



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Fundamentos y aplicaciones de la colorimetría diferencial

Francisco Miguel Martínez Verdú
verdu@ua.es

III Congreso Nacional de Gestión del Color en Artes Gráficas
Valencia, 31 de octubre de 2003

SUMARIO

- **Preámbulo**
- **Color percibido**
 - Factores que influyen en la comparación de colores
- **Fórmulas de diferencias de color**
 - Fórmula de MacAdam
 - Fórmulas basadas en CIE-L*a*b*C*h*
- **Aplicaciones**
 - Tolerancias industriales: aceptabilidad vs. perceptibilidad
 - Corrección de recetas de color
 - Metamerismo e inconstancia de color
 - Parámetros de calidad para las lámparas
 - Parámetros de calidad de las tintas
 - Grado de predicción de los perfiles de color

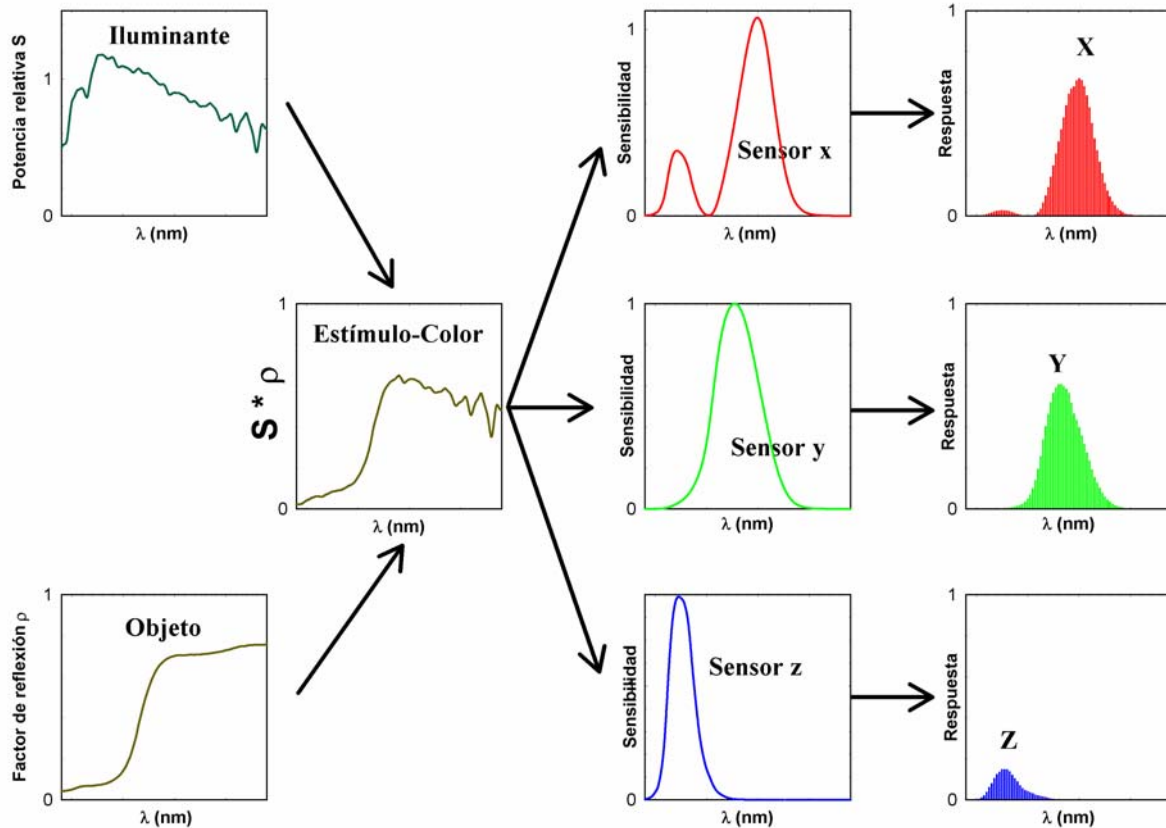
PREÁMBULO (I)

- El sistema visual humano es un excelente comparador de colores (siglo XX)
- ¿Cómo predecir la aceptabilidad del cliente ante el color que hemos generado antes de que lo vea?
 - Control de la reproducción digital del color
 - Instrumentos de medida del color
 - Colorimetría + Densitometría





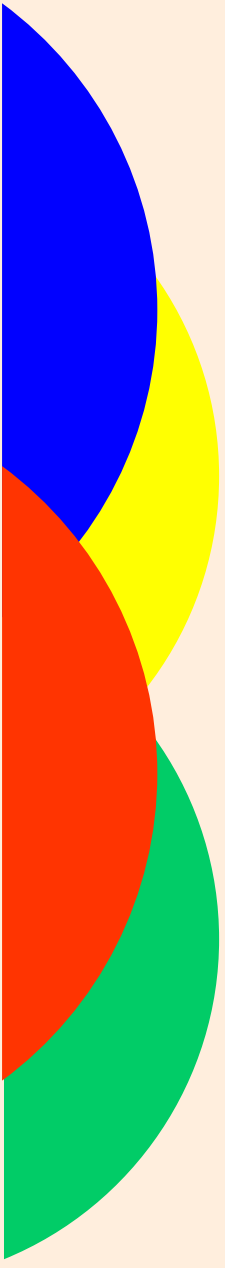
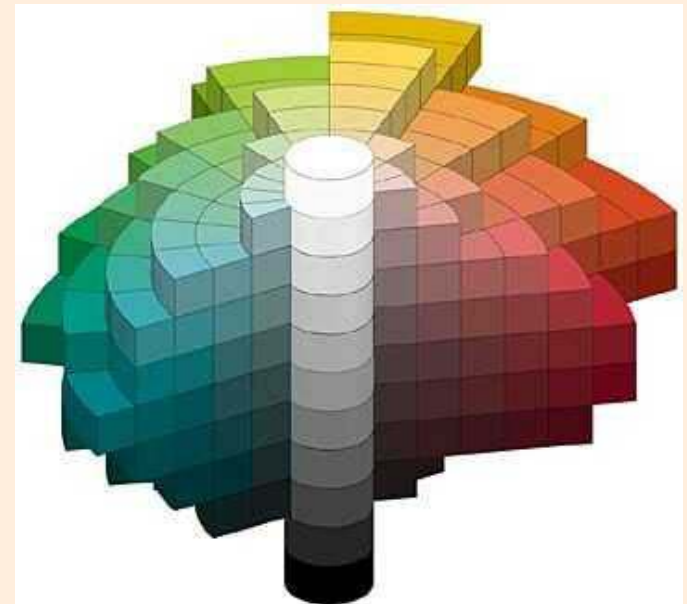
COLOR PSICOFÍSICO (CIE-1931 XYZ)





