Perifóvea**: Entre los 2.5 y 5.5 mm de diámetro
 - **Retina periférica**: Aproximadamente supone el 97.25% de la superficie total de la retina. Consiste mayoritariamente en bastones.
- El número de bastones es un orden de magnitud superior al de conos
 - $120 \cdot 10^6$ bastones
 - $6,5 \cdot 10^6$ conos

El ojo humano

- Dos tipos de visión: **Escotópica** y **fotópica**
- Escotópica
 - Define la actividad de los bastones
 - Relacionada con la visión nocturna
 - Se cree que los bastones son acromáticos
- Fotópica
 - Describe la actividad de los conos
 - Responsables de la visión diurna
 - Responsables de la visión en color
- Los conos se adaptan rápidamente a la luz brillante y al color
- Los bastones son relativamente lentos en su respuesta y se adaptan a niveles de gris

Fotorreceptores

- Conos y bastones
- Similares estructuralmente
- Difieren en la sustancia fotosensible (pigmento visual)



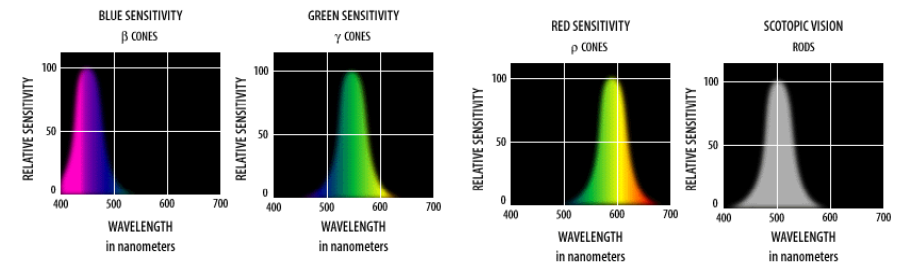
Bastones

- Son los más numerosos: $120 \cdot 10^6$ bastones
- Responden al espectro luminoso 400-700 nm
- Su sustancia fotosensible es la rhodopsina (púrpura visual)
- Es de color rosa
- Se vuelve blanquecina cuando le da la luz blanca
- Existe correspondencia entre la respuesta espectral de la rhodopsina y la de los bastones

Conos

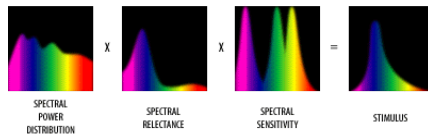
- Menor número de conos que de bastones: $6,5 \cdot 10^6$ conos
- Tres tipos de conos cada uno con un fotopigmento diferente
 - Eritropsina (575 nm)
 - Cloropsina (540 nm)
 - Cianopsina (440 nm)
- Comúnmente se conocen como los conos rojos, verdes y azules
- Nombres confusos: sus curvas de sensibilidad no se corresponden exactamente con esos colores
- Más correcto denominarlos por sus repuestas a longitudes de onda largas, cortas o medias.
- 1 cono "azul" – 20 "verde" – 40 "rojo"

Fotorreceptores



Estímulo visual

- Como consecuencia de la interacción entre la imagen recibida y la respuesta de nuestro órgano visual, obtenemos un estímulo que será procesado neurológicamente.
- Hasta aquí hay procesos que no están completamente entendidos
- A partir de aquí hay procesos que están algo entendidos.
- Existen una serie de mecanismos curiosos, como la adaptación cromática de nuestro sistema de visión, la aparición de post-imágenes (fenómenos de persistencia), la dependencia de la percepción de los colores circundantes, etc.



Adaptación cromática



¿De qué color es la camiseta de la persona del medio?

Adaptación cromática



¿Amarilla?

Adaptación cromática



¿Verde?

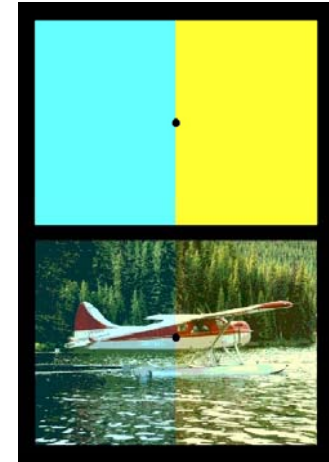
Adaptación cromática



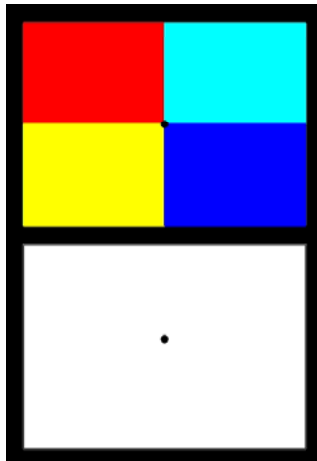
Depende del entorno...

