



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Diseño de un Colorímetro Triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB

Memoria de Investigación para optar al grado de Doctor en Física

Francisco Miguel Martínez Verdú



Departament d'Òptica i Optometria

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Noviembre 2001

D. Jaume Pujol Ramo, Catedrático de Escuela Universitaria del Departamento de Óptica y Optometría de la Universidad Politécnica de Cataluña, y, D. Pascual Capilla Perea, Profesor Titular del Departamento de Óptica de la Universidad de Valencia, certifican que el trabajo “*Diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB*” ha sido realizado bajo su dirección por D. Francisco Miguel Martínez Verdú para optar al grado de Doctor en Física.

Fdo. Jaume Pujol

Fdo. Pascual Capilla

Terrassa, Noviembre 2001

A Marisa

A Gerard, Sara y Jaume, nuestro futuro hijo

A nuestra familia

El espíritu humano avanza de continuo, pero avanza en línea espiral.

(Johann W. Goethe, 1749-1832)

Ante ciertos libros uno se pregunta: ¿quién los leerá?

Y ante ciertas personas uno se pregunta: ¿qué leerán?

Y al fin libros y personas se encuentran.

(André Gide, 1869-1951)

SUMARIO

<i>Prefacio</i>	17
<i>Agradecimientos</i>	19
<i>Introducción</i>	21
Capítulo 1. Medida y reproducción del color	27
1.1 Sobre la medida del color	27
1.1.1 Especificación de colores aislados y relacionados	32
1.1.2 Determinación de la incertidumbre en la medida del color	43
1.1.3 Sobre instrumentos tele-colorimétricos	51
1.2 Reproducción aditiva del color	54
1.2.1 Problemática actual de los sistemas de gestión del color	56
1.2.2 Objetivos de una reproducción del color	65
1.2.3 Métodos de obtención del perfil colorimétrico entre espacios de color	73
1.2.3.1 Diseño de las sensibilidades espectrales de una cámara.....	75
1.2.3.2 Métodos matemáticos alternativos de obtención del perfil colorimétrico	86
Capítulo 2. Fotografía Digital	107
2.1 Límites estadísticos de la fotodetección ideal	107
2.2 Selección de una cámara digital para aplicaciones científicas	123
2.2.1 Componentes básicos de una cámara digital	124
2.2.2 Optoelectrónica del dispositivo semiconductor	130
2.2.3 Captura, digitalización, codificación y transmisión del color.....	137
2.2.3.1 Arquitecturas de color.....	137
2.2.3.2 Digitalización	140
2.2.3.3 Ruido de la imagen	143
2.2.3.4 Parámetros condicionantes finales en la codificación y transmisión del color	149
2.2.4 Parámetros funcionales de una cámara digital científica.....	156
2.3 Aspectos técnicos en la estandarización internacional de la Fotografía Digital	170
2.3.1 Sobre terminología.....	173
2.3.2 Sobre sensibilidad fotográfica	173
2.3.3 Sobre resolución espacial.....	179
2.3.4 Sobre reproducción del color.....	179
2.3.4.1 ISO 17321-1, Método A: obtención de las curvas de sensibilidad espectral relativa.....	182
2.3.4.2 ISO 17321-2, Método B: estimación colorimétrica de una escena tipificada.....	185
2.3.5 Sobre almacenamiento de las imágenes registradas.....	188
2.3.6 Sobre la interconexión con otros dispositivos multimedia	188

Capítulo 3. Definición de la Tesis	189
3.1 Distinción entre escáneres y cámaras.....	190
3.2 Caracterización de un dispositivo de captura como un instrumento de medida del color ..	191
Capítulo 4. Caracterización espectral	195
4.1 Montajes experimentales.....	195
4.1.1 Montaje experimental para la caracterización espectral (Montaje A).....	195
4.1.1.1 Diseño del estímulo lambertiano espectral	196
4.1.1.2 Cálculo de la exposición radiante sobre el plano focal fotosensible.....	198
4.1.1.3 Análisis inicial de las medidas efectuadas	200
4.1.2 Montaje para la caracterización colorimétrica (Montaje B).....	201
4.2 Funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSFs)	213
4.3 Verificación de la ley de la reciprocidad	223
4.3.1 Diseño del test.....	224
4.3.2 Enfoque estadístico	225
4.3.2.1 Variación exclusiva de la apertura relativa.....	225
4.3.2.2 Variación exclusiva del tiempo de exposición.....	226
4.3.2.3 Variación selectiva de ambos parámetros.....	228
4.3.3 Enfoque físico-matemático	229
4.3.3.1 Variación exclusiva de la apertura relativa.....	230
4.3.3.2 Variación exclusiva del tiempo de exposición.....	232
4.3.3.3 Variación selectiva de ambos parámetros.....	233
4.3.3.4 Relación matemática entre el tiempo de obturación y el tiempo de exposición.....	234
4.4 Determinación de sensibilidades espectrales completas	238
4.5 Determinación del comportamiento de transferencia fotónica	247
4.6 Modelo de codificación del color	256
4.6.1 Comprobación del balance de blanco.....	256
4.6.2 Criterio de normalización conjunta de las sensibilidades espectrales relativas.....	260
4.7 Obtención de las pseudo-funciones de igualación.....	263
4.7.1 Codificación cromática para estímulos multi-espectrales.....	266
4.7.2 Obtención de metámeros	273
Capítulo 5. Caracterización colorimétrica	277
5.1 Preparación de los datos RGB: balance de adaptación luminosa	277
5.2 Obtención de perfiles colorimétricos al espacio CIE-1931 XYZ	285
5.3 Evaluación del nivel de reproducción del color	290
5.3.1 Estimaciones teóricas	290
5.3.2 Estimaciones empíricas	291

5.3.2.1 Resultados con el perfil colorimétrico bruto	296
5.3.2.2 Cálculo del grado de precisión	314
5.4 Sobre la determinación de la gama de colores reproducibles.....	330
5.4.1 Consideraciones iniciales	330
5.4.2 Pseudo-primarios RGB	331
5.4.3 A partir del conjunto de colores óptimos.....	333
5.4.4 A partir del Atlas Munsell	342
Capítulo 6. Conclusiones.....	353
6.1 Interés industrial y transferencia de resultados.....	359
Capítulo 7. Investigaciones futuras	363
Anexo A.....	365
Anexo B.....	373
Referencias.....	381
Índice.....	393

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

(por orden de aparición)

CIE: Comisión Internacional de la Iluminación

\mathbf{b} : vector-luz de dimensión $N_\lambda \times 1$, distribución espectral de potencia radiante o estímulo-color

$\rho(\lambda)$: factor de reflexión

$\alpha(\lambda)$: factor de absorción

$\tau(\lambda)$: factor de transmisión

$L_e(\lambda), L_{e\lambda}$: radiancia espectral de una fuente luminosa extensa

$\text{diag}(\mathbf{X})$: matriz diagonal del vector \mathbf{X}

\mathbf{B} : matriz-base vectorial de un espacio N_b -dimensional

\mathbf{P} : k vectores-primarios de representación lineal del vector-luz \mathbf{b}

\mathbf{t} : vector k -estímulo

\mathbf{E} : estímulo equienergético o vector-luz identidad

\mathbf{T} : matriz k -vectorial de funciones de igualación asociadas a un conjunto k -vectorial de primarios \mathbf{P}

K_m : constante de conversión fotópica, que equivale a 683 lm/W

$\Delta\lambda$: anchura de banda espectral

\mathbf{T}_{XYZ} : funciones de igualación del observador patrón colorimétrico CIE-1931 XYZ

CMF: Funciones de Igualación del Color

\mathbf{t}_{XYZ} : especificación triestímulo absoluta CIE o valores triestímulo absolutos XYZ (en cd/m^2)

\mathbf{t}'_{XYZ} : valores triestímulo relativos al estímulo esquienergético

\mathbf{t}''_{XYZ} : valores triestímulo relativos al estímulo-color asociado al blanco de referencia ρ_w de la escena

k_E : constante de escalado colorimétrico según el estímulo equienergético \mathbf{E}

\mathbf{t}_w : especificación triestímulo del blanco de referencias

$L^*a^*b^*$: especificación CIE- $L^*a^*b^*$ para colores relacionados

$C_{ab}^*h_{ab}^*$: correlaciones de croma y ángulo-tono en la especificación CIE- $L^*a^*b^*$

H : tono

Q : luminosidad

J : claridad

M : colorido

C : croma

s : saturación

m : valor medio de la muestra de una población

s : desviación estadística de la muestra

s^2 : varianza de la muestra

s_m : error estándar del valor medio

t_{95}^v : valor percentil al 95 % de confianza del estadístico t-Student de v grados de libertad

v : incertidumbre relativa o coeficiente de variación

\mathbf{S}_x : matriz covarianza del vector \mathbf{x}

\mathbf{J}_y : jacobiano de la función $\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$

ISO: Organización Internacional de Estandarización

SPIE: Sociedad de Ingeniería Óptica

IS&T: Sociedad de Ciencias y Tecnologías de la Imagen

$IcJ(Q)$: índice combinado de claridad (luminosidad)

IcH : índice combinado de tono

$IcM(C)$: índice combinado de colorido (croma)

CRI : índice de reproducción del color

$s(\lambda)$: sensibilidad espectral

$\text{tr}(\mathbf{X})$: operador traza de una matriz \mathbf{X} o suma de los elementos de su diagonal principal
 \mathbf{O}_{XYZ} : base ortonormal de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ
 \mathbf{b}_f : metámero fundamental del vector-luz \mathbf{b}
 \mathbf{P}_{XYZ} : operador proyección del espacio CIE-1931 XYZ
 ρ_f : reflectancia fundamental
 \mathbf{P}_{RGB} : primarios fundamentales de un espacio de color RGB
 \mathbf{T}^+ : matriz inversa generalizada de Moore-Penrose de una matriz asimétrica \mathbf{T}
 \mathbf{M} : perfil colorimétrico o matriz de cambio de base entre dos espacios de representación del color
 $\hat{\mathbf{t}}$: estimación triestímulo a partir de cualquier perfil colorimétrico optimizado matemáticamente
 \mathbf{K}_S : matriz covarianza del conjunto vectorial estadístico \mathbf{S}
 \mathbf{K} : matriz autocorrelación del conjunto \mathbf{S}
 q_N : factor de calidad de Neugebauer
 q_V : factor de Vora
 CQF : factor de calidad del color
 $QE(\lambda)$: eficiencia cuántica espectral
 $n_i(\lambda)$: tasa de fotones incidentes, exposición cuántica
 $n_{pe}(\lambda)$: fotoelectrones generados
 q : valor medio de fotones incidentes
 l : valor medio de fotoelectrones generados
 $OECSF(\lambda)$: función espectral de conversión optoelectrónica
 $EEER$: exposición espectral equivalente de ruido
 $EEES$: exposición espectral equivalente de saturación
 rd_E : rango dinámico de entrada
 rd_S : rango dinámico de salida
 rlb : ruido de lectura base
 SNR : relación señal-ruido
 $IGSF(\lambda), g(\lambda)$: función espectral de ganancia incremental
 $FTSC$: curvas espectrales de transferencia fotónica
 K : constante de conversión optoelectrónica
 $DQE(\lambda)$: eficiencia espectral de detección
 ND : nivel digital
 $H(\lambda)$: exposición espectral
 NDR : nivel digital relativo
 $r(\lambda), r(\lambda, H)$: responsividad espectral
 $a(\lambda), a(\lambda, NDR)$: espectro de acción
 N : apertura relativa (f-#) de un objetivo fotográfico
 t : tiempo de exposición/integración en el sensor optoelectrónico
 CCD : dispositivo de carga acoplada (sensor optoelectrónico)
 ADC : conversor analógico-digital
 $offset$: valor de "brillo" de una tarjeta digitalizadora
 $gain$: valor de "contraste" de una tarjeta digitalizadora
 h : constante de Planck
 c : velocidad de la luz
 A_{SENSOR} : área efectiva irradiada en el sensor optoelectrónico
 $m_{ÓPTICA}$: aumento lateral del objetivo fotográfico
 $\tau_{ÓPTICA}(\lambda)$: transmitancia espectral del objetivo fotográfico
 $T_{ATM}(\lambda)$: transmitancia espectral de la atmósfera
 θ : posición angular de la escena respecto el eje óptico de una cámara
 DNL : no-linealidad diferencial del conversor analógico-digital

INL: no linealidad integral del conversor analógico-digital

σ_{PSN}^2 : ruido optoelectrónico de disparo, que incluye el ruido fotónico libre y la corriente oscura

$\sigma_{PATRÓN}^2$: ruido optoelectrónico de patrón, compuesto por el ruido de patrón fijo (FPN) y la no-uniformidad espacial de respuesta (PRNU)

σ_{BASE}^2 : ruido optoelectrónico base

σ_{ADC}^2 : ruido optoelectrónico de cuantización

N_{pozo} : capacidad de pozo optoelectrónico lleno

$\sigma_{SISTEMA}^2$: ruido optoelectrónico total del dispositivo de captura

$\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$: longitudes de onda de los picos de responsividad máxima de los canales-color RGB

F : variable local para tiempos de exposición superiores al configurado por defecto en el obturador de la cámara

P_H : variable local para tiempos de exposición inferiores al configurado por defecto en el obturador de la cámara

γ : gamma del monitor de visualización de una imagen captada por un dispositivo de captura (escáner, cámara)

G : ganancia electrónica en un dispositivo de captura

$f_k(\lambda, H)$: función analítica generalizada para la función espectral de conversión optoelectrónica OECSF

$g_k(\lambda, NDR)$: función analítica generalizada inversa de $f_k(\lambda, H)$

$\tilde{r}_{\lambda,k}$: responsividad espectral relativa para el canal-color k (= R, G, B)

$\tilde{a}_{\lambda,k}$: espectro de acción relativo para el canal-color k

$\tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda,k}$: eficiencia cuántica espectral relativa del canal-color k

$\tilde{I}\tilde{G}\tilde{S}\tilde{F}_{\lambda,k}$: función espectral relativa de ganancia incremental para el canal-color k

$\tilde{D}\tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda,k}$: eficiencia cuántica espectral de detección para el canal-color k

OECSF: función de conversión optoelectrónica

IGF: función de ganancia incremental

E_{min} : nivel de iluminación mínima (en lx) al que es sensible un dispositivo de captura

s_{ave} : parámetro de ruido digital según ISO 15739

s_{diff} : parámetro de ruido digital según ISO 15739

s_{temp} : parámetro de ruido digital según ISO 15739

s_{fp} : parámetro de ruido digital según ISO 15739

S_{sat} : velocidad de saturación según ISO 12232

S_{noise} : velocidad de ruido según ISO 12232

$\phi_{E/S}$: rendijas entrada/salida de un monocromador

f_R, f_G, f_B : niveles digitales medios de fondo en los canales-color RGB

$E_{ml}(L_{ml})$: iluminación (luminancia) correspondiente al blanco ideal en cada una de las posiciones de una carta ColorChecker dentro de la cabina

\mathbf{ND}_{RGB} : terna de valores cromático digitales entre 0 y $(2^{\text{bits}}-1)$

$H_{0.5}$: valor de exposición espectral que genera la mitad de la respuesta del dispositivo de captura, o, constante de semisaturación

RLI : índice de verificación de la ley de la reciprocidad

H_E : nivel absoluto de exposición equienergética

p_R, p_G, p_B : valores de normalización conjunta de las sensibilidades espectrales

bal_R, bal_G, bal_B : valores del balance de blanco ideal

k_R, k_G, k_B : parámetros finales de escalado del modelo de codificación cromática, predichos por las leyes de Grassmann

e_R, e_G, e_B : parámetros finales de desviación del modelo de codificación cromática, no predichos por las leyes de Grassmann

ENLNF: factor de luminancia neutra equivalente

\mathbf{Bal} : matriz diagonal de balance de grises

R, G, B: valores triestímulo relativos al blanco ideal del dispositivo de captura

$m_k(N)$: pendiente de la recta OECSF⁻¹ del canal-color k

$h_k(N)$: ordenada en el origen de la recta OECSF⁻¹ del canal-color k

\mathbf{B}_C : matriz diagonal de escalado colorimétrico, predicha por las leyes de Grassmann

\mathbf{A}_C : vector de desplazamiento de color, no predicho por las leyes de Grassmann

Prefacio

Muchas cosas han pasado desde la defensa del Proyecto de Tesis, en diciembre de 1997, hasta el final de la redacción de este trabajo, todas ellas complicadas de superar en su momento, pero asumidas satisfactoriamente una vez pasadas. Me refiero al traslado de Terrassa a Alicante, mis viajes de investigación a Terrassa, la defensa exitosa de mi Proyecto Docente y la participación en dos libros sobre Colorimetría y Tecnología del Color.

No fue fácil para nadie, sobretodo para Jaume, asumir mi marcha de Terrassa en el verano de 1998, justamente cuando las cosas empezaban a rodar. Menos mal que estaba Alejandro: gracias a su aparición, corta pero provechosa, el ritmo de trabajo experimental en la tesis no se interrumpió a pesar de mi ausencia.

No fue fácil para mí, ni para Marisa, que tuvo que soportarme, la adaptación a un nuevo entorno de trabajo, mucho más centrado en la docencia que en la investigación, y lejos físicamente de Terrassa. Menos mal que estaba Internet: gracias a la red, las ideas, discusiones y la obtención de información siguieron el buen ritmo que se había conseguido en Terrassa.

Tampoco fue fácil para mí, asumir los comentarios jocosos e irónicos, pero a la vez motivadores, de mis compañeros de Alicante sobre "¿cuándo lees la Tesis?", cuando estaba en el horizonte cercano una plaza-oposición en la que tenía muchas opciones de conseguir. Muchas veces les respondía: "Ya caerá ...", quizás parafraseando inconscientemente a Víctor Hugo cuando escribió "*No existe en el mundo nada más poderoso que una idea a la que le ha llegado su tiempo*", por las connotaciones reales que luego surgieron. Por eso, tampoco fue fácil para mi familia asumir mi ausencia durante varias semanas en aquellos primeros meses (febrero y junio) de 1999 para acabar las medidas experimentales.

En principio, a finales del verano de 1999, la Tesis parecía estar concluida, solamente quedaba redactarla. Con ese objetivo, empecé a escribir a lo largo del otoño, pero, inevitablemente, iba perdiendo ritmo a medida que iba esforzándome más en la preparación del Proyecto Docente sobre Óptica Fisiológica. Consecuentemente, a pesar de que casi acabé los dos primeros capítulos, los primeros meses del 2000 estuve más centrado en la participación del concurso-oposición que, afortunadamente, sin contar con la Tesis en el curriculum, conseguí principalmente a mis habilidades docentes.

Por tanto, a finales de la primavera del 2000, estaba de nuevo en condiciones de dedicarme exclusivamente a la redacción final de este trabajo. No obstante, la parte final no estaba definida del todo. A un mes vista de la 6ª Reunión Nacional de Óptica (Valladolid, septiembre 2000), preparando el capítulo sobre Fotografía Digital para un libro docente sobre Tecnología del Color, logré describir analíticamente el balance de adaptación luminosa y su inserción en el perfil colorimétrico de la cámara digital, aspecto que considero el más novedoso y original de los que aporta este trabajo.

Las cosas pintaban, pues, bastante bien: solamente era cuestión de tener tiempo para escribir. Sin embargo, la carga docente durante el último curso ha sido tan grande (33 créditos con asignaturas

inclusive de reciente creación como Ciencia del Color: aplicaciones industriales) que, aparte de cerrar definitivamente la participación en los libros de Colorimetría y Tecnología del Color, la reincorporación a la redacción de la Tesis se retrasó hasta finales de noviembre del 2000.

Desde ese momento hasta ahora, a pesar de los problemas docentes surgidos con la implantación de un nuevo plan de estudios, el ritmo de redacción ha sido constante y creciente. No sé, hasta qué punto, si hubiera permanecido en Terrassa, habría finalizado en modo y forma este trabajo en el plazo previsto por el Proyecto de Tesis (primavera del 2001), pero las cosas han venido así y, ahora, me siento más satisfecho por cómo he llegado al final que por haber llegado.

Existen Tesis Doctorales que, dadas sus líneas de definición, son bastante cerradas y con poco riesgo en la resolución de la misma. Existen otras que poseen una línea definitoria más abierta y, por ende, con más riesgo de resolverse satisfactoriamente. Creemos que este trabajo se enmarca en el segundo grupo, por su proceso no predestinado de resolución y elaboración. Pero no creemos por ello que se merezca un reconocimiento mayor que el resto de Tesis Doctorales, más bien, reivindicamos el derecho de esta Tesis Doctoral, y otras similares, a resolverse a su debido tiempo, sin prisas pero sin pausas, sin premuras administrativas de carácter docente. Como escribió Karl Popper: *"La ciencia será siempre una búsqueda, jamás un descubrimiento real. Es un viaje, nunca una llegada"*.

Agradecimientos

A mi mujer Marisa y a mis hijos Gerard y Sara, por la infinita, e inocente, paciencia en la elaboración de este trabajo. Por su perseverancia en cuanto mi falta de atención en las cuestiones cotidianas de una familia convencional. Mil y una gracias por amarme y entenderme, cada uno a su manera.

A Jaume y Pascual, como co-directores, por su ánimo constante y esfuerzo en la revisión de este trabajo. Por las animadas discusiones científicas que hemos compartido, momentos siempre gratificantes y provechosos.

A todos mis compañeros, ya sean de Terrassa, Valencia o Alicante, por su interés informal, desinteresado y gratificante sobre mis actividades investigadoras. En especial a Carles, Josep, Montserrat, M^a José, Valentín y Carlos.

Al Departamento Interuniversitario de Óptica de la Universidad de Alicante, por permitirme realizar todas las estancias necesarias de investigación en Terrassa para finalizar este trabajo. Gracias con confiar en mí como candidato, sin ser Doctor, en la defensa de la plaza-oposición A-2101 versada en la Óptica Fisiológica.

A Alejandro Bouzada, por haber participado en los primeros experimentos de este trabajo en los momentos de mi traslado profesional de Terrassa a Alicante.

A Jan Moróvic, del Color Imaging Institute, de la Universidad de Derby (Gran Bretaña), por proporcionarme información valiosa sobre la Carta ColorChecker para el desarrollo de este trabajo.

Introducción

Uno de los objetivos primarios del ser humano ha sido, es y será siempre el estudio y la simulación de sistemas biológicos, y en concreto de sistemas de visión o de captura de energía radiante. Así, el paso siguiente es el diseño y la fabricación de instrumentos o sistemas de visión artificial que reproduzcan las respuestas visuales humanas frente a cualquier tipo de estímulos visuales.

En concreto, y refiriéndonos a partir de ahora a la especificación de la banda espectral de la potencia radiante a la que es sensible el sistema visual humano (o Colorimetría), existen en la actualidad varias clases de instrumentos colorimétricos –espectroradiómetro, espectrofotómetro y colorímetro– que presentan inherentemente varias carencias para describir completamente las respuestas perceptuales cromáticas frente a multitud de parámetros visuales. El problema base se encuentra en que estos instrumentos llegan a presentar solamente codificaciones cromáticas intermedias, como por ejemplo las codificaciones triestímulo (psicofísica) CIE-XYZ o pseudo-perceptual CIE-L*a*b*. Pero, aún así, en espera que la investigación sobre la apariencia del color mejore mucho más, la característica inicial y crucial para cualquier nuevo instrumento colorimétrico es alcanzar la especificación triestímulo t_{XYZ} , puesto que cualquier nuevo modelo de apariencia que surja tomará los datos t_{XYZ} como entrada. En principio, el diseño estructural de estos instrumentos se fundamenta en un sistema artificial de visión o sensor optoelectrónico que convierte la energía radiante incidente en un sistema propio de codificación **ND**, pero siempre diferente del sistema considerado estándar t_{XYZ} . Por tanto, a expensas del conjunto de parámetros **p** de funcionamiento, cada instrumento se caracteriza por una transformación interna **f** tal que permite calcular $t_{XYZ} = f(\mathbf{ND}, \mathbf{p})$. Esta función **f** recibe genéricamente el nombre de modelo de caracterización o calibración del dispositivo/instrumento.

Desde el punto de vista metrológico, cada clase de instrumento posee evidentemente modelos diferentes de caracterización colorimétrica, a partir de los cuales, y junto con los diseños tecnológicos propios y conjuntos de parámetros **p** específicos de cada uno, permiten la comparación entre tipos diferentes e incluso entre variantes (marcas y modelos) de la misma clase. Entre los aspectos metrológicos a comparar destacan el control de las fuentes de incertidumbres sistemáticas, que afectan a la exactitud de la medida, y aleatorias, referentes a la precisión o repetibilidad de la medida. De esta manera, según estas prestaciones básicas y dependiendo del ámbito de uso, cada clase de instrumento colorimétrico presenta ventajas e inconvenientes.

Como ejemplo típico de versatilidad en la medida del color destaca el tele-espectroradiómetro, el cual permite obtener la distribución espectral de potencia radiante absoluta (en $W/sr \cdot m^2$) del estímulo visual, para a continuación implementar los algoritmos colorimétricos necesarios para calcular los valores triestímulo absolutos t_{XYZ} (en cd/m^2) con gran exactitud y precisión. Tiene, sin embargo, algunos inconvenientes como su alto precio de base, al igual que sus accesorios (a veces necesarios según el tipo de aplicación), y el campo reducido de visión, lo cual lo imposibilita para tomar un gran número de medidas con una visualización única de la escena. Si pudiéramos utilizar como dispositivo base una cámara CCD-RGB para transformarla en un tele-colorímetro, no cabe duda que su bajo precio relativo y su versátil campo de visión la convertiría en un instrumento tele-colorimétrico de amplias prestaciones

para numerosas aplicaciones científicas (implementación de modelos de apariencia del color en sistemas de visión artificial) e industriales (microprocesos, televisión, industria textil, gemología, biología, etc), donde el control del color en los productos manufacturados resulta clave para alcanzar una calidad visual final apreciable.

Desde otro aspecto paralelo, ya que la mayor parte de la información que utilizamos para desenvolvemos en nuestro entorno es eminentemente de índole visual, las tecnologías actuales disponibles para generar, almacenar, procesar y transferir imágenes coloreadas carecen de un control universal del sistema de codificación del color asociado a la imagen, ya sea en su etapa inicial de generación, o en las posteriores que sean necesarias para llegar al resultado perceptualmente deseado. Así, los dispositivos de captura (escáneres y cámaras) representarían uno de los variados métodos de generación de imágenes; los dispositivos de visualización –monitores CRT, pantallas LCD, etc– representarían una fase intermedia de transferencia o de control previo antes de alcanzar el resultado visual final mediante un dispositivo de impresión como una impresora de chorro de tinta o una imprenta offset. El problema básico subyacente en el control del color en las tecnologías multimedia es cómo gestionar la variedad de espacios o sistemas de color dependientes de cada dispositivo.

La solución general pasa inevitablemente por conseguir la función $f(\mathbf{ND}, \mathbf{p})$ de caracterización colorimétrica CIE-XYZ de cada tipo de dispositivo, siendo \mathbf{ND} la variable característica ligada al proceso directo de generación o control del color, y \mathbf{p} , el conjunto de parámetros de funcionamiento del dispositivo que puede alterar en un segundo plano el tipo de reproducción de color conseguida. Así, por ejemplo, en el caso de los dispositivos de captura, \mathbf{ND} representaría los niveles digitales RGB de un escáner/cámara, y el conjunto \mathbf{p} incluiría el método de separación espectral de los canales de color, el tipo de sensor optoelectrónico, etc. En el caso de los dispositivos de visualización del tipo CRT (*Cathod Ray Tube*), \mathbf{ND} representaría las señales eléctricas de excitación de bombardeo de electrones sobre los fósforos RGB de la pantalla, mientras que el conjunto \mathbf{p} incluiría la variedad físico-química de los fósforos y los controles externos de brillo y contraste de la pantalla. Del mismo modo, en el caso de una impresora de chorro de tinta, \mathbf{ND} representaría los niveles proporcionales de las tintas cian (C), magenta (M), amarilla (Y) y negra (K) de las tramas de puntos coloreados CMYK, mientras que el conjunto \mathbf{p} incluiría el tipo de papel o sustrato, la composición de las tintas, la interacción físico-química entre las tintas y el papel, etc.

Aunque parezca obvio ahora la necesidad de caracterizar colorimétricamente según $\mathbf{t}_{XYZ} = f(\mathbf{ND}, \mathbf{p})$ cada uno de estos tipos de dispositivos multimedia, no existe un algoritmo general válido para cualquier grupo. Lo ideal sería que la función f de caracterización fuera analítica o monótona (monovaluada), o sea paramétrica según \mathbf{ND} y \mathbf{p} , e invertible (que existiera analíticamente la función $\mathbf{g} = f^{-1}$), de forma que igual que podríamos predecir el color resultante \mathbf{t}_{XYZ} a partir de \mathbf{ND} y \mathbf{p} dados, pudiéramos averiguar qué conjunto \mathbf{ND} y \mathbf{p} está biunívocamente relacionado con un color \mathbf{t}_{XYZ} determinado. Para ello, habría que efectuar el número suficiente de medidas experimentales para ajustar matemáticamente los resultados colorimétricos \mathbf{t}_{XYZ} al conjunto $\{\mathbf{ND}, \mathbf{p}\}$ mediante un método de minimización de una función determinada de desviación o error. Generalmente, este conjunto de medidas recibe el nombre de conjunto-entrenamiento (*training set*), mientras que suele ser otro grupo de colores el que se utiliza para

probar la eficacia del método de ajuste, de ahí que se conozca convencionalmente como el conjunto-test (*control set*). Habitualmente, el conjunto-entrenamiento es espectralradiométrico, y el conjunto-test no necesita serlo, puesto que los modelos colorimétricos de caracterización se ajustan a la predicción de los valores triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} y no a la distribución espectral de potencia radiante subyacente en el color psicofísico. Esto es lo que ocurre genéricamente, por ejemplo, en la caracterización colorimétrica de monitores CRT e impresoras de chorro de tinta: un modelo físico-matemático más o menos sencillo, basado en los principios físicos y tecnológicos del dispositivo (es decir, utilizando o controlando al menos parcialmente el conjunto \mathbf{p}), permite simular con bastante éxito el control y manipulación del color de las imágenes en sus respectivos formatos.

Ahora bien, la situación anterior está bastante idealizada y nunca se aplica por ejemplo para los dispositivos de captura, ya sea escáneres o cámaras. Por tanto, para esta clase de dispositivos multimedia de color, debe recurrirse a algoritmos de caracterización colorimétrica estrictamente empíricos (*ad hoc*), o sea, completamente matemáticos como, por ejemplo, la generación de tablas de interpolación polinómica (LUTs, *Look-Up Tables*), sin tener en cuenta un modelo físico-tecnológico sobre el funcionamiento del dispositivo. En estos casos, el conjunto \mathbf{p} incluye muy pocos parámetros, lo cual limita exclusivamente la eficacia del modelo colorimétrico al conjunto de entrenamiento, siendo casi siempre un conjunto de colores en formato CIE-XYZ, nunca con información espectralradiométrica. Centrándonos definitivamente en el tema central de este trabajo, todas las propuestas actuales de caracterización colorimétrica de dispositivos de captura se basan en el enfoque empírico: fijando el nivel de intensidad y la cromaticidad de la iluminación, la variabilidad estadística de las reflectancias espectrales de los objetos de la escena, y el conjunto \mathbf{p} de parámetros de funcionamiento del dispositivo de captura, se consigue establecer con acierto una transformación colorimétrica entre el espacio de color RGB del dispositivo y los valores triestímulo relativos \mathbf{t}'_{XYZ} (sin unidades fotométricas), consiguiendo así convertir un escáner o una cámara en un instrumento colorimétrico con unas prestaciones más o menos controladas.

La originalidad y novedad de esta Tesis Doctoral consistirá en la presentación de un algoritmo general de caracterización colorimétrica del tipo $\mathbf{t}_{XYZ} = f(\mathbf{ND}, \mathbf{p})$ en cd/m^2 , sin fijar las características espectralradiométricas de la fuente luminosa ni de los objetos, que incorpora por primera vez un parámetro clave en el funcionamiento y versatilidad de las cámaras digitales como es la apertura relativa N del objetivo fotográfico, como variable clave para adaptar el rango dinámico local de sensibilidad luminosa del dispositivo al rango dinámico mucho más extenso de iluminación de una escena real. Con la incorporación de este parámetro clave, el modelo físico-matemático propuesto de caracterización colorimétrica de una cámara digital convencional permite analizar y controlar los errores sistemáticos y aleatorios de la medida colorimétrica obtenida, por lo que se puede comparar directamente con un tele-espectralradiómetro. A diferencia de modelos anteriores, el conjunto-entrenamiento de la propuesta es estrictamente espectralradiométrico, pero también hemos incorporado un conjunto-test basado en medidas espectralradiométricas sin que se haga uso previo de ellas para calcular la eficacia del algoritmo propuesto de caracterización colorimétrica.

Creemos, por tanto, que presentamos en este trabajo un algoritmo general de caracterización de un dispositivo de captura (escáner, cámara) como un instrumento de medida del color. El algoritmo en sí

consta de dos fases principales: una, de caracterización espectral; y otra, de caracterización colorimétrica o evaluación del nivel de reproducción del color del dispositivo de captura. La primera consiste básicamente en la determinación experimental de las curvas de sensibilidad espectral absoluta de una cámara CCD-RGB acoplada a una tarjeta digitalizadora. La segunda, consiste en aplicar una transformación general $t_{XYZ} = f(\mathbf{ND}, \mathbf{p})$ con balance de adaptación luminosa para comparar de forma cuantitativa y cualitativa los grados de exactitud y precisión de la cámara digital con respecto a un tele-espectroradiómetro. Esto supondrá, en primer lugar, evaluar las desviaciones de medida como tele-colorímetro absoluto en estado bruto de reproducción; y, en segundo lugar, aplicar un algoritmo matemático sencillo de corrección de color para minimizar los errores colorimétricos sistemáticos iniciales o brutos.

La memoria está organizada de la siguiente forma:

El Capítulo 1 está dedicado a la medida y reproducción aditiva del color, intentando centrar siempre el problema en la transformación colorimétrica de los datos digitales RGB de un dispositivo de captura en valores triestímulo CIE-XYZ, es decir, a la transformación $t_{XYZ} = f(\mathbf{ND}, \mathbf{p} = \text{cte})$.

El Capítulo 2 está dedicado plenamente a los aspectos teóricos y tecnológicos de la Fotografía Digital, sobretodo en la búsqueda de un modelo general de caracterización espectrocolorimétrica y optoelectrónica que permita comparar a nivel absoluto dispositivos de captura de marcas y/o modelos diferentes. Éste es, por supuesto, el propósito final de cualquier comité científico de estandarización de la calidad, lo cual supone atreverse a investigar cómo el conjunto de parámetros \mathbf{p} de funcionamiento influye en la salida cromática final \mathbf{ND} . Por tanto, este capítulo incluye también los aspectos más relevantes de la estandarización internacional de la Fotografía Digital, sobretodo lo que estén relacionados con la caracterización del color de estos dispositivos multimedia.

El Capítulo 3 sintetiza el estado del arte sobre el problema que aborda este trabajo a partir de todos los conceptos desarrollados en los capítulos anteriores. Con ello, es posible generalizar los objetivos de esta tesis para escáneres y cámaras, aunque se haya tomado el enfoque más complejo al seleccionar una cámara. De esta forma, esta sección presenta un sumario de todos los pasos que se desarrollarán para convertir una cámara CCD-RGB en un instrumento tele-colorimétrico.

El Capítulo 4 describe en primer lugar los montajes experimentales utilizados en el desarrollo y resolución de este trabajo, para a continuación, centrarse en el sub-algoritmo de caracterización espectral.

El Capítulo 5 se centra directamente en desarrollar el sub-algoritmo de caracterización colorimétrica, aprovechando para ello los resultados espectrales anteriores.

El Capítulo 6 resume a modo de conclusión todos los resultados obtenidos y hace, además, hincapié en el interés industrial y la transferencia tecnológica de estos resultados.

Por último, el Capítulo 7 desarrolla brevemente las investigaciones futuras que se pueden proseguir a partir de los resultados y las conclusiones obtenidos.

Los dos anexos de este trabajo se centran en la presentación de un modelo de apariencia de colores aislados (Anexo A), el cual es necesario para evaluar el nivel de reproducción del dispositivo de captura, ya sea en su estado bruto o compensado, mediante el algoritmo denominado índice de reproducción del color (Anexo B).

Capítulo 1. Medida y reproducción del color

Vamos a presentar en los dos capítulos siguientes los conocimientos imprescindibles para enfocar correctamente la definición y resolución de esta tesis doctoral. El planteamiento que seguiremos es enmarcar primero el problema físico-matemático original que subyace en el propósito de este trabajo, para pasar a continuación a aspectos más específicos ligados a este problema, los cuales permitirán enfocarlo claramente en una dimensión, que será fundamental para los aspectos complementarios de índole tecnológico del capítulo siguiente.

1.1 Sobre la medida del color

La *Comisión Internacional de la Iluminación* (CIE, *Commission Internationale de l'Eclairage*) establece claramente en sus documentos de estandarización (CIE 1986; CIE 1987) que la medida del color o *Colorimetría* es la ciencia que se encarga de especificar con magnitudes físicas la banda espectral de la potencia radiante a la que es sensible el Sistema Visual Humano (SVH).

Esto significa que en la comprensión inicial del vocablo "color" debe distinguirse entre *color psicofísico* y *psicológico* o *percibido* (Grum, Bartleson 1980, 1-9). El color es un mundo de información (invención) de nuestro cerebro visual. Es así porque el proceso de la visión se basa en la recolección de energía radiante procedente del mundo exterior, en su codificación a través de fases diferentes, y en su interpretación posterior de acuerdo a variables perceptuales cromáticas diseñadas en el área visual del cerebro. La naturaleza de la luz visible captada por el sistema visual humano (SVH) puede ser muy diversa: de fuentes luminosas naturales o artificiales, de dispositivos aditivos tales como monitores, proyectores, etc, o de dispositivos sustractivos (Fotografía Fotoquímica, Artes Gráficas, etc); pero siempre el sistema visual humano registrará esta energía radiante mediante un proceso claramente aditivo. Este proceso se caracteriza por su carácter trivariante: tres números son suficientes para codificar/interpretar una sensación luminosa de color. Esto significa que la Colorimetría está siempre ligada al conocimiento que tenemos sobre la *Percepción del Color*. Así, color psicológico denota el aspecto de la percepción visual por el cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de visión del mismo tamaño, forma y estructura, tales que son causadas por diferencias en la composición espectral de la potencia radiante que incide en el observador. Mientras que, color psicofísico denota una característica de la energía radiante visible por la que un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de visión del mismo tamaño, forma y estructura, tales que son causadas por diferencias en la composición espectral de la energía radiante que incide en el observador. Según estas recomendaciones de la CIE, el color psicofísico es algo que puede especificarse mediante una terna de números, más conocida como *especificación triestímulo* o *valores triestímulo* de la potencia radiante incidente sobre los ojos de un observador; mientras que el color percibido es de carácter más privado, inherente al observador, por lo que un método de medida o especificación basado en el anterior se necesita y se denota como *modelo de apariencia del color* (Fairchild 1998).

La Filosofía de la Ciencia define como medida al método de asignar atributos o números a las cosas. Pero tal asignación no está exenta de un formalismo matemático básico. Desde un enfoque reducido, la aditividad y su consecuencia geométrica, distancia, son fundamentales para el problema de lo que constituye una medida. El concepto de distancia métrica requiere que una medida válida es aquella que puede describirse mediante una función matemática que cumple las propiedades siguientes:

1. La distancia entre dos puntos cualesquiera nunca es negativa: $d(x, y) \geq 0$
2. La distancia entre dos puntos idénticos es siempre cero: $d(x, x) = 0$
3. La distancia es simétrica: $d(x, y) = d(y, x)$
4. La suma de distancias entre dos puntos a través de un tercer punto es siempre igual o más grande que la distancia directa entre estos dos puntos: $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$

El significado de distancia (diferencias, intervalos) puede generalizarse como *norma*:

Ecuación 1.1

$$d(x, y) = \|\mathbf{X} - \mathbf{Y}\|^r = \sum_i^n [|x_i - y_i|^r]^{\frac{1}{r}} \quad \text{donde } r \geq 1$$

El exponente r puede interpretarse como el parámetro de peso. Cuando $r = 1$, todas las componentes tienen igual peso o ponderación. A medida que el exponente r aumenta, las componentes vendrán ponderadas progresivamente según sus tamaños. Todas las distancias de norma son invariantes a transformaciones afines o de traslación de coordenadas, pero solamente el caso especial de $r = 2$ son también invariantes a rotaciones. Ese caso especial se denomina geometría euclídea, con la que estamos tan familiarizados en las ciencias físicas. Por otro lado, esto no parece que se puede aplicar a las ciencias psicológicas o perceptuales. Las implicaciones de esto sobre el concepto y la medida del color son que la CIE ha definido color psicofísico como que puede especificarse según magnitudes físicas que cumplen las propiedades geométricas euclídeas, pero el color perceptual está involucrado con cantidades o magnitudes no físicas que pueden cumplir propiedades geométricas no euclídeas. A partir de esta observación, debería estar bastante claro que no podemos pasar sin impunidad de las especificaciones de color psicofísico a las de color percibido.

Existe también otro enfoque en que las medidas de las dos clases de color pueden diferir. Tiene que ver con la forma con que las escalas de las medidas satisfacen los requerimientos de norma (Ec. 1.1). Obviando los formalismos matemáticos, el problema se plantea al considerar las clases de escalas que están involucradas en la medida del color. Ordenadas según aumenta la potencia matemática, tenemos:

1. *Escalas nominales*: determinan exclusivamente si dos cosas son o no iguales. Satisfacen la condición siguiente de invariancia: si $y = y, x = x \Rightarrow y \neq x$. La escala nominal es la escala menos potente a la que

se puede referir como escala de medida. Ejemplos: la numeración de los jugadores de fútbol o de baloncesto.

2. *Escalas ordinales*: además de verificar la igualdad, determinan el orden en que las cosas se sitúan unas respecto a las otras. Satisfacen la invariancia de monotonicidad: si $y > x$, $x > z \Rightarrow y > z$. Ejemplos: la escala Mohs de dureza de los minerales o la escala Richter de gradación del daño de los terremotos.
3. *Escalas interválicas*: determinan además la igualdad de intervalos. Satisfacen la condición invariante $y = a \cdot x + b$, la cual significa que los cocientes de los intervalos permanecen constantes sobre cualquier transformación lineal de la escala. Ejemplos: las escalas de temperatura de Celsius ($^{\circ}\text{C}$), de carácter internacional, o de Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), de ámbito anglosajón.
4. *Escalas proporcionales*: determinan además la igualdad de magnitudes. Satisfacen la condición invariante $y = a \cdot x$, la cual significa que los cocientes de las magnitudes permanecen invariantes sobre cualquier transformación lineal de la escala que pase por el origen. Ejemplos: la longitud en metros o la temperatura en kelvins.

La Colorimetría se basa en la determinación de los valores triestímulo (Brill 1996; Lang 1997), en la información nominal del color percibido provocada por la estimulación aditiva de la potencia radiante que incide en los ojos de un observador. Con el código "nominal" nos referimos a una estimulación sobre la escala proporcionada de magnitudes físicas. Si nuestro objetivo es de utilizar esta descripción para hacer Colorimetría Diferencial, el color percibido será *psicométrico*, no psicofísico, y, por tanto, se regirá por las reglas de las escalas interválicas. Si estamos interesados en cuestiones sobre Apariencia del Color, el color percibido denominado ahora *psicocuantitativo* se regirá por las reglas de las escalas proporcionales (Grum, Bartleson 1980, 1-9; Hunt 1995, 703).

El formalismo matemático que subyace en estas aseveraciones preliminares es el siguiente. La luz visible incidente sobre el sistema visual humano o sobre cualquier sistema fotosensor puede representarse de forma vectorial, como una función espectral \mathbf{b} de la energía radiante o distribución espectral de potencia radiante (flujo, radiancia, irradiancia) con dimensión N_{λ} entre el intervalo $[380, 780]$ nm con pasos $\Delta\lambda = 5$ ó 10 nm. Si los elementos condicionantes de la Colorimetría son tres: el objeto, la fuente luminosa y el sistema fotosensor; podemos identificar cada uno de ellos con una variable característica. El objeto se comporta ante la radiación electromagnética de manera que parte de ella puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Por tanto, las características intrínsecas del objeto ante la potencia radiante son los factores de reflexión $\rho(\lambda)$, de absorción $\alpha(\lambda)$ y de transmisión $\tau(\lambda)$. Si ahora consideramos la característica emisiva de una fuente luminosa extensa como radiancia espectral $L_e(\lambda)$, en unidades métricas $\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$, la potencia radiante que llega a incidir sobre los ojos de un observador o, en su caso, sobre el plano focal de un fotodetector, es el resultado de la potencia radiante incidente por la característica intrínseca del objeto. Por tanto, parece acertado identificar al vector-luz \mathbf{b} como *estímulo-color* (Ec. 1.2). Ahora queda enlazar esto con la característica intrínseca del sistema fotosensor, o, en su caso, del sistema visual humano.

Ecuación 1.2

$$\mathbf{b} = \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \boldsymbol{\rho} \quad , \text{ es decir} \quad \begin{bmatrix} b_{\lambda_1} \\ b_{\lambda_2} \\ \vdots \\ b_{\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times 1} = \begin{bmatrix} L_{e\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{e\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & L_{e\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times N_\lambda} \cdot \begin{bmatrix} \rho_{\lambda_1} \\ \rho_{\lambda_2} \\ \vdots \\ \rho_{\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times 1}$$

con $\text{diag}(\mathbf{x})$ como matriz diagonal del vector \mathbf{x} , y, donde el significado de la expresión es totalmente equivalente si sustituimos el factor de reflexión $\boldsymbol{\rho}$ por el de transmisión $\boldsymbol{\tau}$.

Esta representación vectorial está completamente caracterizada por las propiedades matemáticas del Álgebra Lineal (Brainard 1995; Trussell 1991): condiciones de linealidad (escalado de la intensidad de la luz) y existencia de vectores base linealmente independientes (Ec. 1.3). La determinación de una base N_b -dimensional de vectores independientes a partir de datos espectrales se obtiene a partir del denominado análisis unimodal de componentes, a través del uso del enfoque de *componentes principales* (Vrhel, Trussell 1992), que analizaremos profundamente más adelante, o la *descomposición del valor singular* (*Singular Value Decomposition* - SVD), el cual toma las primeras N_b columnas de \mathbf{U} y las primeras N_b filas de $\mathbf{D}\mathbf{V}^t$ (Ec.1.4).

Ecuación 1.3

$$\mathbf{b} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a} \quad , \text{ es decir} \quad \begin{bmatrix} b_{\lambda_1} \\ b_{\lambda_2} \\ \vdots \\ b_{\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times 1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_1 & \tilde{\mathbf{b}}_2 & \cdots & \tilde{\mathbf{b}}_{N_b} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times N_b} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{N_b} \end{bmatrix}_{N_b \times 1}$$

Ecuación 1.4

$$\mathbf{X} = [\mathbf{b}_1 \quad \mathbf{b}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{b}_{N'}]_{N_\lambda \times N'} \quad \text{y buscamos } \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a} \text{ estimador} / \|\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}\|^2 < \varepsilon$$

$$\text{como } \mathbf{X} = \mathbf{U} \cdot (\mathbf{D}\mathbf{V}^t), \text{ si } N' > N_\lambda \Rightarrow \hat{\mathbf{X}} = [\mathbf{U}]_{N_\lambda \times N_b} \cdot [\mathbf{D}\mathbf{V}^t]_{N_b \times N'} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a}$$

Si la estimación $\hat{\mathbf{X}}$ no es óptima, la única representación de las propiedades espectrales de la luz es la distribución espectral completa de la potencia radiante. Sin embargo, un sistema fotosensor de k canales o sub-sistemas fotosensores no codifica toda la información disponible de la distribución espectral de potencia radiante. Es más, el concepto de k -variancia indica que un conjunto de k vectores-luz $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \dots, \mathbf{p}_k$ denominados *primarios* son suficientes para "estimar" un vector-luz \mathbf{b} cualquiera bajo un modelo lineal donde los pesos reciben el nombre de valores triestímulo (Ec. 1.5), más bien como valores "k-estímulo".

Ecuación 1.5

$$\mathbf{b} \equiv \mathbf{P} \cdot \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2 & \cdots & \mathbf{p}_k \end{bmatrix}_{N_\lambda \times k} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_k \end{bmatrix}_{k \times 1}$$

donde el signo \equiv tiene la interpretación amplia de estimación o de equivalencia matemática, pero que recibirá matizaciones más adelante. Tal amplia interpretación debe satisfacer las propiedades matemáticas de reflexividad, simetría y transitividad, entre las que se derivan los corolarios de proporcionalidad y aditividad (Ec. 1.6).

Ecuación 1.6

proporcionalidad: si $\mathbf{b} \equiv \mathbf{P} \cdot \mathbf{t} \Rightarrow \alpha \mathbf{b} \equiv \mathbf{P} \cdot (\alpha \mathbf{t})$ α escalar
 aditividad: si $\mathbf{b}_1 \equiv \mathbf{P} \cdot \mathbf{t}_1$ y $\mathbf{b}_2 \equiv \mathbf{P} \cdot \mathbf{t}_2 \Rightarrow \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 \equiv \mathbf{P} \cdot (\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2)$

Las consecuencias de estos corolarios son muy importantes para caracterizar el comportamiento físico-matemático del sistema fotosensor, o en su caso, el sistema visual humano (SVH). Dado un conjunto de k primarios, si efectuamos N_b "equivalencias de color" sobre los vectores base \mathbf{b}_i , los valores triestímulo correspondientes $\tilde{\mathbf{t}}_i$ dispuestos matricialmente en \mathbf{T}_B permiten calcular los valores triestímulo \mathbf{t} de cualquier luz \mathbf{b} descrita por el modelo lineal de vectores base \mathbf{b}_i (Ec. 1.7). Las filas de la matriz \mathbf{T}_B se denominan *funciones de igualación del color* (*Color-Matching Functions* - CMF), que nunca representan distribuciones espectrales de potencia radiante, pero que sí van ligadas estrechamente por la relación de identidad al conjunto de primarios $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_k$ elegido para la "equivalencia de color".