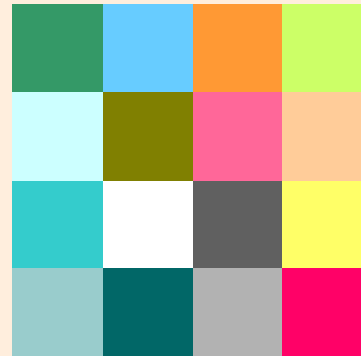
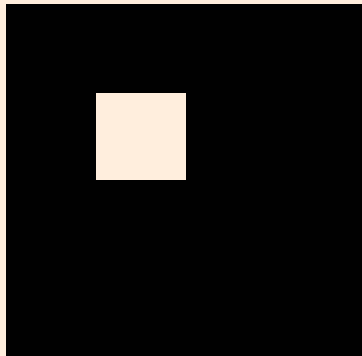
COLOR PERCIBIDO (I)

- Depende del color psicofísico y de otros factores relacionados con el entorno
- Atributos perceptuales del color



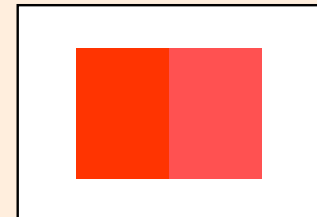
COLOR PERCIBIDO (II)

- **Color aislado**



- **Color relacionado:**

- Válido para imágenes
- Es la situación más cotidiana:
 - Muestra vs. patrón con respecto el blanco del medio

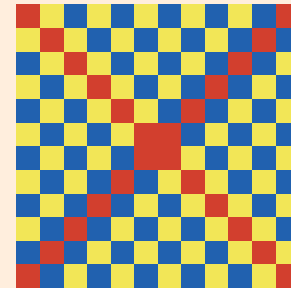




COLOR PERCIBIDO (III)

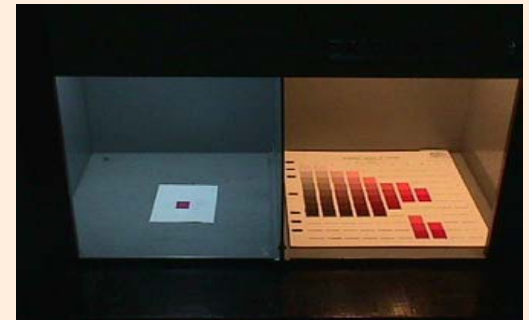
▪ Efectos de apariencia del color

- Para colores aislados
- Para colores relacionados
 - Contexto espacial
 - Inducción vs. Asimilación



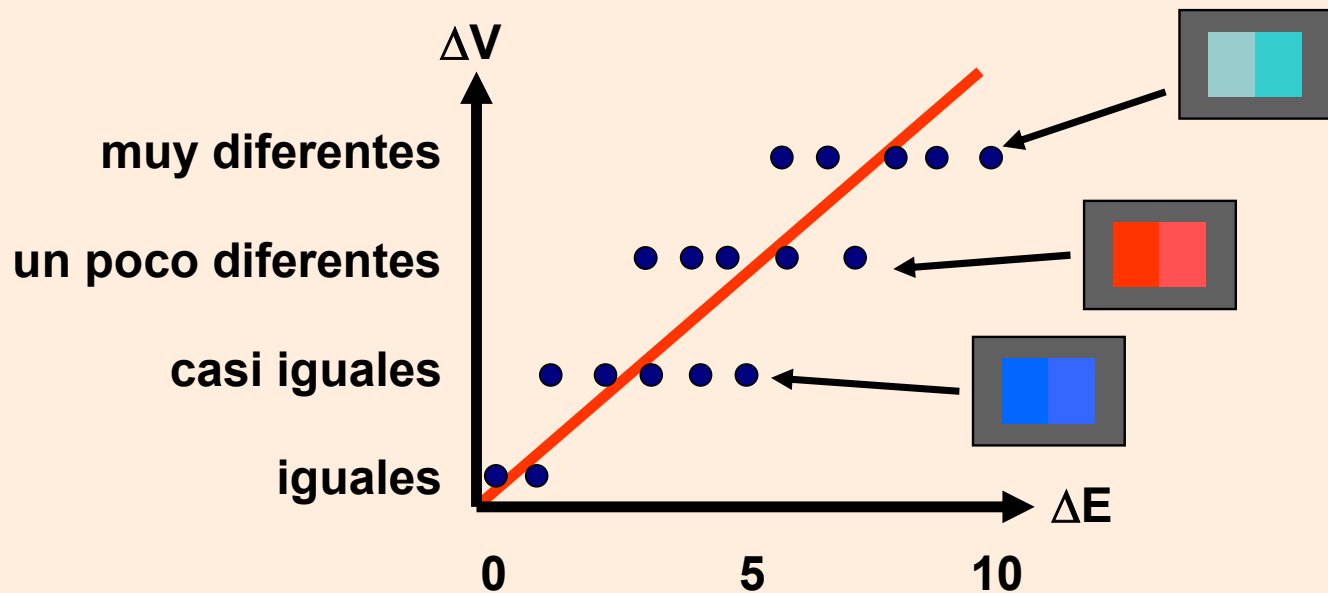
▪ Adaptación cromática y luminosa:

- Efecto de la intensidad y el color de la iluminación



OBJETIVO

- Valorar el grado de perceptibilidad (ΔV) usando un algoritmo numérico (ΔE) entre variables de color
 - Condiciones de validez: iluminante fijado y fondo neutro



FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (I)

- **Perspectiva històrica**
 - **Algoritmo de MacAdam (1942)**
 - **Fórmula FMC-II (1971)**
 - **Algoritmos basados en CIE-L*a*b*C*h* (1976)**
 - **Equivalencia entre $(Y/Y_n)^{1/3}$ y la notación Munsell (1958)**
 - **Sistema de ordenación oponente Lab de Hunter (1958) basado en una transformación no lineal de CIE-XYZ**
 - **Fórmulas CMC, BDF, ΔE_{94} , ΔE_{2000}**



CIE-1976 L*a*b*C*h*

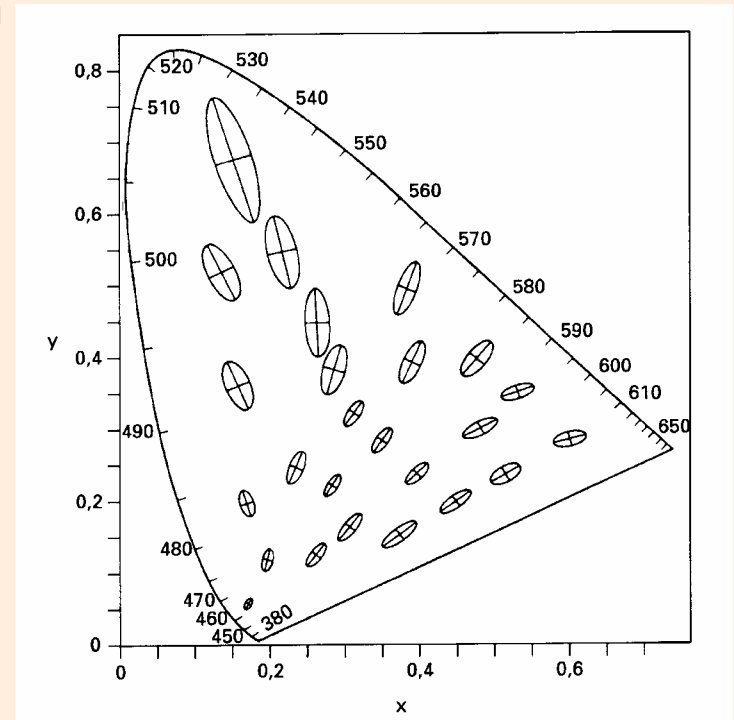
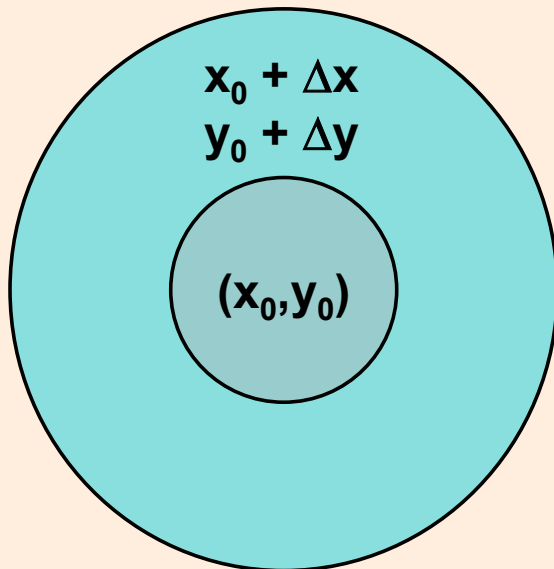
City University, London



FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (II)

- Fórmula de MacAdam (I)
 - Datos experimentales: CIE-xyY no es uniforme
 - Elipses de discriminación

Luminancia Y cte



FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (II)

▪ Fórmula de MacAdam (II)

- Adecuada para colores autoluminosos (pantallas)
- Coeficientes g_{ij} dependen del tamaño y de la orientación de la elipse de discriminación
- Es una fórmula computacionalmente difícil de manejar

$$\Delta E = \left[g_{11}\Delta^2 x + 2g_{12}\Delta x\Delta y + g_{22}\Delta^2 y + \alpha \left(\frac{\Delta Y}{Y} \right)^2 \right]^{1/2}$$


$\alpha \cong 10^4$ para campo visual de 1°

si $\Delta E = 1 \Rightarrow$ desviación estándar

si $\Delta E = 2 \Rightarrow$ mínima diferencia perceptible

FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (III)

▪ Fórmula FMC-II (1971)

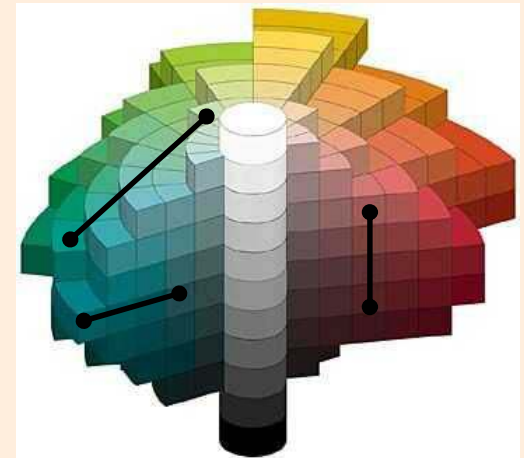
- No incorpora datos del iluminante
- Evitamos las interpolaciones “manuales” de los g_{ij}
- Transformación lineal de valores XYZ a valores PQS
- Coeficientes empíricos a , b , K_1 y K_2
- Diferencias parciales de color:
 - ΔL , ΔC_{rg} , ΔC_{yb} 

$$\Delta E_{FMC} = \left[\left(\frac{0.279K_2 \cdot \Delta L}{a} \right)^2 + \left(\frac{K_1 \cdot \Delta C_{rg}}{a} \right)^2 + \left(\frac{K_1 \cdot \Delta C_{yb}}{b} \right)^2 \right]^{1/2}$$

FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (IV)

Aspectos anteriores a tener en cuenta:

- El sistema CIE-XYZ no es uniforme
- $\Delta E = (\Delta^2 X + \Delta^2 Y + \Delta^2 Z)^{1/2}$ no vale

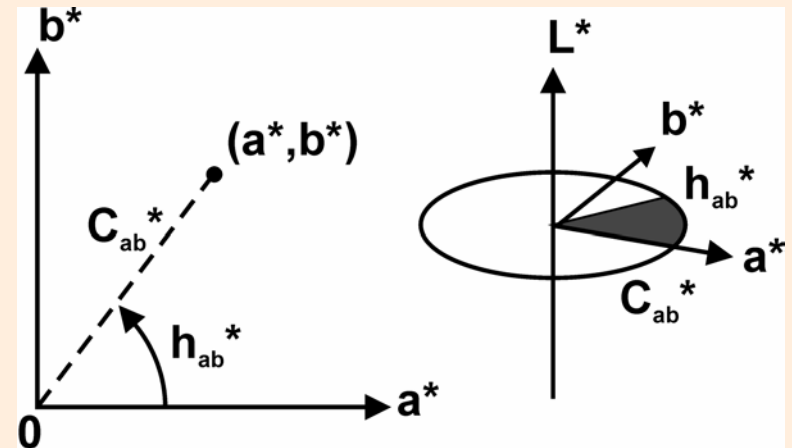
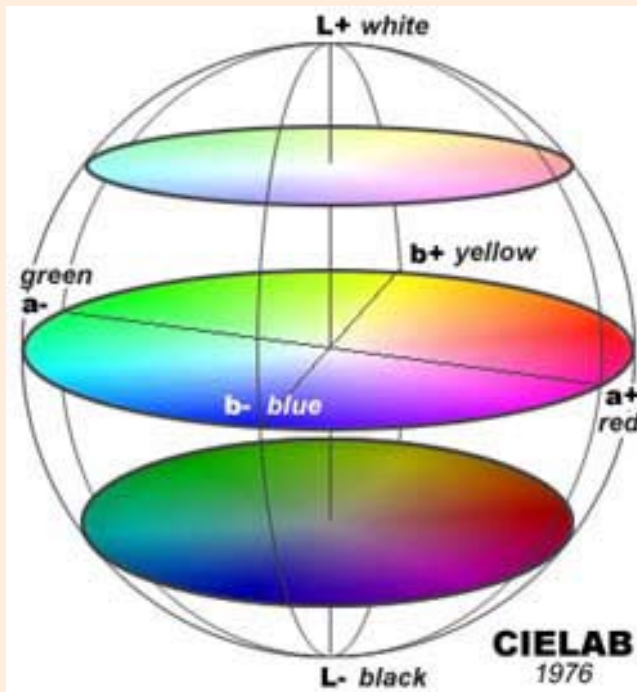


Objetivo deseado:

- Color percibido: claridad (L^*), tono (h^*), colorido (C^*)
- $\Delta E = (\Delta^2 L^* + \Delta^2 C^* + \Delta^2 H^*)^{1/2}$ es la mejor opción
- **¿CIE-XYZ → CIE- $L^*C^*H^*$? ¿qué modelo de apariencia?**

FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (V)

- CIE-L*a*b*C*h*
 - Datos sobre el iluminante X_n, Y_n, Z_n
 - Coordenadas oponentes $a^* b^*$



FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (VI)

- Comparación de colores en CIE-L*a*b*C*h*
 - Datos de entrada: XYZ (m), XYZ (std), XYZ (iluminante)
 - Datos de salida: L*a*b*C*h* (m), L*a*b*C*h* (std)

- Diferencias parciales de color:

- ΔL^* , Δa^* , Δb^*
- ΔC_{ab}^* , Δh_{ab}^* , $\Delta H_{ab}^* = 2 \cdot (C_m^* \cdot C_{std}^*)^{1/2} \cdot \text{sen}(0.5 \cdot \Delta h_{ab}^*)$

- Diferencia total de color:

$$\begin{aligned} \Delta E_{ab} &= \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} = \\ &= \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (VII)

- Mejoras del algoritmo ΔE basado en CIE-L*a*b*C*h*
 - Ajuste de varios conjuntos de datos experimentales
 - Filosofía del comité CIE TC1-29

$$\Delta E = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C \cdot S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H \cdot S_H} \right)^2 \right]^{0.5}$$

k : factor paramétrico (cte)

S : función de ponderación o correctiva

FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR (VIII)