Adaptación cromática

La adaptación cromática se refiere a la habilidad del sistema visual humano para compensar los cambios en el color que prevalece en el ambiente

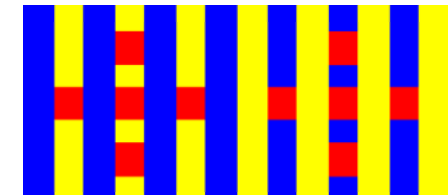


After-Images

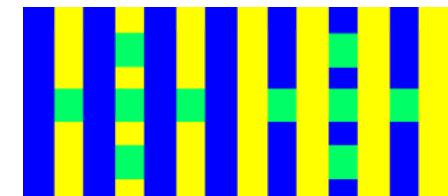


Contraste simultáneo

Cuando vemos un color, nuestra percepción de él es influida por los colores que lo rodean.



Nunca podremos considerar las características de un color como absolutas sino siempre relativas al entorno.



Índice

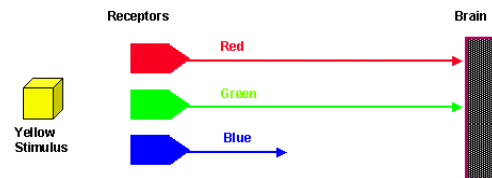
1. Introducción
 - Color
 - Luz visible
 - Interacción con la materia
2. Sistema visual humano
3. **Percepción del color**
 - Teoría tricromática**
 - Componentes opuestos**
4. Representación del color

Teoría tricromática

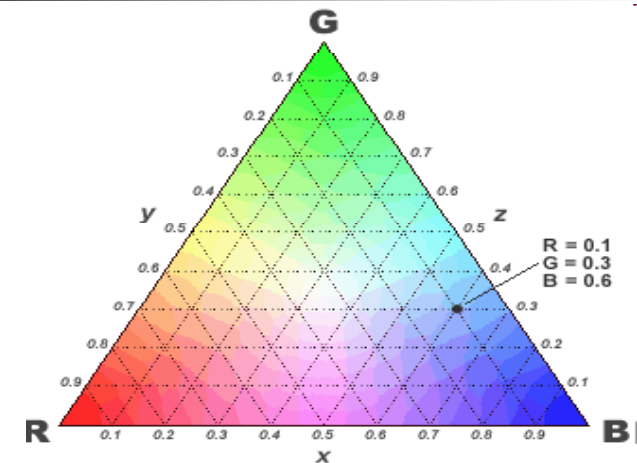
- Palmer (1777), Young (1801) y Helmholtz (1860). Experimentos de Maxwell: fotografías en color usando 3 filtros rojo, verde y azul (1860)
- La mayoría de colores se pueden conseguir por la superposición de 3 fuentes de luz de colores primarios (mezcla aditiva)
- Utilizar como primarios fuentes monocromáticas permite conseguir un gamut más amplio (espectro de colores)
- Un color obtenido por la mezcla de primarios es indistinguible del mismo color obtenido por una luz monocromática (metamerismo).
- Esta teoría se formuló suponiendo que había 3 tipos de receptores, pero antes de comprobarse que realmente existen 3 tipos de conos

Teoría tricromática

Trichromatic theory of vision Young-Helmholtz



Teoría tricromática



El triángulo de Maxwell's (1860)

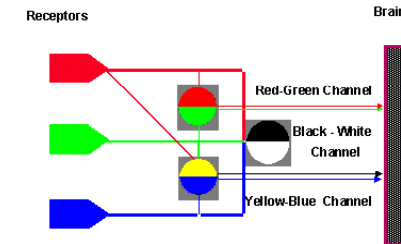
Teoría del oponente

- Hering (1875) aparentemente contradice la teoría de Young-Helmholtz
- Intenta explicar fenómenos como las "post-imágenes" y la percepción de un color dependiendo de su entorno
- Propone que existe una asociación de colores opuestos
 - Rojo-verde
 - Azul-amarillo
 - Blanco-negro
- Existen señales que actúan como inhibitorias y otras como excitadoras
- Como resultado tenemos
 - 2 canales con información cromática
 - 1 canal con información acromática