Ecuación 1.7

$$\text{si } \mathbf{b} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{t} = \mathbf{T}_B \cdot \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{t}}_1 & \tilde{\mathbf{t}}_2 & \cdots & \tilde{\mathbf{t}}_{N_b} \end{bmatrix}_{k \times N_b} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{N_b} \end{bmatrix}_{N_b \times 1}$$

La forma más sencilla de utilizar el potencial matemático de los modelos lineales es escoger el modelo identidad para los vectores base. Ésta es la decisión de la CIE, la elección del espectro o estímulo equienergético \mathbf{E}_λ como modelo base para sus espacios de representación del color, de sus primarios \mathbf{P} y funciones de igualación asociados \mathbf{T} , verificándose siempre la relación de identidad $\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{P} = \mathbf{I}$ (Ec. 1.8), y, por tanto, una estimación de \mathbf{P} podría ser $\hat{\mathbf{P}} = \mathbf{T} \cdot (\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{T})^{-1}$. Esto significa que los conceptos "primarios" y "funciones de igualación" son matemáticamente duales: conocido uno, podemos estimar el otro. Así, se verificará que

Ecuación 1.8

$$\mathbf{t} = \mathbf{T}^t \cdot \mathbf{b} = \begin{bmatrix} t_{p_1\lambda_1} & t_{p_1\lambda_2} & \cdots & t_{p_1\lambda_n} \\ t_{p_2\lambda_1} & t_{p_2\lambda_2} & \cdots & t_{p_2\lambda_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{p_k\lambda_1} & t_{p_k\lambda_2} & \cdots & t_{p_k\lambda_n} \end{bmatrix}_{k \times N_\lambda} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times 1}$$

$$\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{P} = \begin{bmatrix} t_{p_1\lambda_1} & t_{p_1\lambda_2} & \cdots & t_{p_1\lambda_n} \\ t_{p_2\lambda_1} & t_{p_2\lambda_2} & \cdots & t_{p_2\lambda_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{p_k\lambda_1} & t_{p_k\lambda_2} & \cdots & t_{p_k\lambda_n} \end{bmatrix}_{k \times N_\lambda} \cdot \begin{bmatrix} p_{1\lambda_1} & p_{2\lambda_1} & \cdots & p_{k\lambda_1} \\ p_{1\lambda_2} & p_{2\lambda_2} & \cdots & p_{k\lambda_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1\lambda_n} & p_{2\lambda_n} & \cdots & p_{k\lambda_n} \end{bmatrix}_{N_\lambda \times k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{k \times k} = \mathbf{I}$$

Por tanto, es muy importante aclarar aquí que aunque los conceptos *sensibilidad espectral* y función de igualación son matemáticamente equivalentes, no lo son desde el punto de vista físico. Las funciones de igualación no tienen unidades físicas, ni están asociadas a magnitudes físicas, al igual que los valores triestímulo (Brill 1996; Lang 1997). En cambio, la sensibilidad espectral del sistema fotosensor tiene como unidad física el cociente resultante de la unidad métrica de respuesta por la unidad radiométrica de la potencia radiante incidente. Pero, las equivalencias matemática y física se establecen por un factor de escalado que, en ocasiones, juegan un papel clave para entender completamente los conceptos de medida del color explicados anteriormente. Esto nos conduce a otra dualidad importante en la medida y reproducción del color: la especificación de colores aislados y relacionados, la diferencia entre colorimetría absoluta y relativa, a veces bastante sutil.

1.1.1 Especificación de colores aislados y relacionados

Un *color aislado* es un color percibido, de forma que pertenece a un área u objeto visto de forma aislada del resto de los otros estímulos-color. Un *color relacionado* es un color percibido, de forma que pertenece a un área u objeto en relación con otros estímulos-color (CIE 1987; Fairchild 1998). Recordemos entonces que el color percibido depende de la distribución espectral de potencia radiante del estímulo-color, del tamaño, de la forma, de la estructura, del entorno del área del estímulo, del estado de adaptación del sistema visual del observador, y, de la experiencia del observador ante situaciones prevaletientes o similares de observación. Aunque esta aclaración abre una puerta a una lista amplísima de factores físicos, fisiológicos, psicológicos y de tipo cognitivo que influyen en la apariencia del color, es evidente que una ínfima parte de ellos se tratarán en este trabajo; pero sí, por ejemplo, la cuestión sobre el número mínimo de atributos perceptuales para describir la apariencia de colores aislados y relacionados.

El punto de partida sobre esta cuestión es la especificación triestímulo CIE. Denotaremos como \mathbf{T}_{XYZ} a las funciones de igualación del color (cmf del inglés *color matching functions*) del observador patrón o estándar CIE-1931 XYZ (Fig. 1.1). Esto implica que la CIE considera como observador patrón un sistema fotosensor lineal de dimensionalidad trivariante $\mathbf{T}_{XYZ} = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]$, cuyas sensibilidades espectrales

relativas coinciden con las funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} . De esta forma, los valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} de un estímulo-color \mathbf{b} resultan ser:

Ecuación 1.9

$$\mathbf{t}_{XYZ} = K_m \cdot \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot (\mathbf{b} \cdot \Delta\lambda)$$

$$\mathbf{t}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K_m \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{380} & \bar{x}_{390} & \dots & \bar{x}_{780} \\ \bar{y}_{380} & \bar{y}_{390} & \dots & \bar{y}_{780} \\ \bar{z}_{380} & \bar{z}_{390} & \dots & \bar{z}_{780} \end{bmatrix}_{3 \times 41} \cdot \begin{bmatrix} b_{380} \cdot \Delta\lambda \\ b_{390} \cdot \Delta\lambda \\ \vdots \\ b_{780} \cdot \Delta\lambda \end{bmatrix}_{41 \times 1}, \text{ con } K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

donde es importante considerar de momento la *constante de conversión fotópica* K_m y la resolución o *anchura de banda espectral* $\Delta\lambda = 10$ nm en el intervalo visible [380, 780] nm del espectro electromagnético. No obstante, para simplificar la notación y, salvo que no se indique lo contrario, dejaremos implícita la intervención de K_m y $\Delta\lambda$.

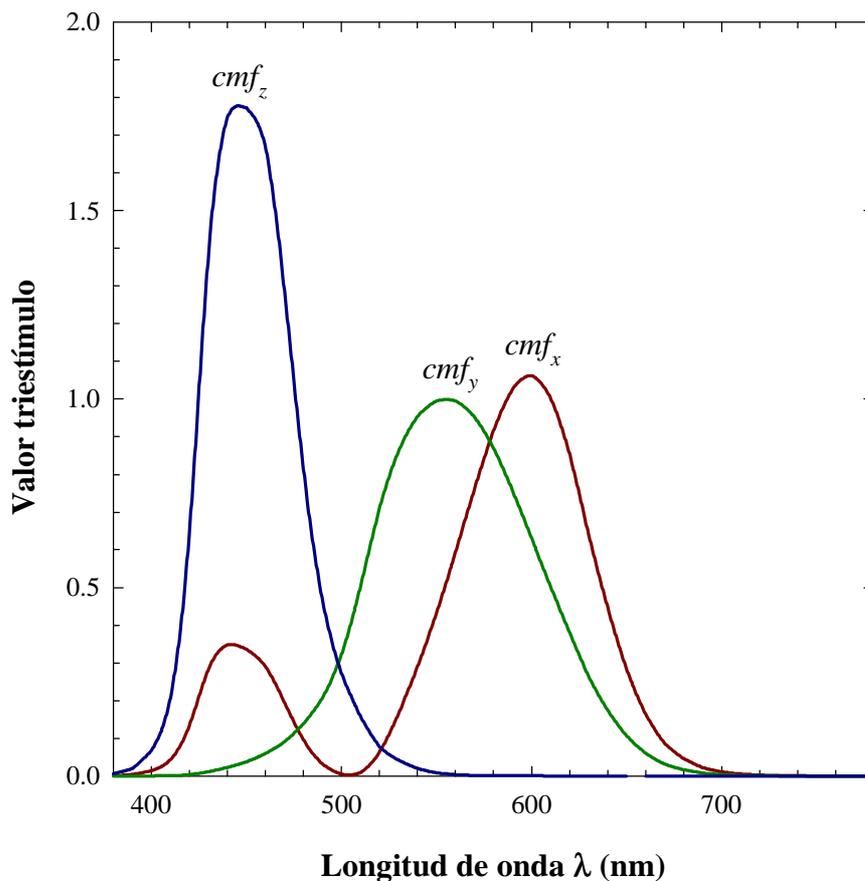


Figura 1.1: Funciones de igualación del observador patrón CIE-1931 XYZ: \bar{x} denotada como cmf_x , \bar{y} como cmf_y y \bar{z} como cmf_z .

Aclaremos que denotamos \mathbf{t}_{XYZ} como valores triestímulo absolutos puesto que la terna $[X, Y, Z]^t$ está representada con la unidad física cd/m^2 , debido a la constante de conversión fotópica K_m y la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ de la fuente luminosa extensa. Esto sería la descripción de la colorimetría absoluta, de la que parten dos versiones de colorimetría relativa.

- *Colorimetría "relativa-absoluta"*: en el sentido de que la terna triestímulo original o absoluta es ponderada por la terna triestímulo del estímulo equienergético \mathbf{t}_E . Si \mathbf{t}_{XYZ} son los valores triestímulo absolutos del estímulo-color \mathbf{b} y \mathbf{t}_E son los valores triestímulo absolutos del estímulo equienergético \mathbf{E}_λ bajo las mismas condiciones radiométricas de observación que \mathbf{b} , entonces el paso de valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} a valores triestímulo relativos \mathbf{t}'_{XYZ} viene dada por

Ecuación 1.10

$$\mathbf{t}'_{XYZ} = k_E \mathbf{t}_{XYZ} \quad , \text{ con } k_E = \frac{1}{K_m (\bar{\mathbf{y}}^t \cdot \mathbf{L})}$$

En esencia, es normalizar los valores triestímulo absolutos (en cd/m^2) por la luminancia L_E (cd/m^2) del estímulo equienergético. Dado que el estímulo equienergético \mathbf{E}_λ se define vectorialmente como $[1, 1, \dots, 1]^t$, es fácil comprobar que los productos escalares $(\bar{\mathbf{x}}^t \cdot \mathbf{E}_\lambda)$, $(\bar{\mathbf{y}}^t \cdot \mathbf{E}_\lambda)$, $(\bar{\mathbf{z}}^t \cdot \mathbf{E}_\lambda)$ valen igual, en concreto 21.3714 (Wyszecki, Stiles 1982) con $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$. Entonces, la terna triestímulo relativa $\mathbf{t}'_E = [1, 1, 1]^t$. Por ejemplo, si consideramos la distribución espectral de potencia radiante que simula mejor la luz diurna, conocida como *iluminante D65*, la terna relativa $\mathbf{t}'_{D65} = [0.95017, 1, 1.08813]^t$.

- *Colorimetría "completamente-relativa"*: en el sentido de que la terna triestímulo original o absoluta es ponderada por la terna triestímulo \mathbf{t}_W del estímulo-color asociado a la fuente luminosa L_e o al estímulo blanco de referencia ρ_W de la escena. Si \mathbf{t}_{XYZ} son los valores triestímulo absolutos del estímulo-color \mathbf{b} y \mathbf{t}_W son los valores triestímulo absolutos de la fuente luminosa \mathbf{L} o del blanco de referencia ρ_W bajo las mismas condiciones radiométricas de observación que \mathbf{b} , entonces el paso de valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} a valores triestímulo relativos \mathbf{t}''_{XYZ} viene dada por

Ecuación 1.11

$$\mathbf{t}''_{XYZ} = [\text{diag}(\mathbf{t}_W)]^{-1} \cdot \mathbf{t}_{XYZ}$$

Dado que el estímulo-color $\mathbf{b}_W = \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \rho_W \neq [1, 1, \dots, 1]^t$, es fácil comprobar que los productos escalares $(\bar{\mathbf{x}}^t \cdot \mathbf{b}_W)$, $(\bar{\mathbf{y}}^t \cdot \mathbf{b}_W)$, $(\bar{\mathbf{z}}^t \cdot \mathbf{b}_W)$ no valen igual. Entonces, la terna triestímulo relativa $\mathbf{t}'_W \neq [1, 1, 1]^t$, pero $\mathbf{t}''_W = [1, 1, 1]^t$. Por ejemplo, si consideramos la distribución espectral de potencia radiante que simula mejor la luz diurna, conocida como *iluminante D65*, la terna relativa $\mathbf{t}'_{D65} = [0.95017, 1, 1.08813]^t$, pero $\mathbf{t}''_{D65} = [1, 1, 1]^t$.

Aunque el paso entre ambas colorimetrías relativas parece obvio (Ec. 1.12), la ambigüedad con que se usan indistintamente dificulta la comprensión de los conceptos de medida/especificación y reproducción del color, aspecto muy importante para definir el objetivo de esta tesis doctoral.

Ecuación 1.12

$$\mathbf{t}_{XYZ}'' = \left(\frac{1}{k_E} \right) [\text{diag}(\mathbf{t}_w)]^{-1} \cdot \mathbf{t}_{XYZ}'$$

Estas diferencias "sutiles" equivalen al problema dual entre la especificación de colores aislados y colores relacionados. Consideremos el caso de la medida del color de un *tele-espectrocolorímetro*, un *espectrofotómetro* (Artigas, et al. 1995; Wyszecki, Stiles 1982) y la reproducción del color mediante una *vídeo-cámara digital* (Perales 1994), de uso tan extendido en los reportajes videográficos de bodas. En primer lugar, y tal como se verá más adelante, el tele-espectrocolorímetro es un dispositivo optoelectrónico que registra inicialmente de forma absoluta la distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} que incide sobre su sistema fotosensor y un microprocesador calcula a continuación los valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} . En la mayoría de los casos, salvo errores graves de diseño óptico, los efectos de difusión (*flare*) o scattering debido a zonas contiguas al estímulo-color enfocado son despreciables. Por tanto, esta especificación del color es claramente aislada y absoluta. En segundo lugar, un espectrofotómetro es un dispositivo optoelectrónico de medida del color, basado en la comparación entre las distribuciones espectrales de potencia radiante de un objeto-color y el blanco de referencia usado, para calcular mediante un microprocesador la reflectancia espectral $\rho(\lambda)$ del objeto (o la transmitancia espectral $\tau(\lambda)$, si fuera el caso), bajo unas condiciones geométricas de visualización bien determinadas. El propósito final de la determinación de la reflectancia espectral del objeto-color es calcular sus valores triestímulo relativos \mathbf{t}_{XYZ}' según varios iluminantes, tales como A (luz incandescente), D65 (luz diurna), etc, pero siempre referidos al estímulo equienergético \mathbf{E} . Por tanto, en ningún momento de todo este proceso se tiene acceso a la información triestímulo original o absoluta. En consecuencia, esta especificación del color es claramente aislada y "relativa-absoluta", si el blanco de referencia es un blanco ideal de reflexión espectral 100 %. En cambio, cuando se pasa del espacio CIE-XYZ al espacio CIE-L*a*b*, las transformaciones de paso son claramente de tipo "completamente relativas" (Ec. 1.13), de carácter relacionado, puesto que la especificación de color está referida al blanco de referencia. Esto es equivalente a lo que pasa con el manejo de una vídeo-cámara digital en situaciones dinámicas de intensidad y cromaticidad de la iluminación. Para mantener aproximadamente la apariencia del color, el operador debe efectuar tantos balances de blanco como cambios de iluminación, salvo que la cámara disponga de esta operación de forma automática según algoritmos electrónicos. El *balance de blanco* consiste en corresponder los niveles digitales máximos disponibles con el estímulo-blanco de la escena, un blanco que se puede ser incluso el tejido blanco de un traje de novia, porque siempre será el objeto con la reflectancia espectral más elevada de todos los objetos de la escena. Por tanto, aunque el grado de exactitud de reproducción del color dista bastante del criterio real, nuestra tolerancia perceptual del color permite considerar estas especificaciones de color como "buenas". Por tanto, y concluyendo con este importante análisis para la definición de la tesis doctoral, esta especificación del color es claramente relacionada y "completamente-relativa", al igual que el uso del espacio CIE-L*a*b*.

Ecuación 1.13

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(X) \\ f(Y) \\ f(Z) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -16 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{con } f(t_i) = \begin{cases} \left(\frac{t_i}{t_{iW}} \right)^{\frac{1}{3}}, & \text{si } \left(\frac{t_i}{t_{iW}} \right) > 0.008856 \\ 7.787 \left(\frac{t_i}{t_{iW}} \right) + \frac{16}{116}, & \text{si } \left(\frac{t_i}{t_{iW}} \right) < 0.008856 \end{cases}, \text{ con } t_i = X, Y, Z$$

Este importante análisis se ha planteado siempre como dualidad colorimetría absoluta vs. relativa para el concepto de color psicofísico. Aunque existe cierta equivalencia entre especificación triestímulo absoluta y colores aislados, y, especificación triestímulo relativa y colores relacionados; para comprender perfectamente el grado de equivalencia entre estos conceptos, debemos referirnos a la fenomenología psicofísica de la apariencia del color, a las magnitudes perceptuales cromáticas que pueden describir el color psicológico como color aislado o como color relacionado.

La apariencia del color de colores aislados es de carácter trivariante: luminosidad Q , tono H y saturación s . Sin embargo, la apariencia completa de colores relacionados es de carácter pentavariante: luminosidad Q , claridad J , tono H , colorido M y croma C , aunque suele reducirse a una terna formada por la claridad J , el tono H y el croma C . Ambas especificaciones comparten atributos cromáticos, pero no los algoritmos de cálculo de los mismos, eso ya depende de cada modelo de apariencia del color (Fairchild 1998). En todo caso, las definiciones de estos atributos perceptuales cromáticos y sus relaciones entre ellos sí que son comunes a todos los modelos de apariencia del color presentes en la literatura científica. Así pues, tenemos que:

- *Tono H*: es el atributo de una sensación visual según la cual un área se parece a uno de los colores percibidos denotados como rojo, amarillo, verde, y azul, o a una combinación de ellos. Ejemplos: una sensación visual catalogada como negro, gris o blanco es un *color acromático*, que carece de tono.
- *Luminosidad Q*: es el atributo de una sensación visual según la cual un área parece emitir más o menos luz.
- *Claridad J*: es la luminosidad Q de un área juzgada en relación a la luminosidad de un área iluminada de forma similar que parece blanca o altamente transmisiva.

$$\text{claridad} = \frac{\text{luminosidad}}{\text{luminosidad}(\text{blanco})}$$

Ejemplo: el papel blanco de impresora siempre es juzgado como el color más claro de una oficina, queremos decir entonces que el color posee la claridad J_1 más alta porque su luminosidad Q_1 también lo es; ahora bien, si colocamos el papel blanco en el exterior, con un nivel de iluminación bastante más elevado que el de la oficina, el papel blanco nos sigue pareciendo el más claro y luminoso, pero las luminosidades absolutas en las dos condiciones de contorno han cambiado ($Q_2 > Q_1$), no así la claridad ($J_2 \cong J_1$).

- *Colorido M*: es el atributo de una sensación visual según el cual el color percibido de un área parece más o menos cromático.
- *Saturación s*: es el colorido de un área juzgado en proporción a su luminosidad.
- *Croma C*: es el colorido de un área juzgado en proporción a la luminosidad de un área iluminada de forma similar que parece blanca o altamente transmisiva.

$$\text{saturación} = \frac{\text{colorido}}{\text{luminosidad}} \Rightarrow \text{croma} = \frac{\text{colorido}}{\text{luminosidad}(\text{blanco})}$$

Ejemplo: consideremos una señal de tráfico (fondo blanco y borde rojo, una cualquiera de mensaje de prohibición) iluminada en la oscuridad. La descripción cromática básica o colorido M del borde rojo completamente aislado aumenta a medida que el nivel de iluminación se incrementa, pero no así su saturación s . Si se utiliza como escena toda la señal, fondo blanco y borde rojo, el colorido M del borde rojo aumentará de acorde con el incremento de la intensidad luminosa, pero ahora la percepción cromática de croma C es la que se mantiene aproximadamente constante.

Estos conceptos se pueden poner en práctica en el análisis comparativo de las escalas psicométricas (interválicas) y psicocuantitativas (proporcionales) en la descripción CIE- $L^*a^*b^*$ de un atlas de color perceptualmente uniforme como el *Atlas Munsell*, con notación tono claridad/croma ($H V/C$) (Fairchild 1998; Wyszecki, Stiles 1982). En primer lugar, las variables CIE- a^*b^* no especifican nada semejante a tono H o croma C ; mientras la variable L^* se considera como *claridad psicométrica* (Hunt 1980). No obstante, CIE propone una transformación polar de coordenadas para describir las correlaciones de tono y croma en el diagrama cromático psicométrico CIE- (a^*,b^*) (Ec. 1.14).

Ecuación 1.14

$$\begin{aligned} \text{ángulo - tono } h_{ab}^* &= \arctg \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \\ \text{croma } C_{ab}^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \end{aligned}$$

De esta manera, es posible definir una métrica o función distancia denominada *diferencia de color* ΔE que intenta correlacionarse con los datos reales de apariencia subjetiva de color ΔV . Como se mantiene el carácter trivariante de la especificación del color, de CIE- $L^*a^*b^*$ a CIE- $L^*C_{ab}^*h_{ab}^*$, la diferencia de color ΔE puede expresarse de forma equivalente como:

Ecuación 1.15

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2} \quad , \text{ siendo } \Delta H_{ab}^* = 2\sqrt{C_m^* \cdot C_r^*} \cdot \text{sen}\left(\frac{\Delta h_{ab}^*}{2}\right)$$

donde $\Delta =$ (muestra – referencia) es la diferencia parcial entre el estímulo-color considerado como muestra o copia "m" y el estímulo-color considerado como referencia o estándar "r".

Ahora bien, comparemos esta especificación psicométrica del color con un escalado psicocuantitativo o perceptual del color como lo representa la distribución de colores del Atlas Munsell. Debido al carácter trivariante $H\ V/C$ de la notación Munsell, resulta que el escalado del tono se divide en 100 partes, distribuidas en 10 grupos o tonos denotados con las letras R-rojo, YR-amarillo-rojo (naranja), Y-amarillo, GY-verde-amarillo, G-verde, BG-azul-verde, B-azul, PB-púrpura-azul, P-púrpura, RP-rojo-púrpura (Fig. 1.2). El escalado de la claridad o *value* V se divide en 10 partes, donde $V = 10$ es el blanco perfecto (correspondiente al iluminante C) y $V = 0$ al negro perfecto. El escalado de croma C sigue una progresión matemática creciente de números pares $C = 0, 2, 4, 6, 8, 10, \dots$, donde el sentido de la progresión se correlaciona con el aumento de la variable perceptual croma. Es corriente describir la distribución de las muestras Munsell sobre diagramas o planos $V-C$, donde el eje de abscisas representa el escalado de croma y el eje de ordenadas el escalado de claridad, siempre manteniendo el tono constante (Fig. 1.3).

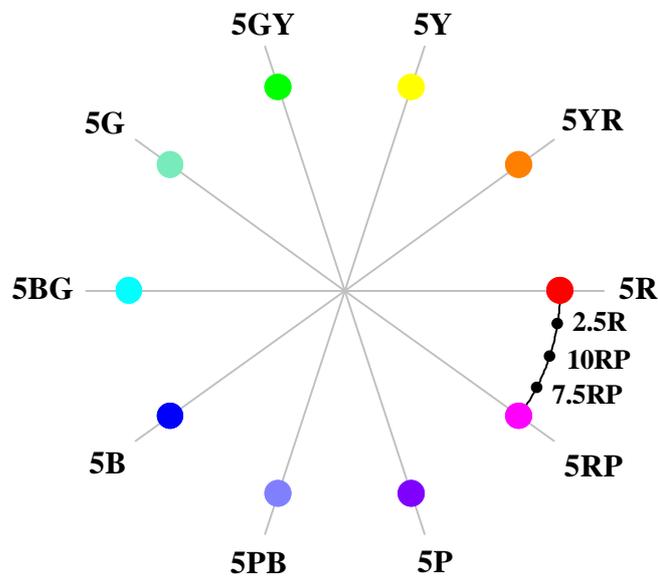


Figura 1.2: Escalado geométrico del tono en el Atlas Munsell.

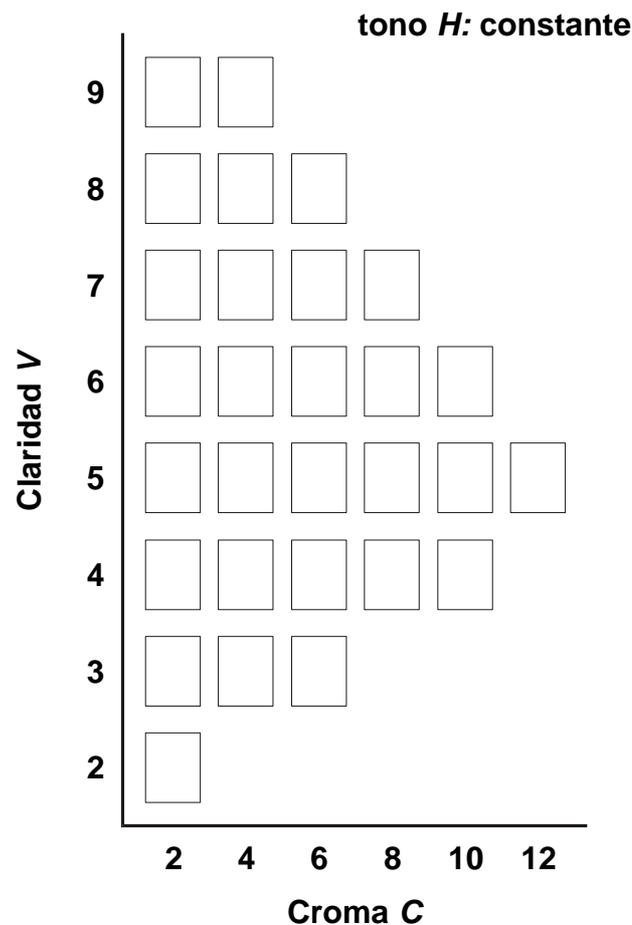


Figura 1.3: Plano claridad V vs. croma C sobre tono H constante en el Atlas Munsell.

Ahora bien, la cuestión que surge a continuación es si el escalado psicométrico del espacio de representación $CIE-L^*C_{ab}^*h_{ab}^*$ se ajusta al escalado psicocuantitativo o perceptual del Atlas Munsell. Si representamos varios cortes transversales del *sólido de color* Munsell con claridad V constante sobre el diagrama psicométrico $CIE-(a^*,b^*)$ a partir de la especificación triestímulo t'_{XYZ} bajo el iluminante C (Wyszecki, Stiles 1982, 840-861), resulta que el espacio de representación $CIE-L^*a^*b^*$ no mantiene el escalado psicocuantitativo del sólido Munsell: los locus de croma C constante en cortes transversales de claridad $V = 3, 5$ y 7 no son circulares, ni los locus de tono H constante en cortes transversales de claridad $V = 3, 5$ y 7 son líneas rectas, ni los centros de los círculos de croma C constante se encuentran todos situados sobre el origen de referencia ($a^* = 0, b^* = 0$) (Fig. 1.4-6). La verdad es que ningún modelo de apariencia de color existente en la actualidad logra describir correctamente desde el punto de vista geométrico el escalado perceptual del Atlas Munsell sobre todos los cortes transversales a claridad constante. Quizás, tanto el modelo de apariencia del color CIECAM'97c (Fairchild 1998) como el modelo fisiológico-perceptual SVF (Seim, Valberg 1986) logran esto con mayor efectividad; pero es evidente que se necesita mucha más investigación teórica y, sobre todo, empírica para esa búsqueda del modelo "unificado" de apariencia del color.

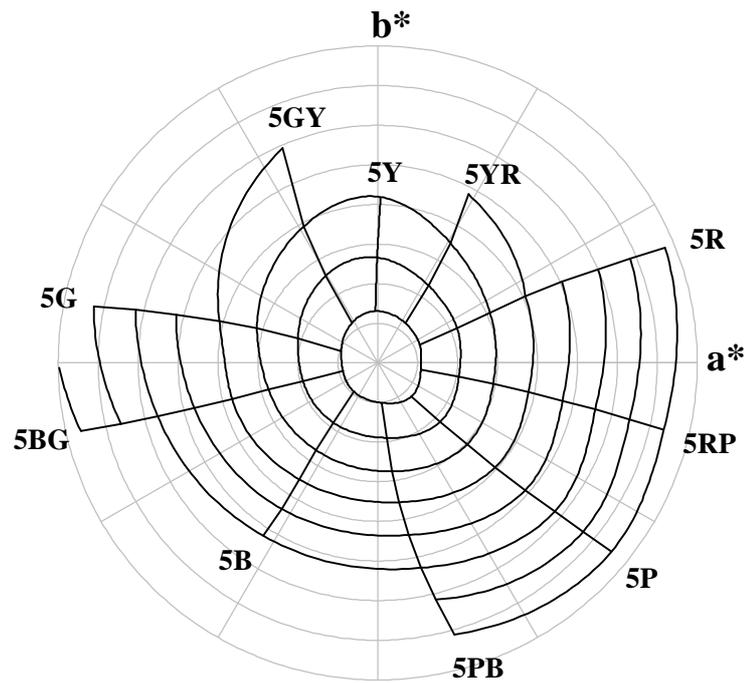


Figura 1.4: Locus de igual cromas C y tono H con claridad $V = 3$ del Atlas Munsell en el diagrama psicométrico CIE- (a^*, b^*) .

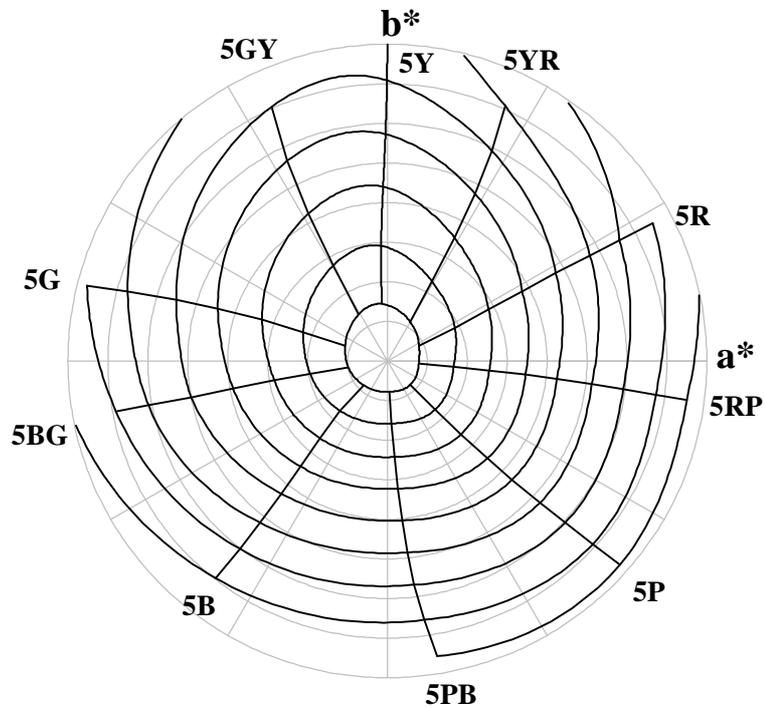


Figura 1.5: Locus de igual cromas C y tono H con claridad $V = 5$ del Atlas Munsell en el diagrama psicométrico CIE- (a^*, b^*) .

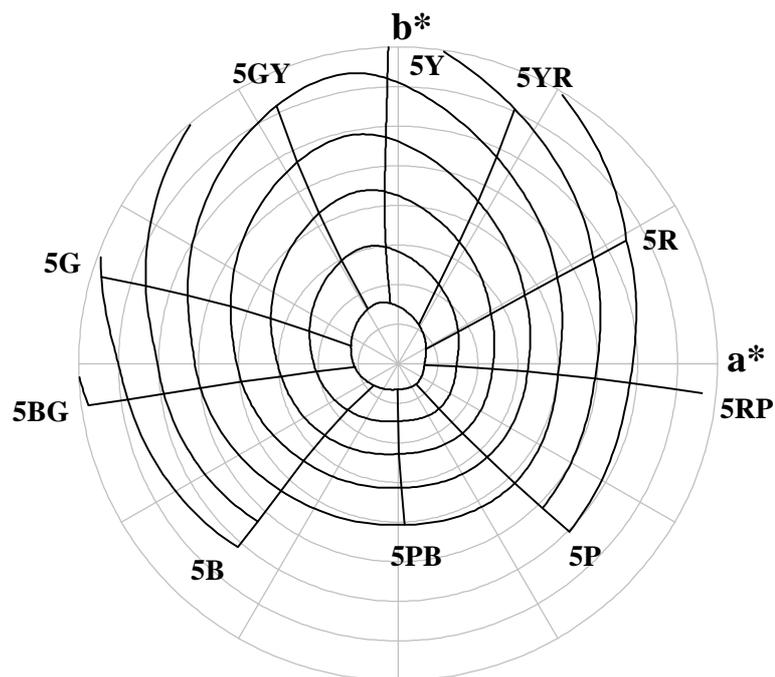


Figura 1.6: Locus de igual croma C y tono H con claridad $V = 7$ del Atlas Munsell en el diagrama psicométrico CIE-(a^* , b^*).

En conclusión, la medida del color original y estricta es de carácter absoluto y aislado. En este caso, por tanto, si deseamos pasar de una especificación del color sobre una escala nominal (t_{XYZ}) a una sobre una escala proporcional (luminosidad Q , tono H y saturación s) mediante un modelo de apariencia del color de colores aislados, tendríamos que remitirnos a algún modelo empírico como el de Hunt'91 (Hunt 1991, ver Anexo A). Si, por otro lado, estuviéramos interesados en el paso de la colorimetría absoluta a la relativa en cualquiera de sus versiones sobre una escala proporcional (claridad J , tono H y croma C), deberíamos implementar algún modelo empírico de apariencia del color de colores relacionados, bastante más numeroso en la literatura científica (Fairchild 1998), cuyo representante más sencillo es la especificación CIE- $L^*a^*b^*$. No obstante, lo que debe resultar evidente es que si conocemos desde el primer momento la especificación triestímulo absoluta t_{XYZ} , es fácil pasar a cualquiera de las dos versiones de colorimetría relativa t'_{XYZ} y t''_{XYZ} . Pero, si el punto de partida de una medida o reproducción del color es una especificación triestímulo relativa t''_{XYZ} o t'_{XYZ} , nada podemos hacer por recuperar la información original t_{XYZ} . Es más, los modelos más complejos y, por tanto, más completos de predicción de la apariencia del color necesitan en los datos de entrada la especificación triestímulo absoluta t_{XYZ} , o sea, una medida absoluta y aislada del color, en cd/m^2 , como unidad física de especificación de la potencia radiante incidente en los ojos del observador. Esto significa que, el único instrumento de medida del color capaz de proporcionar inicialmente la especificación triestímulo absoluta es el tele-espectrocolorímetro, o, una cámara digital tipo CCD-RGB bien caracterizada para funcionar como un tele-colorímetro absoluto de valores triestímulo, que es el objetivo de esta tesis doctoral. Una de las aplicaciones ventajosas de esta caracterización o diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una

cámara CCD-RGB sería la del funcionamiento del dispositivo como un instrumento de medida absoluta del color que, implementando un modelo de apariencia del color como CIECAM'97c u otro igualmente eficaz, se convertiría automáticamente en un tele-colorímetro perceptual, un Sistema de Visión Artificial (SVA) con capacidades perceptuales cromáticas perfectamente simuladas (Fig. 1.7). La simulación podría ser tan mimética que no importaría cuáles fueran las condiciones reales de visualización –cambios de intensidad y cromaticidad de la fuente luminosa, cambios de posición de la fuente luminosa, efectos combinados de varias fuentes luminosas, etc–, porque el dispositivo de aplicaciones tan diversas en el campo de la Multimedia y la Tecnología del Color (*Color Imaging*), una vez bien caracterizado y diseñado como colorímetro triestímulo absoluto, se adaptaría de forma dinámica a todas estas condiciones ambientales, tal como lo hace el Sistema Visual Humano (SVH).

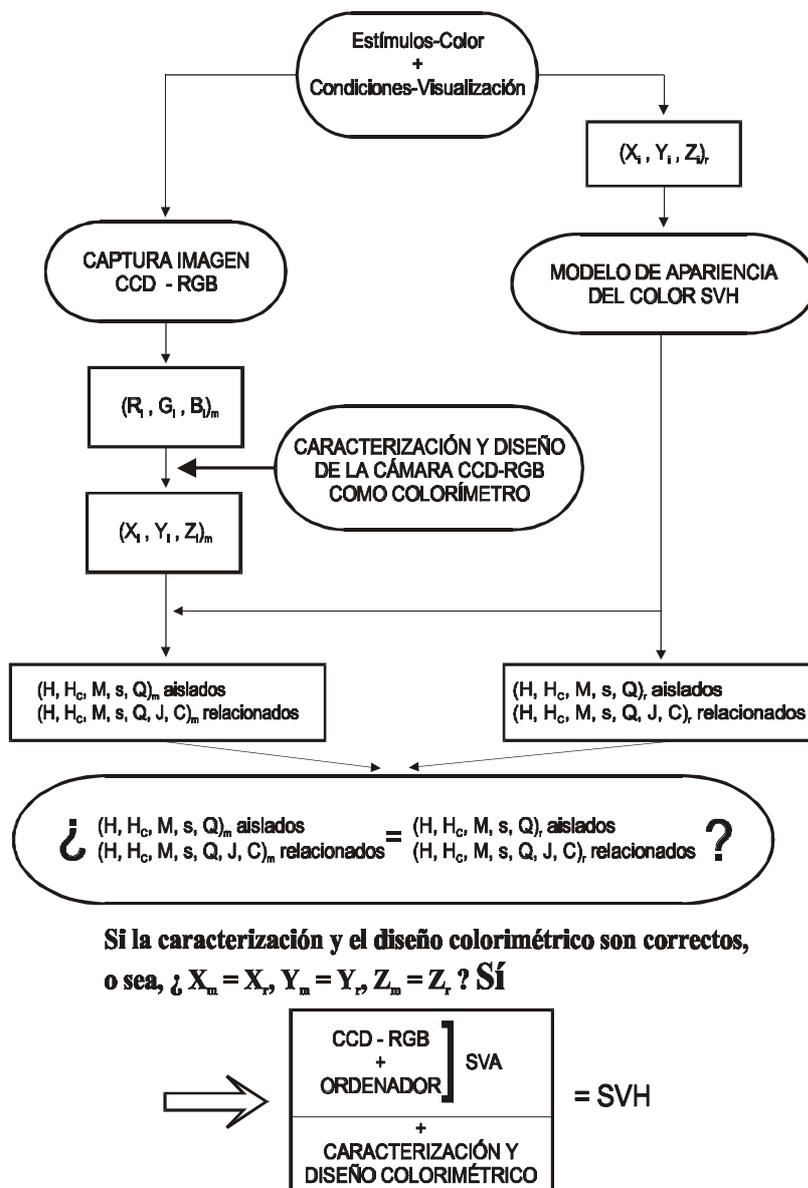


Figura 1.7: Esquema del funcionamiento de un tele-colorímetro perceptual a partir de la caracterización y el diseño colorimétrico de una cámara CCD-RGB como colorímetro triestímulo absoluto.

1.1.2 Determinación de la incertidumbre en la medida del color

Una vez establecida la problemática general de la medida del color, resta el planteamiento del cálculo de la incertidumbre o error asociado a esa medida, ya sea nominal o psicofísica, psicométrica o psicocuantitativa.

El planteamiento base para solucionar esto es el error de medida en la especificación triestímulo absoluta t_{XYZ} . Por tanto, cualquier instrumento de medida del color que funcione en su estado bruto como registrador de valores triestímulo t_{XYZ} , implementará métodos numéricos determinados (Borges 1994; CIE 1986; Venable 1989) para obtenerlos, pero no exentos de cierta incertidumbre. Una incertidumbre que vendrá caracterizada por fuentes de *errores sistemáticos* y fuentes de *errores aleatorios*. El compensar los primeros, como los elementos de diseño/funcionamiento de una cámara CCD-RGB para convertirla en un colorímetro triestímulo, favorece la consecución de una medida exacta. Por tanto, el concepto error sistemático o deriva (*bias*) va estrechamente ligado al de *exactitud*. Cualquier error sistemático puede compensarse o neutralizarse. Conociendo un valor medido y su error sistemático, es factible conocer el valor verdadero. Por otro lado, los errores aleatorios, por definición, se basan en términos probabilísticos y no se pueden compensar. Es decir, los errores aleatorios son las diferencias en medidas independientes causadas por la incapacidad para controlar el instrumento más allá de un cierto grado o por fluctuaciones ambientales impredecibles, e indican el grado de precisión conseguido en la medida, ligado a los conceptos de *repetibilidad* a corto y largo plazo (Berns 2000; Berger-Schunn 1994; Fairchild, Reniff 1991). Por tanto, el concepto error aleatorio va estrechamente ligado al de *precisión*. Así pues, la exactitud y la precisión son independientes, y en la Colorimetría instrumental se pueden dar las cuatro combinaciones: exactitud baja – precisión baja, exactitud alta – precisión baja, etc (Fig. 1.8).

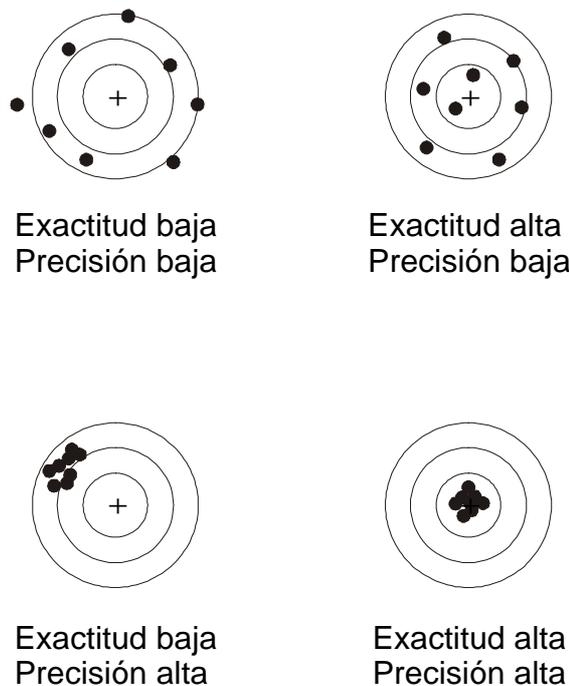


Figura 1.8: Esquema de combinaciones entre exactitud (error sistemático) y precisión (error aleatorio).

Respecto al error aleatorio cabe establecer que no es posible determinarlo exactamente: esto sería equivalente a medir la variable sin error, ya que podría hacerse la compensación para cualquier error conocido. Entonces, lo verdaderamente importante es especificar la cantidad más alta a la que la variable a medir podría estar equivocada o en error. Esto significa que los parámetros estadísticos son las herramientas para cuantificar tal cantidad de carácter probabilístico. El planteamiento estadístico de la incertidumbre aleatoria de una medida sería el siguiente:

- El acto de efectuar una medida representa una observación de las infinitas observaciones posibles del mismo acto. Por tanto, al conjunto infinito de observaciones de ese acto de medida se le denomina *población*.
- Los parámetros estadísticos representativos de esa población se denominan valor medio o *media* μ y *varianza* σ^2 , cuya raíz cuadrada se conoce como *desviación estadística* σ . Es común identificar la distribución infinita de observaciones de esta población medida mediante la función de Gauss o *distribución normal* Y_{Gauss} como:

Ecuación 1.16

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^{\infty} x_k \quad ; \quad \sigma^2 = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^{\infty} (x_k - \mu)^2$$

$$Y_{Gauss} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right] \quad , \text{ distribución normal}$$

- El problema surge cuando nunca se efectúan infinitas observaciones del mismo acto de medida. En realidad, si se efectúan $k \leq 30$ observaciones (Spiegel 1991), entonces los parámetros estadísticos media m , varianza s^2 y desviación estadística s son estimaciones muestrales de la población, entendiéndose que hemos efectuado una selección o muestra de medidas de la población infinita de observaciones. Entonces, el estadístico que debe tenerse en cuenta no es la distribución normal, sino la *distribución t de Student*:

Ecuación 1.17

$$m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad ; \quad s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_i - m)^2$$

$$Y_{t-Student} = \frac{Y_0}{\left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{\frac{v+1}{2}}} \quad , \quad \text{distribución t - Student}$$

con $Y_0 = cte$, $t = \frac{m - \mu}{s} \sqrt{k-1}$ y $v = k - 1$ número de grados de libertad

- Entonces, a la hora de presentar los resultados estadísticos de un acto de medida de k observaciones, estamos en cierta manera dando un margen de confianza o un grado de probabilidad de que el valor medio m de la muestra, como estimación μ de toda la población, se encuentra acotado en un intervalo de acuerdo a las reglas probabilísticas o aleatorias. Dicho intervalo recibe el nombre de *intervalo de confianza*. Este intervalo de acotación o *percentil* suele determinarse al 90 ó 95 % de confianza, o sea, con una probabilidad de 0.9 ó 0.95. Así pues, la presentación de los resultados de medida se resume al valor medio m y su incertidumbre s_m , denominada *error estándar*, en acotación probabilística del 90 ó 95 % de confianza:

Ecuación 1.18

$$\mu \pm \sigma_\mu \Rightarrow m \pm \frac{s}{\sqrt{k}} t_{0,975}^v \quad \text{al 95 \% de confianza}$$

$$\sigma \pm \sigma_\sigma \Rightarrow s \pm \frac{s}{\sqrt{2k}} t_{0,975}^v \quad \text{al 95 \% de confianza}$$

- Sobre el grado de precisión conseguido en la medida, es común identificar la variable v , denominada *coeficiente de dispersión*, *coeficiente de variación* o *incertidumbre relativa* como la precisión relativa del acto de medida:

Ecuación 1.19

$$v = \frac{s}{m} \pm \frac{v}{\sqrt{2k}} \sqrt{1 + 2v^2} t_{0,975}^v \quad , \quad \text{precisión relativa al 95 \% de confianza}$$

Así pues, y de acuerdo con lo esquematizado en Fig. 1.8, la exactitud de la medida radica en el valor medio m , y la precisión de la medida en el error estándar $s_m = s/\sqrt{k}$, al intervalo de confianza que sea. Si cambiáramos el intervalo de confianza, del 90 % al 95 %, el intervalo de error aumentaría.

Todos los instrumentos más comunes de medida del color, los cuales pueden clasificarse en colorímetros y espectrofotómetros (Artigas, et al. 1995, 541-554; Wyszecki, Stiles 1982, 228-248), se verán afectados en mayor o menor medida por estas fuentes de incertidumbre. Si bien una de las fuentes sistemáticas en los colorímetros es el ajuste de las sensibilidades espectrales al conjunto de funciones de igualación $\mathbf{T}_{XYZ} = [\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z}]$, no existe todavía un informe definitivo editado por la CIE (Comité Técnico CIE TC2-15: *Characterization of the Performance of Tristimulus Colorimeters*). En cuanto a los espectrofotómetros, considerados desde siempre mejores que los colorímetros, tampoco están exentos de varias fuentes de errores sistemáticos y aleatorios (Berns, Reniff 1997; Berns, Petersen 1988; Fairchild, Reniff 1991), fuentes que deben cuantificarse para realizar de forma eficaz una medida intercomparativa entre instrumentos (EUROMET 1998; Venable 1989).

Por tanto, aunque entra dentro de nuestro objetivo conseguir que una cámara CCD-RGB convencional, en funcionamiento colorímetro triestímulo, presente una exactitud alta y una precisión alta, éstas estarán en principio limitadas por la exactitud y precisión del instrumento de medida del color utilizado para la

comparación, en nuestro caso el tele-espectrocolorímetro marca Photo Research modelo SpectraScan PR-650. Es más, si bien el grado de exactitud conseguido depende en cierta forma de las características intrínsecas de funcionamiento optoelectrónico y colorimétrico de la cámara CCD-RGB (ver Capítulo 2), al pasar de la especificación cromática \mathbf{t}_{RGB} del dispositivo a la especificación triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} , arrastraremos inevitablemente una propagación de errores aleatorios.