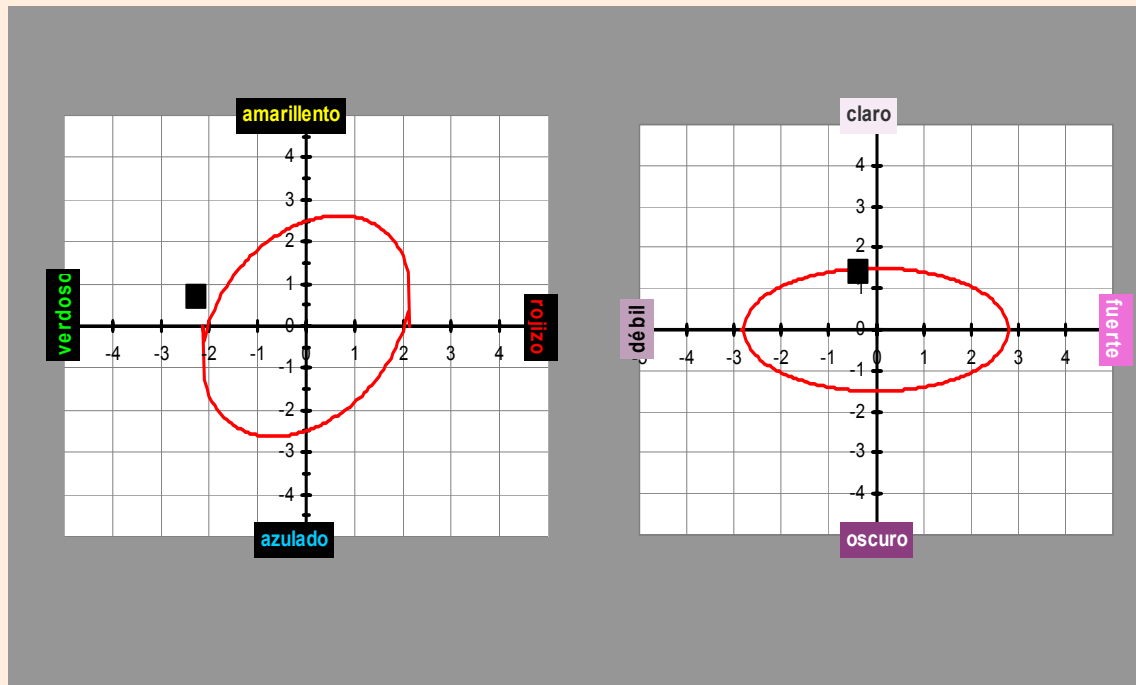
Fórmulas ΔE basadas en CIE-L*a*b*C*h*

- JPC79, de la empresa J & P Coats Ltd., año 1979
- CMC ($l : c$), del SDC, año 1984
 - $l \equiv k_L$, $c \equiv k_C$, $k_H = 1$
 - S_H depende del croma C_{ab}^* y del ángulo tono h_{ab}^*
- BFD ($l : c$), año 1987
 - $l \equiv k_L$, $c \equiv k_C$, $k_H = 1$
 - $S_L = 1$, S_H depende del croma C_{ab}^* y del ángulo tono h_{ab}^*
 - Término adicional cruzado entre ΔC_{ab}^* y ΔH_{ab}^*
- CIE94
- CIE2000
 - Incluye término cruzado entre ΔC_{ab}^* y ΔH_{ab}^*



APLICACIONES (I)

- Tolerancias industriales de color
 - Aceptabilidad vs. Perceptibilidad
 - Pasa / No Pasa





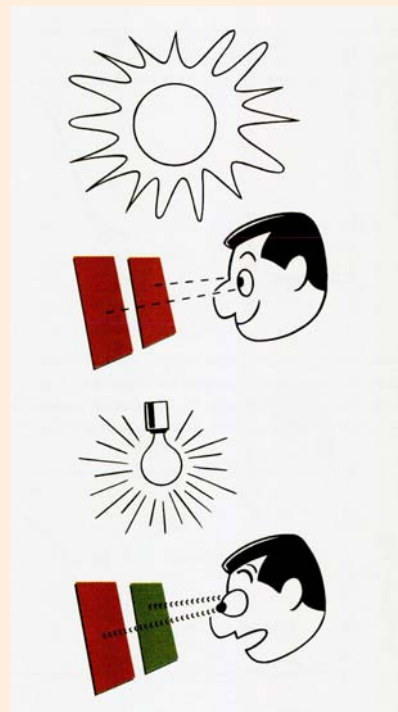
APLICACIONES (II)

- **Corrección de recetas de color**
 - **Ley de Kubelka-Munk → colores planos**
 - **Diferencias ΔL^* , ΔC_{ab}^* , ΔH_{ab}^* → concentraciones corregidas por ΔC_{CYAN} , $\Delta C_{\text{MAGENTA}}$, ΔC_{YELLOW}**
 - **Habitual en la industria textil**
 - **Corrección de la receta inicial**
 - **Corrección de la muestra tintada**

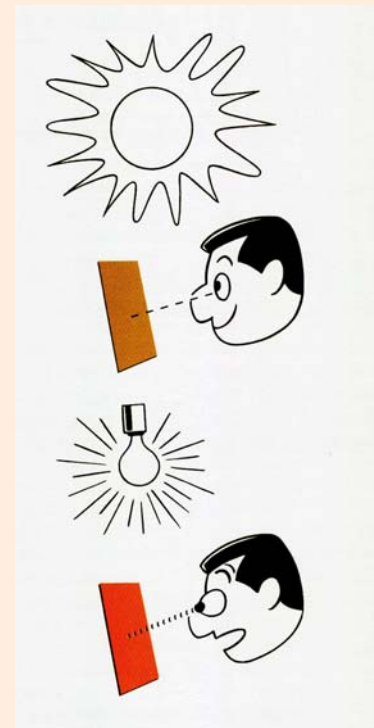


APLICACIONES (III)