Teoría del oponente

Opponent theory of vision

Hering



Comentarios sobre ambas teorías

- La teoría tricromática es la base de las técnicas usadas en gráficos (como RGB). La teoría de colores opuestos sólo se ha usado para ahorrar ancho de banda en algunos sistemas de TV
- Podemos considerar el color como un espacio vectorial de dimensión 3 (que puede tener diferentes bases, como RGB).
- Podemos representar un color C_i como la suma de diferentes cantidades de estímulos puros, a base de mezclar diferentes intensidades de los colores básicos

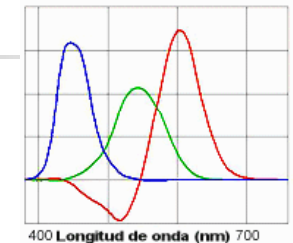
$$C_i = r_i R + g_i G + b_i B$$

r_i , g_i y b_i serían las coordenadas de C_i en este espacio vectorial

Este color sería indistinguible del monocromático de la longitud de onda de C_i (metamerismo)

Comentarios (2)

- Se ha demostrado que todos los colores pueden ser representados como combinaciones de estos colores básicos (para una intensidad constante, aunque cada uno percibimos los colores diferentemente)



Combinación de colores: refuerza la idea de espacio vectorial; la suma de dos colores tiene como coordenadas la suma de las de los dos

Problema: hay colores que necesitan intensidades *negativas* de los tres colores básicos (no pueden ser representados en un monitor RGB, por ejemplo). Sólo se puede resolver utilizando más colores básicos u otros diferentes

Comentarios (3)

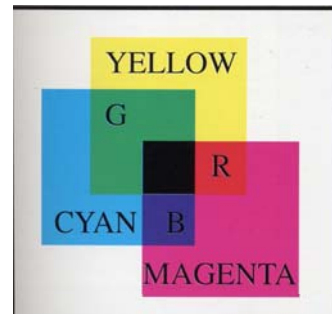
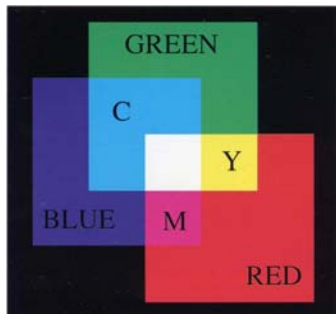
- Realmente, el espacio vectorial de los colores que podemos percibir es de dimensión infinita teóricamente (nos puede llegar una variación continua de diferentes longitudes de onda, aunque sólo percibamos diferencias a partir de un cierto umbral- ver transparencia 8, "Espectro electromagnético").
- Pero mezclas espectrales diferentes pueden parecer del mismo color (este fenómeno se llama metamerismo)

Comentarios (4)

- Hemos hablado sólo de propiedades cromáticas de la luz.
- Propiedades cromáticas de los objetos:
 - Reflejan cada longitud de onda de forma diferente
 - Esto puede originar metamerismo de iluminación (dos objetos parecen del mismo color con una luz, pero no con otra)
 - Podemos extender los modelos de iluminación (Phong, Cook-Torrance, etc.) pero necesitamos más de 3 colores básicos
 - Este tipo de "muestreo espectral" se ha utilizado para síntesis fotorrealista de imágenes de alta calidad
 - Para representar finalmente la escena en un monitor o proyector, hace falta reducir a 3 colores básicos