Para entender cómo se aplica la propagación de errores aleatorios en la transformación posterior entre \mathbf{t}_{RGB} y \mathbf{t}_{XYZ} , el formalismo matemático aplicado a la Colorimetría que presentamos a continuación diferencia entre transformaciones univariantes, multivariantes lineales y multivariantes no lineales (Burns, Berns 1997). En una transformación univariante, si x es la variable medida, que sirve para calcular la variable $y = f(x)$, resulta que el valor medio m_y y la varianza s_y^2 son:

Ecuación 1.20

$$m_y \cong f(m_x) \quad , \quad \text{valor medio}$$

$$s_y^2 \cong \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{m_x}^2 \cdot s_x^2 \quad , \quad \text{varianza}$$

En el caso de que nos estemos refiriendo a una transformación multivariante lineal, es decir, con variables matriciales y/o vectoriales, resulta que si $\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}$, siendo $\mathbf{y}^t = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, $\mathbf{x}^t = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ vectores y \mathbf{A} una matriz de pesos de dimensión $(m \times n)$, tendremos que referirnos a *matrices covarianza*:

Ecuación 1.21

$$\text{si } \mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \Rightarrow \mathbf{S}_y = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}_x \cdot \mathbf{A}^t \quad , \quad \text{matriz covarianza del vector } \mathbf{y}$$

$$\text{con } \mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \quad , \quad \text{matriz covarianza del vector } \mathbf{x}$$

$$\text{siendo } s_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} [(x_i - m_{x_i}) \cdot (x_j - m_{x_j})] \quad , \quad \text{p.e. } s_{11} = s_{x_1}^2$$

En el caso que nos viéramos obligados a utilizar transformaciones multivariantes no lineales, del estilo siguiente:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ y_m &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

entonces, definiendo el operador matricial *jacobiano* $\mathbf{J}_{f(\mathbf{x})}$ evaluado en los valores medios $(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn})$, la matriz covarianza resultante del vector \mathbf{y} es

Ecuación 1.22

$$\text{si } \mathbf{J}_{f(\mathbf{x})} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial x_1} & \frac{\partial y_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \text{ jacobiano de la transformación vectorial } \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

$$\mathbf{S}_y \equiv \mathbf{J}_{f(\mathbf{x})} \cdot \mathbf{S}_x \cdot \mathbf{J}_{f(\mathbf{x})}^t, \text{ matriz covarianza del vector } \mathbf{y}$$

$$\text{con elementos diagonales } s_{y_{ii}} = s_{y_i}^2 \equiv \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)^2 s_{x_{jj}} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right) s_{x_{jk}}$$

Ejemplos directos de este formalismo matemático son la propagación de errores aleatorios en el cálculo de valores triestímulo CIE-XYZ, de coordenadas cromáticas CIE-(x,y) y de diferencias de color basadas en los espacios psicométricos CIE-L*a*b* y CIE-L*C_{ab}*h_{ab}*. Ejemplos que se desarrollan a continuación con la intención de valorar cuantitativa y cualitativamente el cálculo teórico real con incertidumbre de valores cromáticos. Así pues, sea el vector valor medio \mathbf{m}_b de la muestra estadística de k observaciones de una distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} cualquiera. Formando su matriz covarianza \mathbf{S}_b , tenemos que, de acuerdo con Ec. 1.9 y Ec. 1.21, la especificación triestímulo CIE-XYZ resulta ser:

Ecuación 1.23

$$\text{si } \mathbf{S}_b = E[(\mathbf{b} - \mathbf{m}_b) \cdot (\mathbf{b} - \mathbf{m}_b)^t], \text{ con } E[\] \text{ indicando la suma estadística sobre k observaciones}$$

$$\text{siendo } \mathbf{m}_b^t = [m_{b_{\lambda_1}} \quad m_{b_{\lambda_2}} \quad \dots \quad m_{b_{\lambda_N}}], \text{ valor medio}$$

$$\Rightarrow \text{ como } \mathbf{t}_{XYZ} = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{S}_{t_{XYZ}} = \begin{bmatrix} s_X^2 & s_{XY} & s_{XZ} \\ s_{XY} & s_Y^2 & s_{YZ} \\ s_{XZ} & s_{YZ} & s_Z^2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{S}_b \cdot \mathbf{T}_{XYZ}$$

En el caso de que los errores instrumentales de medida de \mathbf{b} no estén correlacionados, la matriz covarianza \mathbf{S}_b sería diagonal, y, si además, suponemos igual varianza instrumental s_b^2 para todas las longitudes de onda, nos queda que en el caso de una especificación triestímulo absoluta, cuando la incertidumbre relativa de la medida $v_b = 5\%$, la presentación de resultados sería:

Ecuación 1.24

$$\text{si } \mathbf{S}_{t_{xyz}} = s_b^2 \begin{bmatrix} 7.1936 & 5.6659 & 2.5565 \\ 5.6659 & 7.7210 & 0.8491 \\ 2.5565 & 0.8491 & 14.0064 \end{bmatrix} = (0.05)^2 \begin{bmatrix} 7.1936 & 5.6659 & 2.5565 \\ 5.6659 & 7.7210 & 0.8491 \\ 2.5565 & 0.8491 & 14.0064 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \pm \frac{t_{0.975}^{k-1}}{\sqrt{k}} \begin{bmatrix} 0.0067 \\ 0.0069 \\ 0.0094 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} 0.0602 \\ 0.0620 \\ 0.0845 \end{bmatrix} \quad \text{cuando } t_{0.975}^1 = 12.71 \quad \text{con } k = 2$$

Ahora bien, es importante anotar el resultado estadístico siguiente: debido a que las funciones de igualación CIE-XYZ tienen zonas espectrales de solapamiento, las incertidumbres aleatorias de los valores triestímulo XYZ sí están correlacionadas (Ec. 1.25), por lo que esta correlación de incertidumbres se arrastrará para transformaciones sucesivas de color.

Ecuación 1.25

$$\mathbf{S}_{t_{xyz}} = \begin{bmatrix} s_X^2 & s_{XY} & s_{XZ} \\ s_{XY} & s_Y^2 & s_{YZ} \\ s_{XZ} & s_{YZ} & s_Z^2 \end{bmatrix} \text{ covarianza} \Rightarrow \mathbf{R}_{t_{xyz}} = \begin{bmatrix} r_X^2 & r_{XY} & r_{XZ} \\ r_{XY} & r_Y^2 & r_{YZ} \\ r_{XZ} & r_{YZ} & r_Z^2 \end{bmatrix} \text{ matriz correlación}$$

con $r_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sqrt{s_i^2 \cdot s_j^2}}$ coeficiente de correlación

$$\Rightarrow \mathbf{R}_{t_{xyz}} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1020 & 0.0254 \\ 0.1020 & 1 & 0.0079 \\ 0.0254 & 0.0079 & 1 \end{bmatrix} \text{ para el ejemplo numérico}$$

Si mantenemos esta propagación de errores aleatorios en CIE-XYZ para la transformación al espacio psicométrico CIE-L*a*b*, resulta que debido a su carácter no lineal, la matriz covarianza \mathbf{S}_{Lab} resultante queda como:

Ecuación 1.26

$$\mathbf{S}_{Lab} \cong \mathbf{J}_{Lab} \cdot \mathbf{S}_{t_{xyz}} \cdot \mathbf{J}_{Lab}^t$$

$$\text{con } \mathbf{J}_{Lab} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X^{-\frac{2}{3}} X_W^{-\frac{1}{3}} & 0 & 0 \\ 0 & Y^{-\frac{2}{3}} Y_W^{-\frac{1}{3}} & 0 \\ 0 & 0 & Z^{-\frac{2}{3}} Z_W^{-\frac{1}{3}} \end{bmatrix}, \quad \text{si } \frac{t_i}{t_w} > 0.008856$$

Si el paso siguiente necesario es el de valores CIE-L*a*b* a valores CIE-L*C_{ab}*h_{ab}*, entonces la matriz covarianza S_{LCh} resultante quedaría como:

Ecuación 1.27

$$S_{LCh} \cong J_{LCh} \cdot S_{Lab} \cdot J_{LCh}^t$$

$$\text{con } J_{LCh} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a^*}{C_{ab}^*} & \frac{b^*}{C_{ab}^*} \\ 0 & -\frac{b^*}{(C_{ab}^*)^2} & \frac{a^*}{(C_{ab}^*)^2} \end{bmatrix}$$

Para la transformación no lineal de los valores CIE-L*C_{ab}*h_{ab}* a la fórmula de diferencia de color ΔE según Ec. 1.15, la matriz covarianza $S_{\Delta L\Delta C\Delta H}$ resultante para diferencias angulares Δh_{ab}^* pequeñas se expresaría como:

Ecuación 1.28

$$S_{\Delta L\Delta C\Delta H} \cong J_{\Delta L\Delta C\Delta H} \cdot S_{LCh} \cdot J_{\Delta L\Delta C\Delta H}^t$$

$$\text{con } J_{\Delta L\Delta C\Delta H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & C_{ab}^* \end{bmatrix}$$

En el caso de desear utilizar el algoritmo mejorado de diferencias de color ΔE_{94} (CIE 1995), entonces la matriz covarianza $S_{\Delta L\Delta C\Delta H}$ final sería la siguiente:

Ecuación 1.29

$$S_{\Delta L\Delta C\Delta H} \cong J_{\Delta L\Delta C\Delta H} \cdot S_{\Delta L\Delta C\Delta H} \cdot J_{\Delta L\Delta C\Delta H}^t$$

$$\text{con } J_{\Delta L\Delta C\Delta H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + 0.045C_{ab}^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + 0.015C_{ab}^*} \end{bmatrix}$$

Este planteamiento matricial para el cálculo de los errores aleatorios de la medida del color puede también re-interpretarse en el sentido inverso: si asumimos por simplicidad errores independientes o no correlacionados en L*, a* y b*, dado un valor límite de diferencia de color ΔE_{94} , ¿cuál sería los límites de

precisión en la especificación triestímulo t_{XYZ} original? La respuesta a esta cuestión puede expresarse matemáticamente así:

Ecuación 1.30

$$S_{t_{XYZ}} = (\mathbf{J}_{Lab})^{-1} (\mathbf{J}_{LCh})^{-1} (\mathbf{J}_{LCH})^{-1} (\mathbf{J}_{\Delta L\Delta a\Delta b})^{-1} S_{\Delta L\Delta a\Delta b} (\mathbf{J}_{\Delta L\Delta a\Delta b}^{-1})^t (\mathbf{J}_{LCH}^{-1})^t (\mathbf{J}_{LCh}^{-1})^t (\mathbf{J}_{Lab}^{-1})^t$$

Si el error aceptable de inter-comparación entre dos medidas consecutivas, como índice de calidad de medida del color de la cámara CCD-RGB una vez caracterizada y perfilada, fuera de 0.5 unidades ΔE_{94} (por debajo del límite de perceptibilidad) para toda la gama de colores reproducibles, y asumiendo errores independientes en los valores cromáticos L^* , a^* y b^* ; entonces, con el método explicado de propagación de errores aleatorios (Burns, Berns 1997), resulta que, por ejemplo, para una terna triestímulo $[X, Y, Z] = [55, 50, 5]$ cd/m^2 bajo espectro equienergético E tal que $Y_E = 100$ cd/m^2 las desviaciones estadísticas asociadas a esta medida deberían ser $[s_X, s_Y, s_Z] = [0.57, 0.47, 0.30]$ (Tabla 1.1). La cuestión importante sobre estos aspectos es si, aparte de la compensación de los errores sistemáticos encontrados en la caracterización colorimétrica de la cámara digital, las características intrínsecas de este dispositivo permitirán alcanzar esta cota de perceptibilidad, o si nos tendremos que conformar con errores aleatorios más tolerantes, como los mostrados para el ejemplo de la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Límites teóricos de precisión s_X, s_Y, s_Z para una muestra ($X = 55, Y = 50, Z = 5$) bajo fuente equienergética E para conseguir ΔE_{94} aceptable, suponiendo errores no correlacionados en los valores CIE- $L^*a^*b^*$.

ΔE_{94}	0.5	1	2	3	5	10	15
s_X	0.57	1.14	2.29	3.43	5.72	11.45	17.17
s_Y	0.47	0.94	1.88	2.82	4.70	9.41	14.11
s_Z	0.30	0.60	1.21	1.81	3.01	6.03	9.04

Lo comentado anteriormente es muy importante: una cosa es averiguar cuáles son los errores sistemáticos de medida y reproducción del color de la cámara digital y compensarlos posteriormente para alcanzar un grado alto de exactitud, y, otra muy distinta, es calcular el grado de precisión conseguido en todos los procesos necesarios anteriores, ya sea alto o bajo, pero que, de alguna manera, es inevitable y no se puede compensar o corregir debido a las características propias del dispositivo como fotosensor. Por eso, en parte, toda esta introducción a este trabajo pretende situar al lector en los aspectos de la Fotografía Digital que limitan por una parte el grado inevitable de precisión en la codificación cromática, y que limitan por otra parte el grado de exactitud en la reproducción del color. Sirva como ejemplo breve el análisis de un instrumento tele-colorimétrico convencional.

1.1.3 Sobre instrumentos tele-colorimétricos

Si la caracterización y el diseño del perfil colorimétrico de una cámara CCD-RGB convencional se realiza eficazmente, estaremos en condiciones de verificar su nivel medida/reproducción con instrumentos de color de su misma categoría como por ejemplo un tele-espectrocolorímetro de la marca Photo Research, modelos SpectraScan PR-650, 705 y 715. Si bien estos instrumentos proporcionan también información espectral, debido a la característica tricromática intrínseca de una cámara CCD-RGB, la comparación a este nivel solamente sería posible a través de métodos matemáticos utilizando el enfoque del *estímulo-color fundamental*, que se explicará brevemente más adelante.

Un tele-espectrocolorímetro tipo SpectraScan PR-650 es un instrumento basado en una óptica de visualización acoplada a un espectrómetro formado por una *red de difracción holográfica* cóncava y una línea o *array* de 128 *fotodiodos* de Si bien caracterizados y calibrados en su zona de respuesta lineal (Frehlich 1992; Zalewski 1995, 24.29-24.35). Sobre un campo de visualización de 7°, el campo central de 1° es la zona de medición útil para el sistema (Fig. 1.9). Incorpora un microprocesador interno que, a partir de los voltajes digitalizados generados en el array de fotodiodos de Si, es posible aplicar consecuentemente los cálculos necesarios para dar en pantalla valores radiométricos espectrales $L_{e\lambda}$ en $W/sr \cdot m^2$, valores fotométricos L en cd/m^2 y colorimétricos absolutos y relativos del estímulo-color enfocado **b**. Estableciendo unas condiciones de contorno bien controladas, también es posible que actúe como un espectrofotómetro, obteniendo así la reflectancia o transmitancia espectral del objeto iluminado. Las especificaciones técnicas más relevantes de este instrumento de medida del color son:

Tabla 1.2: Características de funcionamiento del tele-espectrocolorímetro SpectraScan PR-650.

ASPECTOS	VALORES
Rango espectral	380 – 780 nm
Anchura de banda espectral	8 nm (FWHM, valor a altura mitad del máximo)
Exactitud espectral	± 2 nm
Resolución de longitud de onda	< 3.5 nm / pixel del array sensor
Exactitud luminancia	± 4 %, ± 1 dígito
Exactitud cromaticidad	± 0.001 xy, ± 0.006 xy para monitores CRT
Resolución espacial	14 bits A/D (1 parte en 16000)
Rango autosincronismo	40 – 250 Hz (para fuentes pulsantes)

El esquema de arriba sirve para evidenciar algunas limitaciones de este instrumento. En particular, el aspecto más diferenciador entre las capacidades ópticas de un tele-espectrocolorímetro y una cámara CCD-RGB bien caracterizada y perfilada colorimétricamente, es que la cámara permitiría registrar colorimétricamente de forma simultánea todos los puntos de la escena sobre su plano fotosensible, mientras que el tele-espectrocolorímetro no. Es decir, si una escena de interés constara de N objetos, el tele-espectrocolorímetro PR-650 debería realizar mínimamente N medidas, una sobre cada objeto; mientras que, la cámara CCD-RGB captaría al menos de una sola vez los N objetos que, después serían segmentados rápidamente de forma computacional para presentar la especificación triestímulo t_{XYZ} de cada estímulo-color. Es, por tanto, el factor tiempo, uno de los parámetros industriales más importantes,

el que permite situar en un nivel cualitativo superior las capacidades ópticas de una cámara CCD-RGB bien caracterizada y perfilada coloriméricamente frente a un tele-espectrocolorímetro cualquiera.

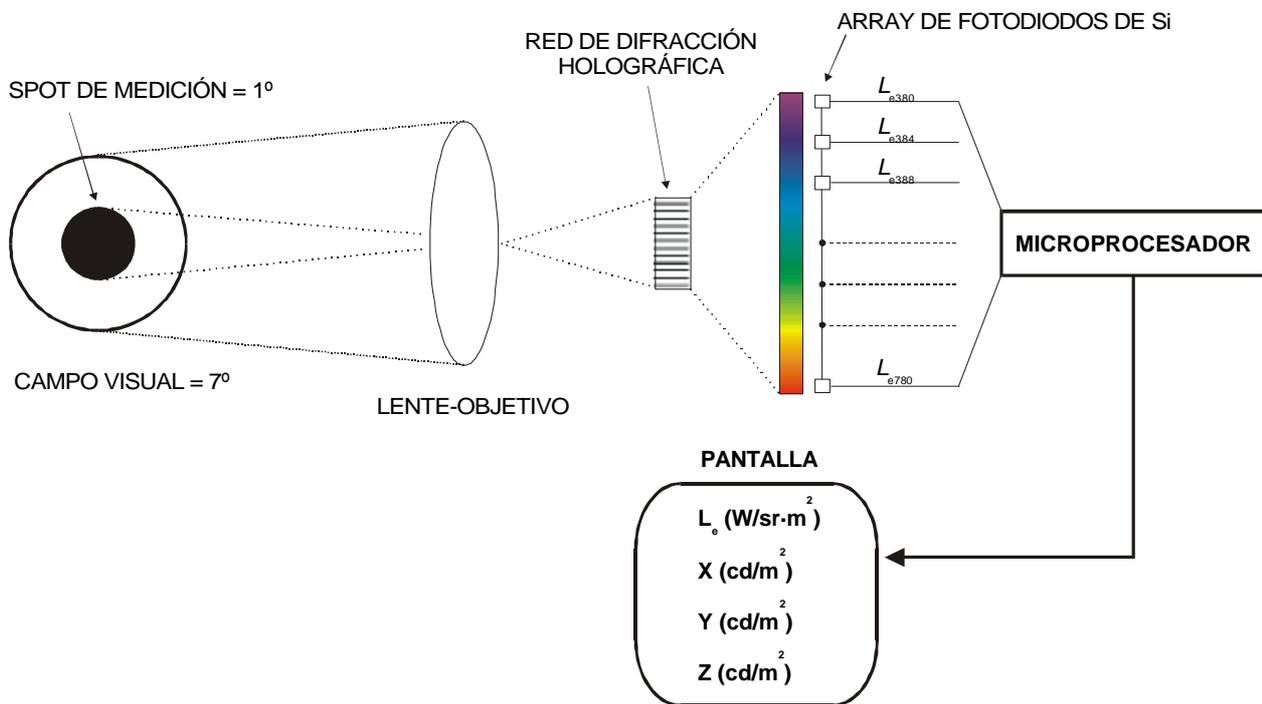


Figura 1.9: Esquema del funcionamiento del tele-espectrocolorímetro SpectraScan PR-650.

Otro aspecto diferenciador a tener en cuenta a favor de una cámara CCD-RGB bien caracterizada y perfilada coloriméricamente es el factor económico. Los equipos tele-espectrocolorimétricos son caros, alrededor de 3-4 millones de ptas, más aún cuando nos vemos obligados a adquirir una serie de accesorios ópticos (software de control, lentes de aumento, sondas de fibra óptica, filtros atenuadores, patrones de calibración, etc) que, a sabiendas que su uso será escaso, deben estar en los equipos tele-colorimétricos como medida de prevención antes problemas colorimétricos no convencionales. Por ejemplo, las sondas de fibra óptica o ciertas lentes de aumento son de enorme utilidad para la medida del color sobre objetos diminutos, como los LEDs de los paneles de visualización de controles de mandos en vehículos de transporte. Los filtros atenuadores son filtros de transmitancia espectral conocida, generalmente constante o neutra, que se colocan delante de la lente-objetivo normal y que, tras una calibración previa y costosa por el laboratorio de control de la empresa, son "descontados" para poder medir distribuciones espectrales de potencia radiante muy elevadas, las cuales saturarían sin el filtro atenuador la capacidad de respuesta de los elementos fotosensores del instrumento. En cambio, los problemas ópticos de las dimensiones de los objetos-color pueden solucionarse de forma más económica puesto que las cámaras CCD-RGB incorporan de forma estándar el acople universal de objetivos (*C-mount* o montura tipo bayoneta), aparte de que los sistemas ópticos convencionales de aumento/reducción de tamaño son generalmente más baratos en comparación con los accesorios de los equipos tele-espectrocolorimétricos. Por otro lado también, como todos los objetivos acoplables a las cámaras incorporan un sistema dinámico de apertura; gracias a él, es posible seleccionar la irradiancia máxima para evitar la saturación de los fotosensores de la cámara, sin necesidad de interponer filtros atenuadores.

Si bien la caracterización y el perfil colorimétrico con y sin compensación pueden aplicarse a cualquier cámara CCD-RGB, parece evidente que solamente un grupo reducido de ellas, debido a ciertas características intrínsecas que se explicarán más adelante, serán las adecuadas para poner en práctica las investigaciones de este trabajo. Aún así, podemos adelantar que una cámara CCD-RGB de nivel medio, de valor aproximado de 1 millón de ptas, puede ser suficiente para competir con las capacidades colorimétricas de los equipos tele-espectrocolorimétricos. Las aplicaciones derivadas de este trabajo pueden ser, por tanto, altamente fructíferas y beneficiosas para las comunidades científica e industrial.

Como conclusión a este sub-apartado, podemos analizar el nivel de precisión de cromaticidad del tele-espectrocolorímetro SpectraScan PR-650. En primer lugar, aunque el grado de precisión de la luminancia sea del 4 %, interpretada entonces como incertidumbre relativa, creemos que es evidente que no puede aplicarse dicha incertidumbre relativa para cualquier nivel de luminancia, ya sean valores bajos ($< 10 \text{ cd/m}^2$) o altos ($> 10000 \text{ cd/m}^2$). Sin embargo, la conclusión que extraemos de la Tabla 1.2 es ésta, cosa que sospechosamente no se cumple para toda la escala mensurable de luminancia. En segundo lugar, y en relación con la cromaticidad, la contra-argumentación anterior parece razonable. Aunque la incertidumbre en cromaticidad se ofrezca con valores absolutos en *coordenadas cromáticas* CIE-(x,y) (Ec. 1.31), esto no debe interpretarse como válido para cualquier zona del espacio de color, ya sea para regiones de tono (rojos, amarillos, verdes o azules) y/o regiones de colorido (colores desaturados, colores saturados)¹. Entonces, como aplicación directa del ejemplo numérico de la Tabla 1.1, podemos plantear lo siguiente para situar el grado de precisión de este instrumento de medida del color. Si el nivel de medida/reproducción fuese el límite de perceptibilidad $\Delta E_{94} = 1$, por lo explicado anteriormente, tendríamos que $s_x = 1.14$, $s_y = 0.94$, $s_z = 0.60$, pero también $s_{xy} = 0.97$, $s_{xz} = 0.36$, $s_{yz} = 0.44$, debido a que las funciones de igualación CIE-1931 presentan zonas espectrales de solapamiento. Entonces, conocida la relación de las coordenadas cromáticas CIE-(x,y) en función de los valores triestímulo $X = 55$, $Y = 50$ y $Z = 5$ bajo fuente equienergética **E** (supuestos exactos), tenemos que las incertidumbres asociadas a las coordenadas cromáticas en esta aproximación teórica son $s_x = 0.0059 > 0.001$, $s_y = 0.0043 > 0.001$, lo cual significa que este instrumento consigue una precisión de cromaticidad por debajo del límite de perceptibilidad: o sea, que presenta una precisión excelente para el límite fijado, que es el justo. Suponiendo que la exactitud sea excelente, tenemos pues que este instrumento de medida del color presenta una exactitud alta y una precisión alta. ¿Es posible conseguir estos niveles de fiabilidad en la medida colorimétrica con la caracterización y el posterior diseño del perfil colorimétrico en una cámara CCD-RGB? Esta es una cuestión a resolver en el desarrollo de esta tesis doctoral.

¹ En parte, el fabricante ya advierte sutilmente este problema con la anotación de que la incertidumbre absoluta para estímulos-color creados en monitores CRT no es la misma que en el caso general, puesto que las características espectrales de estos estímulos-color no son comunes a la mayoría de los objetos-color cotidianos.

Ecuación 1.31

como $x = \frac{X}{X+Y+Z}$, $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ coordenadas cromáticas \Rightarrow

$$s_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial X}\right)^2 s_X^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right)^2 s_Y^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial Z}\right)^2 s_Z^2 + 2s_{XY}^2 \left(\frac{\partial x}{\partial X}\right) \left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right) + 2s_{XZ}^2 \left(\frac{\partial x}{\partial X}\right) \left(\frac{\partial x}{\partial Z}\right) + 2s_{YZ}^2 \left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right) \left(\frac{\partial x}{\partial Z}\right)$$

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial X}\right)^2 s_X^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y}\right)^2 s_Y^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Z}\right)^2 s_Z^2 + 2s_{XY}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial X}\right) \left(\frac{\partial y}{\partial Y}\right) + 2s_{XZ}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial X}\right) \left(\frac{\partial y}{\partial Z}\right) + 2s_{YZ}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial Y}\right) \left(\frac{\partial y}{\partial Z}\right)$$

1.2 Reproducción aditiva del color

El propósito inicial de una reproducción del color parece sencillo: proporcionar una imagen en color copia de la escena real original. Y, la opinión del observador es la que cuenta para indicar si tal fin es aceptable o no. O sea, que el estímulo-color **b** procedente de la imagen es el único necesario para efectuar la decisión de aceptabilidad. Claro está, los métodos tecnológicos para lograr esto han sido numerosos a lo largo de los últimos dos siglos (Hunt 1995) pero, de alguna manera, se pueden reagrupar en *métodos aditivos* y *métodos sustractivos*.

El argumento físico básico que subyace en ambos métodos es el mismo porque se encuentran condicionados por el mismo elemento final de comparación: el Sistema Visual Humano (SVH). El hecho de que podamos interpretar nuestro sistema visual como un sistema biológico fotosensor –que partiendo de una tasa de fotones capturados en los elementos fotosensores o fotoreceptores retinianos, sea capaz de extraer información espacio-temporal y pseudo-espectral de la imagen retiniana a partir de modelos internos de representación– significa que lo estamos considerando como un sistema aditivo de codificación/interpretación de la distribución espectral de potencia radiante **b**. El experimento básico de igualación o "equivalencia" del color (Ec. 1.5) explicado anteriormente puede entenderse en términos de la acción de los fotoreceptores retinianos. Existen tres tipos de fotoreceptores o conos sensibles a bandas de longitud de onda diferente: banda larga (L o cono rojo ρ), banda media (M o cono verde γ) y banda corta (S o cono azul β). La información que un cono proporciona acerca de la luz viene dada por un simple número: la tasa o ritmo de isomerizaciones del fotopigmento-cono causado por la absorción de fotones. Si dos luces **b**₁, **b**₂ producen tasas de absorción idénticas en las tres clases de conos, el sistema visual no será capaz de distinguirlos, concepto conocido como el *principio de univariancia* (Artigas, et al. 1995, 218). La explicación convencional para los resultados de los experimentos de igualación del color es, por tanto que, dos luces son perceptualmente iguales si y sólo si producen el mismo número de absorciones en los fotopigmentos de las tres clases de conos. Puede darse el caso que las luces igualadas sean espectralmente muy diferentes, hecho denominado *metamerismo*, de gran repercusión en la industria

de la reproducción del color, puesto que si se varían las condiciones de visualización estas luces ya no se igualarán perceptualmente.

Para calcular la tasa de fotones absorbidos por los conos a partir de la distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} se usan las funciones de sensibilidad espectral de los conos. Para cada tipo de fotoreceptor, la función especifica el número de fotones que serán absorbidos por una luz monocromática de potencia unidad, incorporando el efecto de los medios oculares. En concreto, estas funciones de sensibilidad espectral reciben el nombre específico de *fundamentales de la visión del color* (Wyszecki, Stiles 1982, 604-633; Capilla 1995). Si representamos la luz incidente como irradiancia en plano retiniano en cantidades fotónicas $n(\lambda)$, o sea en (n° fotones incidentes \cdot s $^{-1}\cdot$ deg $^2\cdot$ nm $^{-1}$), y los fundamentales ρ , γ , β en formato matriz \mathbf{F} , la tasa de fotones absorbidos o valores triestímulo fundamentales \mathbf{f} serán

Ecuación 1.32

$$\text{si } n(\lambda) = 1.53 \cdot 10^6 A_p L_e(\lambda) \tau(\lambda) \lambda \Rightarrow \mathbf{f} = \mathbf{F}^t \cdot \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho_{\lambda_1} & \rho_{\lambda_2} & \cdots & \rho_{\lambda_n} \\ \gamma_{\lambda_1} & \gamma_{\lambda_2} & \cdots & \gamma_{\lambda_n} \\ \beta_{\lambda_1} & \beta_{\lambda_2} & \cdots & \beta_{\lambda_n} \end{bmatrix}_{3 \times N_\lambda} \cdot \begin{bmatrix} n(\lambda_1) \\ n(\lambda_2) \\ \vdots \\ n(\lambda_n) \end{bmatrix}_{N_\lambda \times 1}$$

donde A_p es el área efectiva de la pupila de entrada, $L_e(\lambda)$ la radiancia espectral del objeto y $\tau(\lambda)$ la transmitancia espectral total de los medios oculares pre-retinianos.

De igual modo, si las funciones de igualación \mathbf{T} son los valores triestímulo $\mathbf{f} = \mathbf{t}$ del espectro equienergético $\mathbf{b} = \mathbf{E}$ asociado a un conjunto de primarios \mathbf{P} , entonces se verificará $\mathbf{T} = \mathbf{F} \cdot (\mathbf{P}^t \cdot \mathbf{F})^{-1}$.

La equivalencia fundamentales – sensibilidad espectral – funciones de igualación es total: las funciones de igualación (“concepto psicofísico”) se pueden redefinir como los valores triestímulo relativos de los colores espectrales por unidad de energía, definida como 1/683 lm/W para el sistema visual humano, de un sistema detector de luz (biológico o artificial) con un conjunto asociado de sensibilidades espectrales (“concepto psicofísico”) o fundamentales (“concepto fisiológico”). Esta definición será la que aprovecharemos para caracterizar algunos de los dispositivos aditivos de reproducción del color, en concreto, una cámara CCD-RGB convencional: las funciones de igualación son las respuestas espectrales relativas a un estímulo \mathbf{E} de un sistema determinado de sensibilidades espectrales.

Del mismo modo, podemos reagrupar en el mismo grupo de sistemas aditivos de codificación/representación del color a las cámaras CCD-RGB, ya sean videocámaras o "estáticas", a los escáneres y las pantallas de visualización (monitores CRT, pantallas LCD, pantallas de plasma, etc). El primer grupo formado por los dispositivos de captura (escáneres, cámaras) se caracterizan porque la propiedad intrínseca de funcionamiento en cuanto al concepto "color" son sus funciones de igualación \mathbf{T} ; mejor dicho sus sensibilidades espectrales relativas, porque un método directo y clarificador de paso de un concepto a otro no se encuentra en la literatura científica, aspecto que será resuelto satisfactoriamente en este trabajo. En cambio, el grupo formado por las pantallas de visualización se caracterizan intrínsecamente por sus primarios \mathbf{P} , puesto que conceptualmente estos dispositivos no capturan luz sino

que la mezclan. No obstante, es posible utilizar la relación matemática dual $\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{P} = \mathbf{I}$ entre primarios y funciones de igualación para obtener un conjunto u otro, o viceversa. Esto trae consigo un corolario muy importante: si las funciones de igualación de un dispositivo aditivo de reproducción del color son espectralmente todas positivas, esto significa inevitablemente que los primarios asociados tienen partes espectrales negativas; y, viceversa.

Aunque parezca que estamos desviando la atención sobre los métodos aditivos de reproducción del color, todo lo comentado anteriormente está siempre presente implícitamente en las tecnologías sustractivas de reproducción del color. Sirva como ejemplo en detalle, y que generaliza al resto de métodos sustractivos salvo aspectos técnicos, la reproducción del color en la Fotografía Fotoquímica o clásica. Una cámara fotográfica convencional captura la luz incidente como cualquier sistema aditivo de reproducción del color, puesto que la película fotográfica es el elemento fotosensible, igual que el mosaico retiniano o una línea de fotodiodos de Si de un tele-espectrocolorímetro. Ahora bien, a diferencia del mosaico retiniano y los elementos fotosensibles modernos (fotodiodos, etc), la conversión respuesta vs. potencia radiante es proporcionalmente inversa: la película es una representación en negativo de la escena real. Para invertir este proceso, los recursos tecnológicos a utilizar se basan en dos sustratos o medios finales de presentación de la imagen reproducida: una copia reflectante $\rho(\lambda)$ (papel fotográfico) y/o una copia transparente $\tau(\lambda)$ (*diapositiva*). Sin entrar en detalle en los aspectos físico-químicos de las creaciones de las copias papel y diapositiva (Hunt 1995), el objetivo final que se persigue es obvio, pero sutil al mismo tiempo: el estímulo-color copia \mathbf{b}' formado por la fuente luminosa de observación de la copia fotográfica, ya sea $\rho(\lambda)$ o $\tau(\lambda)$, debe estimular en nosotros, como observadores finales, aproximadamente las mismas sensaciones cromáticas que el estímulo-color real \mathbf{b} de la escena original fotografiada. Por eso, es común asociar a una cámara fotográfica convencional como un dispositivo sustractivo del color, pero siempre que nos refiramos a su modo de funcionamiento: modo *print* o papel, modo *transparencia* o diapositiva; porque, siempre en estado bruto, la cámara se comporta como un dispositivo aditivo más.

Las consecuencias de esta interrelación entre métodos aditivos y sustractivos de reproducción del color se van a enfocar a continuación, con la intención de extraer aplicaciones nuevas y complementarias del objetivo base de esta tesis doctoral.

1.2.1 Problemática actual de los sistemas de gestión del color

Para la mayoría de nosotros es innegable que nos encontramos inmersos en una gran revolución tecnológica con la aparición de las tecnologías derivadas del estudio fundamental de la materia efectuado durante el siglo pasado, de aplicaciones específicas de la Física del Estado Sólido, de la Optoelectrónica u otras disciplinas más que han permitido el estallido socio-tecnológico de la Microelectrónica y la Informática. Este boom tiene y tendrá enormes repercusiones en la sociedad en general, en la industria, en los científicos e ingenieros (Mazor 1996; Owens 1995; Yencharis 1996). Por tanto, no es nada descabellado suponer que en un futuro no muy lejano, parte de este fenómeno socio-tecnológico, con todos sus fundamentos científicos, formará también parte de una disciplina educativa completa a nivel mundial (Rhody 1996).

El fenómeno socio-cultural asociado a esta revolución tecnológica es la Multimedia y términos asociados como Internet, pero a niveles más científicos, todo este campo de conocimiento y aplicación tecnológica de la imagen recibe el nombre de *Imaging*, *Imaging Science*, término que mantendremos en este trabajo para evitar el uso “raro” a la traducción castellana: imagería, o ciencia de la imagen. Esta rama de la ciencia engloba muchos conceptos, desde la edición de documentos hasta la animación por ordenador, y engloba a una gran cantidad de organizaciones profesionales internacionales como IS&T (*The Society of Imaging Science and Technology*) o SPIE (*The International Society for Optical Engineering*).

En la era de la Ofimática (*Desktop Publishing*), creación electrónica de documentos, éstos se procesan, se transportan y se visualizan dentro de una amplia variedad de formas. El ámbito del tratamiento del documento es enorme: abarca configuración de las páginas, longitud del documento, colación, a simple o doble cara, color, calidad de la imagen, acabado, y encuadernación. Si el entorno de la oficina está conectado por red informática, aparecen nuevas cuestiones ligadas con la comunicación del medio informático –protocolo o lenguaje de comunicación, formato del fichero, lenguaje de descripción de las páginas, compresión/descompresión, administración del trabajo, interacción máquina-usuario, y controladores de los dispositivos/periféricos– que también deben tenerse en cuenta. Los sistemas de tratamiento digital de la imagen procesan la información electrónica desde varias fuentes; las imágenes pueden proceder de un entorno local de red, de un dispositivo/periférico remoto, de estaciones de trabajo diferentes en el tratamiento del color, o de un escáner local. Después del procesado, un documento se comprime y se transmite generalmente a varios lugares por comunicación en red para la visualización, la edición o la impresión del mismo. Más aún, la tendencia en la industria se mueve hacia un entorno abierto a diferencia del entorno cerrado del pasado. Esto significa que varios dispositivos como escáneres, computadoras, estaciones de trabajo, módems, cámaras de video-conferencia e impresoras procedentes de fabricantes diferentes se ensamblarán en un único sistema, de ahí el impacto socio-tecnológico de la Multimedia. La tarea de disponer de un lenguaje común de comunicación entre los componentes del sistema independientemente del sistema de control/operación, formato del fichero, lenguaje de descripción de las páginas y contenido de la información, es enorme, y los primeros pasos para conseguir esto se vienen llevando a cabo desde hace solamente unos diez años aproximadamente. Idealmente, el intercambio o la comunicación no debería causar alteración o pérdida de información. Sin embargo, en la estructura de un documento se encuentran texto principalmente, gráficos y diferentes tipos de imágenes, cada uno de ellos con características y representaciones distintas como el código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) para el texto, vectores para los gráficos y código barrido (*raster*) para las imágenes. Cada tipo de imagen y sus atributos asociados como la fuente de letra, el tamaño de la misma, el tipo de trama de impresión (código *halftone*), nivel de gris, resolución, y color tienen que tratarse de forma diferente. En un entorno tan complejo, es muy probable que se den bastantes problemas de compatibilidad cuando una imagen haya de capturarse o registrarse, transmitirse, visualizarse y transferirse. Esta tesis doctoral se dedicará exclusivamente al aspecto del tratamiento del color en la imagen (Hunt 1995; MacDonald 1996; Reis 1996; Martínez-Verdú 1999), caracterizada tanto analógica como digitalmente, denominado *Color Imaging*, o *Tecnología del Color*.

El concepto de calidad total de una imagen en color es subjetivo porque el color es una sensación visual consciente. No obstante, la calidad en color de una imagen puede ajustarse a criterios objetivos que tienen

en cuenta los aspectos perceptuales del color conocidos hasta ahora, los cuales se desarrollarán más adelante. Desde los albores de Imaging Science, se determinó que existen cuatro áreas para la calidad total de una imagen en color (Jacobson 1995; Kang 1997, 269):

1. Reproducción de niveles de intensidad (rango dinámico - *tone*) y del color: referentes a la claridad (J), el tono (H) y el croma (C) de la imagen original con la imagen reproducida.
2. Patrones de interferencia: que pueden ser aleatorios o periódicos, e incluyen por ejemplo el efecto moiré, marcas de agua, aparición de bandas, etc.
3. Definición de la imagen: referentes a la nitidez y resolución del detalle fino de la imagen.
4. Características de la superficie: incluye al brillo, la textura y la rugosidad.

Estas cuatro áreas se pueden atribuir a la igualación/reproducción del color entre original/referencia/estándar y copia/muestra, y, a la estructura de la imagen. La reproducción de niveles de intensidad y del color es una consecuencia directa de la igualación/reproducción del color. Los factores que afectan a la igualación/reproducción del color son la *transformación de color*, la *gama de colores reproducibles (gamut mapping)*, las *condiciones de visualización* y el *medio de soporte* para la imagen; conceptos que se presentarán a continuación y que se tendrán en cuenta para la resolución de esta tesis doctoral. Los patrones de interferencia y la definición en la imagen son estructuras de la imagen que van ligadas a las técnicas de procesado de la imagen. Los factores que afectan a la estructura de la imagen son el *muestreo (sampling)*, *cuantización*, *compresión* y el *sub-muestreo de grises (halftoning)*. Las características de la superficie de la imagen están afectadas principalmente por el medio de soporte. Todos estos factores no son absolutamente independientes, sino que están bastante interrelacionados. Por ejemplo, el muestreo y la cuantización inadecuados transfieren características pobres en la imagen así como desviaciones de color. Las imágenes con bordes nítidos aparecen más coloridas y tienen más contraste que las imágenes con bordes difuminados. Medios con estructura de mosaico más fina darán resoluciones más altas y colores más claros.

El problema principal del procesado de la información electrónica de una imagen en color es la consistencia del color en el sistema de tratamiento: la apariencia de un documento debería permanecer constante cuando la imagen se transfiere a dispositivos/periféricos diferentes y pasa por varias transformaciones de color, de ahí el nombre de *Sistemas de Gestión del Color (Color Management Systems - CMS)*. En lo referente al aspecto del color en una imagen, el problema se traduce en el control de la igualación de la imagen reproducida o copia vs. imagen original, proceso que denominaremos a partir de ahora como reproducción del color. Los problemas de reproducción del color (Kang 1997; MacDonald 1996; Reis 1996) son:

1. Codificación del color en un espacio de representación dependiente del dispositivo/periférico de control de la imagen (*device-dependent color space*), como por ejemplo la codificación RGB (*Red-*

Green-Blue) de monitores CRT (*Cathod Ray Tube*) o la codificación de tintas CMYK (*Cyan-Magenta-Yellow-black*) de los sistemas de impresión.

2. Transformación de una codificación cromática dependiente de un dispositivo a otra codificación de color dependiente de un dispositivo diferente, por diseño o por la naturaleza propia de soporte del color: ¿cómo pasar de valores RGB a valores CMYK, de monitor a impresora? Este concepto se definirá como *transformación de color*.
3. La equivalencia del punto blanco/negro en una transformación de color. Los colores “blanco” y “negro” delimitan el rango dinámico de intensidades o contrastes reproducibles: el blanco en pantalla de un monitor CRT no se caracteriza colorimétricamente igual que el blanco del papel para fotocopiadora.
4. La gama de colores reproducibles (*gamut mapping*), puesto que diferirán en tamaño y en características al aplicar una transformación de color entre dispositivos diferentes: colores que son reproducibles en un dispositivo pueden no serlo en otro distinto, y viceversa.
5. La diferencia de medios o sistemas de soporte/presentación/control de la imagen, porque el fundamento teórico de reproducción del color puede ser muy diferente: un televisor es un sistema aditivo de reproducción del color, mientras que una cámara fotográfica convencional es un sistema sustractivo de reproducción del color en modo print y transparencia o diapositiva. La consideración del medio influye muchísimo en el enfoque con que se ha de tratar la equivalencia blanco/negro y la gama de colores reproducibles para aplicar satisfactoriamente la transformación de color (Tabla 1.3) (Fig. 1.10).

Tabla 1.3: Características de medios diferentes de reproducción del color.

Parámetro	Escena real	Monitor CRT	Impresora
Tipo de medio	Mezclado	Auto-luminoso	Reflectivo
Dimensiones	Dinámico 3-D	Dinámico 2-D	Estático 2-D
Tipo de iluminante	Sol + Luz Artificial	Propia + Luz Artificial	Luz Artificial + Sol
Luminancia (cd/m ²)	10-5000	50-120	15-500
Punto Blanco (K)	2000-10000	5000-9300	2700-4500
Entorno	Claro	Oscuro-Claro	Claro
Rango dinámico	10000:1	100:1	80:1
Resolución espacial	Ideal	Baja	Baja
Colorantes	Mezclado	Fósforos	Pigmentos, Tintas
Gama de colores	Muy grande	Grande	Media

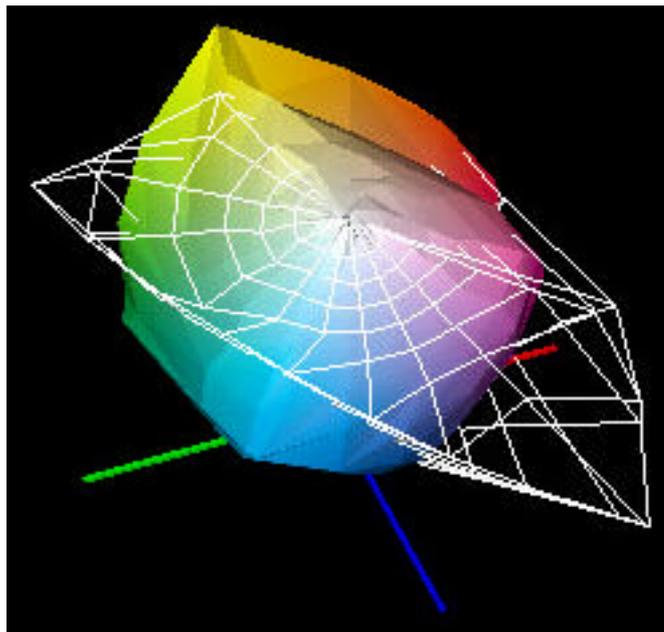


Figura 1.10: Representación tridimensional en el espacio CIE-L*a*b* (eje a*: rojo-verde; eje b*: amarillo-azul) de las gamas de colores reproducibles de un monitor estándar tipo CRT (como rejilla) y de una impresora estándar CMYK de chorro de tinta (como superficie coloreada).

6. Las condiciones de visualización con que se efectúe la comparación directa o indirectamente de la reproducción del color entre copia y original, o sea, el control de calidad del color. En este aspecto es donde interviene de manera especial y fundamental el observador o el sistema visual humano (SVH), con todos sus aspectos de percepción visual, y las condiciones de iluminación que incluyen la geometría fuente luminosa/observador y las características espectralradiométricas de la fuente luminosa.
7. El juicio subjetivo de la comparación visual entre la referencia y la muestra, conocido como apariencia del color, ligado a las condiciones del entorno y a la diferencia de medios. Este aspecto pone de manifiesto que, aunque encontremos una descripción cuantitativa o psicofísica del color (colorimetría), ésta nunca ofrecerá una equivalencia directa con la apariencia del color.
8. La variabilidad temporal de funcionamiento total y estructural de los dispositivos/periféricos del sistema de tratamiento en color de la imagen. Este aspecto obliga a buscar un procedimiento general de control con sub-procedimientos flexibles y eficientes ante inestabilidades. Así, se identifica la *caracterización* como el procedimiento general del dispositivo de color y como *calibración* a los sub-procedimientos a efectuar ante posibles alteraciones en el control del color.

Debido a la codificación del color dependiente del dispositivo, el problema que se presenta es enorme ante la disparidad de lenguajes/codificación del color de los periféricos diferentes de tratamiento/control/presentación del color de una imagen (Tabla 1.4). La forma más lógica de solucionar esto es utilizar un lenguaje/codificación común para todos los dispositivos, espacio de representación del

color que tenga en cuenta las características perceptuales de visión cromática del sistema visual humano (Fig. 1.11). Esta codificación independiente del dispositivo tiene como excelentes representantes a los espacios de color propuestos por CIE, que están completamente establecidos como estándares internacionales en diversos campos de la Ciencia y la Tecnología.

Tabla 1.4: Listado de los espacios de representación del color más comunes en Tecnología del Color.

Espacios de representación del color básicos RGB, CMYK, HSV	
Espacios colorimétricos CIE	
Perceptualmente no uniformes	RGB, XYZ, Yxy
Perceptualmente uniformes	Y _u 'v', CIE-L*u*v*, CIE-L*a*b, Munsell H V/C, NCS sc φ
Espacios de representación del color asociados a dispositivos/periféricos	
Dispositivos de reproducción aditiva del color	RGB _{escáner} , RGB _{monitor} , RGB _{película} , RGB _{cámara} , YIQ
Dispositivos de reproducción sustractiva del color	CMYK _{prueba} , CMYK _{impresión}
Otros espacios de color	YES, PhotoYCC, TekHVC

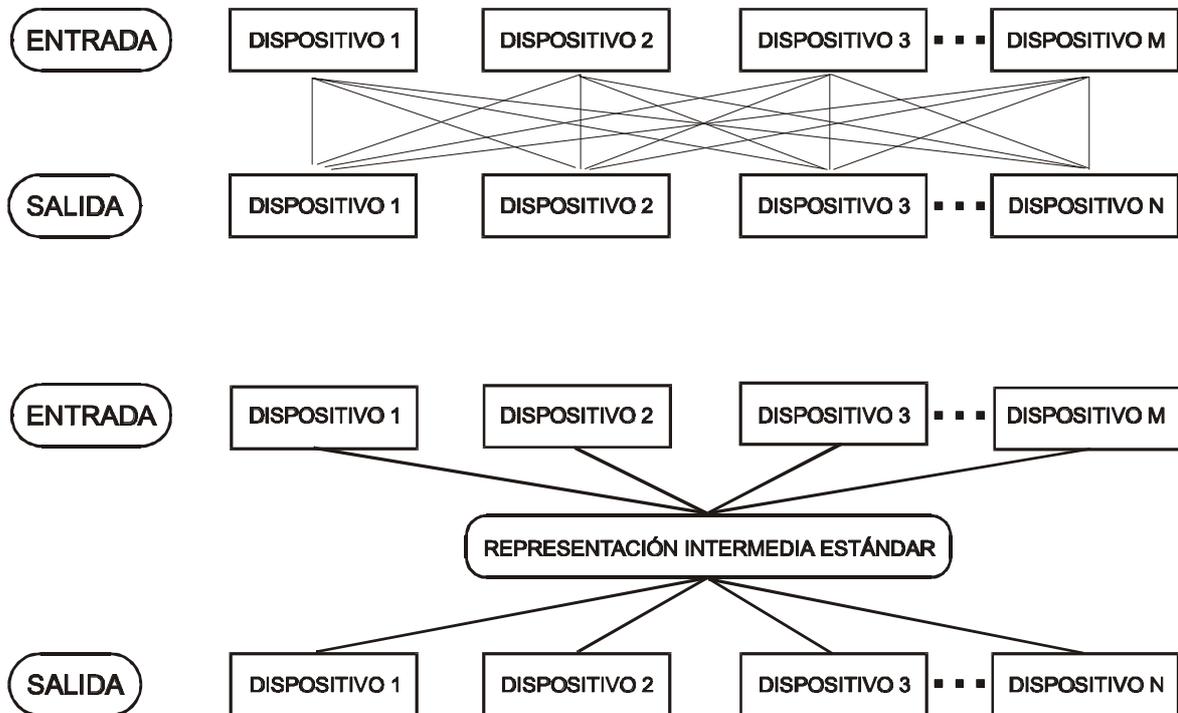


Figura 1.11: Caracterización de dispositivos/periféricos de control de la imagen en color según el estilo de codificación del color dependiente del dispositivo (parte superior) o independiente del dispositivo (parte inferior).

Este problema de estandarización de la consistencia del color en los equipos multimedia ya ha empezado a abordarse entre empresas punteras del sector y los comités internacionales de estandarización (*International Organization for Standardization - ISO, International Electrotechnical Commission - IEC, International Telecommunication Union - ITU*, y, CIE). En particular, la CIE se ha mostrado muy preocupada al respecto, por lo que organiza desde 1996 simposios de expertos sobre estandarización del color en las tecnologías de la imagen CIE-ESCSIT (*CIE Expert Symposium Colour Standards for Image*

Reproducción aditiva del color

Technology) en la *Color Imaging Conference* que organizan IS&T y SID (*Society for Information Display*). El método de resolución que finalmente se implantará se basa en la implementación de modelos de apariencia del color (Fairchild 1998), como espacios de representación del color de conexión intermedia (Fig. 1.12). En concreto, de los dos primeros simposios especializados, CIE ya ha establecido un modelo de apariencia del color denominado CIECAM'97 basado fundamentalmente en el modelo de apariencia para colores relacionados de Hunt'94 (Hunt 1995; 705-756).