Metamerismo

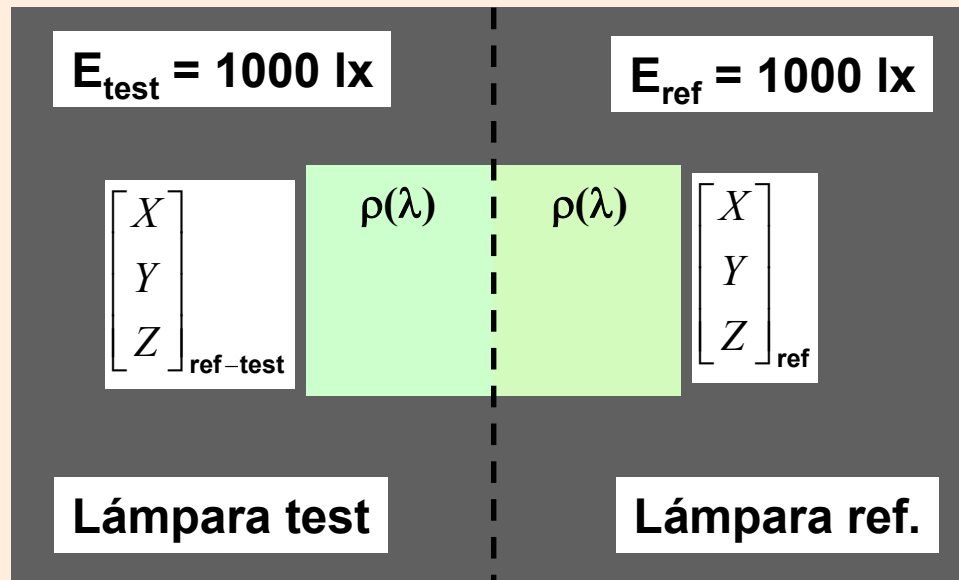


Inconstancia de color



APLICACIONES (IV)

- **Parámetros de calidad de las lámparas (I)**
 - Rendimiento en color (*Color Rendering Index – CRI*)



APLICACIONES (V)

Parámetros de calidad de las lámparas (II)

- Simulación de la luz diurna: componente visible (VIS)

5 pares de metámeros (D65)

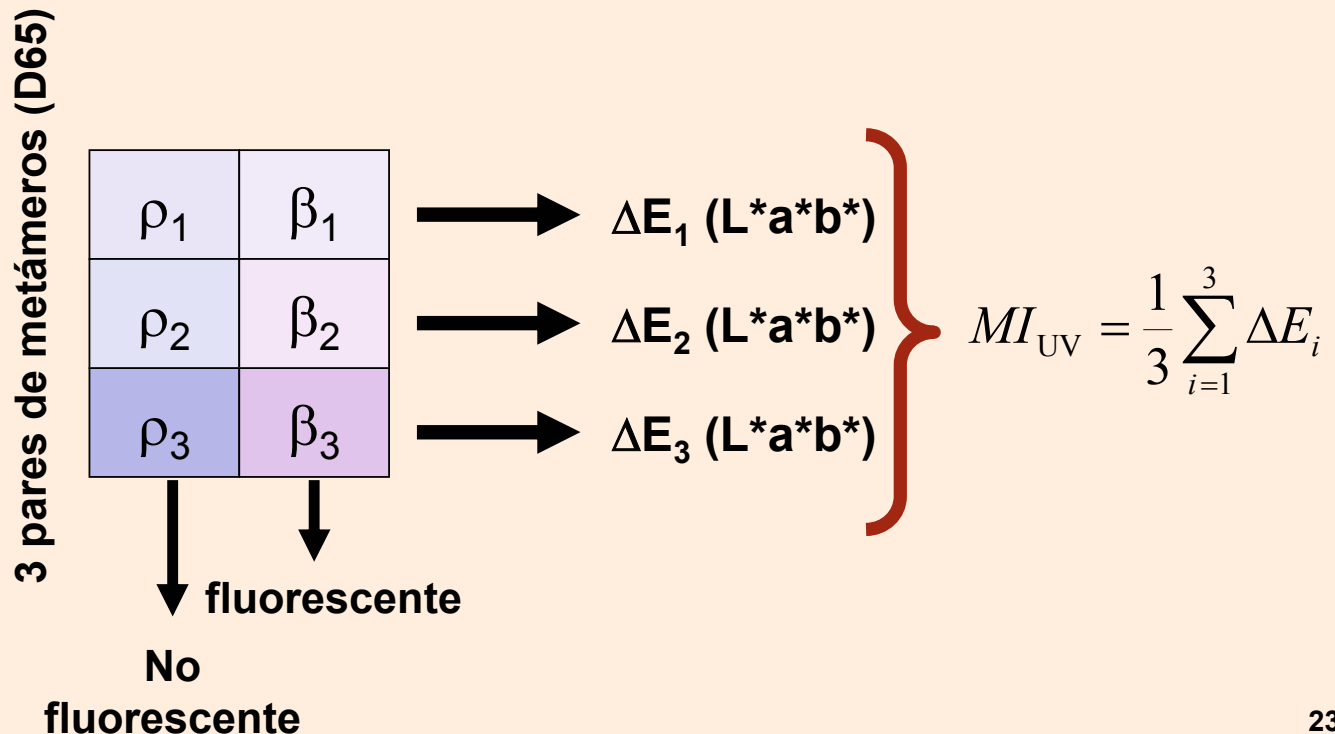
ρ_{11}	ρ_{12}	\longrightarrow	$\Delta E_1 (L^*a^*b^*)$
ρ_{21}	ρ_{22}	\longrightarrow	$\Delta E_2 (L^*a^*b^*)$
ρ_{31}	ρ_{32}	\longrightarrow	$\Delta E_3 (L^*a^*b^*)$
ρ_{41}	ρ_{42}	\longrightarrow	$\Delta E_4 (L^*a^*b^*)$
ρ_{51}	ρ_{52}	\longrightarrow	$\Delta E_5 (L^*a^*b^*)$

$$MI_{\text{VIS}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta E_i$$

APLICACIONES (VI)

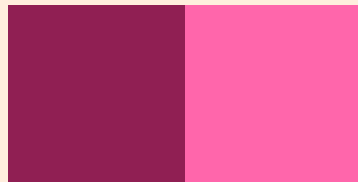
Parámetros de calidad de las lámparas (III)

- Simulación de la luz diurna: componente ultravioleta (UV)



APLICACIONES (VII)