Colores aditivos y sustractivos

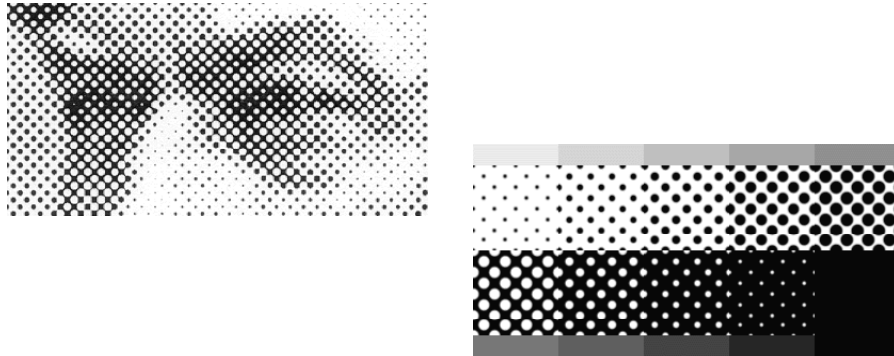
Son formas complementarias de representar el color: Podemos partir de negro e ir añadiendo distintas cantidades de los colores básicos (monitores) o partir de blanco e ir quitándolos (impresora).



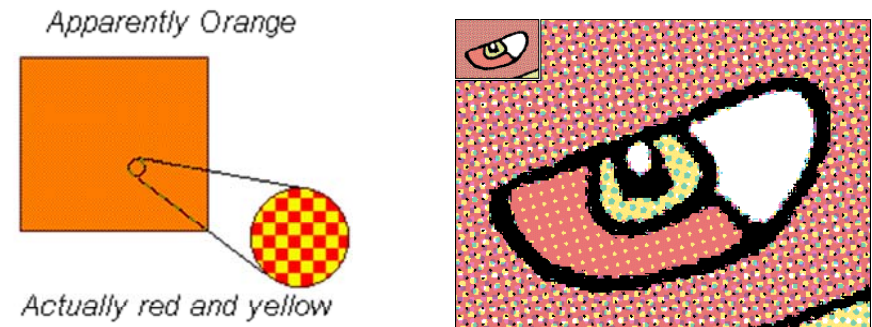
Halftoning-dithering



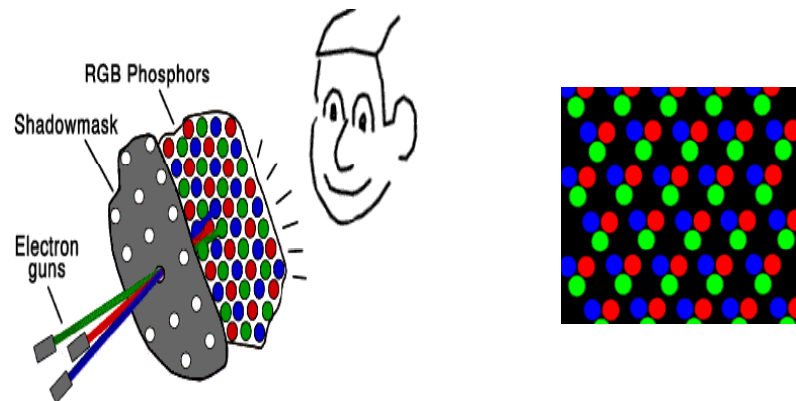
Halftoning-dithering



Halftoning-dithering



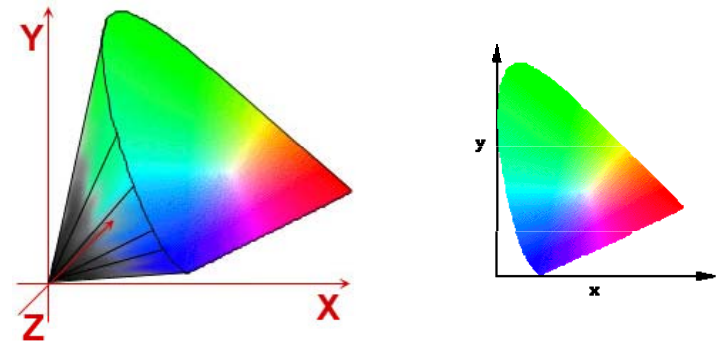
Halftoning-dithering



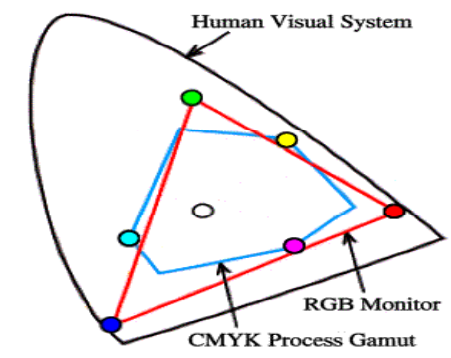
Modelos de color

- Diagrama CIE
- RGB
- CMY
- YIQ
- HSV
- HLS

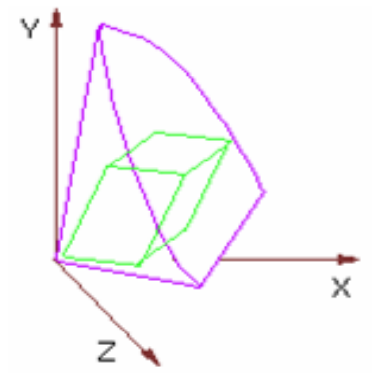
CIE



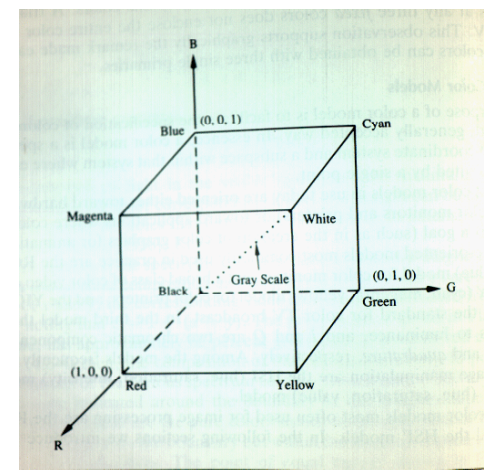
Gamuts