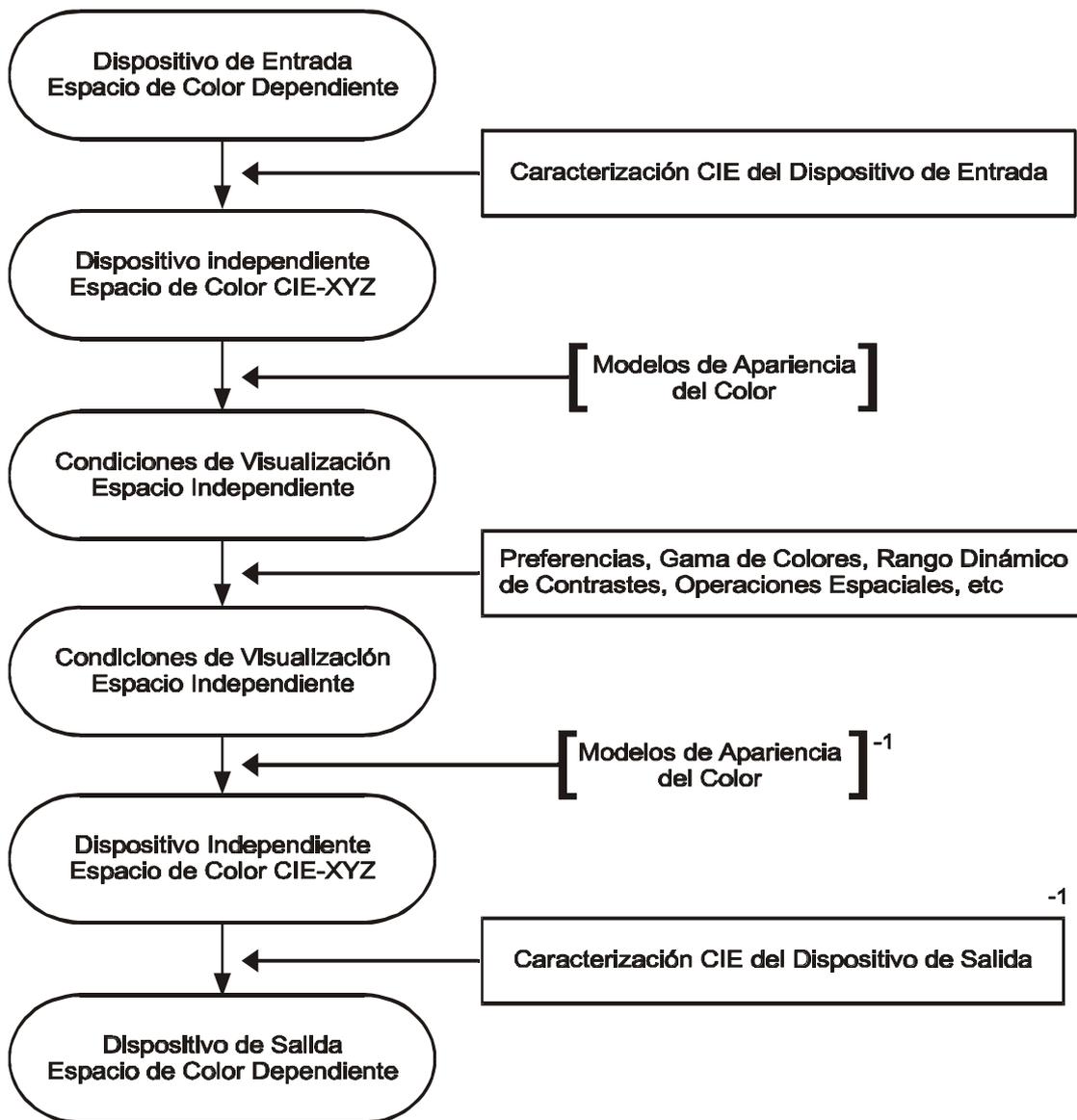
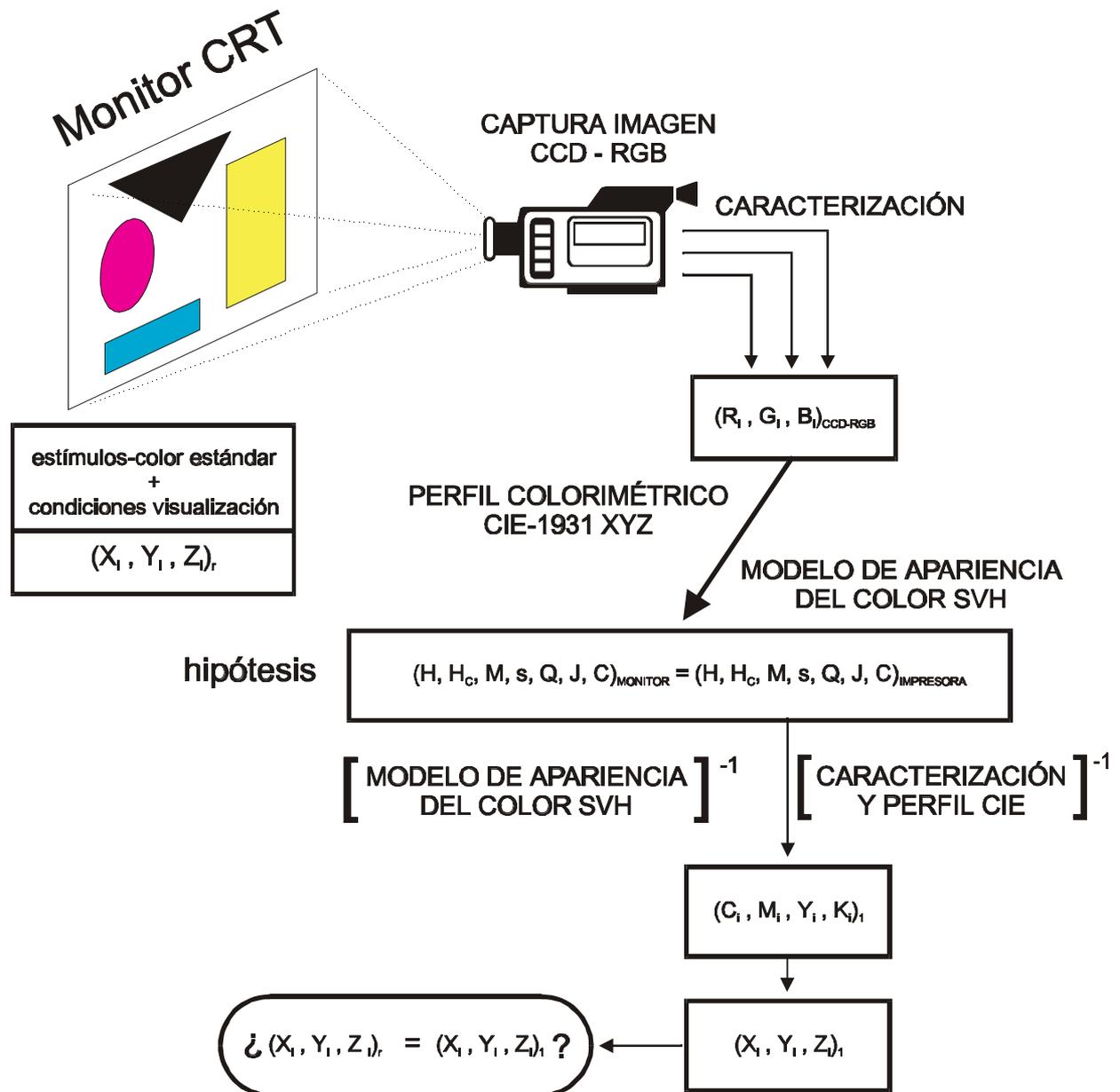


Figura 1.12: Modelo general de implementación de un modelo de apariencia del color para problemas típicos en los Sistemas de Gestión del Color.

Por ejemplo, analicemos el típico problema de obtener una igualación de color aceptable entre una imagen coloreada presentada en una pantalla tipo CRT, la típica de los ordenadores actuales, y su impresión en color a través de una impresora convencional de chorro de tinta. Para controlar de la mejor manera posible las disparidades visuales de apariencia del color entre ciertos colores entre los dos

formatos de imagen –en pantalla, en papel–, es necesario averiguar cómo se “crea” el color en estos dispositivos. Particularmente, la pantalla tipo CRT es un sistema aditivo de reproducción del color, los estímulos visuales presentados en pantalla son esencialmente la suma aditiva de luces roja (R), verde (G) y azul (B); mientras que la impresora de chorro de tinta es un sistema sustractivo de reproducción del color, los estímulos visuales formados sobre el papel son esencialmente la mezcla de tintas o pigmentos cian o azul-verde (C), magenta (M), amarillo (Y) y negro (K). Como consecuencia de esto, cada uno de estos dispositivos utiliza un lenguaje de color muy diferente, así que la forma de establecer una comunicación eficiente entre ambos es establecer un lenguaje común, en particular el que impone el observador por ser el elemento de comparación final entre la imagen en pantalla y la imagen impresa. Por tanto, se necesita diseñar un par de transformaciones de color o diccionarios entre los lenguajes de color propios de los dispositivos con el lenguaje visual del color. En términos técnicos, se realiza para cada dispositivo una caracterización por colorimetría CIE, la cual mediante la consecuente transformación o perfil de color se establece la conexión entre los espacios de color dependientes RGB y CMYK con el espacio de color independiente CIE-1931 XYZ. Aún así, es preferible manipular las diferencias de gamas de colores reproducibles, rango dinámico de intensidades o contrastes y otros aspectos en un espacio de color independiente más acertado como es un espacio de apariencia del color, cuyo ejemplo más conocido es el CIE-L*a*b*. Por lo tanto, el proceso global consta de dos caracterizaciones y cuatro perfiles de color: caracterización CIE de la pantalla tipo CRT, transformación CRT-RGB a CIE-XYZ, transformación CIE-XYZ a CIE-L*a*b*, control del color mediante análisis de la gama de colores reproducibles, el rango dinámico de contrastes, etc, transformación CIE-L*a*b* a CIE-XYZ, transformación CIE-XYZ a impresora-CMYK mediante la caracterización CIE de la impresora de chorro de tinta. Solamente efectuando todo este complejo proceso seremos capaces de analizar las causas de las diferencias visuales entre ciertos colores entre los dos formatos de imagen, y más aún, actuar en consecuencia para resolver estos problemas visuales inherentes a la tecnología multimedia.

Se ha indicado en la literatura científica (ESCSIT 1996, 1998) las excelencias de la tele-colorimetría para resolver la mayoría de los problemas de los Sistemas de Gestión del Color (CMS); en concreto, y al hilo del ejemplo anterior, la caracterización en apariencia del color de medios diferentes de reproducción o visualización como un monitor CRT y una impresora color (Alessi 1994, Fairchild 1998). Es decir, si los valores triestímulo t_{XYZ} de una escena son registrados correctamente por una cámara CCD-RGB "triestímulo", sería posible implementar a continuación cualquier modelo de apariencia del color (Fairchild 1998), convirtiendo así a la cámara CCD-RGB "triestímulo" en un tele-colorímetro perceptual (Fig. 1.7), y controlar de esa manera la salida CMYK en papel impreso para igualar ambas apariencias del color sobre medios cruzados de reproducción del color (Fig. 1.13). De modo complementario, también sería posible alterar a voluntad en la etapa intermedia de representación perceptual del color la gama de colores reproducibles u otros aspectos, para después invertir el modelo de apariencia del color y la caracterización CIE de la impresora con el fin de visualizar en papel impreso esos cambios. La potencialidad del uso de una cámara CCD-RGB bien caracterizada y diseñada o perfilada colorimétricamente es altísima, tanto para los problemas derivados de los Sistemas de Gestión del Color como los derivados en las primeras líneas de este trabajo de la medida y especificación de estímulos-color **b**. En parte, esta problemática multimedia no deja de ser una rama aplicada de los problemas generales ya explicados anteriormente



Si el juicio perceptual humano es positivo entonces (...) ? Sí



Figura 1.13: Resolución de la apariencia del color entre medios cruzados de reproducción del color a través de la implementación de un modelo de apariencia del color sobre una cámara CCD-RGB bien caracterizada y diseñada colorimétricamente.

1.2.2 Objetivos de una reproducción del color

El objetivo de una reproducción del color parece sencillo: conseguir una imagen en color copia de la escena real original. Y, la opinión del observador es la que cuenta para indicar si tal fin es aceptable o no. O sea, que la distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} procedente exclusivamente de la imagen es la única necesaria para efectuar la decisión de aceptabilidad. Sin embargo, tal como se indicó antes, los factores del entorno tales como las condiciones de visualización, la apariencia del color, la diferencia de medios, etc, influirán también en el criterio de aceptabilidad de la reproducción del color. Para evitar esta subjetividad en la aceptabilidad, la Colorimetría aporta criterios y métodos objetivos para minimizar esta componente subjetiva en la calidad de la imagen reproducida, necesarios para resolver la problemática de los Sistemas de Gestión del Color (CMS), como en el caso del planteamiento del espacio de representación del color independiente del dispositivo. Así, se distinguen varios objetivos o grados de exactitud de una reproducción del color (Hunt 1995, 222-241; Viggiano, Moroney 1997):

1. *Reproducción espectral del color*: igualdad de reflectancias/transmitancias espectrales o de distribuciones espectrales de potencia radiante entre copia y original. Con la notación matemática utilizada en este trabajo, tendríamos que: $\mathbf{b}_m = \mathbf{b}_r$, siendo "m" la muestra o copia y "r" la referencia o el original. Si bien proporciona una base útil para determinar el grado de metamerismo de los sistemas de reproducción, no se consigue en la mayoría de los casos por su fuerte restricción a causa de la naturaleza de la aditividad tricromática en el sistema visual humano (SVH) (Hunt 1995, 34-43, 54-61). No obstante, siempre que las cantidades de los primarios involucrados, ya sean aditivos o sustractivos, sean conocidas, entonces la reproducción espectral siempre será factible. Por ejemplo, supongamos que la chapa lateral de nuestro automóvil sufre desperfectos de pintura. Nuestro objetivo inmediato es llevarlo a un taller de chapa y pintura para sustituirla por otra nueva, igual a la anterior, sobretudo que el color de la nueva sea idéntico al original. Los empleados de estos talleres no suelen molestarse en calcular la fórmula de colorantes o pigmentos para conseguir el color de la pintura de nuestro automóvil. Más bien, ellos evitan efectuar una igualación metamérica que no se mantendría en otras condiciones de iluminación (por ejemplo, que el lateral nuevo fuera muy diferente al resto de la chapa del coche bajo la iluminación nocturna típica compuesta por lámparas de Na). La reproducción del color que realizan es de tipo espectral porque lo que suelen hacer es encontrar el código de color de la chapa, código que es exclusivo de la marca y del modelo del vehículo, ponerse en contacto con la sucursal de aprovisionamiento de dicha marca para recibir los botes de pintura con el mismo color que la chapa original de nuestro vehículo.
2. *Reproducción exacta del color*: igualdad de cromaticidades CIE-(x,y), luminancias relativas (Y) y luminancias absolutas (L en cd/m^2) entre copia y original. Esto asegura la igualdad de la apariencia del color si las condiciones de visualización son las mismas, incluyendo la cromaticidad y la luminosidad de la fuente luminosa o iluminante. Es decir, una igualación según la especificación triestímulo absoluta: $(\mathbf{t}_{XYZ})_m = (\mathbf{t}_{XYZ})_r$.
3. *Reproducción colorimétrica del color*: igualdad de cromaticidades (x,y) y luminancias relativas (Y) entre copia y original. Es decir, una igualación metamérica bajo las mismas condiciones de

visualización y el uso de iluminantes de la misma cromaticidad y luminosidad. Es decir, una igualación según la especificación triestímulo relativa: $(t'_{XYZ})_m = (t'_{XYZ})_r$. Como ejemplo analicemos la reproducción del color de la piel caucásiana (“blanca”) en un monitor CRT o de TV (Fig. 1.14). En este ejemplo, no se consigue los niveles de reproducción espectral ni exacto, entre otras cosas porque los niveles de luminancia absoluta entre la escena original y lo que se reproduce es bastante grande (de 1000 cd/m² bajo luz diurna a 50 cd/m² sobre pantalla). Pero si la caracterización CIE del monitor CRT se realiza eficazmente (CIE 1996; IEC 2000), si se realiza correctamente entre otras cosas la equivalencia del punto blanco del monitor CRT ($T_c=9300$ K, generalmente) y el iluminante D65, es posible conseguir el nivel de reproducción colorimétrico.

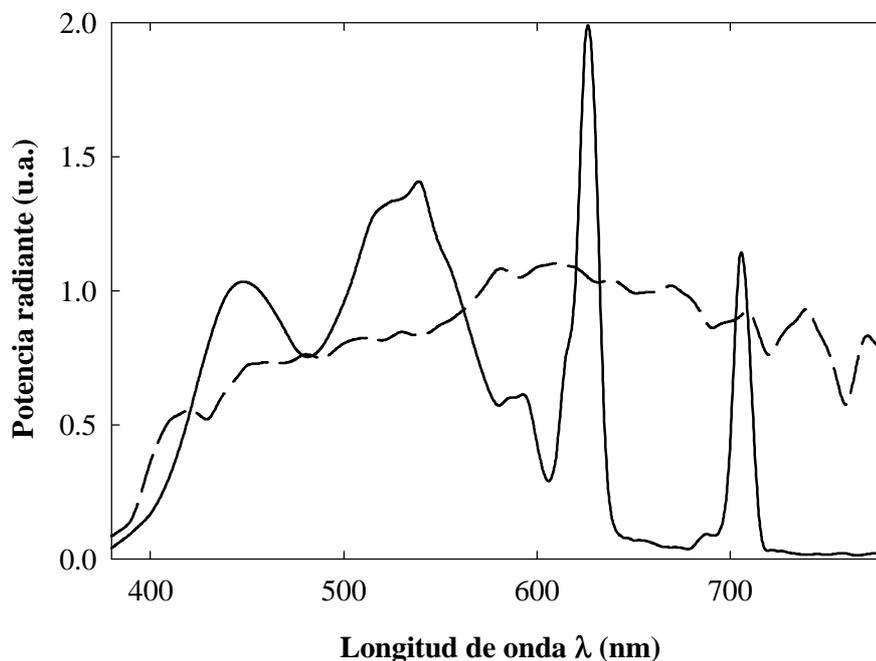


Figura 1.14: Distribuciones espectrales de potencia radiante relativa de la piel caucásiana estándar bajo el iluminante D65 (línea discontinua) y su reproducción aditiva (línea continua) mediante un monitor estándar tipo CRT.

4. *Reproducción equivalente del color:* las cromaticidades (x,y), las luminancias relativas (Y) y las luminancias absolutas (L) de la copia son tales que aseguran la igualdad de apariencia, pudiendo tener en cuenta todos los efectos de las condiciones de visualización. Es decir, que no es necesario ninguna de las igualaciones en las especificaciones triestímulo absoluta o relativa. Sin embargo, puede ser un criterio irrealista si no se consideran correctamente los efectos siguientes:

- La diferencia en luminosidad y cromaticidad entre el iluminante del original y el iluminante de la copia. Por ejemplo: el balance de blanco de una cámara TV sobre una escena iluminada con luz

incandescente (iluminante A, $T_C = 2856$ K) y su reproducción aparentemente neutra sobre el monitor ($T_C = 6500$ K), ni demasiado amarillenta ni azulada.

- El efecto del fondo: un fondo oscuro hace decrecer el colorido aparente de los colores así como el contraste de los grises.

5. *Reproducción correspondiente del color*: las cromaticidades (x,y) y las luminancias relativas (Y) de la copia son tales que aseguran aproximadamente la igualdad de apariencia cuando los niveles de luminancia entre la copia y el original son aproximadamente los mismos. Este criterio también incorpora la posibilidad de tener en cuenta los efectos de las condiciones de visualización, excepto los niveles absolutos de luminancia, y, es el criterio más realista para la mayoría de situaciones, tal como ocurre por ejemplo en la Fotografía Fotoquímica o clásica (Attridge, Pointer 1994; Holm 1996; Hunt 1995, 243-429). Uno de los efectos que controla este nivel de reproducción es el de la luminancia del fondo de visualización sobre el *balance de grises* o contraste acromático (*tone reproduction*) (Hunt 1995: 93-97). Ya hemos advertido arriba que un fondo oscuro siempre reduce aparentemente el colorido y el contraste de grises. Por eso, el mejor método para contrarrestarlo es adelantarse a él. La Figura 1.15 muestra en escala logarítmica como ordenada los niveles de grises o contrastes necesarios para conseguir una reproducción correspondiente del color frente a los niveles de grises originales ante tres situaciones típicas de fondo: claro (o típico para la reproducción fotográfica en papel), semi-oscuro (como cuando observamos la TV o películas fotográficas sobre un tablero luminoso) y oscuro (típico del ambiente de las salas de cine). Si el fondo claro intenta representar las mismas condiciones de visualización que la escena original, entonces el cociente o la pendiente (*gamma*) entre los datos copia/original tiene que ser igual a 1. En los demás casos, interesa aumentar la pendiente (*gamma*) o contraste entre ambos para que el efecto final reductor sea minimizado lo justo o incluso superado, es decir, que el contraste y el colorido final sean mayores que el original. Por ejemplo, las cintas cinematográficas presentan un contraste muy elevado, $\gamma = 1.5$, para que cuando la película se proyecte en la sala a oscuras, el efecto reductor del ambiente sea superado de forma que la apariencia de los colores de la cinta, tanto el colorido como el contraste de grises, se vean ligeramente reforzados ($1 < \gamma < 1.5$) para conseguir una apariencia del color aceptable para todos los observadores.
6. *Reproducción preferida del color*: los colores reproducidos se desvían de la apariencia del color original debido fundamentalmente a criterios psicológicos y culturales para conseguir un resultado visual agradable o placentero. Por ejemplo, las cromaticidades preferidas en el diagrama cromático UCS-1976 (u',v') para los colores-objeto siguientes en Fotografía Fotoquímica y en Televisión: verde-césped, azul-cielo y piel caucásica (Fig. 1.16). Las luminancias relativas en porcentaje para los colores preferidos son 27, 30 y 39 para el césped, el cielo y la piel, respectivamente; los valores reales de luminancia relativa son respectivamente 13, 33 y 35. En consecuencia, podemos deducir de estos resultados que preferimos para muestras en papel fotográfico el césped más claro y el cielo un poco desaturado de sus apariencias reales de color. Este nivel de reproducción del color, no por ser el menos riguroso, deja de ser uno de los más importantes. Por ejemplo, en Fotografía y en Televisión ciertos colores como la piel tiene que controlarse cuidadosamente. La piel “blanca”, como color desaturado o pálido, varía desde tonalidades de rosa claro hasta diferentes grados de bronceados,

según el tipo de piel. Esto lo convierte en un color sensible a las variaciones de cromaticidad, como por ejemplo las causadas por un cambio de iluminante: ni la aceptamos como ligeramente verdosa ni ligeramente azulada. En consecuencia, es común en estos sistemas de reproducción utilizar la descripción cromática estándar de este color (notación Munsell: 5YR 8/4 bajo iluminante C) como punto ancla de las películas fotográficas y cintas cinematográficas y de vídeo/TV, es decir, las manipulan para conseguir un nivel de reproducción preferida para este color. No obstante, también es verdad que estos tipos de retoques o manipulaciones pueden alterar al mismo tiempo el nivel de aceptabilidad de otras gamas de colores: los sistemas con bajos niveles de colorido pueden reproducir los grises excesivamente amarillentos, mientras que los sistemas con altos niveles de colorido los pueden reproducir excesivamente azulados.

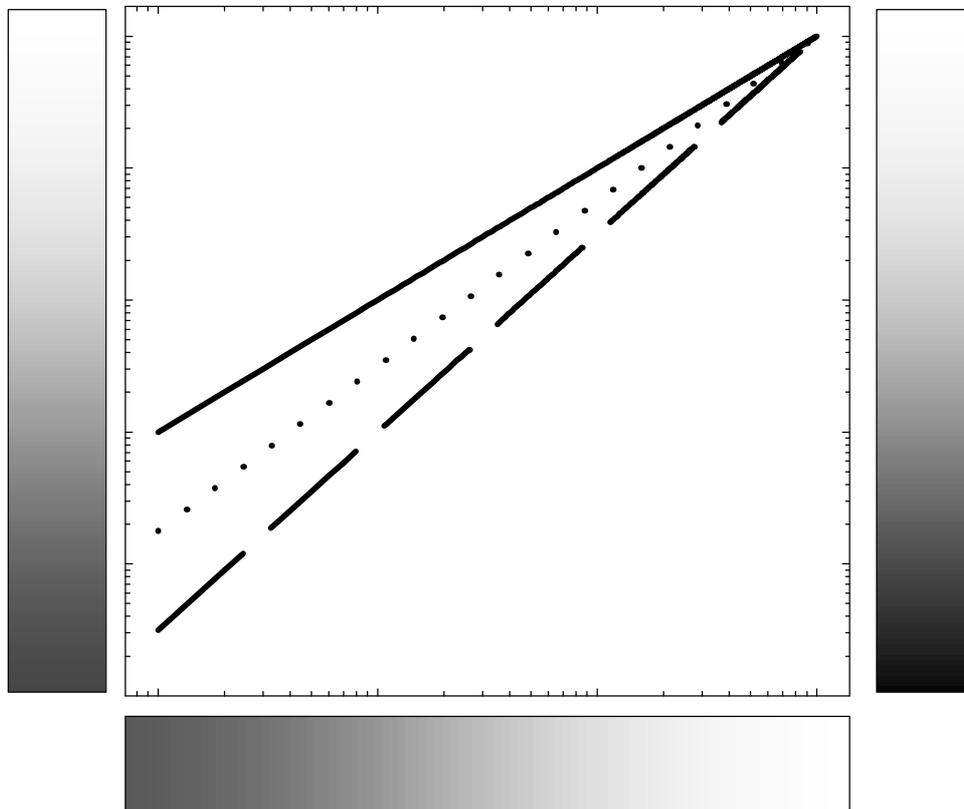


Figura 1.15: Compensación del efecto visual de reducción del contraste debido a la luminancia de fondo de visualización en el balance de niveles de gris de una reproducción del color: $Y_{\text{SALIDA}} = (Y_{\text{ENTRADA}})^{\gamma}$. La línea continua muestra el balance neutro de pendiente o gamma $\gamma = 1$, entrada = salida, válido para fondo claro. La línea punteada muestra el balance $\gamma = 1.25$ (escala visual de la izquierda), válido para contrarrestar el efecto de fondos semi-oscuros (hogar y TV). La línea discontinua muestra el balance $\gamma = 1.5$ (escala visual de la derecha), válido para contrarrestar el efecto de fondos oscuros (sala cinematográfica).

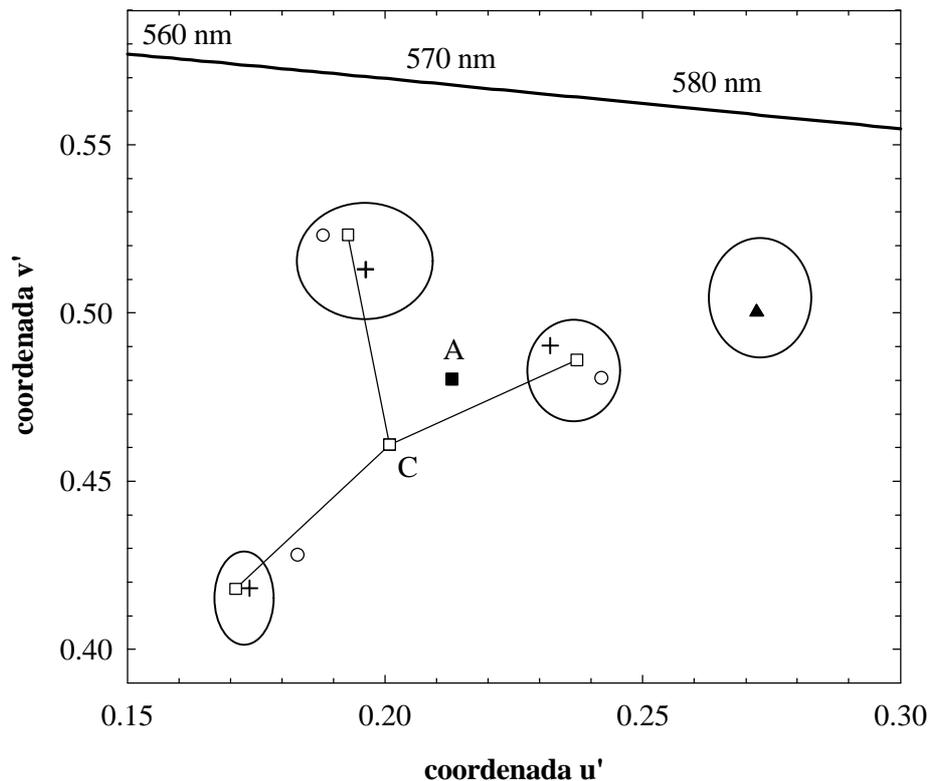


Figura 1.16: Cromaticidades preferidas (□) para el verde-césped, el azul-cielo y la piel caucásiana en papel fotográfico, junto con las cromaticidades reales de estos objetos-color (○) y las reproducciones fotográficas típicas (+), todas bajo iluminante C. Se muestra también la cromaticidad preferida de la piel caucásiana (▲) sobre un monitor de televisión (tipo CRT) bajo un entorno semi-oscuro de iluminación incandescente tipo A (■). Las líneas continuas delimitan las áreas de cromaticidad aceptable para la reproducción del color de estos objetos-color.

El criterio establecido normalmente en Tecnología del Color para resolver la problemática de los Sistemas de Gestión del Color (CMS) es la reproducción colorimétrica del color, la cual no asegura la igualdad de apariencia del color por basarse en la especificación triestímulo relativa: las equivalencias de los puntos "blanco" ($t'_{XYZ} = [1,1,1]^t$) y "negro" ($t'_{XYZ} = [0,0,0]^t$) no son colorimétricamente exactas entre un escáner y una impresora, por ejemplo. Por eso, últimamente se está planteando el objetivo de reproducción exacta para conseguir resolver definitivamente esta problemática (Hunt 1995, 705-756; MacDonald 1996) con la implementación de modelos de apariencia del color (Fig. 1.12-13).

Uno de los primeros pasos que realizan los usuarios o profesionales de la edición electrónica de documentos e imágenes (*Desktop Publishing*) es la capturar o registrar una imagen para reproducirla en color con respecto a la escena o imagen original. Esta captura se efectúa a través de un escáner, generalmente de sobremesa (*flat-bed scanner*), pero el control de la imagen capturada y digitalizada se realiza a través de su observación por el usuario mediante un sistema de visualización común como un monitor CRT. La diferencia de los medios de reproducción del color en Tecnología del Color –escáner,

monitor CRT, impresora, etc– plantea a los usuarios la aplicación generalmente inconsciente de la “filosofía” del software de control en modo WYSIWYG (*What You See Is What You Get*, lo que tú ves es lo que consigues), tanto entre escáner-monitor CRT como entre monitor CRT-impresora de chorro de tinta (*ink jet*) en las aplicaciones ofimáticas de uso extendido. Es uno de los aspectos más problemáticos en el éxito de la implementación de los Sistemas de Gestión del Color (CMS), pero que en realidad es un problema de controlar la reproducción del color. Si los usuarios siguen las pautas marcadas en la “filosofía” WYSIWYG estarán aplicando siempre como objetivos de reproducción del color los correspondiente o preferido, pero nunca el exacto, que garantiza la igualdad de apariencia del color, base del espacio de representación del color independiente del dispositivo, punto clave en la problemática de los Sistemas de Gestión del Color. Si bien existen numerosas reglas empíricas sobre la corrección del color, retoque y manipulación de imágenes (Margulis 1995), obtenidas por profesionales bien entrenados en percepción del color, estos fundamentos no deben considerarse válidos para una reproducción exacta del color (Kang 1997, 262-264; Hunt 1995, 698-702; MacDonald 1996).

La forma clásica de indicar de forma cuantitativa la calidad de la reproducción en color es calcular la diferencia de color total ΔE y parciales (claridad ΔJ , tono ΔH y croma ΔC) entre la copia y el original, como un intento objetivo de describir la valoración visual ΔV que efectúa el observador. Son las aplicaciones específicas de los espacios uniformes de representación psicométrica del color CIE-L*a*b*, CIE-L*u*v* y otros, como modelos simples de apariencia del color. Sin embargo, existen ciertas prioridades psicofísicas y psicológicas a la hora de cuantificar la importancia relativa de las variables perceptuales cromáticas en la valoración visual ΔV (Hunt 1995, 62-81; CIE 1995), por lo que las diferencias parciales de color suelen factorizarse adecuadamente para dar lugar a lo que se denomina *índice de reproducción del color (Color Reproduction Index - CRI)* (Attridge, Pointer 1994; Hunt 1995, 757-762). A partir de un conjunto de muestras coloreadas definidas, como la carta *Macbeth ColorChecker Chart* (Fig. 1.17, Tabla 1.5), las cartas IT8.7/1/2-1993 de la norma ISO 12641 u otras, se pueden calcular las desviaciones absolutas y relativas de claridad, tono y croma de reproducción en estas muestras (Fig. 1.18), y obtener así un criterio objetivo de la aceptabilidad o control de calidad de la reproducción del color. Ya han aparecido trabajos interesantes sobre la aplicabilidad del índice de reproducción del color con resultados optimistas (Attridge, et al. 1993; Attridge, Pointer, Reid 1991; Attridge, et al. 1995; Jacobson, et al. 1994; Wood, et al. 1987).

Si denotamos como IcJ el índice combinado de diferencias de claridad ΔJ , IcH el índice combinado de diferencias de tono ΔH , e, IcC el índice combinado de diferencias de croma ΔC , para una imagen tipo ColorChecker, entonces el índice de reproducción del color CRI se expresa como:

Ecuación 1.33

$$CRI = \frac{IcJ + k \cdot IcH + IcC}{k + 2}$$

con un factor k de peso (generalmente igual a 2) para la variable perceptual tono H debido a que los resultados psicofísicos y psicológicos demuestran que somos más sensibles a diferencias de tono que a las restantes, es decir, que la tolerancia perceptual a las diferencias de tono es más rigurosa que las otras dos.



Figura 1.17: Carta de colores ColorChecker de Gretag-Macbeth.

El algoritmo *CRI* tiene el propósito de extrapolar, a partir de una muestra estadística de estímulos-color, las desviaciones absolutas que se obtienen sin tener en cuenta el signo de las diferencias de color y relativas obtenidas considerando el signo de las diferencias en reproducción del color de las variables perceptuales de claridad (*J*), tono (*H*) y croma (*C*) de todos los estímulos-color que pueden reproducirse (Ver Anexo B). Por tanto, los índices combinados *IcJ*, *IcH*, *IcC* no son más que los valores medios de las desviaciones absolutas de las respectivas diferencias perceptuales parciales en las cuatro regiones tonales principales. Del mismo modo, las respectivas diferencias perceptuales relativas anteriores dan también información sobre las desviaciones relativas: por ejemplo, que si los colores rojos se desvían hacia el amarillo, que si los colores azules se reproducen ligeramente más claros, que si los colores verdes se reproducen bastante desaturados, etc. Si todas las diferencias absolutas y relativas parciales fueran cero, entonces por una sencilla normalización los índices combinados *IcJ*, *IcH*, *IcC* y el índice total *CRI* valdrían todos 100, como cota superior que indicaría reproducción del color perfecta en todos los sentidos. La conclusión válida, por tanto, sobre este algoritmo es que sus resultados son útiles desde el punto de vista cualitativo, no desde el punto de vista cuantitativo (como un índice general de error de medida/reproducción), debido a su carácter estadístico. Aunque es un algoritmo numérico que calcula tanto desviaciones absolutas como relativas, quizás las desviaciones absolutas deberían estar mejor pesadas para ofrecer varias escalas de aceptabilidad en la reproducción del color, pero se ha realizado muy poca investigación al respecto con este algoritmo. En cambio, las desviaciones relativas de claridad, tono y croma en las cuatro regiones tonales principales son parámetros estadísticos excelentes para marcar las tendencias de error en la reproducción del color del dispositivo puesto a prueba.

Tabla 1.5: Datos colorimétricos CIE-1931 (x,y,Y) bajo iluminante C y nomenclatura Munsell de los 24 colores de la carta ColorChecker.

Nº	Descripción	CIE-1931 bajo iluminante C			Nomenclatura Munsell	
		x	y	Y	H	V / C
1	Piel oscura	0.400	0.350	10.1	3 YR	3.7 / 3.2
2	Piel clara	0.377	0.345	35.8	2.2 YR	6.47 / 4.1
3	Azul cielo	0.247	0.251	19.3	4.3 PB	4.95 / 5.5
4	Verde follaje	0.337	0.422	13.3	6.7 GY	4.2 / 4.1
5	Azul flor	0.265	0.240	24.3	9.7 PB	5.47 / 6.7
6	Verde azulado	0.261	0.343	43.1	2.5 BG	7 / 6
7	Naranja	0.506	0.407	30.1	5 YR	6 / 11
8	Azul purpurado	0.211	0.175	12.0	7.5 PB	4 / 10.7
9	Rojo moderado	0.453	0.306	19.8	2.5 R	5 / 10
10	Púrpura	0.285	0.202	6.6	5 P	3 / 7
11	Verde amarillento	0.380	0.489	44.3	5 GY	7.1 / 9.1
12	Amarillo anaranjado	0.473	0.438	43.1	10 YR	7 / 10.5
13	Azul	0.187	0.129	6.1	7.5 PB	2.9 / 12.7
14	Verde	0.305	0.478	23.4	0.25 G	5.4 / 8.65
15	Rojo	0.539	0.313	12.0	5 R	4 / 12
16	Amarillo	0.448	0.470	59.1	5 Y	8 / 11.1
17	Magenta	0.364	0.233	19.8	2.5 RP	5 / 12
18	Cian	0.196	0.252	19.8	5 B	5 / 8
19	Blanco	0.310	0.316	90.0	N	9.5 /
20	Neutro 8	0.310	0.316	59.1	N	8 /
21	Neutro 6.5	0.310	0.316	36.2	N	6.5 /
22	Neutro 5	0.310	0.316	19.8	N	5 /
23	Neutro 3.5	0.310	0.316	9.0	N	3.5 /
24	Negro	0.310	0.316	3.1	N	2 /

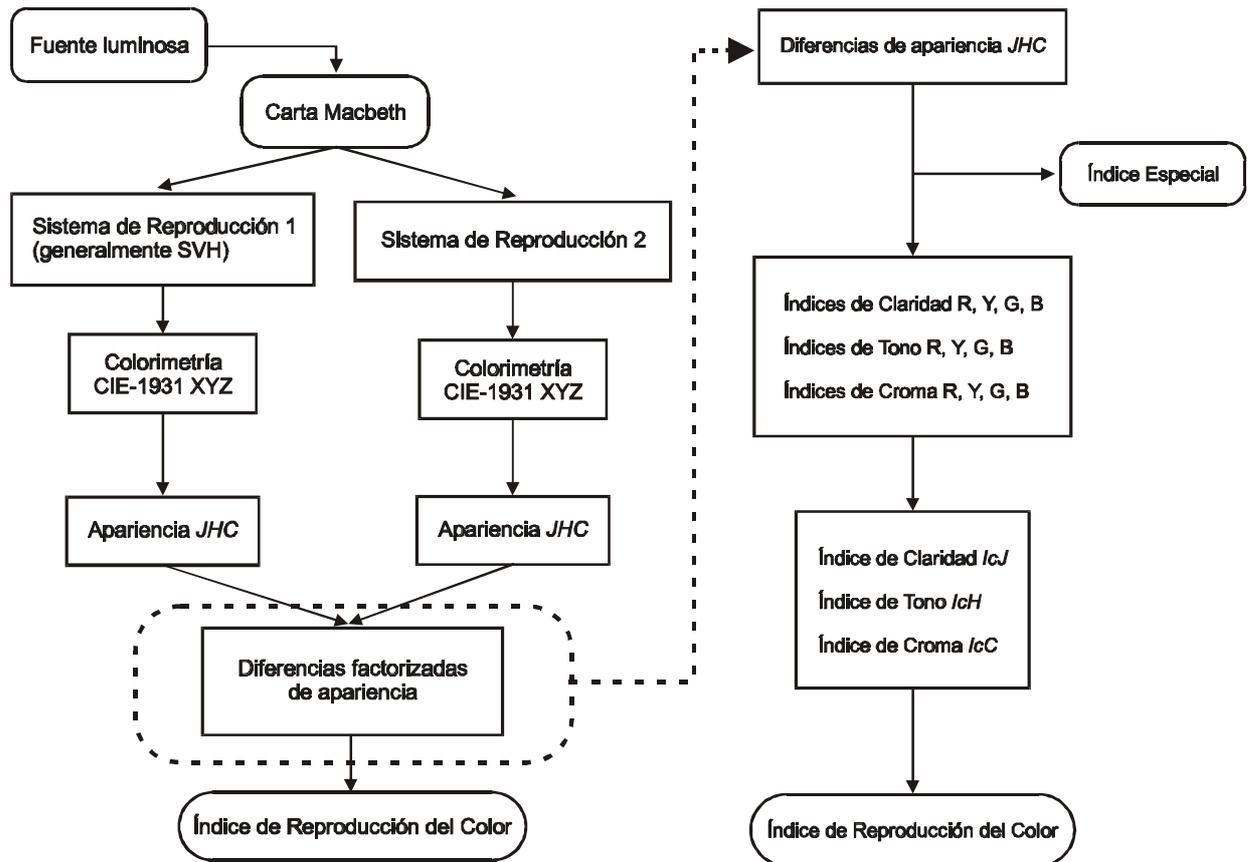


Figura 1.18: Estructura para el cálculo del índice de reproducción del color (CRI) para comparar dos sistemas de reproducción, donde generalmente uno de ellos es el sistema visual humano (SVH). Se indica también a la derecha los cálculos específicos de índices absolutos y relativos de reproducción en las regiones tonales roja (R), amarilla (Y), verde (G) y azul (B), incluyendo además un índice especial para alguna muestra coloreada considerada importante.

1.2.3 Métodos de obtención del perfil colorimétrico entre espacios de color

Ya hemos visto que la medida y la reproducción del color están íntimamente relacionados, como así lo demuestra la problemática de los Sistemas de Gestión del Color. Centrémonos, por tanto, en el problema específico de cómo convertir un dispositivo multimedia como una cámara CCD-RGB en un instrumento de medida/reproducción del color. En primer lugar, parece evidente que la terna RGB de respuesta de una cámara CCD-RGB es especificación de color dependiente del dispositivo, lo cual significa que hay que ir con mucho tiento al comparar las respuestas RGB numéricamente iguales entre cámaras de diferentes fabricantes, incluso entre modelos diferentes de la misma empresa. Esto no quiere decir que no pueda utilizarse la especificación RGB de una imagen para aplicar algoritmos de detección de bordes, segmentación, reconocimiento de objetos en una imagen, tal como hace el Tratamiento Digital de la Imagen; pero no tiene sentido extrapolar a partir de esas técnicas medidas colorimétricas y resultados válidos sobre reproducción del color (Margulis 1995). En todo caso, todas las conclusiones que pueden extraerse sobre estas técnicas se clasificarían dentro de los niveles de reproducción correspondiente y

preferida del color, pero nunca a niveles exacto ni colorimétrico. Por tanto, la cuestión evidente que surge rápidamente de esto es: ¿cómo transformar los valores RGB de una cámara CCD-RGB en valores triestímulo CIE-XYZ?. Es, en definitiva, calcular el perfil colorimétrico de nuestro dispositivo multimedia.

Como ya hemos indicado el concepto de espacio de color dependiente del dispositivo complica la resolución del control del color en las tecnologías multimedia. Ante tal variedad de espacios de representación del color (Tabla 1.4), se hace necesario establecer transformaciones para pasar de una representación a otra, como por ejemplo de los valores RGB de una cámara CCD-RGB bien caracterizada a valores triestímulo CIE-XYZ. Subrayamos de nuevo lo de "bien caracterizada" de la frase anterior, porque es un aspecto crucial para la resolución final de esta tesis doctoral. En concreto, nos estamos refiriendo a que una caracterización espectral acertada de cómo una cámara CCD-RGB captura la luz visible es imprescindible para después calcular el perfil colorimétrico del dispositivo, para que se comporte como un instrumento de medida del color. Si la caracterización espectral no es acertada, en ningún momento, cuando se aplique cualquiera de las técnicas de obtención del perfil colorimétrico que se describirán a continuación, la cámara perfilada colorimétricamente no será un instrumento de medida del color, puede que incluso no alcance ni el nivel de reproducción colorimétrica del color. Por tanto, aunque los aspectos sobre la caracterización espectral de una cámara CCD-RGB son imprescindibles para la total comprensión de este apartado, dejaremos por supuesto que algún tipo de caracterización, mejor o peor, se ha llevado a cabo antes del cálculo del perfil colorimétrico. (Los aspectos sobre la caracterización espectral de cámaras CCD-RGB se revisarán en el capítulo siguiente.)

La derivación de las transformaciones entre espacios de color depende, en principio, de qué tipo de información se conoce a priori entre los espacios inicial y final. Cuando los espacios de color inicial y final están derivados bajo el mismo observador, cuando se predicen igualaciones de color idénticas en ambos espacios de representación, la transformación ideal \mathbf{M} es una matriz 3x3, corolario de las leyes de Grassmann (leyes de proporcionalidad y aditividad del espacio vectorial tridimensional del sistema visual humano, es decir, la Ec. 1.6 para $k = 3$), y derivable de múltiples maneras (Tabla 1.6).

Aunque el esquema de la Tabla 1.6 (Brainard 1995) parece la solución definitiva al problema de la búsqueda del perfil colorimétrico de los dispositivos multimedia, esto no es tan fácil como se presupone. Sí que funciona para las condiciones iniciales impuestas arriba: por ejemplo, para el paso del espacio CIE-1931 RGB a CIE-1931 XYZ, o entre CIE-1976 (u',v',Y) y CIE-1931 (X,Y,Z). Sí que funciona, salvo algunos matices (CIE 1996), entre el espacio RGB dependiente de un monitor CRT (primarios \mathbf{P}_1) y el espacio CIE-XYZ (CMF \mathbf{T}_2), o entre espacios RGB diferentes entre dos monitores CRT (primarios $\mathbf{P}_1 \rightarrow$ primarios \mathbf{P}_2). Pero, en el caso que nos ocupa, entre el espacio RGB dependiente de una cámara CCD-RGB (CMF \mathbf{T}_1) y el espacio CIE-1931 XYZ (CMF $\mathbf{T}_2 \equiv \mathbf{T}_{XYZ}$), la nota "mediante regresión lineal" requiere un estudio amplio sobre su significado. Un estudio que abarca, por ejemplo, la solución ingenieril de la colorimetría aplicada a la TV, sobretodo los aspectos colorimétricos de las cámaras TV, hasta los últimos métodos matemáticos de enfoque a este problema tan peculiar. Vayamos, por tanto, por partes.

Tabla 1.6: Transformaciones genéricas entre espacios de representación del color.

Funciones espectrales conocidas			
Inicio	Final	$t_2 = M \cdot t_1$	Notas
Primarios P_1	CMF T_2	$M = T_2^t \cdot P_1$	T indica CMF cualesquiera Mediante regresión lineal
CMF T_1	Primarios P_2	$M = (T_1^t \cdot P_2)^{-1}$	
Primarios P_1	Primarios P_2	$M = (T^t \cdot P_2)^{-1} \cdot (T^t \cdot P_1)$	
CMF T_1	CMF T_2	$T_2^t = M \cdot T_1^t$	
Un espacio de color especificado en términos del otro			
Valores triestímulo conocidos		Cómo construir M	
Primarios iniciales P_1 conocidos en el espacio final P_2		Colocarlos en las columnas de M : $P_1 = P_2 \cdot M$	
CMF iniciales T_1 en el espacio final T_2		Colocarlos en las filas de M^{-1} : $T_1 = T_2 \cdot (M^{-1})^t$	
Primarios finales P_2 en el espacio inicial P_1		Colocarlos en las columnas de M^{-1}	
CMF finales T_2 en el espacio inicial T_1		Colocarlos en las filas de M	

1.2.3.1 Diseño de las sensibilidades espectrales de una cámara

La argumentación que se va a desarrollar a continuación es igualmente válida para escáneres, cámaras electrónicas de tubo de imagen para TV (Hunt 1995, 463-482), videocámaras actuales de sensores CCD-RGB para TV, cámaras CCD-RGB estáticas, como para cámaras digitales compactas: todos estos dispositivos de captura de una imagen son sistemas aditivos de reproducción del color.

Si el nivel de reproducción del color que se pretende es el exacto, lo cual implica el colorimétrico, es condición necesaria y suficiente que las sensibilidades espectrales de estos dispositivos, o sus funciones de igualación salvo el factor de escalado, sean una combinación lineal exacta de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ (Horn 1984; Hunt 1995, 451-455, 478), la cual recibe el nombre de condición de Luther (1927).

La solución teórica al problema, antes de comentar la solución práctica o ingenieril, es la siguiente. El concepto óptico de sensibilidad espectral, como el cociente respuesta vs. entrada radiométrica, significa inevitablemente que en la primera etapa de captura fotónica de los fotosensores, ya sean *tubos de imagen* (Hunt 1995; 463ss) o sensores CCD, las curvas espectrales de sensibilidad bruta o pura deben ser totalmente positivas, puesto ambos grupos de dispositivos "cuentan" y "suman" fotones, los cuales se reconvierten a una señal eléctrica por efecto fotoeléctrico. Simplemente, es imponer el concepto de aditividad de la reproducción del color. Otra cosa complementaria, pero que enmascara la mayoría de las veces el enfoque inicial correcto de este problema, son las transformaciones o técnicas de procesado de la señal que sufren posteriormente los valores brutos RGB en cualquiera de estos dispositivos, las cuales suelen llegar a re-interpretar falsamente otras curvas espectrales de sensibilidad como las originarias o brutas (IEC 2000).

Reproducción aditiva del color

La solución teórica sencilla, pero no impuesta tecnológicamente salvo raras excepciones por presentar defectos propios (Wyszecki, Stiles 1982, 243-248), es conseguir que las sensibilidades espectrales de estos dispositivos coincidan con las funciones de igualación CIE-1931 XYZ. El esquema básico a seguir es el siguiente (Fig. 1.19). El diseño óptico básico de cualquier dispositivo de captura de una imagen consta de:

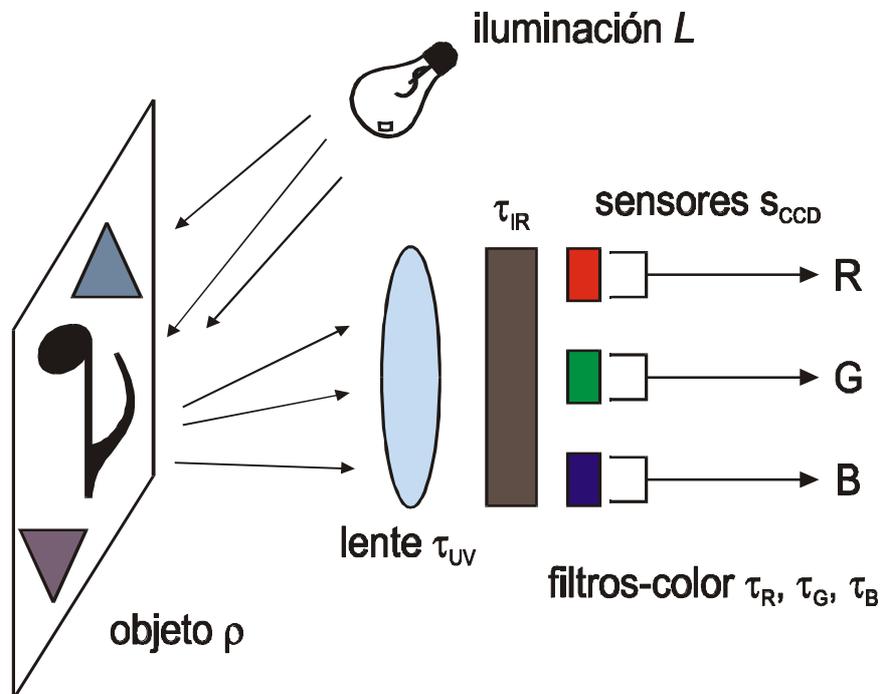


Figura 1.19: Esquema básico de diseño óptico de las sensibilidades espectrales de un dispositivo de captura de imágenes.