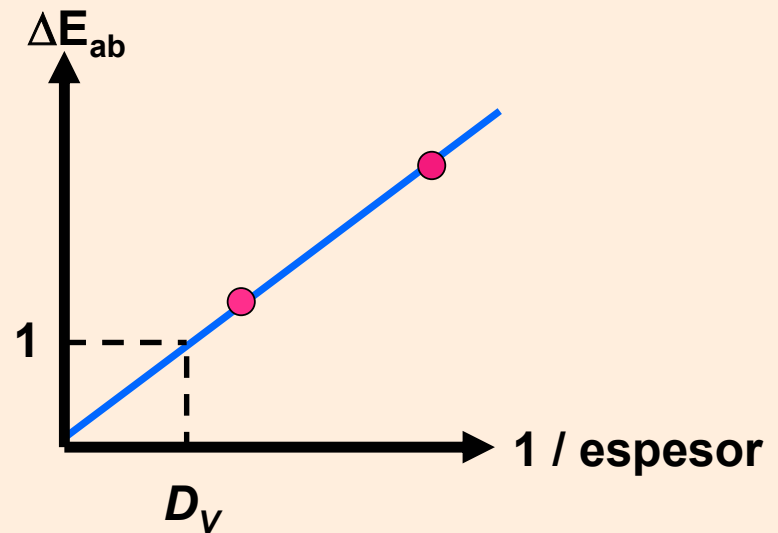
- **Parámetros de calidad de las tintas (I)**
 - Poder de recubrimiento D_V (*hiding power*)



Espesor 1



Espesor 2 > Espesor 1



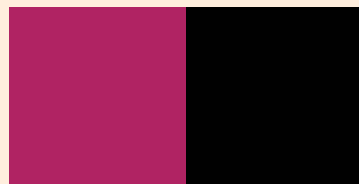
APLICACIONES (VIII)

Parámetros de calidad de las tintas (II)

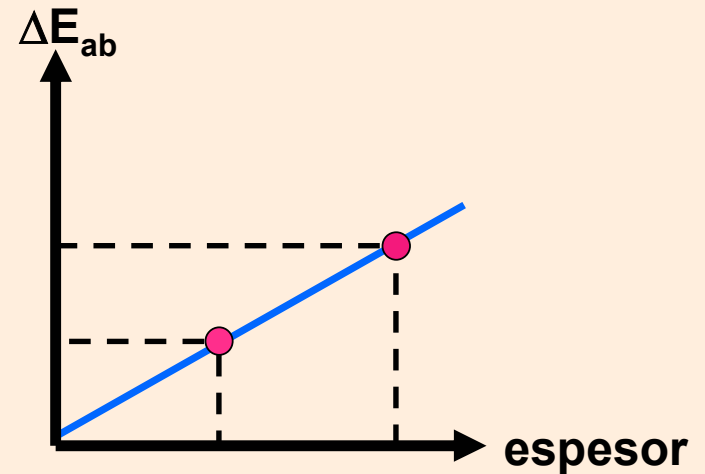
- Poder de transparencia T (*transparency number*)



Espesor 1



Espesor 2 > Espesor 1

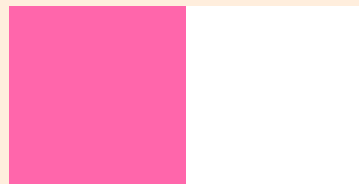


- T es la inversa de la pendiente de la recta
- $T = (e_2 - e_1) / (\Delta E_2 - \Delta E_1)$

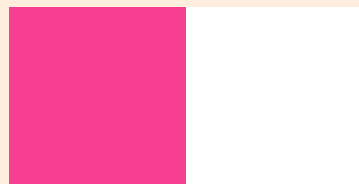
APLICACIONES (IX)

Parámetros de calidad de las tintas (III)

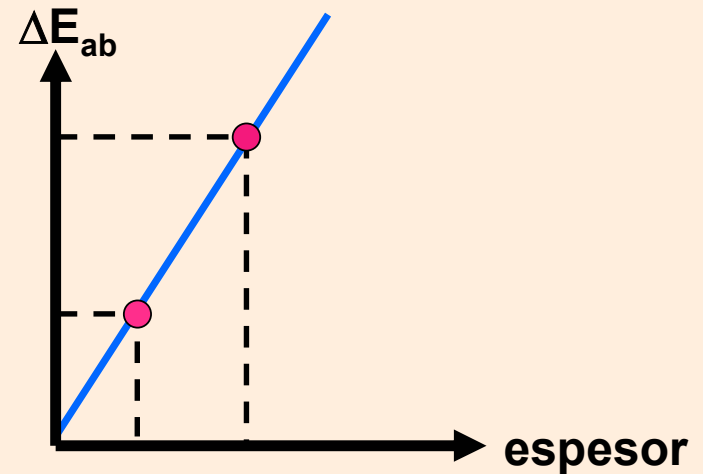
- Poder de coloración Φ (*coloring power*)



Espesor 1



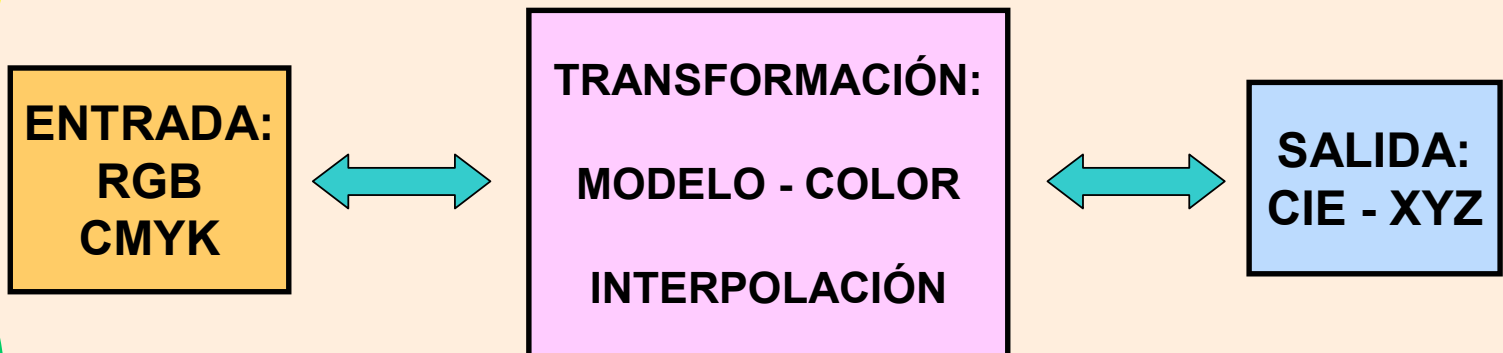
Espesor 2 > Espesor 1



- Φ es la pendiente de la recta
- $\Phi = (\Delta E_2 - \Delta E_1) / (e_2 - e_1)$