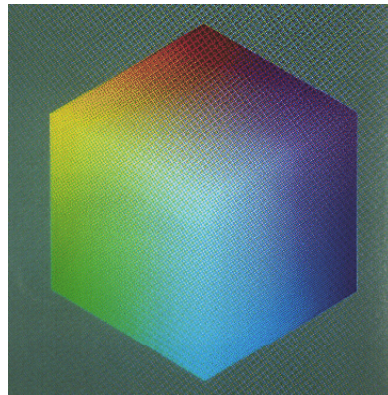
Gamuts



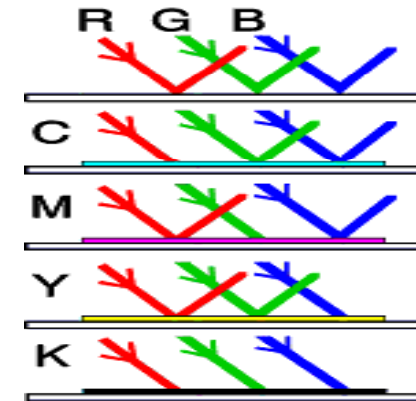
RGB



RGB



CMY

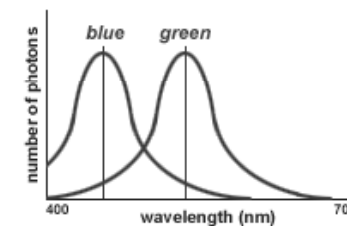


YIQ

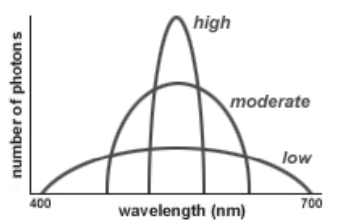
- Modelo de color utilizado en las televisiones
- Es una recodificación del RGB
 - Eficiencia en la transmisión
 - Compatibilidad con la televisión en B&N
- Componente Y se define igual que la Y de CIE
- Es el único canal necesario para la TV en B&N
- Canales I Q representan la información de color
- Más ancho de banda para el canal Y (ojo más sensible a cambios en luminosidad)



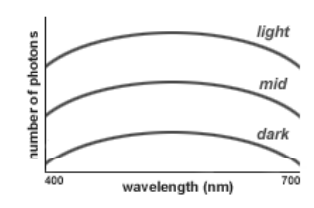
HSV: Tono (Hue)



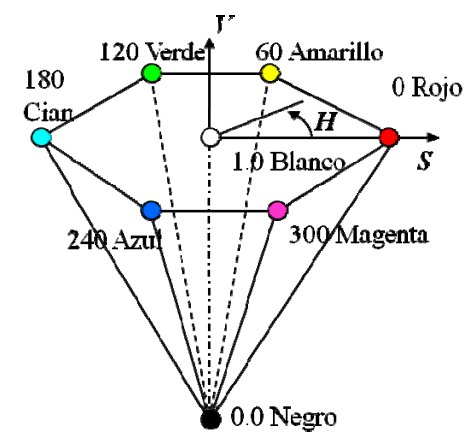
HSV: Saturación (chroma)