1. Un conjunto de filtros ópticos adosado a un sistema óptico de enfoque: para evitar la radiación ultravioleta (UV) τ_{UV} , el de la lente generalmente, para evitar la radiación infrarroja (IR) τ_{IR} , y, los filtros de colores RGB τ_R, τ_G, τ_B para la separación espectral de la información fotoeléctrica separada en los tres canales de color.
2. Un dispositivo optoelectrónico de tipo semiconductor, por ejemplo un CCD (*Charge-Coupled Device*), como sistema fotosensor base con sensibilidad espectral s_{CCD} . En concreto, en el esquema de la Figura 1.19, existirían tres sensores CCD, aunque ya veremos más adelante cuáles son las variaciones de diseño al respecto.

Expresado matemáticamente, y teniendo en cuenta que el funcionamiento del dispositivo se considera lineal (que se cumplan las leyes de Grassmann), la terna $\mathbf{t}_{RGB} = [R, G, B]^T$ de respuesta del dispositivo se obtiene a partir de

Ecuación 1.34

$$\mathbf{t}_{\text{RGB}} \propto \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{b} \quad , \quad \text{siendo } \mathbf{b} = \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \rho \quad \text{vector - luz incidente}$$

$$\text{donde } \mathbf{T}_{\text{RGB}} = [\mathbf{s}_R \quad \mathbf{s}_G \quad \mathbf{s}_B] \quad , \quad \text{siendo}$$

$$s_R(\lambda) = \tau_{\text{UV}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) \tau_R(\lambda) s_{\text{CCD}}(\lambda) \quad , \quad \text{sensibilidad espectral del canal R}$$

$$s_G(\lambda) = \tau_{\text{UV}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) \tau_G(\lambda) s_{\text{CCD}}(\lambda) \quad , \quad \text{sensibilidad espectral del canal G}$$

$$s_B(\lambda) = \tau_{\text{UV}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) \tau_B(\lambda) s_{\text{CCD}}(\lambda) \quad , \quad \text{sensibilidad espectral del canal B}$$

Por tanto, si las variables \mathbf{s}_R , \mathbf{s}_G , \mathbf{s}_B son perfiles espectrales exactos de las funciones de igualación \bar{z} , respectivamente, habrá seguridad que en el rango de funcionamiento lineal del dispositivo, las respuestas RGB serán valores triestímulo XYZ. Éste es por ejemplo el planteamiento teórico de los *colorímetros triestímulos*, ya sean de tipo plantilla (*template-colorimeter*) o de tipo filtro (*filter-photocell colorimeter*) (Artigas, et al., 1995, 551-554; Wyszecki, Stiles 1982, 243-248). Si bien han existido trabajos experimentales con éxito en el diseño, construcción y aplicación de colorímetros triestímulos "exactos", los instrumentos comerciales catalogados como colorímetros triestímulo presentan perfiles espectrales desajustados de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ. Es por eso que, aún siendo más baratos de fabricar y comercializar, sus propiedades de exactitud y precisión son comparativamente peores que las de los espectrofotómetros y los tele-espectrocolorímetros. Por tanto, las soluciones ingenieriles de búsqueda de los perfiles espectrales exactos de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ son, de momento, bastante limitadas.

Otra solución teórica ampliamente utilizada en la práctica es no buscar perfiles espectrales exactos de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ, sino buscar perfiles espectrales de alguna de las combinaciones lineales posibles, que también son por supuesto funciones de igualación. Es el enfoque escogido para la selección de las sensibilidades espectrales para las cámaras TV, tanto las primeras con fotosensores de tipo tubo de imagen, como las actuales con sensores CCD-RGB (Hunt 1995, 451-455). Es el planteamiento de la Tabla 1.6 para la transformación CMF $\mathbf{T}_1 \rightarrow$ Primarios \mathbf{P}_2 , donde \mathbf{T}_1 representa las sensibilidades espectrales de una cámara TV y \mathbf{P}_2 son los primarios aditivos de un monitor TV. Esto acarrea unas dificultades teóricas y prácticas de diseño óptico que justifica las razones en la diversidad de las sensibilidades espectrales de cualquier cámara CCD-RGB del mercado, ya sea en funcionamiento videocámara como cámara estática (de estudio fotográfico).

El planteamiento inicial de esta solución se basa en las características emisivas de los primarios \mathbf{P}_2 de un monitor TV convencional. Si este dispositivo es de tipo CRT (*Cathod Ray Tube*, tubo de rayos catódicos, o emisión de luz por bombardeo de electrones sobre la pantalla fosforescente), y tenemos en cuenta el modelo estándar colorimétrico internacional de espacio dependiente del dispositivo *espacio RGB fundamental sRGB* (IEC 1999), podemos asociar rápidamente estos primarios $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_{\text{sRGB}}$ con sus funciones de igualación \mathbf{T}_{sRGB} (Figura 1.20), balanceadas al iluminante D65, puesto que el blanco W de emisión del monitor sRGB se caracteriza por $\mathbf{t}'_{\text{W-sRGB}} \equiv \mathbf{t}'_{\text{D65}} = [0.9505, 1, 1.0891]^t$.

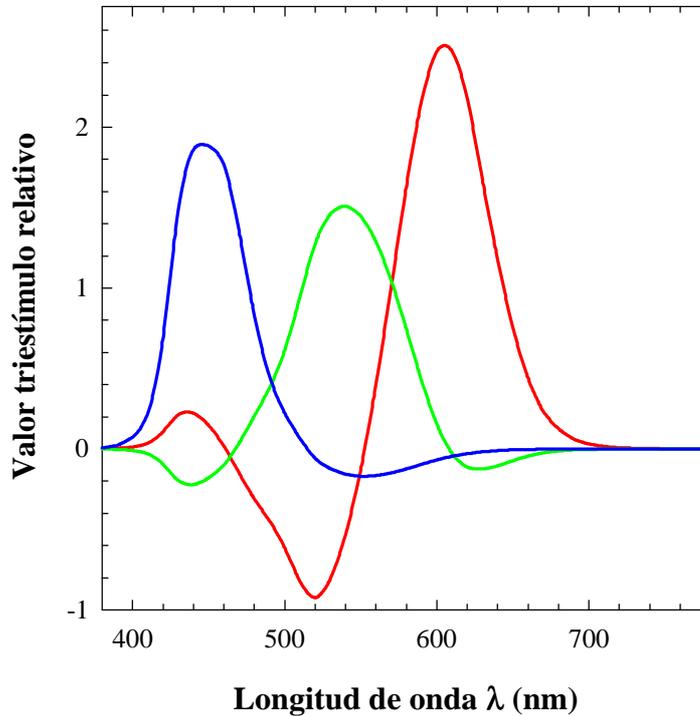


Figura 1.20: Funciones de igualación del espacio sRGB, como representativas de un monitor cuyos primarios proporcionan un blanco W, cuya cromaticidad es equivalente al iluminante D65.

Entonces, la dificultad teórica para seleccionar las sensibilidades espectrales de una cámara TV es que éstas no pueden tener físicamente, en estado bruto, regiones espectrales con valores negativos. Entonces, la primera solución teórica sería utilizar una cámara TV con 6 canales de color RGBUVW (Figura 1.21), de forma que las sensibilidades espectrales de los canales RGB se ajustaran espectralmente a las partes positivas de \mathbf{T}_{sRGB} , y, las sensibilidades espectrales de los canales UVW se ajustaran espectralmente a las partes negativas de \mathbf{T}_{sRGB} (como utilizando la función valor absoluto). De esta manera, la transformación de paso de \mathbf{t}'_{RGBUVW} a \mathbf{t}'_{sRGB} , conocida en la jerga como *matrixing*, entendida como un procesado de las señales de la cámara TV que se suele realizar antes de la transmisión cámara – monitor, quedaría como:

Ecuación 1.35

$$\text{si } \mathbf{T}_{sRGB}^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{T}_{RGBUVW}^t \Rightarrow \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{MONITOR sRGB}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ U \\ V \\ W \end{bmatrix}_{\text{CÁMARA 6-SENSORES}}$$

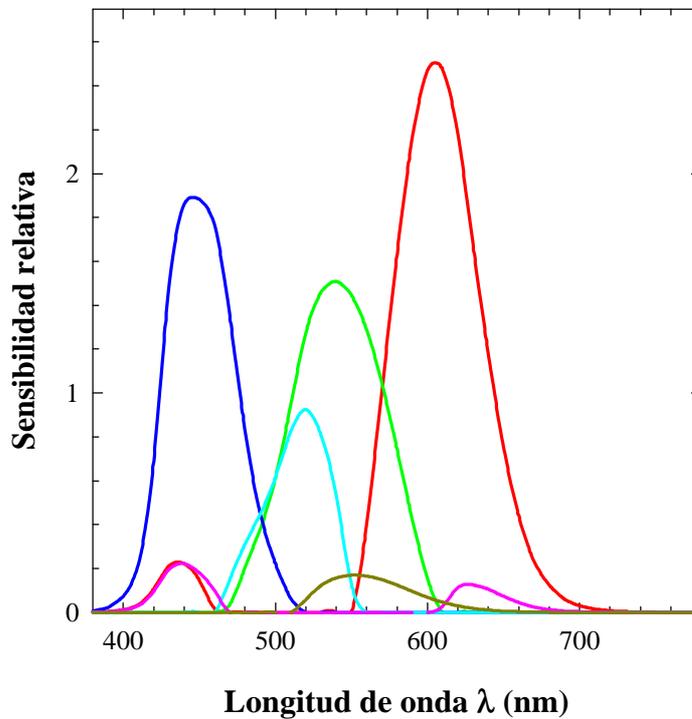


Figura 1.21: Sensibilidades espectrales de una cámara TV de 6-sensores, tal que se ajustan espectralmente a las zonas positivas y negativas de las funciones de igualación del espacio sRGB.

Una dificultad que hace inviable esta primera solución se debe a la propia matriz $\mathbf{M}_{3 \times 6}$, puesto que si recordamos la propagación de errores aleatorios en formalismo matricial (§ 1.1.2), va resultar que los errores aleatorios s_R^2, s_G^2, s_B^2 van a estar muy correlacionados por los solapamientos espectrales entre las sensibilidades espectrales $\mathbf{T}_{\text{RGBUVW}}$. Esto afectará de forma muy negativa a la codificación de las señales sRGB del monitor, puesto que la incertidumbre aleatoria asociada v , conocida en el lenguaje electrónico como SNR (*Signal Noise Ratio*, relación señal-ruido), será muy alta, o sea los valores SNR en dB muy bajos (Ec. 1.36). Otras dificultades técnicas añadidas, desde el punto de vista óptico (Ec. 1.34), son cómo combinar seis filtros $\tau_R, \tau_G, \tau_B, \tau_U, \tau_V, \tau_W$, con la sensibilidad espectral base del sensor para obtener $\mathbf{T}_{\text{RGBUVW}}$, con el escalado absoluto entre ellas. No es nada fácil, puesto que muchas variables pueden dar numerosos errores sistemáticos, aparte de los inevitables errores aleatorios.

Ecuación 1.36

$$\text{si } v = \frac{s}{m} \text{ incertidumbre relativa } \Rightarrow$$

$$SNR = 20 \log \left(\frac{m}{s} \right) = -20 \log (v) \text{ relación señal - ruido (dB)}$$

Reproducción aditiva del color

Descartada tecnológicamente la primera opción, pasemos a la segunda. El segundo planteamiento se fundamenta en la elección de sensibilidades espectrales de la cámara TV que se ajusten espectralmente a funciones de igualación totalmente positivas, como resultado de una combinación lineal exacta de \mathbf{T}_{sRGB} , o $\text{diag}(\mathbf{L}_{\text{D65}}) \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}}$. Si al mismo tiempo, estas nuevas sensibilidades espectrales totalmente positivas tienen pocas zonas de solapamiento espectral, entonces los valores SNR serán mayores que en la opción anterior. Es la idea de D.L. MacAdam (Pearson, Yule 1973), puesto que fue él el que encontró la transformación matricial \mathbf{M} que ofrecía unas funciones de igualación con el menor solapamiento espectral (Fig. 1.22). Si tenemos en cuenta la transformación matricial entre \mathbf{T}_{XYZ} y $\mathbf{T}_{\text{RGBMacAdam}}$, balanceada al estímulo equienergético \mathbf{E} , es posible calcular la transformación matricial de una posible cámara TV con $\mathbf{T}_{\text{RGBMacAdam}}$, balanceada al iluminante D65 para que el acople con el espacio de representación sRGB sea perfecto:

Ecuación 1.37

$$\text{si } \mathbf{T}_{\text{RGBMacAdam}} = \mathbf{T}_{\text{XYZ}} \cdot \begin{bmatrix} 0.5115 & 0.5985 & -0.1100 \\ -0.5081 & 1.4093 & 0.0988 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^t \Rightarrow$$

$$\mathbf{M}_{\text{sRGB-MacAdam}} = \begin{bmatrix} 3.3102 & -2.5129 & 0.2027 \\ -0.3218 & 1.4409 & -0.1192 \\ 0.0137 & -0.1136 & 1.0999 \end{bmatrix}, \text{ de forma que se verifica}$$

$$\mathbf{L}_{\text{D65}} \xrightarrow{\text{CÁMARA TV}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\mathbf{M}_{\text{sRGB-MacAdam}}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{MONITOR sRGB}} \begin{bmatrix} 0.9505 \\ 1 \\ 1.0891 \end{bmatrix} \equiv \mathbf{t}'_{\text{D65}}$$

Aunque la reproducción del color es colorimétricamente correcta dentro de la gama de colores reproducibles en el monitor sRGB, debido a que algunos valores matriciales fuera de la diagonal de $\mathbf{M}_{\text{sRGB-MacAdam}}$ son elevados, resulta que los valores SNR pueden llegar a ser bajos, cosa siempre no deseable. Es el precio que se paga por mantener las sensibilidades espectrales como perfiles exactos de funciones de igualación totalmente positivas: el solapamiento espectral puede ser el mínimo, pero no el mínimo absoluto deseable, o sea, nulo, porque es una consecuencia físico-matemática de la naturaleza de la aditividad tricromática del sistema visual humano (SVH). Pero claro, ¿por qué no ejecutar tal cual la transformación o *matrixing* entre los valores RGB de una cámara TV y un monitor? Esta cuestión introduce, por tanto, la tercera alternativa.

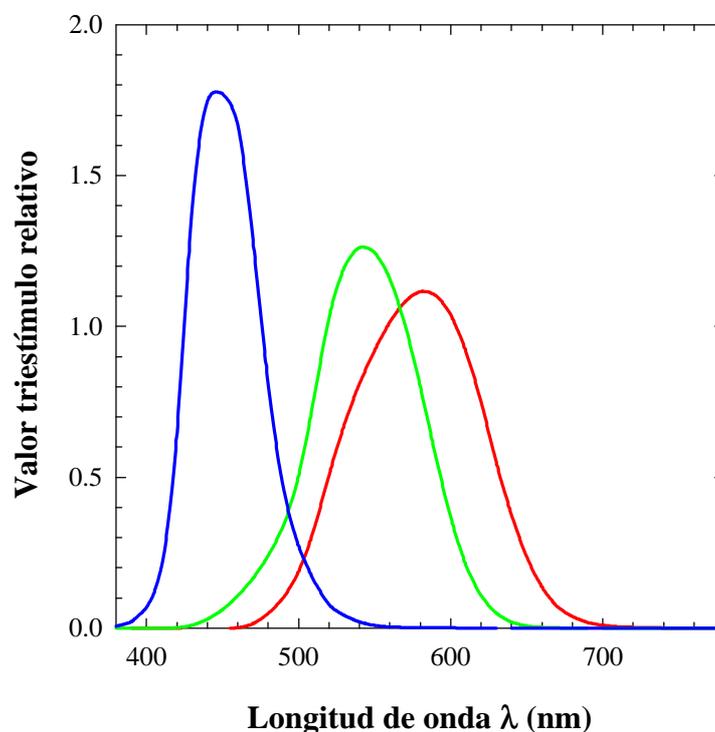


Figura 1.22: Funciones de igualación de MacAdam todas totalmente positivas y con el menor solapamiento espectral.

La tercera opción es consecuencia de lo que se denomina *compromiso de Ives-Abney-Yule* (Hunt 1995, 128ss). La idea consiste en seleccionar una terna de primarios irreales \mathbf{P}_{IAY} , tal que sus mezclas vectoriales engloben la zona física o *locus spectral* de todos los colores que somos capaces de percibir (Fig. 1.23). Si \mathbf{P}_R , \mathbf{P}_G , \mathbf{P}_B son unos primarios irreales cuyo triángulo RGB abarca todo el locus espectral, cualquier estímulo-color de reproducción podría considerarse como la mezcla aditiva de los primarios reales \mathbf{Q}_R , \mathbf{Q}_G , \mathbf{Q}_B más una cantidad específica de blanco \mathbf{W} ($= \mathbf{E}$), siendo estos primarios \mathbf{Q} también mezcla de los primarios \mathbf{P} más una cantidad específica de blanco. Entonces, el usar la terna \mathbf{Q} en los procesos de reproducción, estaría significando simplemente que añadimos luz blanca a la escena: los errores de tono serían mínimos, y los errores de saturación, no tan graves, serían fácilmente compensados aplicando posteriormente una función no lineal de aumento de la pureza colorimétrica. Como los primarios \mathbf{P} son todos irreales, sus funciones de igualación asociadas \mathbf{T}_{IAY} serían todas espectralmente positivas (Fig. 1.24), requisito físico imprescindible para la elección de las sensibilidades espectrales.

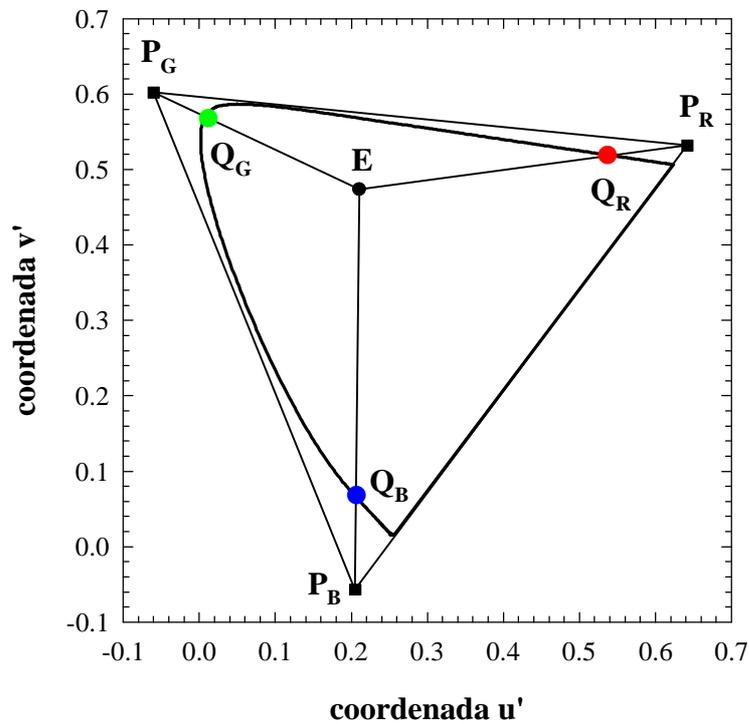


Figura 1.23: Compromiso de Ives-Abney-Yule en la selección de un conjunto de primarios-funciones de igualación para la reproducción del color en el espacio de representación CIE-1976 (u',v').

Las consecuencias de aplicar una transformación matricial entre los valores RGB de la cámara con T_{IAY} y los valores RGB del monitor sRGB son fácilmente controlables: todos los colores reproducidos en el monitor tendrían los mismos tonos, tal como fueran captados por la cámara; todos, eso sí, con una ligera desaturación que, por ser un error exclusivamente sistemático, es fácilmente compensable. Sin embargo, no ha sido históricamente ésta la elección tecnológica. Problemas de diseño óptico y radiométrico en la distribución de la luz incidente en los tres canales RGB de la cámara impiden una codificación eficiente: a mayor solapamiento espectral entre las sensibilidades espectrales, mayor es la dificultad técnica para impedir pérdidas de luz antes de incidir sobre los planos fotosensores (Hunt 1995, 478).

Parece de momento, que las opciones teóricas de selección de las sensibilidades espectrales no son las opciones tecnológicas más rentables y eficaces. Sobretudo, el aspecto clave que limita estas opciones es fundamentalmente de carácter electrónico: la matriz de transformación M entre los valores RGB de la cámara y los valores RGB del monitor debe ser lo más parecida a una matriz diagonal, para minimizar así la propagación de ruido aleatorio en la transmisión de las señales de color. Por tanto, solamente resta por plantear la opción de seleccionar sensibilidades espectrales con nulo solapamiento espectral.

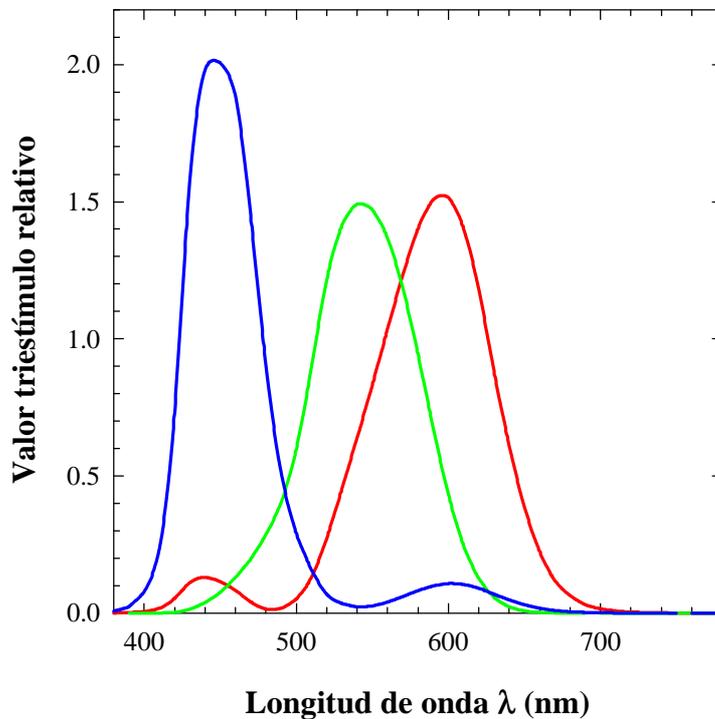


Figura 1.24: Funciones de igualación de Ives-Abney-Yule, balanceadas respecto al iluminante D65.

La cuarta opción consiste en diseñar sensibilidades espectrales en las cámaras que se ajusten espectralmente a las partes exclusivamente positivas de las funciones de igualación \mathbf{T}_{sRGB} . De esta forma, aunque las sensibilidades espectrales son claramente pseudo-funciones de igualación, porque no son combinación lineal exacta de \mathbf{T}_{XYZ} , las zonas de solapamiento espectral pueden reducirse enormemente y, por ende, minimizar el ruido aleatorio en la transmisión de las señales de color y aprovechar mejor la separación de la luz incidente en los tres canales RGB. Sean por ejemplo \mathbf{T}_{CCD} las sensibilidades espectrales de una cámara TV convencional (Fig. 1.25), con el propósito claro de diseño óptico de ajustarse espectralmente de forma aproximada a las partes positivas de \mathbf{T}_{sRGB} . Una vez que la condición de transmisión electrónica se cumple satisfactoriamente, queda averiguar si los errores de reproducción del color van a ser tolerables o no. A priori, por usar pseudo-funciones de igualación, las limitaciones propias entre las gamas de reproducción entre las cámaras y los monitores van a reforzarse: aparte de los errores inevitables debido al metamerismo entre dispositivos, algunos colores, algunas tonalidades, claridades y cromas van a reproducirse de forma errónea en el monitor.

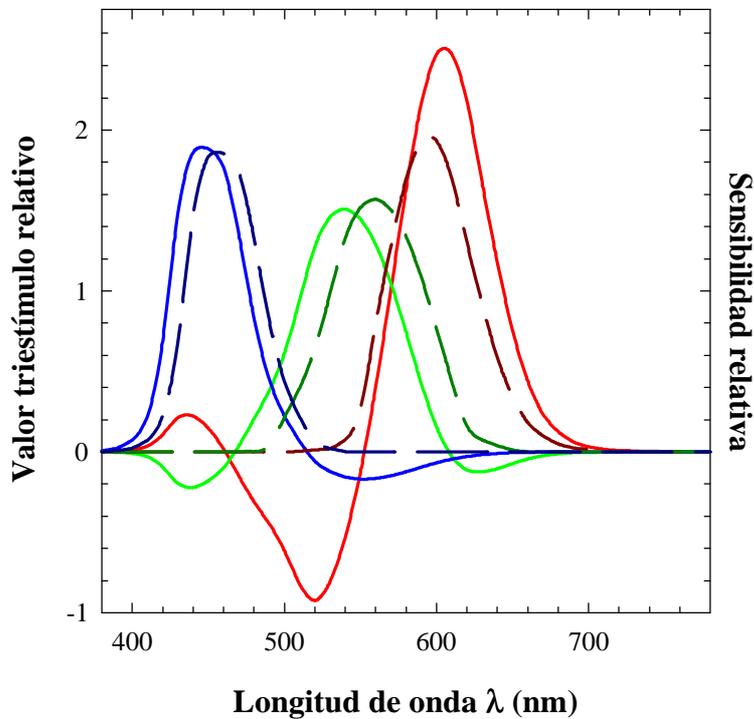


Figura 1.25: Sensibilidades espectrales de una cámara TV convencional (líneas discontinuas), con unos perfiles espectrales que intentan ajustarse a las partes positivas de las funciones de igualación (líneas continuas) de un monitor TV estándar sRGB.

Teniendo en cuenta el balance al iluminante D65, la cuestión que surge inmediatamente es si al encontrar la transformación matricial $M_{sRGB-CCD}$ entre ambos dispositivos, los errores de reproducción van a minimizarse de alguna forma. Considerando esto, tenemos que es posible averiguar a grandes rasgos de forma cualitativa cómo afecta la transformación matricial. Con $M_{sRGB-CCD}$, es posible estimar gráficamente las pseudo-funciones de igualación T_{sRGB} reconstruidas a partir del proceso siguiente:

Ecuación 1.38

$$\begin{aligned}
 &\text{si deseamos } L_{D65} \xrightarrow{\text{CÁMARA TV}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{M_{sRGB-CCD}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{MONITOR sRGB}} \begin{bmatrix} 0.9505 \\ 1 \\ 1.0881 \end{bmatrix} \equiv t'_{D65} \Rightarrow \\
 &M_{sRGB-CCD} = \begin{bmatrix} 1.6357 & -0.6451 & 0.0094 \\ -0.3478 & 1.2370 & 0.1108 \\ 0.0417 & -0.0732 & 1.0315 \end{bmatrix}, \text{ por lo que es posible estimar } T_{sRGB} \text{ como} \\
 &\hat{T}_{sRGB} = T_{CCD} \cdot M_{sRGB-CCD}^t, \text{ (pseudo) funciones de igualación estimadas del monitor sRGB}
 \end{aligned}$$

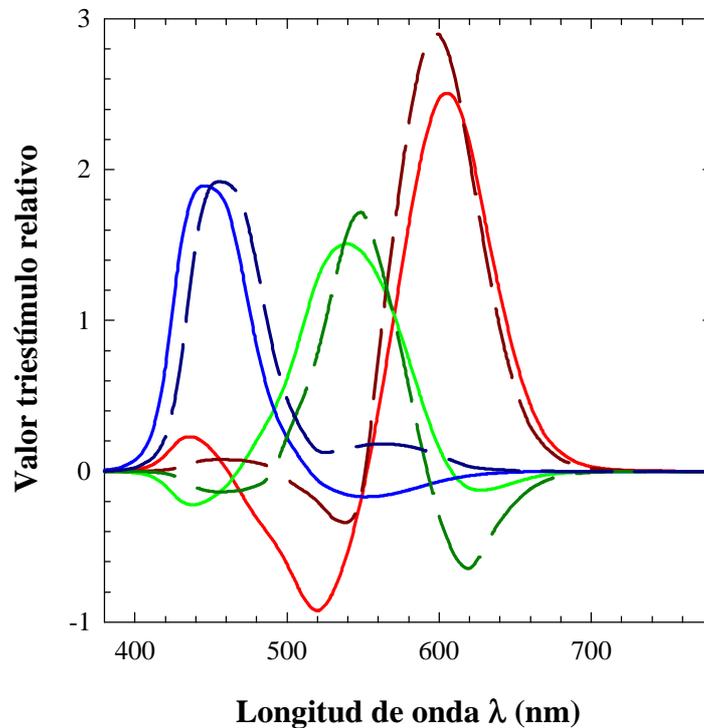


Figura 1.26: Representación gráfica de las (pseudo) funciones de igualación estimadas (líneas discontinuas) de un monitor TV estándar sRGB (líneas continuas), a partir de la transformación matricial de las pseudo-funciones de igualación de una cámara TV convencional.

La estimación gráfica de arriba demuestra que la reproducción del color en TV no es de nivel colorimétrico, como se explicó anteriormente. Sin embargo, los niveles de aceptabilidad al color de los espectadores son tan tolerables que, a no ser que nos fijemos con detenimiento y conozcamos al menos de forma superficial la reproducción aditiva del color, no seremos capaces de detectar y reconocer estos errores. Es más, es costumbre en TV ajustar de forma empírica (Sproson 1983) los coeficientes matriciales de $M_{sRGB-CCD}$ para que algunos estímulos-color comunes de todas las escenas –piel blanca caucásica, etc– sean reproducidos colorimétricamente de forma exacta o preferida, según criterios sociológicos. Por tanto, ésta es la quinta opción: convertir el proceso de reproducción del color en TV a un nivel preferido.

La tabla siguiente resume todas estas opciones ingenieriles sobre el diseño de las sensibilidades espectrales de una cámara TV, en la que las opciones cuarta y quinta son las elegidas, incluso preferentemente para cámaras CCD-RGB, para video-cámaras y cámaras digitales portátiles o de estudio.

Reproducción aditiva del color

Tabla 1.7: Los efectos sobre el nivel de reproducción en el diseño de las sensibilidades espectrales de una cámara TV convencional.

	Sensibilidades espectrales de la cámara TV	Manipulación extra de las señales de color	Gama de reproducción en el monitor TV	Resultado final visualizado en pantalla
1	CMF con partes negativas (cámara de 6 canales)	Ninguna	Colores correspondientes a las CMF de la cámara	Reproducción colorimétrica correcta de todos los colores dentro de la gama de reproducción del monitor
2	CMF totalmente positivas	<i>Matrixing M</i> en la cámara (o en el monitor)	Colores correspondientes a las CMF transformadas de la cámara	Todos los colores ligeramente saturados
3		Ninguna	Colores con el mismo tono como los correspondientes de las CMF de la cámara	
4	Partes positivas de las funciones de igualación del monitor TV	Ninguna	Colores correspondientes a las CMF de la cámara	Algunos errores en la mayoría de los colores
5		<i>Matrixing M</i> en la cámara (o en el monitor)		Errores reducidos en la mayoría de los colores

1.2.3.2 Métodos matemáticos alternativos de obtención del perfil colorimétrico

El formalismo matemático que subyace entre las transformaciones genéricas entre espacios de representación del color (Tabla 1.6) trae consigo otras propiedades matemáticas del Algebra matricial aplicada a la Colorimetría. Las leyes de Grassmann de la Colorimetría son los corolarios de proporcionalidad y aditividad de interpretar un espacio de representación del color como un espacio vectorial lineal de 3 dimensiones. Un espacio vectorial tridimensional, donde se definen los vectores o primarios \mathbf{P} , las coordenadas de posición o valores triestímulo \mathbf{t} , y las funciones de igualación \mathbf{T} como espacio vectorial dual al de los primarios, verificándose la relación de identidad: $\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{P} = \mathbf{I}$. Es, en definitiva, un lenguaje matemático sobre el cual se consolidan las implicaciones físicas del problema de medir y especificar la potencia radiante a la que es sensible el Sistema Visual Humano (SVH). De entre todas las propiedades o proposiciones matemáticas que se están verificando (Brainard 1995; Cohen 1988; Trussell 1991), creemos conveniente primero destacar una de ellas por clarificar bastante los métodos matemáticos alternativos de obtención del perfil colorimétrico entre los valores RGB de una cámara CCD-RGB y los valores triestímulo XYZ.

La base matemática que subyace en el problema colorimétrico del metamerismo, con el concepto fisiológico del principio de univariancia, permite una comprensión más completa de lo que significa la estructura vectorial de un espacio de representación del color. Es el *cálculo de metámeros* de una distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} , o la aplicación del concepto *metámero negro* \mathbf{b}_0 (Brainard 1995; Cohen 1988; Fairman 1991; Trussell 1991; Wyszecki, Stiles 1982). El espacio N_λ -dimensional del estímulo-color \mathbf{b} se puede descomponer en un sub-espacio tridimensional, conocido como *espacio visual humano* (SVH), y un espacio $(N_\lambda-3)$ -dimensional conocido como *espacio metámero negro*. Entonces, debido a la especificación triestímulo, $\mathbf{t} = \mathbf{T}^t \cdot \mathbf{b}$, el sistema visual es únicamente dependiente de la parte de la distribución espectral de potencia radiante que se encuentra dentro del sub-espacio visual humano. Esto significa que todos los metámeros posibles de un estímulo-color \mathbf{b} pueden expresarse de acuerdo con la ecuación 1.39

Ecuación 1.39

si \mathbf{B} es una base tridimensional de dimensión N_λ
 \Rightarrow un metámero cualquiera de \mathbf{b} es $\mathbf{m}_b = \mathbf{b}_f + \mathbf{b}_0$
 con $\mathbf{b}_f = \mathbf{B} (\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{T}^t \cdot \mathbf{b} = \mathbf{P}_v \cdot \mathbf{b}$, metámero fundamental de \mathbf{b} , \mathbf{P}_v operador proyección
 con $\mathbf{b}_0 = \left[\mathbf{I} - \mathbf{B} (\mathbf{T}^t \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{T}^t \right] \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_v) \cdot \mathbf{n}$, metámero negro de \mathbf{b} ,
 siendo \mathbf{n} cualquier vector N_λ - dimensional

La base vectorial \mathbf{B} de tres vectores N_λ -dimensionales puede ser, sin ningún obstáculo, las propias funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} del observador patrón CIE-1931 XYZ. Por tanto, el *operador proyección* del espacio visual humano puede ser $\mathbf{P}_v = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{XYZ}^t$, su *operador proyección ortogonal* $\mathbf{P}_0 = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_v)$. Del mismo modo, también puede encontrarse una base vectorial ortonormal \mathbf{O}_{XYZ} de \mathbf{T}_{XYZ} (Ec. 1.40, Fig. 1.27). De esta manera, el mismo operador proyección ortogonal al espacio visual humano quedaría como $\mathbf{P}_v = \mathbf{O}_{XYZ} \cdot \mathbf{O}_{XYZ}^t$.

Ecuación 1.40

$$\mathbf{O}_{XYZ} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \begin{bmatrix} -0.1209 & 0.1420 & 0.5715 \\ -0.1019 & 0.1850 & -0.5219 \\ -0.1931 & -0.1865 & -0.0823 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{M}_O^t$$

Todo esto significa que, ya que el sistema visual humano no puede detectar todos las posibles distribuciones espectrales de potencia radiante \mathbf{b} , pueden existir vectores \mathbf{b} con componentes negativas. Sabemos que estas componentes no tienen sentido físico, porque no las podemos detectar. Entonces, todos los vectores-luz \mathbf{b}_0 del espacio metámero negro tienen componentes negativas. Sin embargo, los vectores metameros negros \mathbf{b}_0 pueden combinarse con el vector metámero fundamental \mathbf{b}_f , el cual puede también tener algunas componentes negativas, para producir un metámero \mathbf{m}_b físicamente posible.

Para aclarar más este formalismo matemático, antes de entrar en métodos de perfiles colorimétricos, quisiéramos detenernos en los aspectos aplicados siguientes: obtención de *primarios fundamentales* \mathbf{P}_f , y, la *teoría de proyecciones de conjuntos convexos* (*Projection Onto Convex Sets - POCS*) aplicada al metamerismo del dispositivo multimedia.

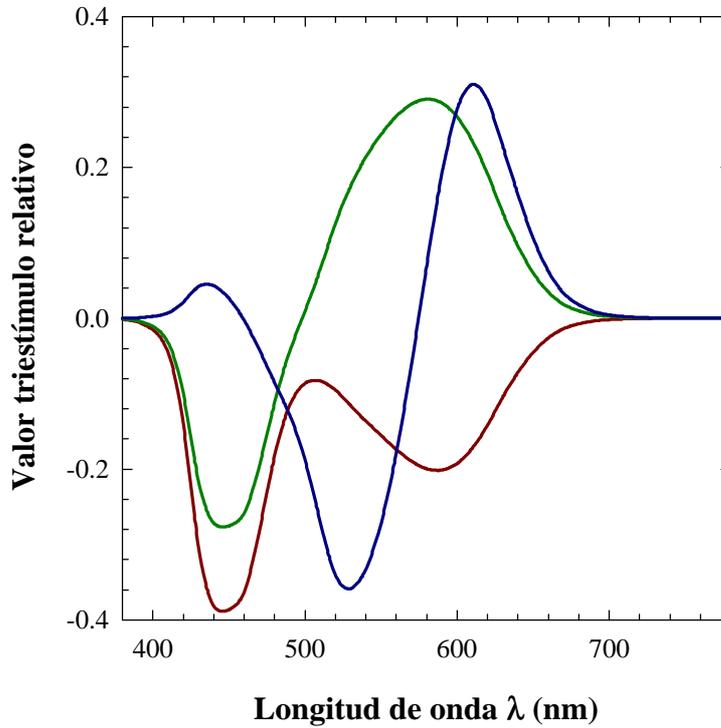


Figura 1.27: Base ortonormal de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ.

Si recordamos los elementos condicionantes de la Colorimetría –fuente luminosa \mathbf{L} , objeto $\boldsymbol{\rho}$, observador \mathbf{T}_{XYZ} –, resulta la especificación triestímulo $\mathbf{t}_{XYZ} = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \boldsymbol{\rho}$, lo cual significa que el estímulo-color viene dado por $\mathbf{b} = \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \boldsymbol{\rho} \equiv \mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{t}_{XYZ}$, verificándose la relación de identidad $\mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{I}_{3 \times 3}$. Entonces, definiendo la *matriz inversa generalizada* de Moore-Penrose (Trussell 1991) de una matriz asimétrica cualquiera \mathbf{T} como $(\mathbf{T})^+ = \mathbf{T}^t \cdot (\mathbf{T} \cdot \mathbf{T}^t)^{-1}$, el operador proyección \mathbf{P}_v del espacio visual humano queda como

Ecuación 1.41

$$\mathbf{P}_v = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{XYZ}^t = (\mathbf{T}_{XYZ}^t)^+ \cdot \mathbf{T}_{XYZ}^t$$

los primarios fundamentales \mathbf{P}_f del espacio de representación CIE-1931 XYZ (Fig. 1.28) como

Ecuación 1.42

$$\mathbf{P}_{XYZ_f} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{P}_{XYZ} = (\mathbf{T}_{XYZ}^t)^+$$

verificándose que $\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{P}_{XYZ_f} = \mathbf{I}$

y, la *reflectancia-objeto fundamental* $\rho_f = \mathbf{T}_L \cdot (\mathbf{T}_L^t \cdot \mathbf{T}_L)^{-1} \cdot \mathbf{t}_{XYZ} = (\mathbf{T}_L^t)^+ \cdot \mathbf{t}_{XYZ}$, siendo $\mathbf{T}_L = \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \mathbf{T}_{XYZ}$, y, verificándose $\mathbf{T}_L^t \cdot \rho_f = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \text{diag}(\mathbf{L}) \cdot \rho_f = \mathbf{t}_{XYZ}$, donde es posible que las componentes $[\rho_i]_f$ y $[\rho_i]_f$ no sean todas positivas, como ya advertimos antes.

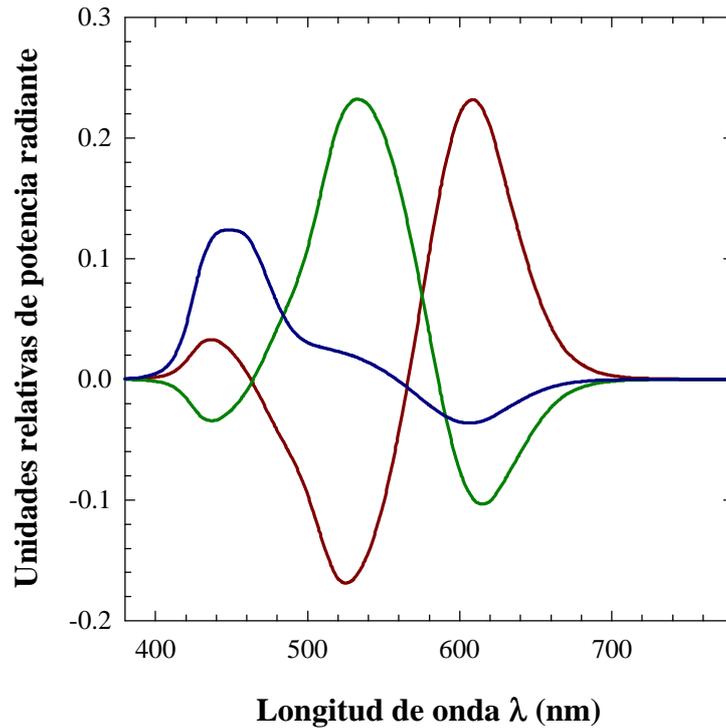


Figura 1.28: Primarios fundamentales del espacio de representación CIE-1931 XYZ.

El propósito de esto tiene que ver con que, gracias a este formalismo matemático, es posible obtener los primarios fundamentales de una cámara CCD-RGB, u otra cualquiera y, por lo tanto, representar cómo sería el triángulo de reproducción del color en una diagrama cromático tipo CIE-(x,y) o CIE-(u',v'). Para ello, recordemos primero el esquema de transformaciones genéricas entre espacios de color (Tabla 1.6). En concreto, el paso $\mathbf{T}_1 \rightarrow \mathbf{T}_2$ mediante el perfil \mathbf{M} , también significa que $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{M}$, entonces los primarios fundamentales de una cámara CCD-RGB se obtendrían así (Ec. 1.43)

Ecuación 1.43

$$\mathbf{P}_{RGB_t} = \mathbf{P}_{XYZ_t} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} \cdot \mathbf{M} = (\mathbf{T}_{XYZ}^t)^+ \cdot \mathbf{M}$$

con lo que la especificación triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} de estos primarios fundamentales de este dispositivo serían realmente las columnas de la matriz o perfil colorimétrico \mathbf{M} .

Reproducción aditiva del color

En métodos clásicos, la estimación es la solución a un problema de optimización matemática. Por ejemplo, una curva parametrizada se ajusta a los datos minimizando el error cuadrático entre la curva y los datos; es lo que se conoce como regresión o ajuste por mínimos cuadrados. La estimación teórica de un conjunto es básicamente diferente puesto que la estimación se elige de acuerdo con que cualquier solución, o elemento de ese conjunto, satisfaga todas las condiciones impuestas. La base para este método es que cada condición o ligadura define un conjunto, de forma que el conjunto estimado es la intersección de todos los conjuntos asociados a cada ligadura. Por tanto, una formulación vectorial es crucial para este método, el cual recibe el nombre técnico de teoría de proyección sobre conjuntos convexos (*Projection Onto Convex Sets* - POCS). Por ejemplo, este formalismo puede servir para estimar la gama de colores reproducibles de un dispositivo multimedia, como consecuencia del metamerismo del dispositivo: estímulos-color que se codifican de forma diferente en CIE-1931 XYZ pueden codificarse con la misma especificación RGB en una cámara CCD-RGB, o viceversa, estímulos-color codificados distintos en la cámara CCD-RGB representan especificaciones triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} iguales. El planteamiento teórico sería el siguiente:

- Conjunto de estímulos-color \mathbf{b} espectralmente positivos:

$$C_b = \{\mathbf{b} / b_i \geq 0\} \quad \text{con operador proyección} \quad P_b(\mathbf{x}) = |\mathbf{x}|, \quad \text{con } x_i \in]-\infty, +\infty[$$

- Conjunto de estímulos-color \mathbf{b} tal que tienen la especificación \mathbf{t}_1 de un dispositivo con espacio de color dependiente RGB:

$$C_{t_1, RGB} = \{\mathbf{b} / \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{b} = \mathbf{t}_1\} \quad \text{con operador proyección} \quad P_{C_{t_1, RGB}}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}_{RGB} \cdot \mathbf{b}_{1r} + \mathbf{P}_{0_{RGB}} \cdot \mathbf{x}$$

- Conjunto de estímulos-color \mathbf{b} tal que tienen la especificación \mathbf{t}_2 en CIE-1931 XYZ:

$$C_{t_2, XYZ} = \{\mathbf{b} / \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{b} = \mathbf{t}_2\} \quad \text{con operador proyección} \quad P_{C_{t_2, XYZ}}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{b}_{2r} + \mathbf{P}_{0_{XYZ}} \cdot \mathbf{x}$$

- Conjunto de estímulos-color \mathbf{b} tal que tienen la especificación \mathbf{t}_3 en CIE-1931 XYZ:

$$C_{t_3, XYZ} = \{\mathbf{b} / \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{b} = \mathbf{t}_3\} \quad \text{con operador proyección} \quad P_{C_{t_3, XYZ}}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{b}_{3r} + \mathbf{P}_{0_{XYZ}} \cdot \mathbf{x}$$

siendo $\mathbf{P}_a = \mathbf{T}_a \cdot (\mathbf{T}_a^t \cdot \mathbf{T}_a)^{-1} \cdot \mathbf{T}_a^t$, $\mathbf{P}_{0_a} = \mathbf{I} - \mathbf{P}_a$, $\mathbf{b}_{ar} = \mathbf{T}_a \cdot (\mathbf{T}_a^t \cdot \mathbf{T}_a)^{-1} \cdot \mathbf{t}_a$.

Entonces, dado inicialmente un vector \mathbf{x} N_λ -dimensional con componentes positivas y/o negativas, la iteración siguiente permite encontrar estímulos-color \mathbf{b} , con significado físico, tal que verifican que son metámeros para el dispositivo RGB y no lo son para CIE-1931 XYZ:

$$\text{la iteración} \quad \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{P}_{C_{t_3, XYZ}} \cdot \mathbf{P}_{C_{t_2, XYZ}} \cdot \mathbf{P}_{C_{t_1, RGB}} \cdot \mathbf{P}_b(\mathbf{x}_k) \quad \text{converge a un punto} \quad \cap C_{i=4}$$

Ahora ya estamos en disposición de presentar opciones de perfiles colorimétricos \mathbf{M} entre los valores RGB de un cámara CCD-RGB y el observador patrón CIE-1931 XYZ, y, estudiar comparativamente varios parámetros o índices matemáticos de calidad sobre la reproducción del color del dispositivo multimedia.

Básicamente, la primera clasificación clave entre los perfiles posibles es distinguirlos entre si el método matemático de optimización es mediante mínimos cuadrados (etiqueta LS - *Least-Squares*) (Finlayson, Drew 1997; Wandell, Farrell 1993) o por componentes principales (etiqueta PC - *Principal Components*) (Vrhel, Trussell 1992). La segunda clasificación clave es si se necesita o no información espectral previa sobre el contenido de la imagen. Así, distinguimos entre *perfiles colorimétricos de máxima ignorancia* (etiqueta MaxIg - *Maximum Ignorance*) o de *no-máxima ignorancia* (etiqueta NoMaxIg), para indicar que un cierto conjunto de estímulos-color puede servir de "entrenamiento" para aplicar después el perfil colorimétrico a escenas con contenidos espectrales desconocidos. Otra clasificación posible distingue entre modelos de regresión lineales o polinómicos (etiqueta PLS - *Polynomial Least Squares*) del perfil colorimétrico con 3 o más canales de color, o, si se establece una ligadura o condición para que se preserve la especificación del blanco W (etiqueta WPPLS - *White Point Preservation Least Squares*) u otro color entre ambos espacios de representación. La tabla siguiente muestra algunas combinaciones de estas clasificaciones, las cuales se desarrollarán a continuación, con la intención de implementarlas en la caracterización y diseño del perfil colorimétrico óptimo de una cámara CCD-RGB para convertirla en un tele-colorímetro triestímulo absoluto.

Tabla 1.8: Combinaciones de métodos matemáticos en la obtención del perfil colorimétrico \mathbf{M} entre el espacio RGB de un dispositivo (cámara CCD-RGB) y CIE-1931 XYZ.

PERFILES	ETIQUETA	RANGO	DESCRIPCIÓN
\mathbf{M}_1	MaxIgLS	3x3	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados (RGB \rightarrow XYZ)
\mathbf{M}_2	MaxIgWPPLS	3x3	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados preservando el punto blanco
\mathbf{M}_3	PMaxIgLS	3x10	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados con polinomio no lineal (1 R G B R ² G ² B ² R·G R·B G·B) \rightarrow (XYZ)
\mathbf{M}_4	PMaxIgWPPLS	3x10	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados con polinomio lineal que mantiene la especificación del punto blanco
\mathbf{M}_5	6-MaxIgLS	3x6	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados con 6 canales de color (R G B U V W) \rightarrow (XYZ)
\mathbf{M}_6	6-WPPLS	3x6	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados con 6 canales de color manteniendo la especificación del punto blanco
\mathbf{M}_7	No-MaxIgLS	3x3	Ajuste por mínimos cuadrados con información espectral previa de un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color
\mathbf{M}_8	6-No-MaxIg WPPLS	3x6	Ajuste por mínimos cuadrados con 6 canales de color manteniendo la especificación del punto blanco y con información espectral previa de un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color
\mathbf{M}_9	PC	3x3	Método por componentes principales, el cual usa un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color

1. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_1 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados.* Dado que se verifica $\mathbf{T}_{XYZ} = \mathbf{T}_{RGB} \cdot \mathbf{M}^t$, entonces podemos utilizar la matriz inversa generalizada $(\mathbf{T}_{RGB}^t)^+$ (Ec. 1.44):

Ecuación 1.44

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB})^{-1} = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t)^+$$

Se denomina de máxima ignorancia por utilizar la información espectral contenida en las funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} y \mathbf{T}_{RGB} , sin conocimiento previo de la escena. La matriz \mathbf{M}_1 puede ser o no una combinación lineal exacta de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ. Pero, por ser el espacio de color de entrada \mathbf{T}_{RGB} , la especificación $\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{t}_{RGB}$ no será quizás verdaderamente triestímulo, sino una estimación $\hat{\mathbf{t}}_{XYZ}$, ya que, seguramente, \mathbf{T}_{RGB} serán pseudo-funciones de igualación. Si planteamos como espacio de color de entrada a CIE-1931 XYZ, entonces el perfil colorimétrico resultante, denotémoslo como \mathbf{M}_{1a} , será una combinación lineal exacta de funciones de igualación que intenta ajustarse espectralmente a las pseudo-funciones de igualación de la cámara CCD-RGB. Entonces, $(\mathbf{M}_{1a})^{-1} \cdot \mathbf{t}_{RGB}$ sí que serán valores triestímulo verdaderos (Ec. 1.45).