APLICACIONES (X)

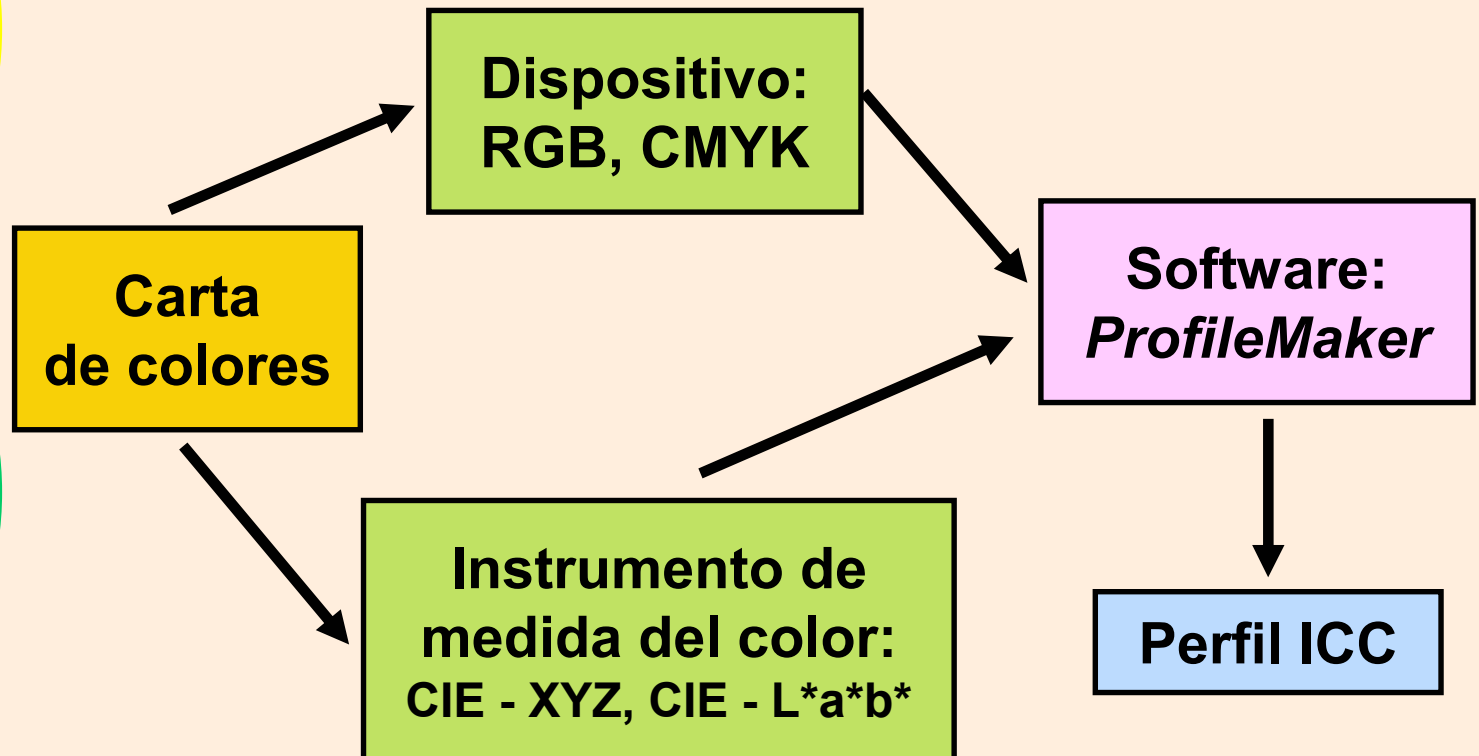
- **Control de la reproducción digital del color (I)**
 - Tipos de perfiles de color



- **Modelo de mezclas de colores: analítico e invertible**
- **Algoritmos de interpolación multidimensional (CLUT): no invertible**

APLICACIONES (XI)

Control de la reproducción digital del color (II)



APLICACIONES (XII)

Control de la reproducción digital del color (III)

- Tipos de perfiles ICC

ENTRADA



Modelo: Matriz + TRC
CLUT: más habitual

VISUALIZACIÓN



Modelo: Matriz + TRC
CLUT: raro

SALIDA



Modelo: No
CLUT: Sí

APLICACIONES (XIII)

Grado de predicción de los perfiles de color

- Comparación entre color- predicho y color- medido
 - Conjunto de colores de entrenamiento
 - Conjunto de colores de comprobación (test)
- Captura:
 - $RGB \rightarrow L^*a^*b^*$ por regresión polinómica
- Visualización:
 - $RGB \rightarrow L^*a^*b^*$ por modelo de color
- Impresión:
 - $CMYK \rightarrow L^*a^*b^*$ por interpolación 4-D
 - $L^*a^*b^* \rightarrow CMYK$ por regresión polinómica

CONCLUSIONES

- **Comparación de 2 colores sobre un fondo neutro e iluminación constante**
- **Se juzgan en base sus atributos perceptuales: claridad, tono y colorido**
- **CIE- ΔE_{00} es la fórmula más reciente**
- **Gran número de aplicaciones**
 - **Parámetros de calidad**



**Y eso es todo,
muchas gracias**

Verdu@ua.es

http://www.ua.es/area/vision_color/