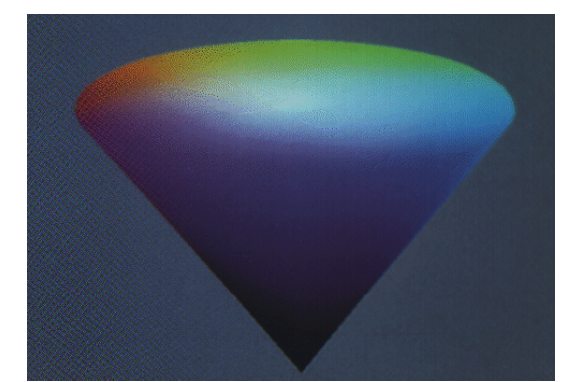
HSV: Luminosidad (value)

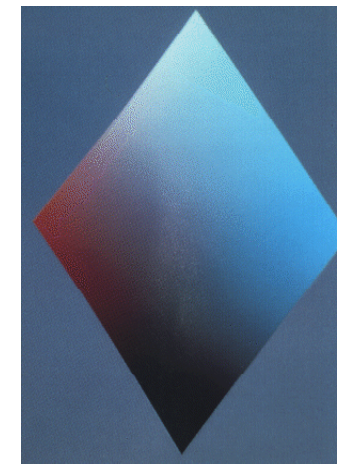
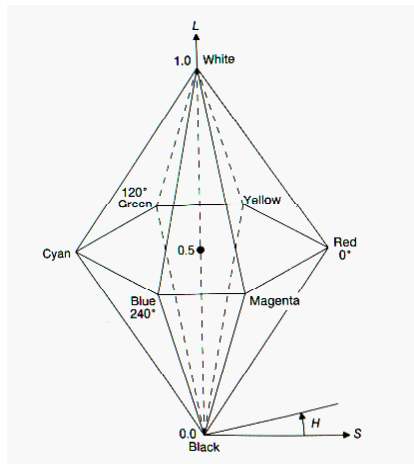


HSV



HSV





Conversiones entre modelos de color

- CMY \leftrightarrow RGB
- CMY \leftrightarrow CMYK
- RGB \leftrightarrow CMYK

Conversiones entre modelos de color: CMY \rightarrow RGB

- CMY (Cyan, Magenta, Yellow)
- RGB (Red, Green, Blue)

■ $RGB = [1, 1, 1] - [C, M, Y]$

- Ejemplo (escala entre 0..1):

■ $CMY = [78\%, 65\%, 84\%]$

- $R = 1 - 0.78 = 0.22 = 22\%$
- $G = 1 - 0.65 = 0.35 = 35\%$
- $B = 1 - 0.84 = 0.16 = 16\%$





Conversiones entre modelos de color: RGB → CMY

- RGB (Red, Green, Blue)
CMY (Cyan, Magenta, Yellow)

- $CMY = [1, 1, 1] - [R, G, B]$

- Ejemplo (escala entre 0..1):

- RGB = [25%, 50%, 90%]  ¿CMY? 
- $C = 1 - 0.25 = 0.75 = 75\%$
- $M = 1 - 0.50 = 0.50 = 50\%$
- $Y = 1 - 0.90 = 0.10 = 10\%$

Conversiones entre modelos de color: RGB ↔ CMY

- RGB (Red, Green, Blue)
CMY (Cyan, Magenta, Yellow)

- Cuando la escala de RGB está entre 0..255:

- RGB → CMY

$$C = 1 - \frac{R}{255} \quad M = 1 - \frac{G}{255} \quad Y = 1 - \frac{B}{255}$$

- CMY → RGB

$$R = 255 \cdot (1 - C) \quad G = 255 \cdot (1 - M) \quad B = 255 \cdot (1 - Y)$$

Conversiones entre modelos de color: CMY → CMYK

- C'M'Y' (Cyan, Magenta, Yellow)
CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Key)

- Key => black

- Procedimiento:

- $K = \text{MIN} \{C', M', Y'\}$

- if ($K = 1$)

- then $CMYK = \{0, 0, 0, 1\}$

- Else $CMYK = \left\{ \frac{C' - K}{1 - K}, \frac{M' - K}{1 - K}, \frac{Y' - K}{1 - K}, K \right\}$