Ecuación 1.45

$$\begin{aligned} \text{si } \mathbf{T}_{RGB} &= \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{M}_{1a}^t \Rightarrow \\ \mathbf{M}_{1a} &= \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} = \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot (\mathbf{T}_{XYZ}^t)^+ \Rightarrow (\mathbf{M}_{1a})^{-1} \approx \mathbf{M}_1 \end{aligned}$$

2. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados preservando el punto blanco.* El perfil colorimétrico anterior no asegura el balance de blanco ideal de la transformación de color, es decir, $\mathbf{M}_1 \cdot [R_E, G_E, B_E]^t \neq [1, 1, 1]^t$, lo cual puede suponer un serio revés a la reproducción de la escala acromática o de grises. Entonces, imponiendo un formalismo tipo multiplicadores de Lagrange, el perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 por mínimos cuadrados condicionados es (Ec. 1.46):

Ecuación 1.46

$$\text{suponiendo } \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{E} = \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_E \\ G_E \\ B_E \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{RGB_E} \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{XYZ_E}, \text{ des - balance de blanco ideal}$$

$$\Rightarrow \mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_2 + \mathbf{E}_2, \text{ donde } \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} \frac{X_E}{R_E} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_E}{G_E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z_E}{B_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_E} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{B_E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_2 = (\mathbf{Z}_2 \cdot \mathbf{N}_2)^t, \text{ satisfaciendo } \mathbf{t}_{RGB_E}^t \cdot \mathbf{E}_2 = 0,$$

$$\text{siendo } \mathbf{Z}_2 = [\boldsymbol{\sigma}_1 \ \boldsymbol{\sigma}_2]_{3 \times 2}, \text{ verificándose que } \boldsymbol{\sigma}_1^t \cdot \mathbf{t}_{RGB_E} = \boldsymbol{\sigma}_2^t \cdot \mathbf{t}_{RGB_E} = 0$$

$$\text{y } \mathbf{N}_2 = (\mathbf{Z}_2^t \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot \mathbf{Z}_2)^{-1} \cdot (\mathbf{Z}_2^t \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ} - \mathbf{Z}_2^t \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot \mathbf{D}_2)$$

Aquí, el perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 se presenta para que $\mathbf{M}_2 \cdot [\mathbf{R}_E, \mathbf{G}_E, \mathbf{B}_E]^t = [1, 1, 1]^t$, con supuesto des-balance de blanco ideal del dispositivo; pero, sería posible imponer otra ligadura sobre otro estímulo-color, incluso sobre dos y tres, que es el caso del método con componentes principales o perfil \mathbf{M}_9 . Por supuesto, ahora toda la escala acromática o estímulos grises se transformarían sin error colorimétrico, pero, puede que a expensas de aumentar el error de reproducción en otras regiones de color.

3. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_3 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados con polinomio no lineal.* El método consiste en considerar también términos cuadráticos de los valores RGB del dispositivo: R^2 , G^2 , B^2 , $R \cdot G$, $R \cdot B$, $G \cdot B$. Partiendo de nuevo con la condición de máxima ignorancia, buscamos la transformación matricial siguiente (Ec.1.47):

Ecuación 1.47

$$\text{si pretendemos } \mathbf{t}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ R \\ G \\ B \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ R \cdot G \\ R \cdot B \\ G \cdot B \end{bmatrix} \Rightarrow \text{si } \mathbf{T}_{RGB} = \begin{bmatrix} \bar{r} & \bar{g} & \bar{b} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

definiendo $\mathbf{R}_{RGB} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \bar{r} & \bar{g} & \bar{b} & \text{diag}(\bar{r}) \cdot \bar{r} & \text{diag}(\bar{g}) \cdot \bar{g} & \text{diag}(\bar{b}) \cdot \bar{b} & \text{diag}(\bar{r}) \cdot \bar{g} & \text{diag}(\bar{r}) \cdot \bar{b} & \text{diag}(\bar{g}) \cdot \bar{b} \end{bmatrix}$
 tenemos $\mathbf{M}_3 = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{R}_{RGB} \cdot (\mathbf{R}_{RGB}^t \cdot \mathbf{R}_{RGB})^{-1}$

En principio, parece que por aumentar el orden del polinomio de ajuste, el perfil colorimétrico será más exacto que los anteriores (Hong, Luo, Rhodes 2001). Pero, no podemos predecir sin ponerlo a prueba cuánto más exacto es, o sea mejor, que los anteriores. El único inconveniente en la aplicación de este método es que las sensibilidades espectrales de la cámara CCD-RGB tengan escaso solapamiento espectral, como suele suceder como justificamos en el sub-apartado anterior. Entonces, la matriz \mathbf{R}_{RGB} tendría una columna entera de ceros, con lo que no sería posible calcular la matriz inversa generalizada porque daría implícitamente un determinante nulo, el que estaría abajo dividiendo, con lo que sería la indefinición matemática 1/0.

4. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_4 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados con polinomio no lineal que mantiene la especificación del punto blanco.* Este método es la combinación conceptual de los tres métodos anteriores, de forma que la expresión de \mathbf{M}_4 quedaría

Ecuación 1.48

$$\mathbf{M}_4 = \mathbf{D}_4 + \mathbf{E}_4 \quad , \quad \text{siendo} \quad \mathbf{D}_4 = \mathbf{D}_2 \quad , \quad \mathbf{E}_4 = (\mathbf{Z}_4 \cdot \mathbf{N}_4)^t \quad , \quad \mathbf{Z}_4 = \mathbf{Z}_2$$

$$\text{y} \quad \mathbf{N}_4 = \left(\mathbf{Z}_4^t \cdot \mathbf{R}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{R}_{\text{RGB}} \cdot \mathbf{Z}_4 \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{Z}_4^t \cdot \mathbf{R}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}} - \mathbf{Z}_4^t \cdot \mathbf{R}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{R}_{\text{RGB}} \cdot \mathbf{D}_4 \right)$$

5. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_5 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados con 6 canales de color.* Es una combinación directa del perfil tipo \mathbf{M}_1 , con la salvedad que la dimensionalidad de la codificación del color en el dispositivo es superior a 3. Simula, por ejemplo, el caso de que en una cámara CCD-RGB, con tres canales de color RGB, puede convertirse en una cámara de 6 canales de color anteponiendo delante de la cámara un filtro de transmitancia $\tau(\lambda)$ conocida y, captar entonces la escena sin filtro (codificación RGB) y con filtro (codificación UVW). Si \mathbf{T}_{RGB} son las funciones de igualación del dispositivo, al colocar delante un filtro de color $\tau(\lambda)$, la matriz de funciones de igualación es $\mathbf{T}_{\text{RGBUVW}} \equiv \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}$. Por tanto, aplicando de forma análoga el método del perfil \mathbf{M}_1 , tendríamos que (Ec. 1.49)

Ecuación 1.49

$$\text{si} \quad \mathbf{T}_{\text{RGB}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{r}} & \bar{\mathbf{g}} & \bar{\mathbf{b}} \end{bmatrix} \quad , \quad \text{y filtro } \tau \Rightarrow \mathbf{T}_{6\text{-RGB}} \equiv \mathbf{T}_{\text{RGBUVW}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{r}} & \bar{\mathbf{g}} & \bar{\mathbf{b}} & \bar{\mathbf{u}} & \bar{\mathbf{v}} & \bar{\mathbf{w}} \end{bmatrix}_{N_6 \times 6}$$

$$\text{con} \quad \bar{\mathbf{u}} = \text{diag}(\tau) \cdot \bar{\mathbf{r}} \quad , \quad \bar{\mathbf{v}} = \text{diag}(\tau) \cdot \bar{\mathbf{g}} \quad , \quad \bar{\mathbf{w}} = \text{diag}(\tau) \cdot \bar{\mathbf{b}}$$

$$\Rightarrow \mathbf{M}_5 = \mathbf{T}_{\text{XYZ}}^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}} \cdot \left(\mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}} \right)^{-1}$$

En principio, por aumentar la dimensionalidad del espacio de representación del color dependiente del dispositivo, de RGB a RGBUVW, el perfil colorimétrico al espacio CIE-1931 XYZ debería ser más exacto. Es como convertir un sistema algebraico de 3 ecuaciones lineales con 3 incógnitas, en un sistema sobredeterminado de 6 ecuaciones lineales con 3 incógnitas. Es, en cierta manera, un método de optimizar la regresión lineal aumentando la dimensionalidad de la captura/codificación del color, puesto que parece que, en principio, con 3 canales RGB no sea suficiente para reproducir a un nivel colorimétrico una escena cualquiera a partir de las señales RGB de una cámara CCD-RGB.

Desde una perspectiva histórica, fueron miembros del equipo técnico de restauración del museo londinense *The National Gallery* (Martínez, Cupitt, Saunders 1993; Saunders et al. 1998) los que aplicaron esta propuesta por primera vez para conseguir un archivo digital de obras de arte con un nivel de reproducción colorimétrica. En concreto, utilizaron una cámara CCD blanco/negro y 7 filtros interferenciales para aumentar la dimensionalidad de la captura de 1 a 7. La misma idea es actualmente seguida por numerosos equipos de investigación, desarrollada según aspectos teóricos y aplicados diferentes: desde métodos físico-ópticos novedosos sobre la separación de la luz incidente en tantos canales de color como se deseen (Engelhardt, Seitz 1993; Herzog et al. 1999; König, Praefcke. 1998; Tominaga 1999), pasando por métodos matemáticos de cálculo optimizado de estos filtros-sensibilidades espectrales de una cámara multi-canal (Vora, Trussell 1997ab; Vrhel, Trussell 1994; Vrhel, Trussell, Bosch 1995), por aplicaciones del tipo de reconstrucción o recuperación espectral del estímulo-color \mathbf{b} , ya sea la distribución espectral de potencia radiante \mathbf{L} de la fuente luminosa o la reflectancia espectral $\rho(\lambda)$

del objeto (Hardeberg et al. 1999; Imai 1998; Pratt 1991; Pratt, Mancill 1975; Tominaga 1996; Tominaga 1999), hasta aplicaciones típicas en gestión de color entre varios dispositivos multimedia o extensión a otros museos de arte. Algunos aspectos de estos trabajos serán más interesantes de analizar al plantear el resto de los perfiles colorimétricos.

6. *Perfil colorimétrico M_6 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados con 6 canales de color manteniendo la especificación del punto blanco.* Este perfil colorimétrico resulta de la combinación de varios métodos anteriores. En concreto, es la combinación del método anterior M_5 con el método M_2 (Ec. 1.50):

Ecuación 1.50

$$\text{suponiendo } \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \mathbf{E} = \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_E \\ G_E \\ B_E \\ U_E \\ V_E \\ W_E \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E} \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{\text{XYZ}_E}, \text{ des - balance de blanco ideal}$$

$$\Rightarrow \mathbf{M}_6 = \mathbf{D}_6 + \mathbf{E}_6, \text{ donde } \mathbf{D}_6 = \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E} \cdot \left(\mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E}^t \cdot \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E} \right)^{-1} \cdot \mathbf{t}_{\text{XYZ}_E},$$

$$\mathbf{E}_6 = (\mathbf{Z}_6 \cdot \mathbf{N}_6)^t, \text{ satisfaciendo } \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E}^t \cdot \mathbf{E}_6 = 0,$$

$$\text{siendo } \mathbf{Z}_6 = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5]_{6 \times 5}, \text{ verificándose que } \sigma_1^t \cdot \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E} = \dots = \sigma_5^t \cdot \mathbf{t}_{6\text{-RGB}_E} = 0$$

$$\text{y } \mathbf{N}_6 = \left(\mathbf{Z}_6^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}} \cdot \mathbf{Z}_6 \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{Z}_6^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}} - \mathbf{Z}_6^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{6\text{-RGB}} \cdot \mathbf{D}_6 \right)$$

7. *Perfil colorimétrico M_7 , ajuste por mínimos cuadrados con información espectral previa de un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color.* Las opciones anteriores carecían de información espectral de la escena, o de un conjunto de entrenamiento de estímulos-color, para obtener la transformación del color entre RGB a XYZ. Esta carencia de información a priori podría provocar errores de reproducción del color, de ahí, por ejemplo, lo de aumentar la dimensionalidad de la captura/codificación del color en los dos últimos perfiles colorimétricos, o lo de aumentar a polinomios no lineales. Por tanto, volvamos al principio en la manera que partimos de un dispositivo con 3 canales de color, caracterizado por \mathbf{T}_{RGB} , pero con información espectral previa de una escena-entrenamiento. Denotemos como matriz \mathbf{S} , de dimensión $N_\lambda \times N$, la que distribuye en columnas las reflectancias espectrales $\rho(\lambda)$ del conjunto-entrenamiento compuesto por N objetos. Denotemos también como matriz $\mathbf{K} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^t$, de dimensión $N_\lambda \times N_\lambda$, a la matriz autocorrelación de la información espectral del conjunto-entrenamiento. Entonces, el perfil colorimétrico M_7 resulta ser (Ec. 1.51):

Ecuación 1.51

$$\mathbf{M}_7 = \mathbf{T}_{\text{XYZ}}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}} \cdot \left(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}} \right)^{-1}$$

La cuestión que surge inmediatamente es: ¿cuál ha de ser el número y la clase de reflectancias espectrales de entrenamiento para optimizar el perfil colorimétrico M_7 para escenas u objetos-reflectancia desconocidos?. No es una pregunta fácil de contestar, a tenor de los trabajos publicados al respecto (Finlayson, Drew 1997). La clave está en elegir un conjunto mínimo de objetos-reflectancia altamente representativos desde el punto de vista estadístico del conjunto infinito o realista de objetos-reflectancias. Existen estudios que se decantan por una selección de muestras del Atlas Munsell (Parkkinen, Hallikainen, Jaaskelainen 1989), o por una selección de objetos reales (Vrhel, Gershon, Iwan 1994), pero que, en definitiva, plantean el método de búsqueda de una base vectorial para la matriz S mediante el método de componentes principales (PC), que explicaremos en el perfil colorimétrico M_9 . Sin embargo, los investigadores G. Finlayson y M. Drew han demostrado que las 24 reflectancias espectrales de la carta Macbeth ColorChecker (Fig. 1.29) pueden ser estadísticamente tan óptimas que otros conjuntos más numerosos.

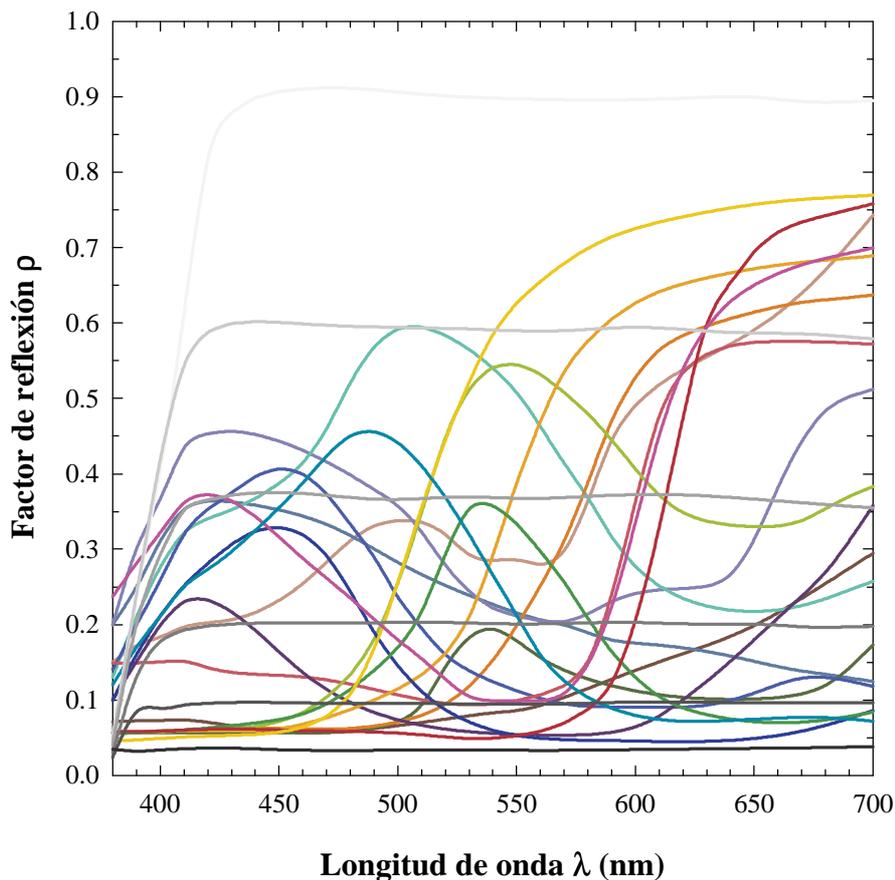


Figura 1.29: Reflectancias espectrales de los 24 colores de la carta Macbeth ColorChecker. (Por gentileza del Grupo de Color de la Universidad de Derby de Gran Bretaña.)

Pero, este aspecto se complica demasiado cuando se trabaja con estímulos-color **b**, con la distribución espectral de potencia radiante que reflejan los objetos-reflectancia ρ de las fuentes luminosas **L**. Existen modelos lineales de representación de fuentes luminosas (Marimont, Wandell 1992; Wyszecki, Stiles 1982, 13, 145), sobre todo para fuentes incandescentes y de luz solar, pero no para fuentes luminosas tan realistas como las fluorescentes o iluminantes tipo F (Fig. 1.30). Por tanto, este perfil colorimétrico M_7 puede no ser adecuado cuando se aplique a escenas reales, cuando la luz presente en la escena es combinación de varios tipos fuentes luminosas (incandescente + luz diurna) o es de tipo fluorescente con presencia de picos espectrales de alta emisividad.

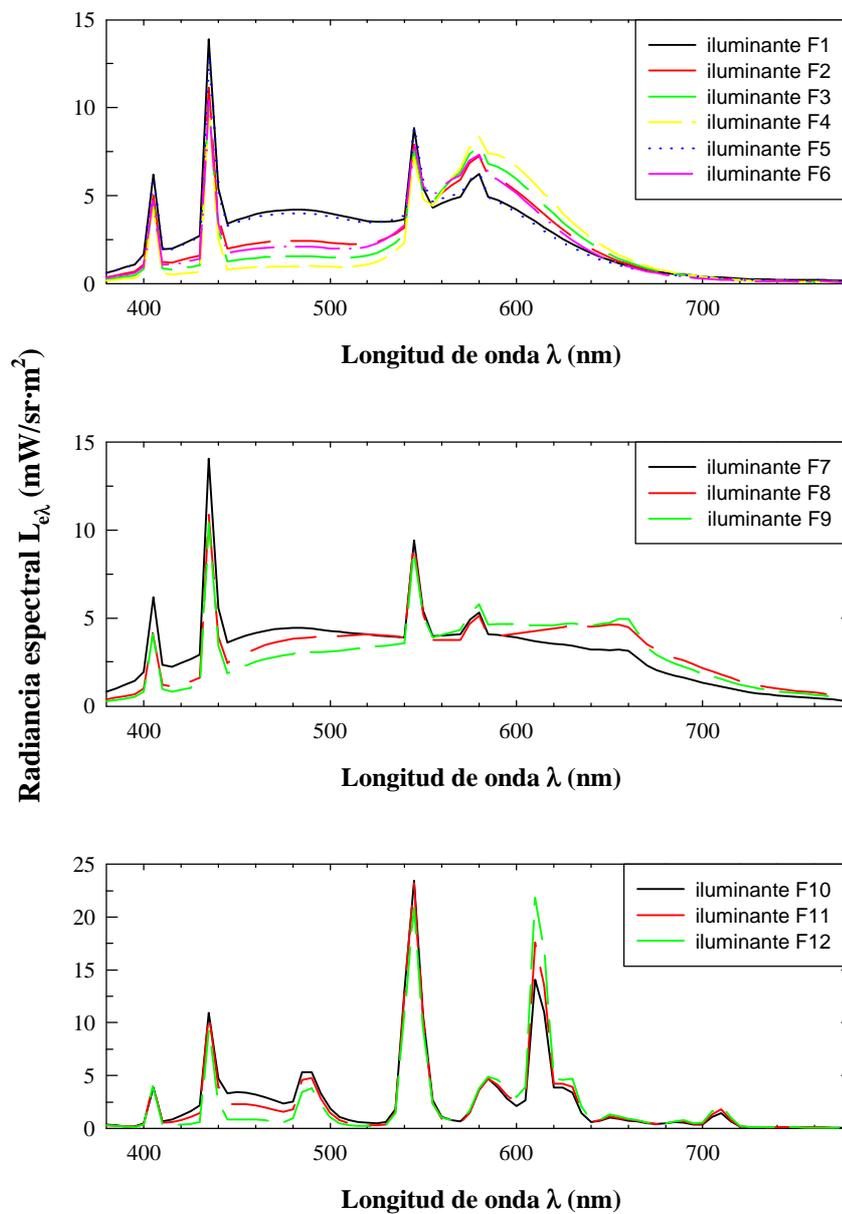


Figura 1.30: Radiancias espectrales de los iluminantes tipo F, normalizados de forma que la iluminación incidente sería de 1000 lx.

De entre las aplicaciones de este enfoque de perfil colorimétrico destacaría, en conexión con lo comentado sobre los dos perfiles anteriores, los métodos matemáticos de diseño optimizado de sensibilidades espectrales (Vora, Trussell 1997ab; Vrhel, Trussell 1994; Vrhel, Trussell, Bosch 1995), la estimación del conjunto real de sensibilidades espectrales de un escáner (Sharma 2000; Sharma, Trussell 1996) mediante formalismo de componentes principales (PC) y/o de proyección sobre conjuntos convexos (POCS), y, la reconstrucción de la reflectancia espectral de los objetos (Hardeberg et al., 1999). Por ejemplo, en el primer caso, los trabajos de H.J. Trussell et al. permiten seguir un método matemático de búsqueda de los filtros-sensibilidades espectrales óptimas de un dispositivo de captura de imágenes (escáner, cámara, etc) basado en la información previa de iluminantes y reflectancias. Así, el conjunto óptimo de P-sensibilidades espectrales con valores positivos es aquel que, incluyendo la fuente luminosa de captación \mathbf{L}_{capt} , abarca el rango del espacio vectorial de la matriz $\mathbf{U}_P = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \dots \ \mathbf{u}_P]$, donde los vectores \mathbf{u} son los P N_λ -vectores columna asociados a los P autovalores más grandes de la matriz $\tilde{\mathbf{O}} \cdot \tilde{\mathbf{O}}' \cdot \mathbf{K}_S$, donde $\tilde{\mathbf{O}} = [\mathbf{O}_1 \ \mathbf{O}_2 \ \dots \ \mathbf{O}_i]$ es la matriz de vectores ortonormales de la matriz que abarca el espacio SVH $[\mathbf{L}_A \cdot \mathbf{T}_{XYZ} \ \mathbf{L}_{D65} \cdot \mathbf{T}_{XYZ} \ \dots \ \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{T}_{XYZ}]$, con $\mathbf{L}_i \equiv \text{diag}(\mathbf{L}_i)$ -espectro-iluminante, y, donde la matriz $\mathbf{K}_S = [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}] \cdot [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}]^t$ es la matriz covarianza del conjunto-entrenamiento de muestras-color \mathbf{S} . Este conjunto óptimo de sensibilidades espectrales se puede hallar mediante métodos matemáticos POCS o por programación lineal (regresión lineal multidimensional), verificando lo siguiente (Ec. 1.52):

Ecuación 1.52

$$[\mathbf{L}_{capt} \cdot \mathbf{T}_{capt}]_{N \times P} = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \dots \ \mathbf{u}_P]_{N \times P} \cdot [\mathbf{a}_P]_{P \times P} \quad , \quad \text{donde } \mathbf{a}_P \text{ es la matriz de pesos}$$

$$\mathbf{t}_{XYZ_{ij}} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{L}_i \cdot \rho_j \quad , \quad i \equiv A, D65, F2, F7, \text{ etc.} \quad , \quad j \equiv 1, 2, 3, \dots, N \text{ reflectancias}$$

$$\hat{\mathbf{t}}_{XYZ_{ij}} = \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{K}_S \cdot \mathbf{L}_{capt} \cdot \mathbf{T}_{capt} \cdot \left(\mathbf{T}_{capt} \cdot \mathbf{L}_{capt} \cdot \mathbf{K}_S \cdot \mathbf{L}_{capt} \cdot \mathbf{T}_{capt} \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{t}_{capt_j} - \mathbf{T}_{capt} \cdot \mathbf{L}_{capt} \cdot \bar{\rho} \right) + \mathbf{T}_{XYZ} \cdot \mathbf{L}_i \cdot \bar{\rho}$$

Cualquier filtro-sensibilidad espectral de la matriz \mathbf{T}_{capt} pertenece al conjunto convexo siguiente

$$C_{capt} = \left\{ \mathbf{T} / \text{diag}(\mathbf{L}_{capt}) \cdot \mathbf{T} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{Y} \quad , \quad \mathbf{Y} \in M_P \quad \text{matrices } P \times P \text{ no singulares} \right\}$$

Imponiendo la condición física de todas las componentes espectrales positivas, e, incorporando una condición de optimización de la sensibilidad en la fabricación real de los filtros, resulta que el problema se reduce a aplicar métodos de regresión no lineal multidimensional a (Ec. 1.53):

Ecuación 1.53

$$\text{minimizar } \psi = \frac{\nu_{\text{máx}}(\text{diag}(\mathbf{L}_{capt}) \cdot \mathbf{T})}{\nu_{\text{mín}}(\text{diag}(\mathbf{L}_{capt}) \cdot \mathbf{T})} = \frac{\text{valor singular máximo}}{\text{valor singular mínimo}}$$

$$\text{con respecto a la matriz } \mathbf{Y}, \quad \text{tal que } \text{diag}(\mathbf{L}_{capt}) \cdot \mathbf{T} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{Y} \geq 0$$

De esta forma, se puede calcular un conjunto teórico optimizado de sensibilidades espectrales (Fig. 1.31, Tabla 1.9) para la corrección del color (transformación de color) t_{capt} a t_{XYZ} bajo iluminantes diferentes (A, F2, D65, etc), y, el conjunto de primarios fundamentales optimizados $P_{\text{optim}} = T_{\text{optim}} [T_{\text{optim}}^t \cdot T_{\text{optim}}]^{-1}$, primarios fundamentales con valores triestímulo XYZ negativos (irreales), es decir, fuera de los locus espectrales CIE-(x,y) y CIE(u',v').

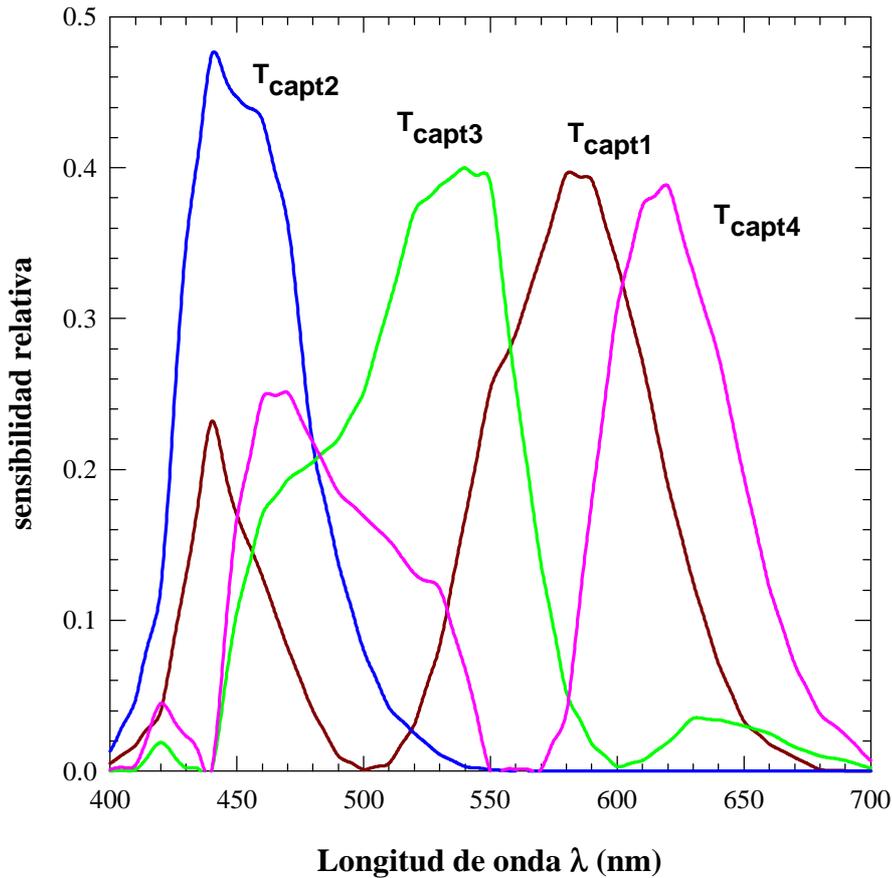


Figura 1.31: Sensibilidades espectrales óptimas para la corrección multi-iluminante del color de los valores t_{capt} tomados bajo L_{capt} uniforme (Vrhel, Trussell, Bosch 1995).

Tabla 1.9: Valores cromáticos (x,y,u',v',Y) de los primarios fundamentales asociados al conjunto T_{capt} de sensibilidades espectrales para la corrección multi-iluminante del color t_{capt} tomados bajo L_{capt} uniforme.

CIE-1931 ilum. E	x	y	u'	v'	Y
Primario P _{1r} -optimizado	0.5389	0.4519	0.2935	0.5537	18.27
Primario P _{2r} -optimizado	-0.1543	-0.3807	0.4899	2.7197	-8.87
Primario P _{3r} -optimizado	-0.3552	1.3852	-0.0699	0.6131	15.53
Primario P _{4r} -optimizado	1.1442	-0.1100	-7.5227	1.6272	-0.89

Quizás, el inconveniente más importante de esta metodología, a nuestro juicio, es que, en ningún momento, se está planteando la condición óptica del problema. Es decir, los métodos matemáticos nos proporcionan unas sensibilidades espectrales optimizadas, pero su implementación física en una cámara real tiene que pasar por tener en cuenta el camino óptico de la luz: la transmitancia espectral τ_{UV} de la lente-objetivo, la transmitancia espectral τ_{IR} del filtro de corte de IR, los filtros-color τ_R , τ_G , τ_B de separación de los canales-color, y, por supuesto, la sensibilidad espectral bruta s_{CCD} del dispositivo fotosensor. Esta metodología sirve de complemento, claro está, a los requisitos de diseño ingenieril de las curvas de sensibilidad espectral, pero no se enfrenta a la problemática real de ensamblar espectral y ópticamente todos los componentes ópticos de una cámara.

8. *Perfil colorimétrico M_8 , ajuste por mínimos cuadrados con 6 canales de color manteniendo la especificación del punto blanco y con información espectral previa de un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color.* Esta transformación de color es, simplemente, la recolección de las propuestas anteriores (Ec. 1.54).

Ecuación 1.54

$$\text{suponiendo } \mathbf{T}_{6-RGB}^t \cdot \mathbf{E} = \mathbf{T}_{6-RGB}^t \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_E \\ G_E \\ B_E \\ U_E \\ V_E \\ W_E \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{6-RGB_E} \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{t}_{XYZ_E}, \quad \text{des - balance de blanco ideal}$$

$$\Rightarrow \mathbf{M}_8 = \mathbf{D}_8 + \mathbf{E}_8, \quad \text{donde } \mathbf{D}_8 = \mathbf{D}_6 = \mathbf{t}_{6-RGB_E} \cdot (\mathbf{t}_{6-RGB_E}^t \cdot \mathbf{t}_{6-RGB_E})^{-1} \cdot \mathbf{t}_{XYZ_E},$$

$$\mathbf{E}_8 = (\mathbf{Z}_8 \cdot \mathbf{N}_8)^t, \quad \text{satisfaciendo } \mathbf{t}_{6-RGB_E}^t \cdot \mathbf{E}_8 = 0,$$

$$\text{siendo } \mathbf{Z}_8 = \mathbf{Z}_6 = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5]_{6 \times 5}, \quad \text{verificándose que } \sigma_1^t \cdot \mathbf{t}_{6-RGB_E} = \dots = \sigma_5^t \cdot \mathbf{t}_{6-RGB_E} = 0$$

$$\text{y } \mathbf{N}_8 = (\mathbf{Z}_8^t \cdot \mathbf{T}_{6-RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{6-RGB} \cdot \mathbf{Z}_8)^{-1} \cdot (\mathbf{Z}_8^t \cdot \mathbf{T}_{6-RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ} - \mathbf{Z}_8^t \cdot \mathbf{T}_{6-RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{6-RGB} \cdot \mathbf{D}_8)$$

9. *Perfil colorimétrico M_9 , método por componentes principales, el cual usa un conjunto-entrenamiento estadísticamente representativo de estímulos-color.* Este método matemático de búsqueda de la transformación de color es el más distinto, cualitativamente hablando, de los métodos anteriores. Denotemos de nuevo como matriz \mathbf{S} , de dimensión $N_\lambda \times N$, la que distribuye en columnas las reflectancias espectrales $\rho(\lambda)$ del conjunto-entrenamiento compuesto por N objetos. Sea la matriz $\bar{\mathbf{S}}$, de dimensión $N_\lambda \times N$, la que repite en cada columna los valores medios $m(\rho_\lambda)$ de reflectancia espectral del conjunto-entrenamiento para cada longitud de onda. Entonces, del mismo modo como ya se introdujo antes, definimos la matriz covarianza $\mathbf{K}_S = [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}] \cdot [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}]^t$ del conjunto estadístico \mathbf{S} . La diagonalización de esta matriz covarianza nos proporciona una base vectorial de autovectores \mathbf{v} con autovalores ω , de forma que cualquier reflectancia espectral $\rho(\lambda)$ puede reconstruirse con solamente los tres autovectores \mathbf{v} asociados a los tres autovalores ω más grandes (Ec. 1.55):

Ecuación 1.55

$$\mathbf{S} = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_N]_{N_\lambda \times N} \quad , \quad \text{conjunto - entrenamiento de reflectancias espectrales}$$

$$\bar{\mathbf{S}} = [\bar{\rho} \quad \bar{\rho} \quad \dots \quad \bar{\rho}]_{N_\lambda \times N} \quad , \quad \text{con} \quad \bar{\rho} = \begin{bmatrix} m(\rho_{\lambda_1}) \\ m(\rho_{\lambda_2}) \\ \vdots \\ m(\rho_{\lambda_N}) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad , \quad m(\) \quad \text{valor medio}$$

$$\Rightarrow \mathbf{K}_S = (\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}) \cdot (\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}})^t \quad , \quad \text{matriz covarianza del conjunto estadístico}$$

$$\Rightarrow \mathbf{K}_S \cdot \mathbf{v}_j = \omega_j \mathbf{v}_j \quad , \quad \text{con} \quad j=1, \dots, N_\lambda \quad , \quad \omega_1 > \omega_2 > \omega_3 > \dots > \omega_{N_\lambda} \quad , \quad \text{y} \quad \mathbf{v}_j^t \cdot \mathbf{v}_i = \delta_{ij}$$

$$\Rightarrow \rho_k \propto \bar{\rho} + \sum_{j=1}^3 \omega_j \mathbf{v}_j = \bar{\rho} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{w} \quad , \quad \mathbf{B} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \mathbf{v}_3] \quad \text{y} \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}$$

Con este preámbulo matemático, ahora es posible estimar la especificación triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} de cualquier reflectancia espectral ρ_i bajo iluminante equienergético \mathbf{E} como (Ec. 1.56):

Ecuación 1.56

$$\hat{\mathbf{t}}_{XYZ,i} = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{B} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot (\mathbf{t}_{RGB,i} - \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \bar{\rho}) + \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \bar{\rho}$$

Si bien no existe formalmente una matriz \mathbf{M}_9 entre el paso de \mathbf{t}_{RGB} a \mathbf{t}_{XYZ} , podemos identificar este perfil colorimétrico con la matriz $\mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{B} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{M}_9$, de dimensión 3x3. Existe también, según los investigadores G. Finlayson y M. Drew, una conexión entre el método por componentes principales (PC) y el que ellos proponen como mínimos cuadrados preservando el punto blanco (WPPLS). En concreto, dado el carácter trivariante del espacio CIE-1931 XYZ, el método WPPLS permite seleccionar hasta tres ligaduras o estímulos-color que preserven exactamente la especificación triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} . Entonces, afirman estos investigadores sin ninguna demostración, que el método por componentes principales (PC) es el método WPPLS con tres ligaduras "de color" que se corresponden con los tres autovectores \mathbf{v} asociados a los tres autovalores ω más grandes de la matriz covarianza \mathbf{K}_S del conjunto-entrenamiento \mathbf{S} .

Ahora que ya hemos listado y analizado los métodos matemáticos sobre la búsqueda de la mejor transformación de color \mathbf{M} entre los valores RGB de una cámara CCD-RGB y los valores triestímulo CIE-1931 XYZ, queda por presentar en este extenso capítulo introductorio los parámetros matemáticos de calidad sobre el nivel de reproducción, un formalismo matemático alternativo al ya presentado como índice de reproducción del color (CRI), de carácter psicofísico. El fundamento matemático básico de estos nuevos parámetros de calidad de la reproducción del color (Sharma, Trussell 1997b; Sharma, Trussell, Vrhel 1998; Vora, Trussell 1993; Wolski et al. 1996) es cuantificar la distancia entre los sub-espacios vectoriales asociados a las funciones de igualdad \mathbf{T}_{RGB} y \mathbf{T}_{XYZ} , o, en su caso, cuantificar cuál es el "volumen común" entre ambos sub-espacios vectoriales. Históricamente, los primeros intentos de cuantificar esto fueron desarrollados por H.E.J. Neugebauer en 1956 con su denominado *factor de calidad de Neugebauer* q , el cual descrito con el formalismo matemático previo se expresaría como (Ec. 1.57):

Ecuación 1.57

$$q_R = \frac{\|\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \bar{\mathbf{r}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{r}}\|^2}, \quad \text{para la función de igualación } \bar{\mathbf{r}}$$

$$q_G = \frac{\|\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \bar{\mathbf{g}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{g}}\|^2}, \quad \text{para la función de igualación } \bar{\mathbf{g}} \Rightarrow q_N = \text{media}(q_R, q_G, q_B)$$

$$q_B = \frac{\|\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \bar{\mathbf{b}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{b}}\|^2}, \quad \text{para la función de igualación } \bar{\mathbf{b}}$$

con $\|\mathbf{x}\|^2 = \mathbf{x}^t \cdot \mathbf{x}$ norma y $\mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{O}_{XYZ} \cdot \mathbf{O}_{XYZ}^t$ el operador proyección de \mathbf{T}_{XYZ}

El valor máximo de este parámetro de calidad es 1, de forma que el valor unidad significaría que \mathbf{T}_{RGB} es una combinación lineal exacta de \mathbf{T}_{XYZ} , por lo que pasaríamos de denotarlas como pseudo-funciones de igualación a funciones de igualación propiamente dichas. Para sensibilidades espectrales o, equivalentemente, pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} casi ortogonales, es decir, con escaso solapamiento espectral, el promedio q_N de los factores individuales q_k es una medida razonable de bondad o calidad del conjunto. Sin embargo, para sensibilidades espectrales no ortogonales, el promedio q_N puede proporcionar interpretaciones incorrectas. La causa de este defecto estriba en que el factor q de Neugebauer carece de más representatividad matemática, es decir: es un factor singular para cada sensibilidad espectral, pero no es un buen indicador perceptual del error de reproducción, no diferencia entre conjuntos imperfectos de sensibilidades espectrales, y, tampoco es útil para juzgar el mérito de una sensibilidad espectral por sí sola como parte de un conjunto de más de tres sensibilidades espectrales. Así, nos encontramos en la literatura científica con el *factor de calidad de Vora* q_V , el cual manteniendo la condición matemática de máxima ignorancia espectral quedaría expresado como (Ec. 1.58):

Ecuación 1.58

$$q_V = \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{P}_{RGB})}{3}, \quad \text{tr}(\) \text{ es el operador traza de una matriz}$$

con $\mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{O}_{XYZ} \cdot \mathbf{O}_{XYZ}^t$ y $\mathbf{P}_{RGB} = \mathbf{T}_{RGB} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t$ operadores proyección

El factor de calidad de Vora intenta cuantificar la "fracción" de sub-espacio vectorial del sistema visual humano (SVH) contenido en el sub-espacio vectorial del dispositivo de captura (SVS). Por otra parte, el factor de calidad de Neugebauer intenta evaluar de forma individual las sensibilidades espectrales determinando la fracción de "energía" de las sensibilidades espectrales que está en SVH. Invertiendo los papeles entre SVH y SVS, se puede determinar qué fracción de energía de \mathbf{T}_{XYZ} se encuentra contenida en SVS. Entonces, definiendo las cantidades $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{T}_{RGB})$, se define el *factor de calidad del color CQF* (*Color Quality Factor*) como (Ec. 1.59)

Ecuación 1.59

$$\begin{aligned}\phi(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\|\mathbf{P}_{\text{RGB}} \cdot \bar{\mathbf{x}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{x}}\|^2} \\ \phi(\bar{\mathbf{y}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\|\mathbf{P}_{\text{RGB}} \cdot \bar{\mathbf{y}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{y}}\|^2} \Rightarrow CQF = \min\{\phi(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}), \phi(\bar{\mathbf{y}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}), \phi(\bar{\mathbf{z}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}})\} \\ \phi(\bar{\mathbf{z}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\|\mathbf{P}_{\text{RGB}} \cdot \bar{\mathbf{z}}\|^2}{\|\bar{\mathbf{z}}\|^2}\end{aligned}$$

Pero, el aspecto clave que compara cualitativamente estos parámetros de calidad es en qué espacio de representación del color se minimiza el error cuadrático medio entre las estimaciones triestímulo y las especificaciones triestímulo reales. O sea, que si tenemos por ejemplo tres cámaras CCD-RGB diferentes, con factores respectivos $CQF = 0.975, 0.987$ y 0.999 , ¿comparar de forma cualitativa las cámaras 1 y 2 es lo mismo que comparar de igual forma las cámaras 2 y 3?, ¿podemos extraer que la cámara 1 es dos veces peor que la cámara 2 de la comparación cualitativa entre las cámaras 1 y 3? Es decir, si tenemos la estimación $\hat{\mathbf{t}}_{\text{XYZ}}$ a partir del perfil colorimétrico \mathbf{M} y los valores \mathbf{t}_{RGB} , y, deseamos comparar con \mathbf{t}_{XYZ} , ¿cuál debería ser el espacio matemático de representación del color donde evaluar el error cuadrático medio como representación de la función distancia entre ambos? Para solucionar este planteamiento, tenemos varias opciones, que están condicionadas también por el perfil colorimétrico aplicado:

1. *Parámetros de calidad basados en el error cuadrático medio en el espacio CIE-1931 XYZ:*

Ecuación 1.60

$$\begin{aligned}q_{I_1}(\mathbf{T}_{\text{XYZ}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\text{tr}(\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}{\text{tr}(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}, \text{ perfil colorimétrico } \mathbf{M}_1 \text{ (MaxIgLS)} \\ q_{I_2}(\mathbf{T}_{\text{XYZ}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\text{tr}(\mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}{\text{tr}(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}, \text{ perfil colorimétrico } \mathbf{M}_2 \text{ (MaxIgWPPLS)} \\ q_{I_7}(\mathbf{T}_{\text{XYZ}}, \mathbf{T}_{\text{RGB}}) &= \frac{\text{tr}(\mathbf{M}_7 \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}{\text{tr}(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}})}, \text{ perfil colorimétrico } \mathbf{M}_7 \text{ (No - MaxIgLS)}\end{aligned}$$

Reproducción aditiva del color

2. *Parámetros de calidad basados en el error cuadrático medio en el espacio ortogonal a CIE-1931 XYZ:*

Ecuación 1.61

$$q_{O_1}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{P}_{RGB})}{3} = q_V \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_1 \text{ (MaxIgLS)}$$

$$q_{O_2}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{O}_{XYZ} \cdot \mathbf{M}_O \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t)}{\text{tr}(\mathbf{P}_{XYZ})} \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_2 \text{ (MaxIgWPPLS)}$$

$$q_{O_7}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{RGB})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{K})}{\text{tr}(\mathbf{P}_{XYZ} \cdot \mathbf{K})} \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_7 \text{ (No - MaxIgLS)}$$

3. *Parámetros de calidad basados en el error cuadrático medio en el espacio psicométrico (pseudo-perceptualmente uniforme) CIE-L*a*b*:*

Ecuación 1.62

$$q_{ap_1}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})}{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})} \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_1 \text{ (MaxIgLS)}$$

$$q_{ap_2}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})}{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{XYZ})} \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_2 \text{ (MaxIgWPPLS)}$$

$$q_{ap_7}(\mathbf{T}_{XYZ}, \mathbf{T}_{RGB}) = \frac{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{M}_7 \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{XYZ})}{\text{tr}(\mathbf{F}_{Lab}^t \cdot \mathbf{F}_{Lab} \cdot \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{XYZ})} \quad , \quad \text{perfil colorimétrico } \mathbf{M}_7 \text{ (No - MaxIgLS)}$$

$$\text{siendo } \mathbf{F}_{Lab} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} \quad \text{relativo al iluminante equienergético}$$

Otro parámetro de calidad sobre la reproducción del color, por extraño que parezca, es la relación señal-ruido *SNR* en dB con este formalismo matemático (Sharma, Trussell 1997a). En concreto, si consideramos o no la condición estadística de máxima ignorancia, tenemos que la *SNR* se puede expresar como (Ec. 1.63):

Ecuación 1.63

$$SNR (dB) = 10 \cdot \log \left[\text{tr} \left(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}} \right) \right] , \quad \text{condición MaxIg}$$

$$SNR (dB) = 10 \cdot \log \left[\text{tr} \left(\mathbf{T}_{\text{RGB}}^{-1} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{\text{RGB}} \right) \right] , \quad \text{condición No - MaxIg}$$

Así quedan pues, tras un análisis extenso, los aspectos introductorios de medida y reproducción del color que se deben tener en cuenta para el diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB bien caracterizada y perfilada colorimétricamente. Con esta extensa introducción, tenemos las herramientas matemáticas que aplicaremos más adelante en la resolución de esta tesis doctoral. Lo que resta de introducción de este trabajo es averiguar qué aspectos tecnológicos, de naturaleza optoelectrónica o estrictamente electrónica, deben controlarse durante el uso real de una cámara CCD-RGB como colorímetro triestímulo para evitar, o en todo caso reducir, errores sistemáticos incomprensibles, para que, de alguna forma, el dispositivo multimedia funcione con gran eficacia (exactitud) y alta eficiencia (alta repetibilidad a corto y largo plazo).

Capítulo 2. Fotografía Digital

Tras estudiar los aspectos físicos referentes a la medida y reproducción del color, remarcando muy especialmente sus aplicaciones sobre una cámara digital cualquiera, lo que resta por analizar son los factores estrictamente teóricos y de tipo tecnológico que permiten evaluar este dispositivo multimedia como un instrumento de medida del color, con un cierto nivel de exactitud (eficacia) y precisión (repetibilidad a corto y largo plazo).

2.1 Límites estadísticos de la fotodetección ideal

Los principios básicos involucrados en los dispositivos multimedia de captura de la luz (cámaras, escáneres, etc) pueden entenderse sin referencia a la tecnología específica de diseño/construcción de cualquiera de ellos, independientemente de los mecanismos bioquímicos (retina humana), químicos (película fotográfica), físicos (fotodiodo) o electrónicos (dispositivo CCD) que intervienen en el proceso de formación bidimensional de la imagen. De igual forma, es posible establecer criterios fundamentales mediante los cuales es posible medir la eficiencia de la captura de la imagen en cualquier dispositivo. Estos criterios se basan principalmente en el concepto de *imagen ideal* y en los métodos mediante los cuales podremos evaluar las desviaciones de los dispositivos reales de captura de la luz a partir de este concepto ideal (Dainty, Shaw 1974, 1-12).

Una definición razonable para una imagen ideal sería la que tiene una relación 1:1 entre los fotones incidentes y algún parámetro de salida mensurable en la imagen. Concretando más, consideremos el caso siguiente bastante simplificado: que la distribución espectral de potencia radiante \mathbf{b} del estímulo-color sea estrictamente monocromática, sin variación espacial ni temporal, de forma que podemos esquematizar como una *exposición cuántica* uniforme de fotones n_n , de cierta longitud de onda λ , sobre una red regular (con idénticas propiedades espaciales y temporales) de tipo hexagonal de fotosensores, cuyo parámetro de respuesta es n_{pe} , como un receptor/contador de fotones. Asumiendo que la resolución espacial de la imagen está limitada solamente por el área de los receptores, que cada receptor captura los fotones incidentes de manera totalmente independiente de sus vecinos, y, que cada estado-imagen es único y distinguible solamente por el número de fotones incidentes, tenemos que la imagen ideal que estamos definiendo con la relación 1:1 se caracteriza por una *eficiencia cuántica* $QE = (n_{pe}/n_n) = 1$, es decir, con una eficiencia de captura del 100 %.

Que cada receptor se restringe a un número limitado de estados-imagen distinguibles significa que tal intervalo de respuesta fotosensible tiene un límite inferior y uno superior. Suponiendo siempre que todos los receptores tienen las mismas propiedades intrínsecas, tenemos que un cierto número de fotones incidentes, denotados como $(T - 1)$, no son capturados por un receptor. Entonces, cuando la tasa de fotones incidentes $n_n = T$, se registra $n_{pe} = 1$ (respuesta mínima), debido a que se activa algún mecanismo umbral (*Threshold* - T , *exposición equivalente de ruido*). Si la tasa de fotones incidentes sigue aumentando progresivamente, los receptores seguirán capturando fotones hasta llegar a su respuesta

Fotodetección ideal

máxima L , pero que, de alguna manera, está biunívocamente relacionada por una tasa mínima de fotones incidentes $n_n = S$, de forma que, aunque $n_n \gg S$, el sistema fotodetector ideal seguirá respondiendo $n_{pe} = L$. Significamos con ellos que el sistema fotodetector está saturado (*Saturation - S, exposición equivalente de saturación*). Resumiendo, tenemos los límites efectivos de entrada/salida de la manera siguiente:

Tabla 2.1: Límites efectivos de entrada/salida en la fotodetección ideal.