Conversiones entre modelos de color: CMYK → CMY

- C'M'Y'K' (Cyan, Magenta, Yellow, Key)
CMY (Cyan, Magenta, Yellow)

- Key => black

- Procedimiento:

- $CMY = \{ C'(1 - K) + K, M'(1 - K) + K, Y'(1 - K) + K \}$

Conversiones entre modelos de color: CMYK → RGB

- CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Key)
- RGB (Red, Green, Blue)
- Key => black

- Procedimiento:

1. $T_{\text{CMYK} \rightarrow \text{CM}'\text{Y}'}$
2. $T_{\text{CM}'\text{Y}' \rightarrow \text{RGB}}$

Conversiones entre modelos de color: Ejemplos

- CMY = [78%, 65%, 84%] ■ ¿RGB?

- $R = 1 - 0.78 = 0.22 = 22\%$
- $G = 1 - 0.65 = 0.35 = 35\%$
- $B = 1 - 0.84 = 0.16 = 16\%$

O lo que es lo mismo (0..255):

$$R = 255 \cdot (1 - C) \quad G = 255 \cdot (1 - M) \quad B = 255 \cdot (1 - Y)$$

$$R = 255 \cdot (1 - 0.78) = 56.1 \quad G = 255 \cdot (1 - 0.65) = 89.25 \quad B = 255 \cdot (1 - 0.84) = 40.8$$

255 ↔ 100	255 ↔ 100	255 ↔ 100
R ← 22	G ← 35	B ← 16
R = 22 * 255 / 100 = 56.1	G = 35 * 255 / 100 = 89.25	B = 16 * 255 / 100 = 40.8

Conversiones entre modelos de color: Ejemplos

- RGB = [137, 192, 35] ■ ¿CMY?

$$C = 1 - \frac{R}{255} \quad M = 1 - \frac{G}{255} \quad Y = 1 - \frac{B}{255}$$

- C = $1 - (137/255) = 0.46 = 46\%$
- M = $1 - (192/255) = 0.24 = 24\%$
- Y = $1 - (35/255) = 0.86 = 86\%$

Conversiones entre modelos de color: Ejemplos

- RGB = [137, 192, 35] ■ ¿CMYK?

- Pasos:

1. $T_{\text{RGB} \rightarrow \text{CM}'\text{Y}'}$

$$C = 1 - \frac{R}{255} \quad M = 1 - \frac{G}{255} \quad Y = 1 - \frac{B}{255}$$

- C = $1 - (137/255) = 0.46 = 46\%$
- M = $1 - (192/255) = 0.24 = 24\%$
- Y = $1 - (35/255) = 0.86 = 86\%$

$$T_{\text{RGB} \rightarrow \text{CMY}} = \text{RGB} \{137, 192, 35\} \rightarrow \text{CMY} \{46\%, 24\%, 86\%\}$$

Conversiones entre modelos de color: Ejemplos

- RGB = [137, 192, 35] ■ ¿CMYK?
 - Pasos: ($T_{RGB \rightarrow CMY} = RGB \{137, 192, 35\} \rightarrow CMY \{46\%, 24\%, 86\%\}$)
 2. $T_{CMY \rightarrow CMYK}$
 - $K = \min \{C, M, Y\} = 0.24$
 - if ($K = 1$) // No se cumple $CMYK = \{0, 0, 0, 1\}$
 - then
 - Else // Sí, se cumple $CMYK = \left\{ \frac{C - K}{1 - K}, \frac{M - K}{1 - K}, \frac{Y - K}{1 - K}, K \right\}$

- $C = (0.46 - 0.24) / (1 - 0.24) = 0.22 / 0.76 = 0.289 = 28.9\%$
- $M = (0.24 - 0.24) / (1 - 0.24) = 0 / 0.76 = 0 = 0\%$
- $Y = (0.86 - 0.24) / (1 - 0.24) = 0.62 / 0.76 = 0.815 = 81.5\%$
- $K = 0.24$

Conversiones entre modelos de color: Ejemplos

- Ojo con las conversiones entre modelos de color
 - La correspondencia entre uno y otro no es totalmente exacta.
 - Volver a un modelo de color desde otro previo puede no dar el mismo color original.