	Valor mínimo	Valor máximo
Exposición cuántica n_n	T , <i>exposición equivalente de ruido</i>	S , <i>exposición equivalente de saturación</i>
Respuesta fotosensible n_{pe}	1	$L = S - T + 1$

Suponiendo siempre una exposición cuántica uniforme sobre la extensión del plano fotosensible, la naturaleza cuántica de la luz se rige con conceptos probabilísticos de acuerdo con la distribución estadística de Poisson. Si el nivel de exposición es tal que el promedio de fotones incidentes por receptor es q , la proporción de receptores que capturan un número particular de cuentas/fotones vendrá dada por:

Tabla 2.2: Aplicación de la estadística de Poisson en la fotodetección ideal.

Número de fotones incidentes	0	1	...	T	...	k	...	S	$S + 1$	...
Proporción de receptores que reciben este número	e^{-q}	$q e^{-q}$	...	$\frac{q^T e^{-q}}{T!}$	...	$\frac{q^k e^{-q}}{k!}$	...	$\frac{q^S e^{-q}}{S!}$	$\frac{q^{S+1} e^{-q}}{(S+1)!}$	...
Número de cuentas registradas	0	0	...	1	...	$k - T + 1$	...	L	L	...

Consideremos en primer lugar la relación entre el promedio de cuentas registradas $m(n_{pe}) = l$ y el promedio de exposición cuántica $m(n_n) = q$. Ya que, por definición, el valor medio o promedio es la suma de los productos de cada valor con su probabilidad de ocurrencia, como primer momento de una distribución estadística, podemos entonces expresar lo siguiente:

Ecuación 2.1

$$l = \sum_{k=T}^{S-1} (k - T + 1) \frac{q^k e^{-q}}{k!} + \sum_{k=S}^{\infty} L \frac{q^k e^{-q}}{k!}$$

Sin embargo, la ecuación 2.1 puede escribirse de una forma más manejable desde el punto de vista computacional:

Ecuación 2.2

$$l = L(1 - f_1 e^{-q}) \quad ,$$

$$\text{siendo} \quad f_1 = \frac{1}{L} \left(\sum_0^{T-1} \frac{q^k}{k!} + \sum_0^T \frac{q^k}{k!} + \sum_0^{T+1} \frac{q^k}{k!} + \dots + \sum_0^{S-1} \frac{q^k}{k!} \right)$$

Dado que la relación q vs. l es la relación directa entrada/salida del sistema fotosensor ideal, hemos creído conveniente denominar esta relación como *función espectral de conversión optoelectrónica* (*Opto-Electronic Conversion Spectral Function* - OECSF), según la nomenclatura técnica que se aplica a las cámaras digitales (ISO 12231), como veremos más adelante. Como primer ejemplo gráfico de este subapartado, representamos a continuación (Fig. 2.1) dos curvas OECSF con las configuraciones $A \equiv (T = 1, S = 75, L = 75)$ y $B \equiv (T = 25, S = 75, L = 51)$, con lo que la primera curva OECSF se identifica con el sistema fotosensor ideal de mayor sensibilidad, dado que posee el umbral de exposición T más pequeño posible.

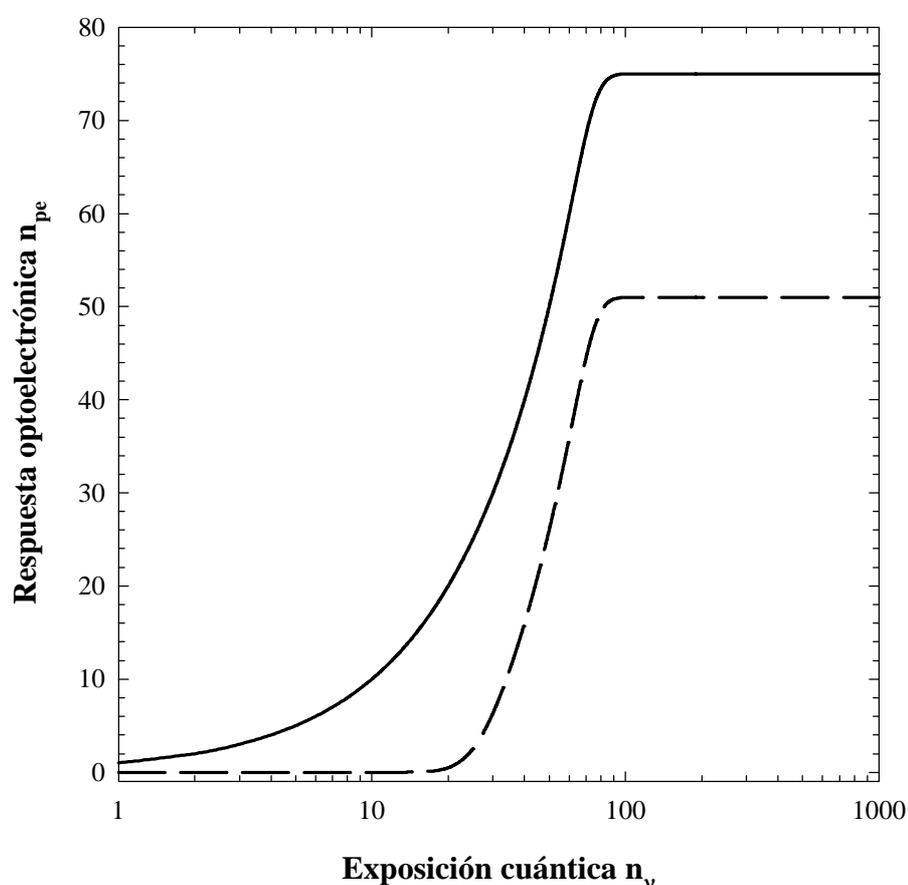


Figura 2.1: Ejemplos de funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF) para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno ($T = 1, S = 75, L = 75$, línea continua) y ($T = 25, S = 75, L = 51$, línea discontinua).

La representación de arriba sirve también de marco de referencia para delimitar el uso del concepto de "lineal" en un sistema fotosensor (ideal, biológico o artificial). Si los sistemas fotodetectores se catalogan como "lineales", se debe a que la zona intermedia de respuesta de las OECSF puede aproximarse a una línea recta, independientemente de la escala de la exposición cuántica, lineal o logarítmica, más o menos

extensa como en los ejemplos A y B; pero que, en todo caso, a medida que los pares de puntos (n_n, n_{pe}) se acercan a los extremos T ($l = 1$) y S ($l = L$), el comportamiento del sistema se aleja paulatinamente de lo que entendemos como lineal. Lo característico de cualquier OECSF es su forma tipo "escalón", separando dos niveles de respuesta, 0 y L, y cómo las respuestas intermedias se distribuyen a lo largo de una curva, que se aproxima más o menos a una recta, pero que la recta no se extiende hasta $-\infty$ y $+\infty$. Por tanto, a nuestro entender, consideraremos siempre desde este momento a los sistemas fotosensores, ideales o reales, como sistemas no lineales de captura de la luz. Aspectos más concretos sobre esta aseveración, la dualidad respuesta no lineal vs. lineal, y sus implicaciones, se analizarán más adelante en esta tesis doctoral.

A partir de los datos de contorno iniciales (T, S, L) de los sistemas fotosensores ideales podemos definir los primeros parámetros generales de excelencia o nivel de calidad de la fotodetección, los cuales serán necesariamente ampliados con otros aspectos, y que, todos en conjunto podrán aplicarse directamente a las cámaras digitales o cualquier otro sistema biológico o artificial de captura de imágenes. Así, se define en primer lugar la *profundidad de respuesta* a la variable $L = S - T + 1$, expresándose generalmente en bits ($\log L / \log 2$), con lo que tenemos como ejemplo comparativo de $L = 75$ y $L = 51$, los valores respectivos 6.2 y 5.7 bits. El concepto de *rango dinámico rd*, entendido como el cociente (respuesta máxima total) / (respuesta mínima total), es el cociente $L / (l_{\min} = 1)$, pero que también suele aplicarse a la variable de entrada expresándose ambas en dB o en bits:

Ecuación 2.3

$$rd_E = 20 \cdot \log \left(\frac{S}{T} \right) \quad \text{entrada}$$
$$rd_S = 20 \cdot \log \left(\frac{L}{l_{\min}} \right) \quad \text{salida}$$

Así, para el ejemplo que consideramos tenemos $rd_A = 37.5$ dB (entrada = salida) y $rd_B = 9.54$ dB (entrada) y 34.15 dB (salida), respectivamente.

Del mismo modo, se define el *ruido de lectura base rlb* como el cociente (respuesta máxima total) / rd, es decir, el valor umbral de respuesta $l_{\min} = 1$, de forma que tenemos respectivamente $rlb_A = 1 = rlb_B$, pero que podría darse el caso de que l_{\min} fuera mayor que 1, como así ocurrirá con la "respuesta oscura" como una fuente importante de error sistemático en los dispositivos fotodetectores reales.

En cuanto a los aspectos de la incertidumbre aleatoria de la respuesta o captura fotónica, podemos dar en primer lugar un límite superior de precisión relativa, entendiéndose que nunca podrá ser rebajado, por aspectos estrictamente estadísticos de la fotodetección ideal. El concepto parte de la definición del coeficiente de variación v , como el cociente entre la desviación estándar s y el valor medio m , que, en el caso de la distribución de Poisson resulta ser $1/\sqrt{n_n}$, puesto que la varianza y el valor medio valen lo mismo. Entonces, recordando que estamos con sistemas fotosensores con eficiencia cuántica QE ideal, tenemos que la precisión relativa de la fotodetección ideal no puede ser inferior a

Ecuación 2.4

$$precisión\ máxima = 100 \frac{1}{\sqrt{resp.\ máx.}} = 100 \frac{1}{\sqrt{L}} \text{ en \%}$$

Así, el sistema fotosensor A, de sensibilidad máxima, posee una precisión relativa de respuesta de 11.6 %, mientras que el sistema B, llega a alcanzar un 14.0 % de precisión relativa. Pero, volviendo a reiterar lo de antes, son cotas superiores de excelencia, puesto que no pueden reducirse debido a los aspectos puramente estadísticos de la fotodetección ideal.

Si seguimos con los aspectos de la incertidumbre en la respuesta fotodetectora, podemos considerar en segundo lugar el concepto de relación señal vs. ruido (*SNR*), tal como se utiliza en ingeniería y se introdujo en el capítulo anterior. Así, *SNR*, entendida como la inversa del coeficiente de variación v y expresada en dB, plantea el primer problema conceptual de la fotodetección ideal: ¿cuál es el error aleatorio asociado a una respuesta l cualquiera? Con los datos previos T , S y L , no podemos contestarla. La solución debe pasar necesariamente por la comprensión minuciosa del proceso de captura fotónica, desde el valor $l = T$ hasta el valor $l = L$, pasando por los valores intermedios. Por ejemplo, a partir del concepto de OECSF, podemos presentar la característica siguiente: el ritmo de cambio del nivel de respuesta fotodetectora con la exposición cuántica, o *gradiente* o *función espectral de ganancia incremental* (*Incremental Gain Spectral Function - IGSF*), derivada de OECSF respecto a n_n . Denotando este concepto como g , tenemos de acuerdo con la expresión matemática de OECSF (Ec. 2.2):

Ecuación 2.5

$$g = \frac{\partial l}{\partial q} = L e^{-q} \left(f_1 - \frac{\partial f_1}{\partial q} \right) = L f_2 e^{-q} \quad , \quad \text{siendo} \quad f_2 = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^{S-1} \frac{q^k}{k!}$$

De este modo, la función espectral de ganancia incremental g (IGSF) permite comprobar hasta qué punto se sigue considerando al sistema fotodetector como estadísticamente ideal. Ya que consideramos eficiencia cuántica ideal ($QE = 1$), el gradiente g será 1 en aquellos valores de exposición donde se mantenga la relación 1:1 entre la entrada y la salida, es decir, como si el sistema fotodetector se comportara estrictamente lineal en ese intervalo de exposición. Si representamos gráficamente IGSF (Fig. 2.2) para los sistemas fotosensores A y B tenemos que ambos casos el gradiente g nunca se mantiene en su valor máximo para todos los rangos de exposición a los que son sensibles los sistemas fotosensores. En particular, la relación ideal $g = 1$ se consigue en el sistema A para exposiciones bajas pero, a medida que la exposición cuántica se aproxima al valor de saturación $S = 75$, entonces el gradiente g decrece hasta llegar a cero en algún nivel de exposición superior a S donde todos los receptores ya estarían saturados. Por otro lado, en el sistema B, más realista, los valores de gradiente $g = 1$ están bastante limitados a una zona de exposición mucho más reducida que en el caso A. De esta forma, tenemos la certeza que el comportamiento "ideal" o de ganancia unidad del sistema B está mucho más restringido en zona de exposición que el del sistema A. Por tanto, el gradiente g (IGSF) puede ser un buen parámetro para evaluar el comportamiento fotodetector de cualquier sistema, biológico o artificial, sensible a la luz.

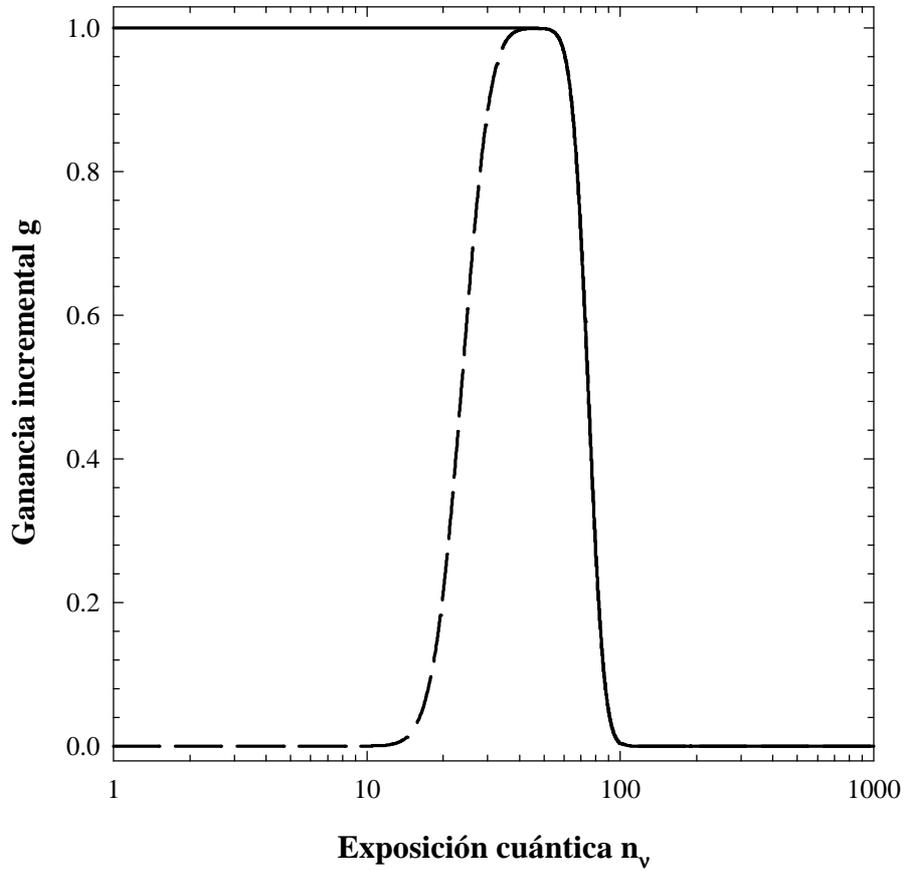


Figura 2.2: Ejemplos de funciones espectrales de ganancia incremental (IGSF) para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno ($T = 1, S = 75, L = 75$, línea continua) y ($T = 25, S = 75, L = 51$, línea discontinua).

Ahora bien, con el parámetro IGSF no resolvemos la cuestión sobre cuál es el error aleatorio asociado a un valor l cualquiera. Sin embargo, lo vamos a usar implícitamente. Considerando que existe una fluctuación estadístico-espacial en la exposición cuántica sobre el plano fotosensor ideal, esto significa que si planteamos el cálculo estadístico de la varianza estadística σ^2 de la entrada y la salida aplicando por definición el segundo momento de la distribución de Poisson, tenemos que:

Ecuación 2.6

$$\sigma_q^2 = \sum_{k=0}^{\infty} k^2 q^k \frac{e^{-q}}{k!} - q^2 = q e^{-q} (e^q (1+q)) - q^2 = q$$

$$\sigma_l^2 = L^2 \left[(1 - f_3 e^{-q}) - (1 - f_1 e^{-q})^2 \right] ,$$

$$\text{siendo } f_3 = \frac{1}{L^2} \left(\sum_0^{T-1} \frac{q^k}{k!} + 3 \sum_0^T \frac{q^k}{k!} + 5 \sum_0^{T+1} \frac{q^k}{k!} + \dots + (2L-1) \sum_0^{S-1} \frac{q^k}{k!} \right)$$

Si seguimos con los mismo ejemplos (Fig. 2.3), resulta que el sistema más idealizado A se comporta de forma que el ruido aleatorio asociado a cada respuesta sigue la línea recta definida por $\sigma_1^2 = q$ hasta que decrece bruscamente hasta cero cuando se aproxima y sobrepasa el nivel de saturación S: si todos los receptores están saturados no puede haber fluctuación (espacial) en la respuesta.

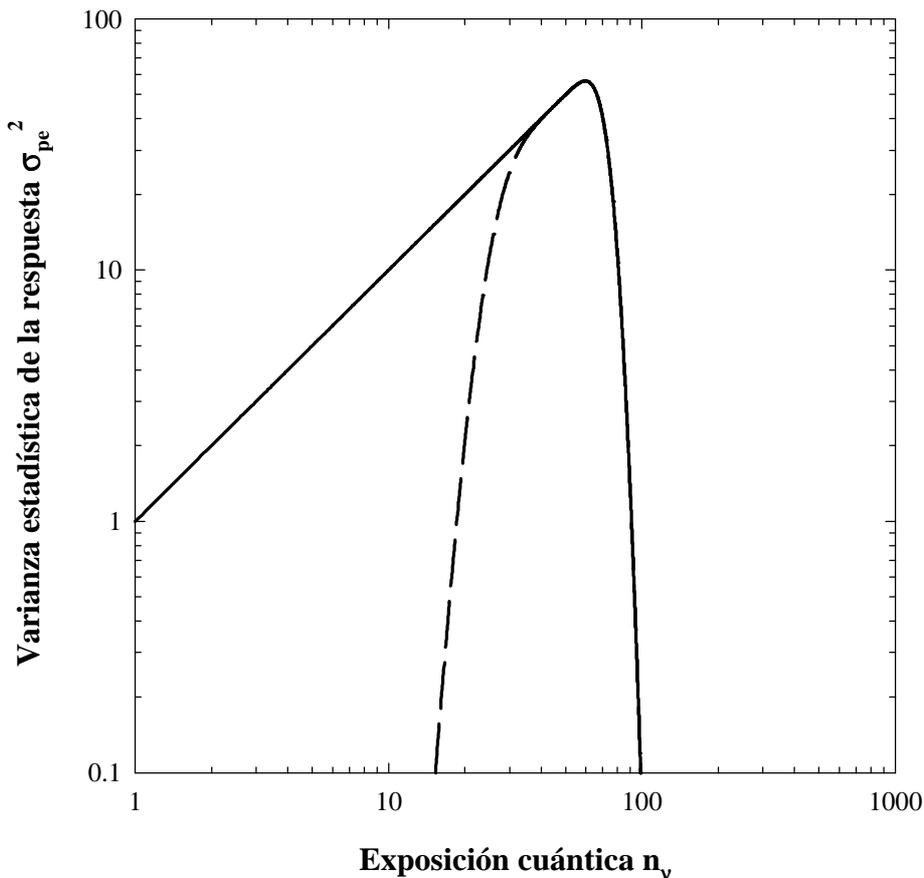


Figura 2.3: Ejemplos de curvas espectrales transferencia fotónica (PTSC) para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno (T = 1, S = 75, L = 75, línea continua) y (T = 25, S = 75, L = 51, línea discontinua).

Pero, la misma representación gráfica σ_l^2 vs. n_n para el sistema fotodetector B muestra un cierto comportamiento fotónico que cabe analizar detenidamente. Para el sistema B con parámetros $T = 25$ y $S = 75$, el ruido aleatorio de la respuesta fotónica no se rige exactamente por la fluctuación estadística de la exposición cuántica. Esto solamente ocurre en un intervalo de exposición bastante reducido, entre $n_n = 30$ y $n_n = 60$. Es como si el sistema fotosensor B aplicara sus propias leyes estadísticas para contar fotones, de ahí que estas representaciones se conozcan técnicamente como *curvas espectrales de transferencia fotónica* (*Photon Transfer Spectral Curve - PTSC*). En concreto, de ellas se puede extraer un parámetro importante de calidad de la fotodetección conocido como *constante de conversión optoelectrónica* K , y que puede interpretarse como el punto de intersección de la curva PTSC entre el eje de abscisas n_n y la línea recta definida por $\sigma_{pe}^2 = 1$, indicando por tanto el grado de aproximación a la relación ideal 1:1 entre entrada y salida. En concreto, las constantes de conversión fotónica quedarían como $K_A = 1$ y $K_B = 18$.

Ahora ya estamos en disposición de representar gráficamente SNR para los dos ejemplos, siguiendo la definición general, que se expresaría particularmente en el caso de la fotodetección ideal como

Ecuación 2.7

$$SNR = 20 \cdot \log \left(\frac{L}{\sigma_l} \right) = 20 \cdot \log \left[\frac{1 - f_1 e^{-q}}{\sqrt{(1 - f_3 e^{-q}) - (1 - f_1 e^{-q})^2}} \right] \text{ en dB}$$

Ahora, sabiendo ya cómo se comporta fotónicamente un sistema fotodetector, podemos imaginar previamente las representaciones gráficas de SNR para los ejemplos A y B (Fig. 2.4). En primer lugar, debemos equiparar los rangos de respuesta fotónica de ambos sistemas puesto que las profundidades de respuesta L son distintas ($L_A = 75$, $L_B = 51$). Así, utilizaremos como eje de abscisas la respuesta fotónica normalizada. En segundo lugar, y según lo explicado en el concepto de transferencia fotónica, el error aleatorio aumenta progresivamente con la respuesta para decrecer repentinamente ante la presencia del nivel de saturación, por lo que tenemos que matemáticamente SNR puede alcanzar un valor infinito, pero no se considera esto útil dado que el sistema fotosensor se encuentra condicionado o ligado a su profundidad de respuesta. Por tanto, es justamente hasta el punto de inflexión de las curvas PTSC lo que limita el uso real del concepto SNR . Por tanto, tenemos una cota superior de validez física, no matemática, para SNR , a partir aproximadamente de un valor normalizado 0.8 de respuesta fotónica. Pero, también aparecerá una cota inferior de validez física para SNR , la que venga asociada con la ligadura de la exposición equivalente de ruido T y la constante de conversión fotónica K , de forma que pueden aparecer zonas de respuesta superiores al valor nulo donde tampoco tenga sentido físico, ni matemático, la existencia del parámetro SNR . Por último, tenemos también una cota teórica para SNR , la que se deriva de aplicar este concepto a la luz libre, a la exposición cuántica n_n . Como la varianza estadística de la distribución de Poisson coincide con el valor medio, la relación SNR para la luz libre es $10 \cdot \log(q)$, por lo que no existirá ningún valor de exposición que se comporte como punto de inflexión.

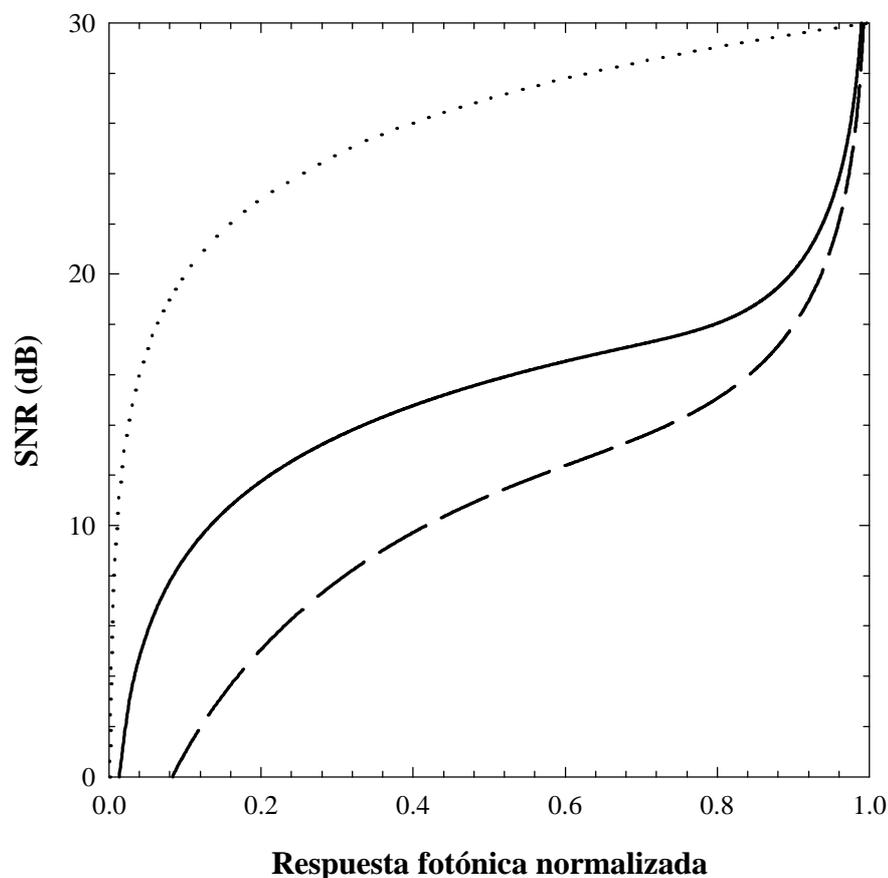


Figura 2.4: Ejemplos de curvas SNR para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno ($T = 1$, $S = 75$, $L = 75$, línea continua) y ($T = 25$, $S = 75$, $L = 51$, línea discontinua). Se muestra así mismo la relación SNR para la luz libre (línea punteada) en el intervalo de exposición 1-1000 fotones.

Queda plantearse si el ruido aleatorio de la imagen captada puede medirse en alguna escala absoluta. En principio, la única escala absoluta que podemos escoger es la de la luz, es decir, de la exposición cuántica n_n . Aunque estamos manteniendo que existe una relación 1:1 entre la entrada y la salida, y que eso lo hemos identificado con el término de eficiencia cuántica espectral QE , como cociente entre l y q , resulta que tal identidad 1:1 no se mantiene a lo largo de todo el rango de exposición a la que es sensible el sistema fotodetector ideal (Fig. 2.5, para los ejemplos A y B). Aunque es costumbre utilizar este parámetro con el más característico para representar el nivel de calidad de la fotodetección, es también cierto que no está sobre una escala absoluta, como ocurre en los fotomultiplicadores o intensificadores de imagen (Johnson, Owen 1995), con QE superiores al 100 %. Es como si la eficiencia cuántica espectral QE representara un parámetro de calidad desde el punto de vista cuantitativo entre la entrada y la salida, pero no desde el punto de vista cualitativo. Entonces, quizás probando con las fluctuaciones aleatorias de la imagen lleguemos a un parámetro cualitativo absoluto de calidad del sistema fotodetector. Tal parámetro, descrito inicialmente como *nivel comparativo de ruido espectral* (*Comparative Spectral Noise*

Fotodetección ideal

Level - CSNL) o parámetro ε , suele denotarse técnicamente como *eficiencia espectral de detección* (*Detective Quantum Efficiency - DQE*), y es el resultado de comparar la varianza estadística de la luz libre con la resultante del proceso de fotodetección:

Ecuación 2.8

$$\varepsilon = \frac{\sigma_q^2}{\sigma_l^2 \left(\frac{\partial q}{\partial l} \right)^2} = q \frac{g^2}{\sigma_l^2} \Rightarrow DQE \equiv \varepsilon = \frac{q (f_2 e^{-q})^2}{(1 - f_3 e^{-q}) - (1 - f_1 e^{-q})^2},$$

diferente a $QE = \frac{l}{q} = \frac{1 - f_1 e^{-q}}{q} L$

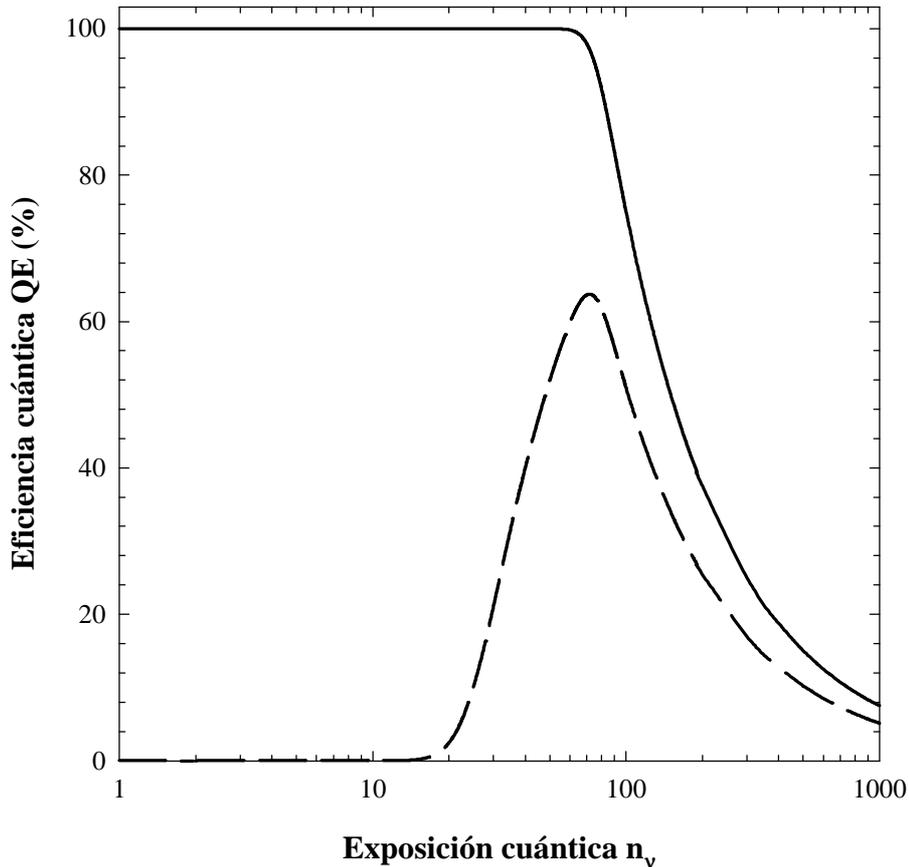


Figura 2.5: Ejemplos de curvas QE para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno ($T = 1$, $S = 75$, $L = 75$, línea continua) y ($T = 25$, $S = 75$, $L = 51$, línea discontinua).

Con esta definición de DQE, es evidente que tiene un límite superior de 1, o sea, del 100 %. En cambio, QE no tiene en principio ninguna limitación matemática en su definición, remarcando de nuevo que son

las propias tecnologías fotónicas las que pueden superar $QE = 1$, pero todas ellas, y sus dispositivos fotodetectores pueden compararse de forma absoluta con DQE (Dainty, Shaw 1974, 28), tal como no resta hacer, siguiendo todo este argumento, con los ejemplos A y B (Fig. 2.6).

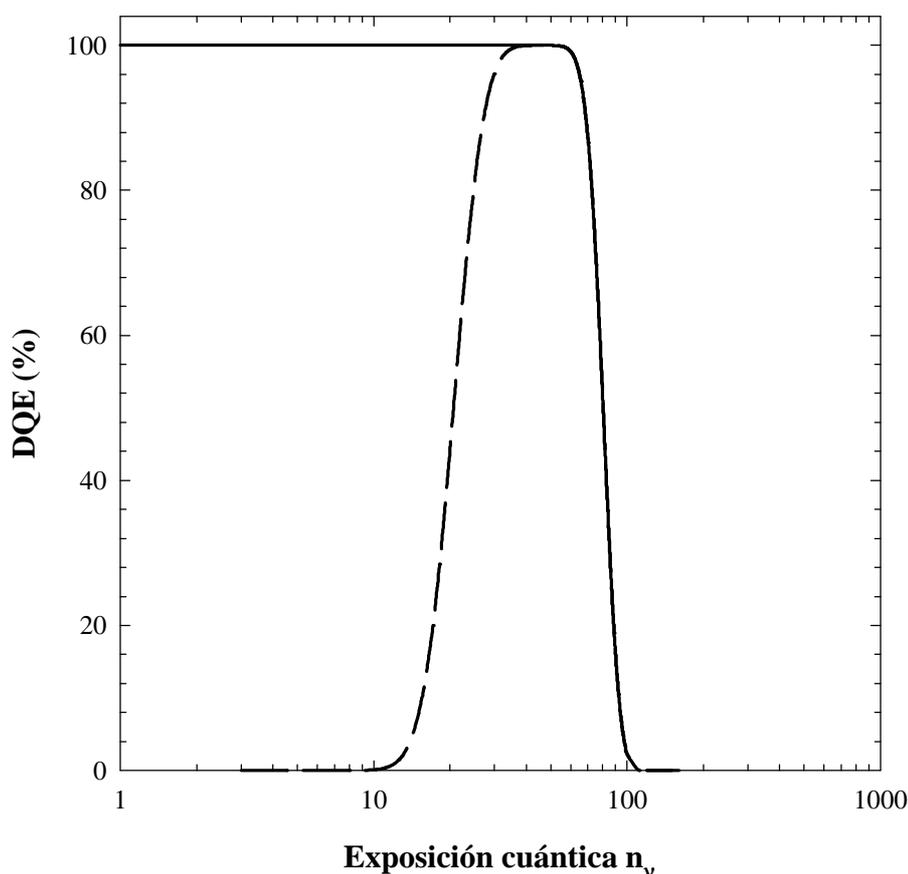


Figura 2.6: Ejemplos de curvas DQE para sistemas fotosensores ideales con variables de contorno ($T = 1, S = 75, L = 75$, línea continua) y ($T = 25, S = 75, L = 51$, línea discontinua).

Finalizamos esta sección de esta tesis doctoral, incorporando en todo lo explicado el principio de univariancia de Rushton de la fotodetección. Hasta ahora, solamente habíamos analizado la fotodetección ideal para luz estrictamente monocromática, pero la extensión a una distribución continua de potencia radiante \mathbf{b} es muy fácil de aplicar. El punto de partida se encuentra en que el sistema fotodetector ideal es simplemente un contador de fotones, de cualquier longitud de onda λ , y con la misma eficiencia 1:1, en principio. Al aplicar el concepto físico-matemático de acumulación, el cual está representando un proceso claramente aditivo, nunca sustractivo, la respuesta fotodetectora l nunca mantiene la información parcial de las exposiciones cuánticas q_λ sobre las cuáles se efectúa la acumulación final l . Es más, es también evidente aquí el concepto ya explicado de metamerismo: una respuesta l puede estar causada por

distribuciones continuas de potencia radiante espectralmente muy diferentes entre sí. Para la fotodetección ideal, el principio de univariación quedaría como

Ecuación 2.9

$$l = \int_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} l_{\lambda} d\lambda \cong \sum_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} l_{\lambda} \Delta\lambda = \sum_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} q_{\lambda} QE_{\lambda} \Delta\lambda = L \sum_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} (1 - f_{l_{\lambda}} e^{-q_{\lambda}}) \Delta\lambda$$

Esto servirá para plantear de forma general el concepto de sensibilidad espectral de fotodetección, tal como se utilizó en el capítulo anterior al considerarla equivalente con el concepto colorimétrico de función de igualación. En parte todo está casi planteado, pero lo que buscamos es describir la sensibilidad espectral en una escala absoluta, y no relativa como la expresamos con las funciones de igualación. El punto de partida es remarcar el concepto de la fotodetección dentro de la teoría general de sistemas: "la salida o respuesta del sistema es igual a la entrada ponderada por la sensibilidad o función de transferencia del sistema". Con esta definición tan genérica entre entrada y salida, podemos definir sin perder generalidad dos conceptos totalmente equivalentes de sensibilidad espectral: *responsividad espectral* $r(\lambda)$ y *espectro de acción* $a(\lambda)$.

Ecuación 2.10

$$salida = (\text{función de transferencia}) \otimes entrada$$

$$respuesta = (\text{sensibilidad}) \otimes exposición \Rightarrow l_{\lambda} = QE_{\lambda} \cdot q_{\lambda}$$

$$\Rightarrow r(\lambda) = \frac{l_{\lambda}}{q = cte} \quad \text{responsividad}$$

$$\Rightarrow a(\lambda) = \frac{l = cte}{q_{\lambda}} \quad \text{espectro de acción}$$

La responsividad espectral y el espectro de acción son matemática y físicamente equivalentes, pero es la manipulación conceptual de la sensibilidad espectral lo que hace necesario diferenciarlas entre ambas, aunque sigamos hablando de lo mismo. Por ejemplo: para la fotodetección ideal, al hablar de sensibilidad umbral para los sistemas-ejemplo A y B, tenemos que utilizar el espectro de acción $a(\lambda)$ para calcular cuánto valen los cocientes $(l = 1)/q$, especificando así cuál debe ser la exposición cuántica n_n que provoca la respuesta mínima del sistema fotosensor. Y, de forma complementaria, dada una exposición cuántica constante n_n , cuál de los sistemas A y B responde con mayor intensidad, cuestión que implica calcular las eficiencias cuánticas QE_A y QE_B para ese valor energético q .

Como conclusión de este paso introductorio a este trabajo, se incorporan los resultados de funcionalidad/calidad de tres sistemas fotosensores ideales más, para poner de relevancia las interrelaciones entre los valores T, S y L con los conceptos rd , rlb , QE , DQE , responsividad y espectro de

acción. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos, los cuales se complementan con varias representaciones gráficas (Fig. 2.7, 8, 9, 10 y 11):

Tabla 2.3: Parámetros funcionales para los casos de estudio de la fotodetección ideal.

Casos del análisis	A	B	C	D	E
	T = 1 , S = 75	T = 25 , S = 75	T = 45 , S = 95	T = 25 , S = 95	T = 45 , S = 75
Profundidad de respuesta (L)	75	51	51	71	31
	6.2 bits	5.7 bits	5.7 bits	6.2 bits	5.0 bits
Rango dinámico de entrada (rd_E)	37.5 dB	9.5 dB	6.5 dB	11.6 dB	4.4 dB
Rango dinámico de salida (rd_S)	37.5 dB	34.2 dB	34.2 dB	37.0 dB	29.8 dB
Ruido-lectura-base (rlb)	1	1	1	1	1
Precisión relativa máxima (%)	11.6	14.0	14.0	11.9	18.0
Constante de conversión fotónica (K)	1	18	34	18	34
SNR para respuesta normalizada = 0.5	15.7 dB	11.2 dB	9.7 dB	13.3 dB	6.4 dB
QE (%) para $q = 35$	100.00	31.57	0.56	31.57	0.56
DQE (%) para $q = 35$	100.00	99.53	22.40	99.53	22.40
Sensibilidad (%) umbral ($I = 1$)	100.00	4.58	2.51	4.58	2.51
Sensibilidad (%) a media respuesta normalizada	100.00	51.51	36.69	59.66	26.03

Una de las primeras conclusiones que podemos extraer de esta comparativa es el efecto de la profundidad de respuesta L: si aumenta progresivamente, favorecemos que el sistema consiga una precisión relativa más alta (numéricamente más pequeña). En cuanto el efecto de exposición equivalente de ruido T, las deducciones son muy importantes: en términos de K , QE , DQE y sensibilidad umbral, no importan los valores de la profundidad de respuesta L ni de la exposición equivalente de saturación S, pero sí para el rango dinámico de entrada (rd_E), o rango de exposición a la que es sensible el sistema fotosensor, y que no se diferencia en el rango dinámico de salida (rd_S) en los sistemas con idéntica profundidad de respuesta L (sistemas B y C). Esto significa que, ante la posibilidad de comparar sistemas fotosensores con idéntica profundidad de respuesta L, e idéntico rango dinámico de salida (rd_S), los parámetros SNR , K , QE , DQE y sensibilidad-espectro de acción son los más reveladores para marcar las diferencias en calidad de fotodetección que puedan existir. Lo que sí parece evidente es que si el sistema fotosensor real tiene las exposiciones equivalentes de ruido T y de saturación S bastante separadas numéricamente, más se aproximará su comportamiento fotosensor a lo que hemos explicado aquí como fotodetección ideal.

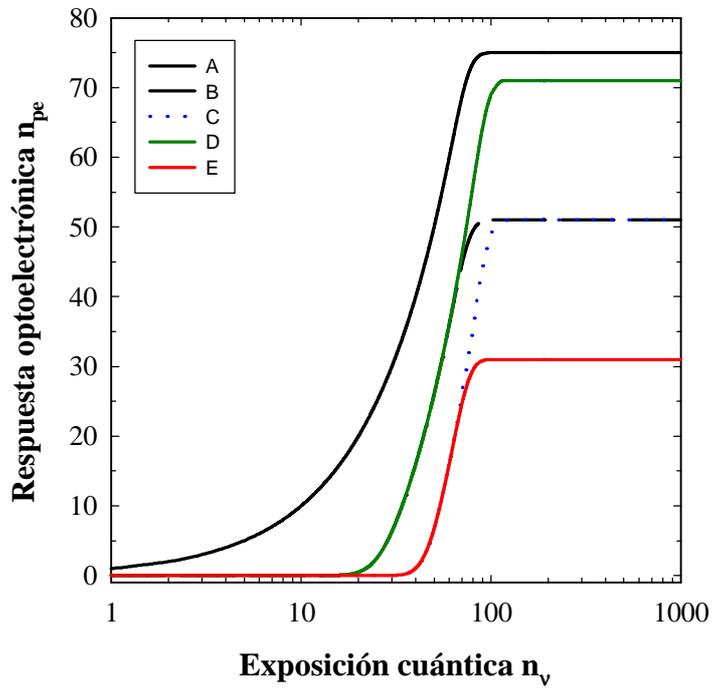


Figura 2.7: Curvas OECSF de los sistemas fotosensores de la Tabla 2.3.

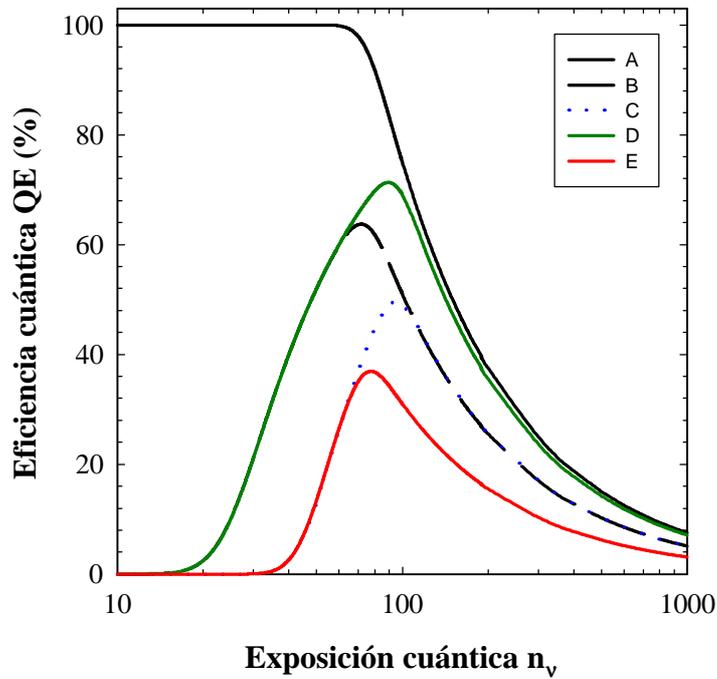


Figura 2.8: Curvas QE de los sistemas fotosensores de la Tabla 2.3.

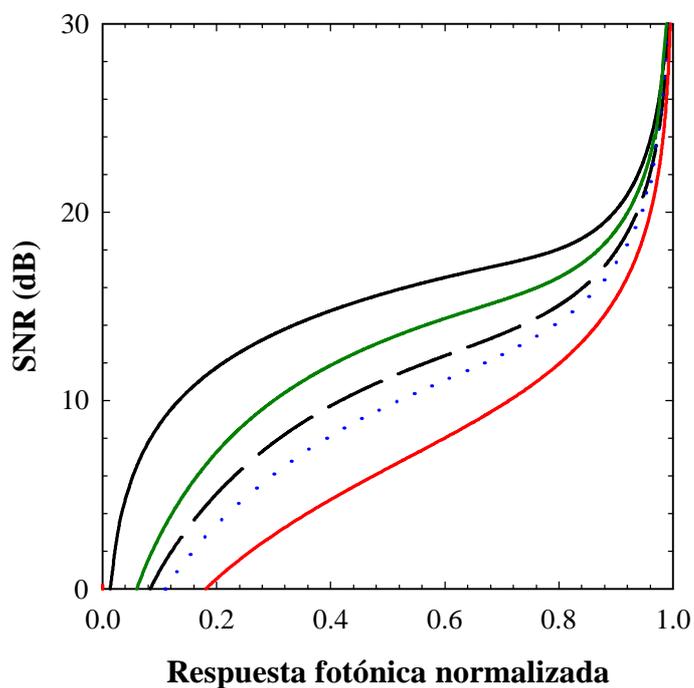


Figura 2.9: Curvas *SNR* de los sistemas fotosensores de la Tabla 2.3.

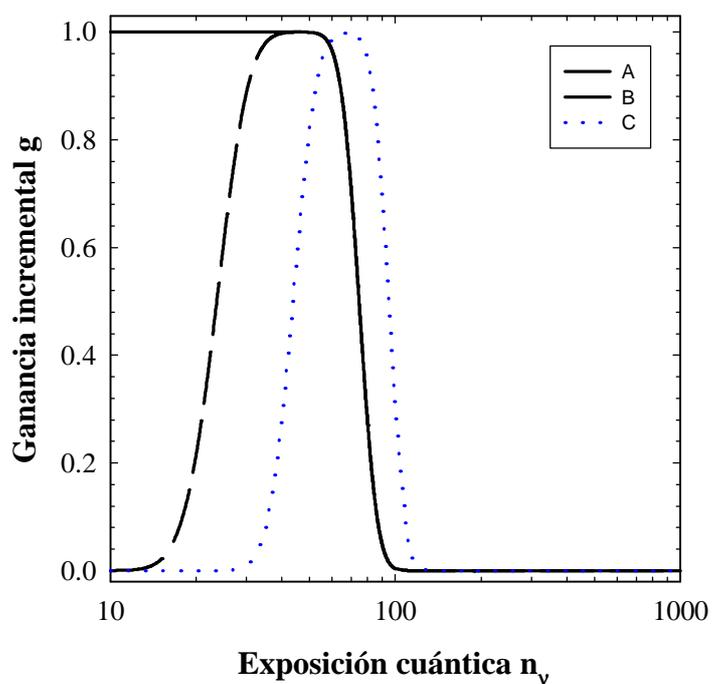


Figura 2.10: Curvas *IGSF* de los sistemas fotosensores A, B y C de la Tabla 2.3.

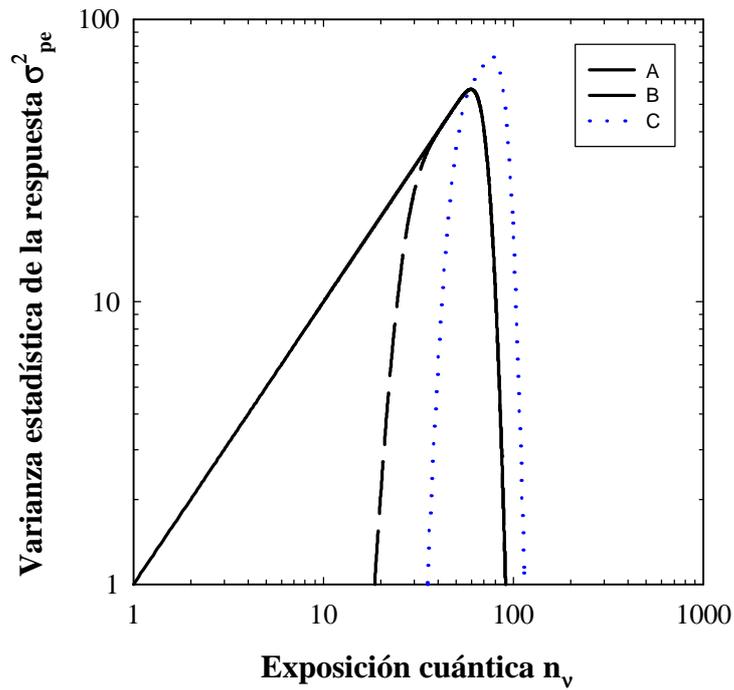


Figura 2.11: Curvas *PTSC* de los sistemas fotosensores A, B y C de la Tabla 2.3.

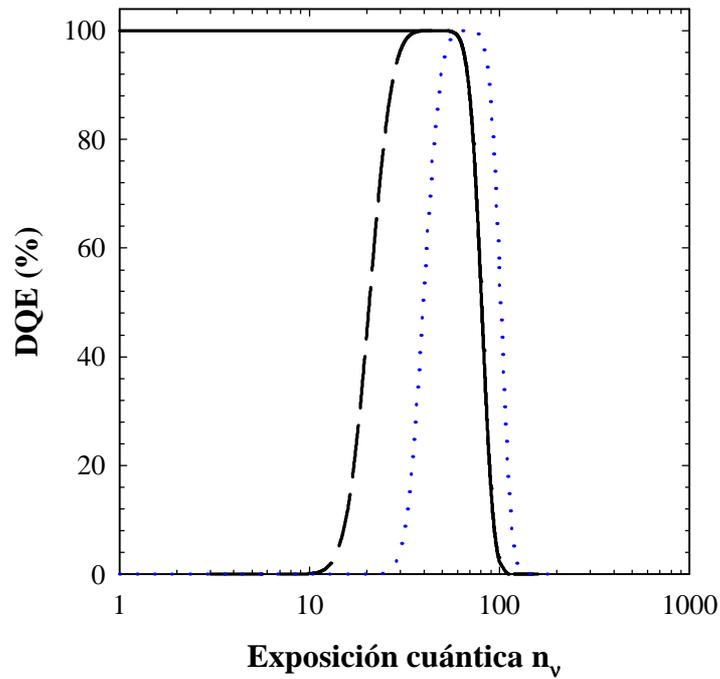


Figura 2.12: Curvas *DQE* de los sistemas fotosensores A, B y C de la Tabla 2.3.

2.2 Selección de una cámara digital para aplicaciones científicas

Nadie ya duda que estamos viviendo una revolución tecnológica sobre el concepto "Multimedia" y las Telecomunicaciones, sobre el concepto de generación, codificación, transmisión y representación de información visual, y de cómo la técnica fotográfica clásica o fotoquímica, hasta ahora exclusiva solamente de empresas especializadas y profesionales, puede llegar a ser desbancada por la Fotografía Digital, en la que personas no especializadas pueden manejar sin dificultades y conseguir con pocos conocimientos un nivel aceptable de reproducción del color (Agfa 1994, 1995; Sawyer, Pronk 1998). La cuestión que surge inmediatamente es si es posible conseguir el nivel exacto, o incluso espectral, de reproducción del color en Fotografía Digital, ya sea con videocámaras, cámaras estáticas o escáneres. De esta forma, estaríamos transformando un aparato diseñado para el consumo multimedia en un instrumento de medida del color con enormes aplicaciones científicas e industriales.

Ya hemos visto en el primer capítulo todo el trasfondo físico-matemático que se necesita para abordar con garantías esta complicada empresa de pasar de cualquier codificación de color dependiente del dispositivo a una codificación de color independiente, en todo caso, ajustada a la del sistema visual humano como el elemento final de la cadena de la reproducción de una imagen. También hemos analizado en el apartado anterior los factores aleatorios que están siempre implícita o explícitamente en todos los sistemas fotosensores. Y, cómo a través de este análisis teórico se han derivado parámetros de excelencia o de calidad del proceso fotosensible o fotográfico. Por tanto, solamente con este tipo de información o introducción teórica al problema, ya podríamos abordar la cuestión sobre qué características de la fotodetección ideal deberíamos haber tenido en cuenta para conseguir con éxito la conversión de un sistema fotosensor ideal en un instrumento de medida del color, con su nivel de exactitud y precisión. Pero claro, la realidad es otra: ningún sistema fotosensor biológico o artificial está diseñado a semejanza de las virtudes o excelencias de la fotodetección ideal. Es más, son los medios y las herramientas que dispone la Naturaleza y el ser humano los que condicionan ejemplos tan sobresalientes como la retina humana, una cámara digital o un fotomultiplicador. Por consiguiente, en el caso de una cámara digital, parece necesario abordar qué aspectos tecnológicos se emplean sin más remedio o se eligen intencionadamente en el diseño/construcción/uso de una cámara digital que puedan alterar a favor o en contra el nivel de reproducción del color. Lo que nos ocupa a continuación, como parte también imprescindible de esta tesis doctoral, puede plantearse del modo siguiente:

- ¿Qué parámetros de las especificaciones técnicas del fabricante hemos de tener en cuenta para utilizar una cámara digital con propósitos científicos?
- ¿Qué características de diseño y funcionamiento de una cámara digital pueden ser fuentes de error sistemático en la respuesta cromática de una cámara digital que impidan o dificulten su transformación en un instrumento tele-colorimétrico exacto y preciso?

El esquema argumental que seguiremos no pretende explicar de forma exhaustiva toda la Física y la Microelectrónica que subyace en una cámara digital, sino más bien, desde un punto de vista más didáctico, analizar los parámetros clave que están influyendo en la salida cromática de una cámara digital.

Este análisis resultará de gran importancia para conseguir nuestro objetivo: reducir, si es posible, todos los errores sistemáticos sobre la respuesta cromática de una cámara digital para transformarla en un instrumento tele-colorimétrico exacto y preciso. Por eso, como si de una guía se tratara, presentaremos la cámara digital de trabajo de esta tesis doctoral sobre la que iremos extrayendo, a partir de las especificaciones técnicas del fabricante que se incluyen en el manual de funcionamiento, los aspectos de diseño y funcionales clave que se tendrán en cuenta para lograr el objetivo propuesto. Reiteramos de nuevo que tal argumentación podría aplicarse a otras cámaras digitales diferentes a la usada, independientemente del fundamento optoelectrónico de la fotodetección y/o de las características de diseño electrónico que posean. Un aspecto o dato importante al respecto es que la cámara utilizada en esta tesis doctoral no fue seleccionada con ningún criterio previo para convertirla en un instrumento de medida del color, aunque ninguna cámara digital que se fabrica actualmente está diseñada concienzudamente para tal fin científico. Si bien, hay que remarcar que la selección de esta cámara de trabajo acertó en algunos aspectos, lo importante es que el discurso que sigue a continuación –el desarrollo y la resolución de esta tesis doctoral– puede aplicarse a cualquier otra cámara digital, sea la marca y modelo que sea, sea la aplicación pseudo-científica o científica que se desee llevar a cabo. Lo que aportaremos de forma novedosa desde un punto de vista científico en esta tesis doctoral es un método físico-matemático para evaluar el nivel de reproducción del color de una cámara digital cualquiera.

2.2.1 Componentes básicos de una cámara digital

Cualquier sistema fotosensor multimedia tipo cámara digital, escáner o videocámara puede descomponerse en cuatro componentes básicos:

- El dispositivo optoelectrónico fotosensor: el que convierte el patrón de luz incidente n_n en un patrón-imagen de fotoelectrones generados n_{pe} por efecto fotoeléctrico, el cual se codifica de forma efectiva como un patrón bidimensional de voltajes (salida analógica, por tanto).
- El *convertor analógico-digital* ADC (*tarjeta digitalizadora* o *frame grabber*): el que convierte la imagen analógica capturada en una imagen con valores digitales y cierta dimensión espacial, cuyo elemento espacial básico es el *píxel*, para estar óptimamente preparada para el uso posterior que quiera hacerse de ella.
- El sistema de almacenamiento de las imágenes digitales: en las videocámaras o cámaras digitales portátiles son tarjetas de memoria magnética/digital, mientras que en los escáneres las imágenes digitales capturadas se almacenan directamente en el disco duro del ordenador o en discos de memoria portátil (disquettes, CD-ROM, etc).
- El software de tratamiento digital de la imagen: el que manipula la imagen digital capturada para efectuar diferentes tareas de procesado (máscaras, transformaciones de color, extracción de bordes, segmentación, reconocimiento de patrones, etc).

De este esquema tan básico, podemos concluir que lo que se considera imagen (digital) bruta es la que surge de la salida del conversor analógico-digital ADC, cuando adquiere una ciertas dimensiones espaciales y posee una variable específica de respuesta, que denominamos *nivel de gris* o *número digital (ND)* pero que, de alguna manera, si las características de funcionamiento están bien controladas, es una transformación biunívoca reversible de la imagen optoelectrónica bruta con valores n_{pe} . Llegado a este punto, es muy importante diferenciar entre las áreas diferentes de aplicación de *Image Science* puesto que esto marcará las condiciones de contorno y el rango de validez/aplicación donde se desenvolverá el desarrollo y resolución de esta tesis doctoral. Desde diseño por ordenador, restauración/resalte de imágenes, reconocimiento de patrones, pasando por transmisión de imágenes vía satélite, todas ellas son transformaciones que sufre la imagen digital bruta u original para ciertos propósitos. Todas estas operaciones pueden clasificarse en tres grupos:

- Operaciones puntuales: cada nuevo nivel de gris se calcula exclusivamente a partir del nivel de gris viejo u original. Por ejemplo: las transformaciones de histograma.
- Operaciones locales: que pretenden resaltar o suprimir patrones de niveles de gris de píxeles vecinos. Por ejemplo: las transformaciones de gradiente o de suavizado.
- Operaciones globales: donde todos los píxeles de la imagen original se necesitan para calcular el nivel de gris de cada píxel de la imagen final o transformada. Por ejemplo: la transformada de Fourier.

Dentro de esta clasificación, las transformaciones de color, tal como se presentaron en el capítulo anterior, son todas ellas operaciones puntuales. Por tanto, cuando se indica como objetivo de esta tesis doctoral que pretendemos convertir los valores digitales RGB de una cámara digital, pudiéndose ser valores triestímulo o no, a valores triestímulo CIE-XYZ, nos referimos a un grupo de operaciones todas ellas puntuales, de píxel a píxel, y, sobre todo, que partiremos de la imagen optoelectrónica o digital bruta, la que originalmente se codifica antes de pasar por operaciones diferentes, necesarias para el uso que se haga de ella (formato de almacenamiento, formato de vídeo, etc). Con esto, queremos expresar que el nivel de procesado de la imagen digital es el más básico de todos, y en el que se basan todos los demás, con lo que, si en este nivel de procesado de la imagen conseguimos una eficiencia metrológica alta, no cabe duda que todas las operaciones posteriores se pueden beneficiar de tal propiedad. Por lo tanto, al transformar una imagen digital RGB en una imagen digital XYZ, metrológicamente correcta, con un cierto nivel de reproducción del color, no cabe duda que todas las transformaciones posteriores sobre la imagen metrológica XYZ pueden aprovecharse para optimizar mejor sus recursos existentes y ampliar sus aplicaciones científicas o pseudo-científicas, con control exacto del nivel de reproducción del color que se maneja, manteniendo el nivel original o prefiriendo uno de inferior calidad (correspondiente o preferido, al estilo WYSIWYG).

Llegado a este punto, cabe diferenciar claramente entre videocámaras y cámaras estáticas (de imagen fija, *digital still camera* - DSC), ya sean electrónicas o digitales. Todas las cámaras dan salida analógica en su estado bruto o primario, pero dependiendo del formato de salida de la imagen, esta señal analógica se reconvierte en formato vídeo (MPEG, para TV, etc) o en formato gráfico (TIFF, GIF, JPEG, etc), vía

soporte magnético o una tarjeta digitalizadora. Inevitablemente, esta última opción está condicionada por el formato de vídeo, como precursor tecnológico de las aplicaciones de la imagen, pero no se está registrando un patrón temporal de imágenes, sino que son imágenes estáticas, capturadas en un instante determinado. Aunque el formato de vídeo analógico/digital se rige por sus propios estándares (MPEG, CCIR para Europa, RS-170 para Estados Unidos, etc) en coordinación con las características espacio-temporales y colorimétricas de los monitores CRT (las primeras TV) (Hunt 1995, 433-599), esto sigue condicionando tecnológicamente la salida en formato gráfico para aplicaciones de visión artificial, diseño gráfico, etc. Por tanto, una vez descartadas las videocámaras, podemos diferenciar dentro de las cámaras estáticas entre cámaras electrónicas y digitales (*electronic still picture camera* vs. *digital still camera*). La única diferencia conceptual entre ambas es que las últimas incorporan en su arquitectura la tarjeta digitalizadora ADC, de forma que la salida, cromática RGB o acromática B/N, es completamente digital. En cambio, las primeras son cámaras con salida analógica que se conectan externamente a una tarjeta digitalizadora, generalmente insertada dentro de un ordenador personal (PC). En concreto, nuestra cámara de trabajo es de tipo CCD-RGB de la marca Sony, modelo DXC-930P, conectada externamente a una tarjeta digitalizadora de la marca Matrox, modelo MVP-AT 850, insertada en un ordenador convencional. Sin embargo, no debemos olvidar que los procedimientos a realizar y los resultados obtenidos de esta tesis doctoral son teóricamente totalmente implementables en las cámaras digitales portátiles, las que sustituirán en un plazo no muy largo a las actuales cámaras fotográficas de bolsillo (Tani 1998).

Otro aspecto a tener en cuenta es la adaptabilidad de este trabajo a la tecnología de escáneres multimedia. Si bien existen ciertas semejanzas entre las cámaras electrónicas analógicas/digitales y los escáneres (Advanced Imaging 2000; B&H 2001), es evidente la disparidad de arquitecturas/diseños e implementaciones en los mismos dispositivos sobre cuestiones de registro, control y transmisión de la imagen en color entre fabricantes diferentes. Esto ya de por sí, al igual que ocurre con los fabricantes de las cámaras, puede agravar la caracterización totalmente generalizada de una cámara analógica/digital o un escáner, puesto que, ciertas diferencias en arquitectura/diseño entre estos periféricos ponen de manifiesto aspectos importantísimos muy distintos sobre el tratamiento del color en una imagen digital. Desde nuestro punto de vista, estos aspectos discrepantes son:

- Un escáner es un dispositivo multimedia estático, sin capacidad para registrar o captar una imagen que no se coloque sobre su plano de captación. En esto difiere sobremanera una cámara analógica/digital, totalmente dinámica, adaptable a cualquier ambiente luminoso o de visualización. Una cámara analógica/digital puede ser un instrumento tele-colorimétrico, mientras que un escáner no, tal vez un colorímetro estático.
- La fuente luminosa en un escáner siempre será fija y estará bien caracterizada, mientras que no ocurrirá lo mismo en una cámara analógica/digital, dispuesta y preparada para capturar imágenes ante multitud de ambientes de iluminación, siempre más complejos por la existencia de varias fuentes de iluminación e interreflexiones que en un escáner. Por ejemplo, recordando la dualidad entre caracterización vs. calibración colorimétrica, el fabricante debería proporcionar al usuario un modelo de reproducción del color del escáner que incorpore las propiedades radiantes o colorimétricas de la fuente luminosa del escáner, de forma que, ante una sustitución eventual de la fuente luminosa,

generalmente fluorescente, el usuario pudiera calibrar de nuevo el dispositivo según el modelo de caracterización colorimétrica de que dispone.

- La óptica de captura/registro de la imagen puede ser muy diferente entre ambos dispositivos. En particular, y ligado al aspecto anterior, el nivel de iluminación en un escáner siempre estará limitado, mientras que en una cámara analógica/digital no. El uso inteligente del iris o diafragma de la lente-objetivo o del obturador electrónico de la cámara añade más complejidad a la caracterización colorimétrica de ésta frente a la de un escáner convencional (de sobremesa).
- De igual modo, la formación y registro de la imagen, así como las características de codificación/transmisión de la misma, ofrecen diferencias sustanciales entre ambos periféricos. En un escáner, el fotodetector es generalmente un CCD trilineal, mientras que en una cámara es un mosaico CCD. Además, las tarjetas digitalizadoras (gráficas, o de vídeo) multimedia son radicalmente distintas a las utilizadas en aplicaciones de visión artificial. Las primeras, las comunes en todos los ordenadores personales, están diseñadas para editar vídeo y sonido, por lo que el compromiso entre coste computacional y efectividad se decanta a favor de esta última: imágenes de baja resolución espacial y uso de técnicas de compresión de la imagen que reducen la calidad de la imagen, y, sobretodo, distorsionan la codificación cromática original de la imagen por lo que se pierde el sentido metrológico en estas aplicaciones multimedia. En cambio, lo importante en las otras es que el coste computacional sea el óptimo para resolver eficaz y eficientemente cualquier procesado sobre la imagen, con lo que es posible mantener el sentido metrológico en casi todas las operaciones que sufra la imagen original. Claro está, la diferencia de precios es abismal entre ambas. Más aún, existen estándares internacionales de conexión (*Multimedia Control Interface* - MCI, TWAIN, etc) en las tarjetas multimedia, mientras que en las otras, cada fabricante desarrolla su propia estrategia en las arquitecturas de diseño, por lo que los softwares de aplicación se programan a medida para cada tarjeta digitalizadora, mientras que las primeras son compatibles para softwares tan comunes ya como Photoshop, Corel PhotoPaint, etc.

Aunque la tendencia en este campo es unificar criterios y utilizar los mismos estándares, esta tesis doctoral pretende desarrollar herramientas sobre el control de la reproducción del color totalmente válidas para ambos tipos de tarjetas digitalizadoras o modos de captura/procesado de la imagen (escáner o cámara). Lo ideal sería que los resultados de esta tesis doctoral fueran totalmente aplicables tanto a nivel profesional como a nivel usuario en la tarea de controlar el nivel de reproducción del color de la imagen captada inicialmente por un escáner o un cámara digital de bolsillo.

El sistema digital de captura de imágenes que hemos utilizado como ejemplo para el desarrollo de esta tesis doctoral consta de:

1. Una cámara electrónica CCD-RGB, marca Sony, modelo DXC-930P, año 1993.

Selección de una cámara digital científica

2. Una tarjeta digitalizadora, marca Matrox, modelo MVP-AT 850, año 1988, insertada en un PC compatible tipo Pentium S a 90 Mhz.

Con la tabulación siguiente de las especificaciones técnicas de esta cámara y sus accesorios principales, así como de la tarjeta digitalizadora (Tablas 2.4-7), marcaremos con un asterisco (*) las variables optoelectrónicas del sistema completo que pueden intervenir en la respuesta en color. Nos encontraremos, por tanto, con que las condiciones de contorno de funcionamiento del sistema se caracterizarán verdaderamente en un espacio n-dimensional, un problema bastante complicado de resolver a priori, y mucho más teniendo en cuenta la complejidad de los diagramas de circuitos analógicos y digitales que configuran el control y funcionamiento de una cámara CCD-RGB convencional (Parulski, et al. 1991). Sin embargo, como iremos demostrando en las secciones posteriores, la mayoría de ellas se incluyen en los diseños típicos de una cámara CCD-RGB convencional de acuerdo con la filosofía WYSIWYG (lo que tú ves es lo que consigues), tan útiles en aplicaciones de rango local, no metrológicas, pero que dejan de ser acertadas para resolver la problemática de los Sistemas de Gestión del Color en cuanto a cámaras digitales. Por tanto, lo que haremos a continuación es desbrozar este espacio n-dimensional de contorno para quedarnos con una configuración básica de funcionamiento para el sistema digital de captación, la cual será la adecuada para conseguir el propósito de convertir este dispositivo multimedia en un instrumento tele-colorimétrico.

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas de la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P.

Sensor de imagen (*)	3-CCDs tipo IT HyperHAD de ½ pulgada	Obturador electrónico (*)	Inactivo (1/50 s) / Por pasos / Manual conmutable
Elementos de imagen	752 (H) x 582 (V)	Control de fase	Horizontal (H) / Subportadora (SC)
Área sensible	6.4 mm x 4.8 mm	Control de CCD Iris (*)	Activado / Desactivado conmutable
Sistema de señal	Norma PAL	Balance de blanco (*)	Automático / Manual Ganancia R/B conmutable
Sistema de barrido	625 líneas, entrelazado 2:1	Relación señal-ruido (SNR) (*)	56 dB sin gamma, ni detalle (DTL)
Frecuencia horizontal	15.625 kHz	Control de gamma (*)	Activado / Desactivado Conmutable
Frecuencia vertical	50 Hz	Salida de vídeo (*)	Compuesta VBS, R/G/B, Y/C
Sistema de sincronismo	Interno / Externo, con VBS o BS	Temperatura de trabajo	-5 °C a 45 °C
Resolución horizontal	720 líneas de TV	Temperatura de almacenamiento	-20 °C a 60 °C
Montura de objetivo	Bayoneta Sony de ½ pulgada	Requisitos de alimentación	12 V DC desde CMA-D1CE
Sensibilidad (*)	N5.6 a 2000 lx	Consumo de potencia	aprox. 7.8 W
Iluminación mínima (*)	19 lx con N1.4 y +18 dB	Peso	aprox. 670 g
Control de ganancia (*)	AGC / 0 a 18 dB (conmutable)	Conectores (*)	Vídeo Out, Gen Lock, DC In / Remote, RGB/Sync, Lentes, CCU

Tabla 2.5: Especificaciones técnicas del objetivo fotográfico telecéntrico modelo VCL-712BXEA incorporado en la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P.

Modelo	VCL-712BXEA
Montura	Bayoneta (C-Mount)
Distancia Focal	7.5 ~ 90 mm
Relación de Zoom	12x
Control de Zoom	Manual / Remoto
Control de Enfoque	Manual / Remoto
Control de Diafragma (*)	Manual / Remoto
Máxima relación de apertura N (*)	1:1.4
Mínima distancia al objeto	1.1 m
Macro	Aplicable
Tamaño del filtro	M72x0.75 mm
Peso	1.25 kg
Dimensiones	110 x 184.2 mm (diámetro x longitud)
Notas	control remoto desde la unidad RM-930

Tabla 2.6: Menú de funciones desde la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P y desde la unidad de control remoto RM-930.

ELEMENTOS CONTROLADOS		SELECCIÓN
Balance de negro (BLACK) (*)		Automático
Ganancia de vídeo (GAIN) (*)		Paso a Paso (STEP) / Control Automático Ganancia (AGC)
	Paso a Paso (STEP)	0 dB a + 18 dB (en pasos de 1 dB)
Balance de blanco (WHT.BAL) (*)		Automático (AUTO) / Manual (MANU)
	Automático (AUTO)	Selección de blanco por T_c entre 3200 K o 5600 K (C.TEMP)
	Manual (MANU)	ganancia de R o B entre [-99, ..., 0, ..., +99] dB
CCD Iris (CCD IRIS) (*)		Activo / Inactivo
Obturador (SHUTTER) (*)		Desactivado / Por Pasos (STEP) / Manual (MANU)
	Por Pasos (STEP)	sin parpadeo (1/120 s), 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4000, 1/10000 segundos
	Manual (MANU)	255 a 1 cuadros (modo campo) o de 256 a 2 cuadros (modo cuadro); de 310/625 a 1/1625 unidades de barrido horizontal
Nivel de Pedestal (M.PED) (*)		[-99, ..., 0, ..., +99] dB
Detalle (DTL) (*)		[-99, ..., 0, ..., +99] dB
Fase Horizontal (H.PHASE)		[-99, ..., 0, ..., +99] dB
Fase Subportadora (SC)		SC / 0-180
	SC	[-99, ..., 0, ..., +99] dB
	0/180	0 ó 180
Gamma (compensación de monitor CRT) (GAMMA) (*)		Activo / Inactivo
Sincronismo sobre el canal verde (G.SYNC)		Activo / Inactivo
Modo de integración del CCD (FLD/FRM) (*)		Campo (FLD) / Cuadro (FRM)
Formato de la señal de salida RGB/SYNC (D-SUB) (*)		VBS ó Y/C

Tabla 2.7: Especificaciones técnicas de la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

Sobre tarjeta RAM	FIFO para transferencia a RAM	Parámetros de Conversión A/D (*)	Ganancia y Offset sintonizables conjuntamente para los tres canales
Bus	PCI Bus bits	Ritmo de barrido horizontal	CCIR 14.3 kHz, PAL 14.75 kHz
Transferencia de datos	PCI Bus Master	Píxel cuadrado (*)	Sí (formato de imagen 512 x 512)
Entrada analógica	3 monocromáticas R/G/B simultáneamente y 1 RGB	Jitter	± 6 ns (típico)
Entrada digital	–	Ruido	54 dB (1 LSB)
Entrada digital con sincronización no estándar	–	Operaciones sobre tarjeta	Histograma, Umbralización, Operaciones espaciales (filtros de borde, morfológicas), etc
Salida digital con sincronización no estándar	–	Operaciones sobre pantalla	–
Sincronización	NTSC / PAL / SECAM, RS-170 / CCIR, RGB	Compatibilidad con tarjetas gráficas	VGA
Muestreo de color	YUV 4:2:2 / RGB	Driver disponible	Samba (software gráfico propio)
Conversión A/D	8 bits de forma monocromática, 8:8:8 bits RGB	Compiladores recomendados	DOS, BC, Watcom
Digitalizador C_{A/D}	TDA 8708 & BT 254	Compatibilidad con cámaras	–

2.2.2 Optoelectrónica del dispositivo semiconductor

El elemento fotosensor de esta cámara CCD-RGB se compone de una estructura en formato bidimensional o área de sensores HyperHAD en registro de conversión/lectura de fotoelectrones n_{pe} en voltaje analógico tipo CCD en arquitectura IT.

Los fotosensores están compuestos por detectores cuánticos (Joshi, Olsen 1995; Norton 1995) en modo fotovoltaico de la clase fotodiodo, concretamente fotodiodos de Si, en estructura p^+np (Tredwell 1995) o diodos acumuladores de agujeros (*Hole Accumulated Diode* - HAD) con microlentes adosadas (código Hyper) (Figura 2.13). La elección de fotodiodos de Si es la adecuada sobretudo para captar energía radiante en el espectro visible debido a la forma de su responsividad espectral (Norton 1995, 51), aparte de un rango de linealidad con una desviación por debajo del 5% sobre 10 órdenes de magnitud de irradiancia (de 10^{-13} hasta 10^{-3} W/cm²). Si bien ya en 1964 se diseñaron los primeros detectores cuánticos, capaces de generar una corriente eléctrica mensurable y controlable de fotoelectrones debido al efecto fotoeléctrico en materiales fundamentalmente semiconductores, fue en 1970, con el invento del diseño de registro CCD por Boyle y Smith, cuando se dio un impulso enorme a la investigación y posterior difusión de las Ciencias de la Imagen (*Imaging Science*), puesto que la mayoría de escáneres, videocámaras y cámaras de televisión incorporan actualmente dispositivos de carga acoplada (*Charge-Coupled Device* - CCD). El término registro CCD se refiere al modo de transferir la carga eléctrica de los fotoelectrones generados en los fotodiodos a un amplificador de salida, y, convertir esa carga eléctrica a señal de

voltaje/corriente macroscópica, la cual será aprovechada por circuitos analógicos y digitales externos del sensor. El píxel-imagen (Figura 2.13) está formado por el fotodetector HyperHAD y el elemento CCD vertical adosado y cubierto a la luz incidente, de estructura condensador MOS (metal-óxido-semiconductor), con sistema de drenaje de saturación (*lateral antiblooming*), formando así un área fotosensible de 752x582 píxels de área $8.51 \times 8.25 \mu\text{m}^2$ en $6.4 \times 4.8 \text{ mm}^2$ (formato 1/2 pulgada en jerga de cámaras TV). El código 3-CCDs hace referencia a la captura/separación de la codificación cromática, punto que se tratará en el apartado siguiente.

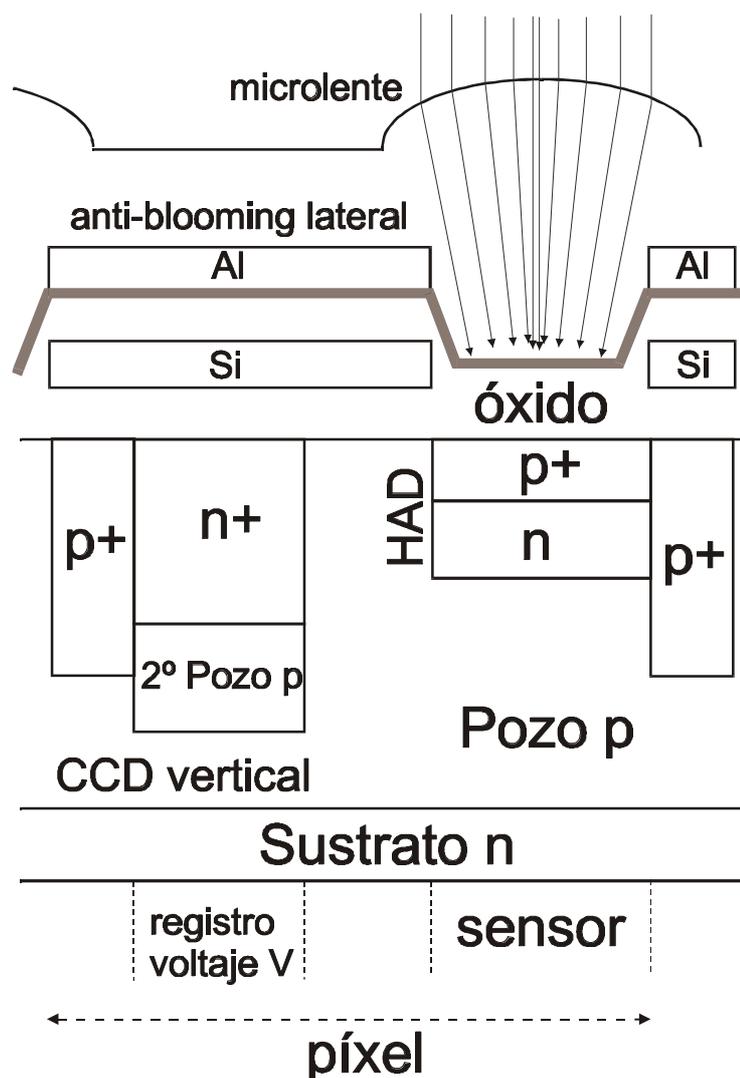


Figura 2.13. Sección transversal microscópica de un píxel-imagen del elemento HyperHAD con registro CCD IT.

La arquitectura de estos elementos sensores es de tipo transferencia entrelazada o interlineal (*Interline Transfer - IT*). Es decir, existe una etapa de registro/lectura de carga eléctrica CCD vertical por cada dos fotodiodos (Figura 2.14), porque la conversión y registro total se efectúa a través de campos de líneas pares e impares sin áreas de almacenamiento a un ritmo secuencial de 1/50 s de acuerdo con el formato de señal de vídeo PAL (Hunt 1995, 514). No obstante, se está advirtiendo últimamente que la señal

entrelazada de vídeo que da la arquitectura IT no es la deseable para Fotografía Digital y otras aplicaciones multimedia, ni para aplicaciones científicas de Imaging Science (Holst 1998, 68; Tredwell 1995, 32), por lo que se está extendiendo el uso de la arquitectura de barrido progresivo (*progressive scan*) IT. Si bien, en la fabricación de un CCD se efectúan aproximadamente 150 operaciones diferentes, y aunque, esta última arquitectura todavía es más difícil de fabricar, parece ser que por sus altas prestaciones en calidad de imagen, la arquitectura *progressive scan* IT CCD será el formato estándar para sistemas de televisión digital de alta definición (HDTV) y para sistemas multimedia en un futuro no muy lejano.

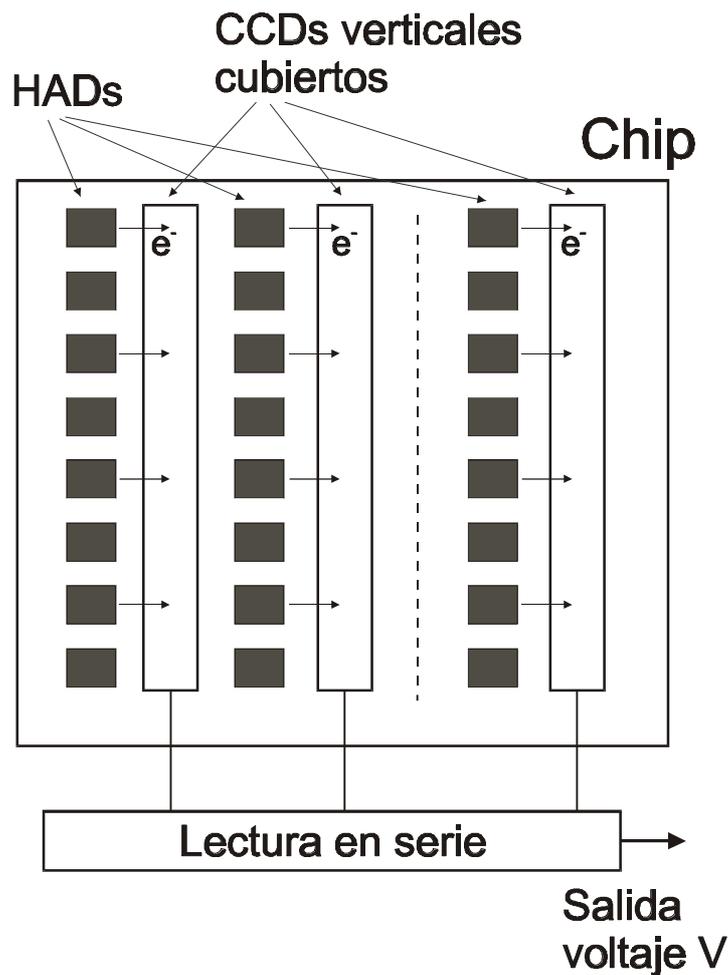


Figura 2.14. Esquema del funcionamiento de la arquitectura CCD en modo interlínea.

Otra posible opción en el dispositivo semiconductor que no posee esta cámara es la opción CMOS, o registro de lectura tipo CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) (Chapinal 2001; Holst 1998, 91; Tredwell 1995, 21). Los elementos fotosensores de cada píxel se conectan individualmente a una línea de lectura mediante una puerta de transferencia. Cada píxel a lo largo de la línea está controlado separadamente mediante un circuito de control de su dirección (fila-columna en el mosaico imagen). Cuando un píxel determinado transmite, la puerta de transferencia se abre y la carga eléctrica pasa del píxel a la línea de lectura. Un amplificador al final de la línea de lectura nota el cambio de voltaje o

corriente eléctrica resultante de la transferencia de carga, de forma que puede recargarse al voltaje original para recibir la transferencia de carga de otro píxel. Esto es muy diferente respecto al CCD. En la lectura tipo CCD, la carga de todos los píxeles se transfiere simultáneamente al colector, no de forma individual. Comparando las prestaciones de las cámaras CCD respecto a las cámaras CMOS (Hindus 2001) podemos destacar que las primeras se caracterizan por su alta sensibilidad y bajo ruido debido a su baja capacitancia eléctrica, pero están limitadas para manejar grandes cantidades de carga eléctrica o fotoelectrones generados, mientras que los sensores CMOS no. El enorme potencial de las cámaras CMOS estriba en que es posible diseñar cámaras mucho más pequeñas que las actuales CCD e incorporando un control optoelectrónico efectivo sobre cada píxel del mosaico sensor (*Active Pixel Sensor - APS, camera-on-a-chip*), aparte de su bajo consumo eléctrico, por lo que pueden llegar a ser grandes competidores de los CCDs para las cámaras digitales (Hurwitz, et al. 1997).

Un esquema global de funcionamiento o de transferencia optoelectrónica de una cámara CCD cualquiera puede aproximarse en el dominio de linealidad de la forma siguiente (Holst 1998, 111-119; Janesick, Klaasen, Elliott 1987; Stark, et al. 1992; Wyszzecki, Stiles 1982, 4). La exposición cuántica o tasa de fotones incidentes n_v , como n° de fotones incidentes·sr⁻¹·nm⁻¹, sobre el plano focal fotosensor CCD es

Ecuación 2.11

$$n_v(\lambda) = \frac{\pi \lambda}{4 hc} \frac{L_e(\lambda) \cdot A_{\text{SENSOR}} \cdot t}{N^2 (1 + m_{\text{OBJETIVO}})^2} \tau_{\text{OBJETIVO}}(\lambda) \cdot T_{\text{ATM}}(\lambda) \cdot \cos^4 \theta$$

donde h y c son constantes físicas fundamentales, L_e la radiancia espectral en W/sr·m², A_{SENSOR} el área efectivamente irradiada del plano focal fotosensor, t el tiempo de exposición o de integración optoelectrónica, N la apertura relativa (*f-number*) del diafragma de apertura del objetivo fotográfico, m_{OBJETIVO} el aumento lateral del objetivo fotográfico, τ_{OBJETIVO} la transmitancia espectral del objetivo fotográfico o sistema óptico de entrada, T_{ATM} la transmitancia espectral de la atmósfera y θ la posición angular del objeto-escena respecto el eje óptico del sistema óptico de entrada u objetivo fotográfico.

En ese intervalo de exposición t , se produce la conversión fotoeléctrica y la serie de lecturas/conversiones de cargas eléctricas recolectadas a un voltaje analógico, el cual será el correspondiente pseudo-valor triestímulo bruto dado por el mosaico-sensor CCD (Figura 2.15).

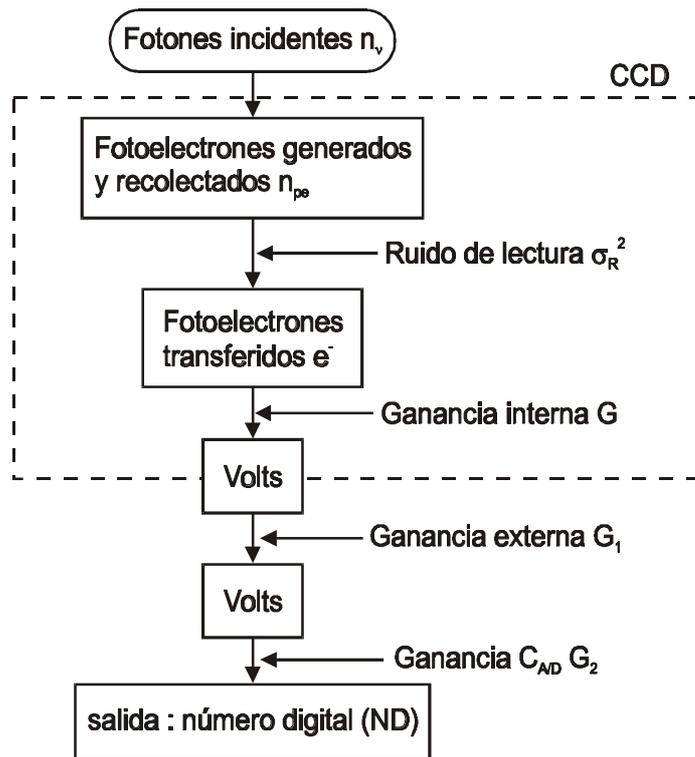


Figura 2.15: Funcionamiento optoelectrónico global de una cámara CCD ideal.

Ecuación 2.12

$$\begin{aligned} \text{pseudo - valor triestímulo} &\equiv V_{SALIDA} = G_1 \cdot G \cdot n_{pe} \\ \Rightarrow \text{nivel de gris (número digital)} &ND = \text{int}[G_2 \cdot V_{SALIDA}] \end{aligned}$$

donde G_2 es la ganancia del conversor analógico-digital C_{AD} de la tarjeta digitalizadora ADC, G_1 es la ganancia (automática AGC o manual) del circuito electrónico exterior al mosaico-chip-sensor CCD, G la ganancia interna del CCD del circuito electrónico de lectura/conversión interna y n_{pe} el número de fotodectrones generados durante el proceso de exposición a la energía radiante incidente. Los valores típicos de la ganancia interna G del mosaico CCD son de $0.1 \mu\text{V}/e^-$ hasta $10 \mu\text{V}/e^-$, de ahí la justificación de utilizar un circuito electrónico exterior de amplificación de la señal de voltaje a valores macroscópicos, bastante más aprovechables para la entrada a otros circuitos analógicos y digitales, como la salida a la tarjeta digitalizadora ADC o la salida de vídeo-monitor con codificación cromática PAL o NTSC.

Por otro lado, y recordando lo explicado en el apartado anterior sobre fotodetección ideal, tenemos también que se debe verificar el principio de univariancia, de forma que los fotodectrones generados n_{pe} pueden expresarse también como

Ecuación 2.13

$$n_{pe} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_v(\lambda) QE(\lambda) d\lambda \cong \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_v(\lambda) QE(\lambda) \Delta\lambda$$

donde $QE(\lambda)$ es la eficiencia cuántica del fotodetector CCD, la cual indica la conversión de fotones incidentes a fotoelectrones, o versión cuántica de la sensibilidad espectral del mosaico-sensor CCD en el intervalo espectral $[\lambda_1, \lambda_2]$ nm.

Si tenemos en cuenta conjuntamente las ecuaciones anteriores, podemos encontrar una expresión válida y más práctica en términos macroscópicos de la eficiencia cuántica QE . Para ello, debemos en primer lugar, convertir la variable cuántica n_n en su equivalente macroscópico exposición espectral $H(\lambda)$, cuya unidad métrica es el joule (J):

Ecuación 2.14

$$H(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} n_v(\lambda)$$

Así, y de forma paralela, la conversión optoelectrónica que tiene lugar en una cámara digital puede entenderse expresando la exposición espectral $H(\lambda)$ como directamente proporcional a la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ del objeto-escena y el tiempo de exposición t , e inversamente proporcional al cuadrado de la apertura relativa N . De acuerdo con la ecuación 2.11 y teniendo en cuenta que la transmitancia espectral de la atmósfera T_{ATM} en el rango visible es la unidad, que podemos considerar para la mayoría de las lentes fotográficas la transmitancia espectral $\tau_{OBJETIVO}$ constante e independiente de la longitud de onda en el rango visible con un valor cercano también a la unidad y considerando incidencia normal ($\cos \theta = 1$) la expresión anterior quedaría de forma más efectiva como:

Ecuación 2.15

$$H(\lambda) = \alpha \frac{L_e(\lambda)}{N^2} t \quad , \quad \text{siendo} \quad \alpha = \frac{\pi}{4} \frac{A_{SENSOR}}{(1 + m_{OBJETIVO})^2} \tau_{OBJETIVO} \cdot T_{ATM}$$

Si paralelamente, consideramos también todo el proceso electrónico descrito por la inversa del producto $G_2 \cdot G_1 \cdot G$ como un proceso de transferencia optoelectrónica K , número de fotoelectrones n_{pe} por numero digital ND , y que resulta más conveniente trabajar con números o niveles digitales relativos NDR , para ampliar este esquema a cualquier nivel de digitalización o profundidad de respuesta digital ($2^{bits} - 1$), resulta que la eficiencia cuántica QE queda expresada como:

Ecuación 2.16

para una longitud de onda λ determinada,

$$ND_{\lambda} = (2^{bits} - 1)NDR_{\lambda} \quad , \quad NDR_{\lambda} \in [0, 1]$$

$$ND_{\lambda} = G_2 \cdot G_1 \cdot G_{\lambda} \cdot n_{pe\lambda} = \frac{1}{K_{\lambda}} QE_{\lambda} \cdot n_{v\lambda} = \frac{1}{K_{\lambda}} QE_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} H_{\lambda} \quad , \quad \left[K_{\lambda} \equiv \frac{e^{-}}{ND} \right]$$

$$\Rightarrow \text{definiendo } r_{\lambda} = \frac{NDR_{\lambda}}{H_{\lambda}} \text{ responsividad espectral } [J^{-1}]$$

$$\Rightarrow QE_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} (2^{bits} - 1) K_{\lambda} \cdot r_{\lambda} \quad \left[\frac{e^{-}}{\text{fotones}} \right]$$

Esta expresión resultará clave para la resolución posterior de esta tesis doctoral, pero como preámbulo de la potencialidad de la misma comentamos ahora dos aspectos importantes. En primer lugar, como si estuviéramos todavía considerando la fotodetección ideal, con $QE_{\lambda} = 1$ y $K_{\lambda} = \text{cte } \forall \lambda$, resulta que para conseguir la misma responsividad espectral r_{λ} para todo el rango espectral sensible, es necesario aumentar proporcionalmente el número de fotones incidentes para cada longitud de onda λ . Esto debe asimilarse como que el espectro equienergético \mathbf{E} , expresado vectorialmente como $[1, 1, \dots, 1]^t$ W/m (densidad espectral de potencia radiante) en función de la longitud de onda λ , está representando una tasa de fotones no lineal con la longitud de onda: para que una exposición específica de fotones λ_1 provoque la misma respuesta digital sobre una cámara digital que otra exposición específica de fotones λ_2 ($> \lambda_1$), pero energéticamente equivalentes $E_{\lambda_2} = E_{\lambda_1}$ (Wyszecki, Stiles 1982, 4), la tasa de fotones λ_2 ha de ser superior a la de los fotones λ_1 , concretamente $n_{m2} = (\lambda_2 / \lambda_1)^3 \cdot n_{m1}$.

Por tanto, y como segundo aspecto, esto significa que lo que se configurará de forma externa como estímulo equi-energético \mathbf{E} será la radiancia espectral $L_{e\lambda}$ de un test-objeto monocromático junto con una configuración interna de la apertura relativa N del objetivo fotográfico y el tiempo de exposición t del obturador electrónico de la cámara digital. Es decir, que la exposición espectral H_{λ} puede variarse de tres formas diferentes: según la luminosidad del test-objeto, el diámetro del diafragma de apertura del objetivo fotográfico y/o el tiempo de exposición o integración optoelectrónica. Otro aspecto subsidiario de esto es si todas las combinaciones posibles de $(L_{e\lambda}, N, t)$ para tener la misma exposición espectral H_{λ} , provocarán la misma respuesta digital ND_{λ} . Es lo que se conoce como *ley de la reciprocidad*, resultando que no se verifica completamente en Fotografía Fotoquímica o clásica (Dainty, Shaw 1974, 47; Hamilton 1977; Hunt 1995, 282; Proudfoot 1997; Tani 1995), pero que poco se sabe hasta qué punto se verifica o no en Fotografía Digital.

2.2.3 Captura, digitalización, codificación y transmisión del color

Hasta este momento, tras lo explicado en este apartado, se han hecho escasas referencias específicas a los factores sistemáticos que condicionan la respuesta cromática del sistema digital de captura de esta tesis doctoral, el compuesto por la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P más la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850. Lo que hemos analizado en la sección anterior han sido aspectos optoelectrónicos sobre el proceso general radiométrico-optoelectrónico bruto de formación de la imagen en el mosaico-sensor CCD. Por tanto, en esta sección, veremos aspectos más específicos ligados a los procesos posteriores a la formación optoelectrónica bruta de la imagen. Estos aspectos los dividiremos en:

- Arquitecturas de color, para hacer referencia a los aspectos óptico-espectrales de separación espectral de la luz en los tres canales RGB;
- Digitalización: para explicar qué procesos algorítmicos básicos se ejecutan en una tarjeta digitalizadora, sobre todo aquellos que condicionan la codificación cromática final de la imagen;
- Ruido de la imagen: haciendo referencia a los tipos de ruidos o incertidumbres sistemáticas que se arrastran siempre en la formación optoelectrónica real de la imagen;
- Parámetros condicionantes finales en la codificación y transmisión del color: para hacer referencia a los parámetros libres de configuración en el menú de funciones de la cámara Sony DXC-930P que influyen en la codificación cromática final de la imagen.

2.2.3.1 Arquitecturas de color

La cámara Sony DXC-930P presenta una estructura de 3 CCDs, o sea, un sistema de prismas dicróicos separa el flujo radiante incidente en tres haces de banda espectral diferente, los cuales llegan a tres áreas-mosaico CCD (Fig. 2.16), procesándose de esta forma la información cromática en tres canales de color RGB totalmente independientes.

Este diseño proviene del ya usado en las cámaras de televisión con tres tubos Vidicón o Plumbicón, con la mejora sustancial de un espacio ocupado más reducido, el cual proporciona un peso más ligero, aparte de un comportamiento en respuesta más eficiente, pero en el que es necesario controlar los efectos perjudiciales de las aberraciones cromáticas (Oshima 1988) por lo que los objetivos fotográficos acoplables a las cámaras 3-CCD deben ser diseñados ópticamente a conciencia. Si consideramos el nivel macroscópico de la sensibilidad espectral del CCD en el dominio de linealidad, $s_{CCD}(\lambda)$, claramente derivable de la eficiencia cuántica espectral QE y del factor de conversión optoelectrónica K , tenemos que el conjunto de sensibilidades espectrales $s_R(\lambda)$, $s_G(\lambda)$, $s_B(\lambda)$ de este sistema es:

Ecuación 2.17

$$\text{si } s_{CCD}(\lambda) \propto \frac{QE_{\lambda}}{K_{\lambda}} \quad \text{sensibilidad espectral del CCD}$$

$$s_R(\lambda) = \tau_{\text{OBJETIVO}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) \tau_1(\lambda) [1 - \tau_2(\lambda)] \tau_R(\lambda) s_{CCD}(\lambda)$$

$$s_G(\lambda) = \tau_{\text{OBJETIVO}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \tau_G(\lambda) s_{CCD}(\lambda)$$

$$s_B(\lambda) = \tau_{\text{OBJETIVO}}(\lambda) \tau_{\text{IR}}(\lambda) [1 - \tau_1(\lambda)] \tau_B(\lambda) s_{CCD}(\lambda)$$

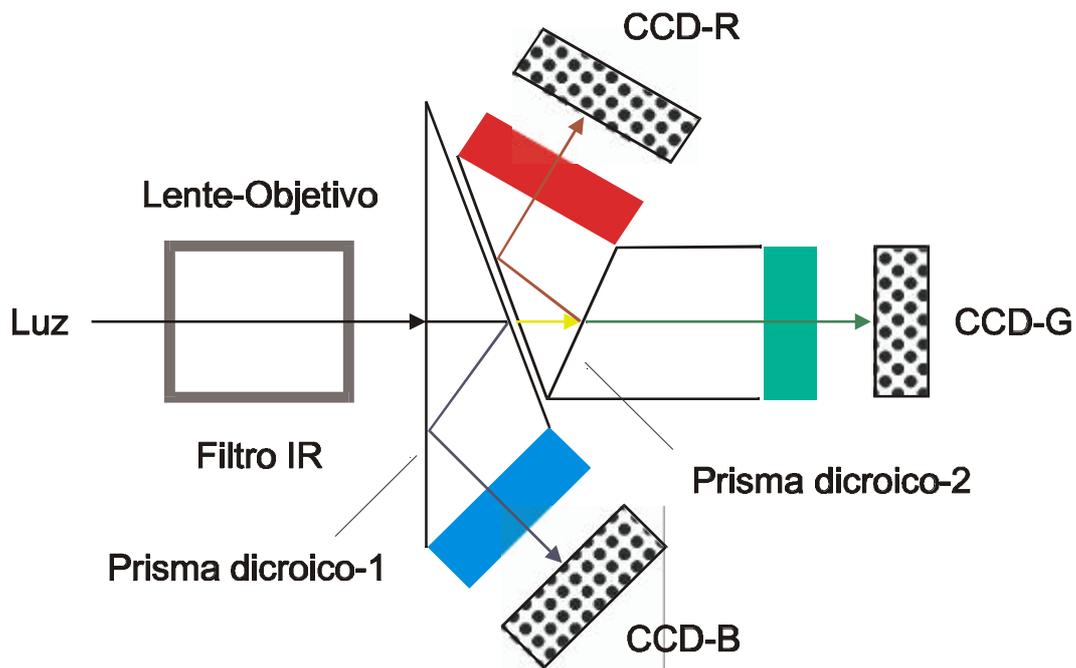


Figura 2.16: Esquema del diseño óptico de un bloque de prismas para 3-CCDs.

Aunque esta forma de indicar el conjunto de sensibilidades espectrales parece muy elegante, debe tenerse muy en cuenta los aspectos direccionales y espectrales de los filtros dicróicos $\tau_1(\lambda)$, $\tau_2(\lambda)$ y de color $\tau_R(\lambda)$, $\tau_G(\lambda)$, $\tau_B(\lambda)$ utilizados (Wyszecki, Stiles 1982, 49) porque no siempre son fáciles de controlar. Además, lo que no parece que tenga sentido es desmontar el bloque 3-CCD para medir de forma espectrofotométrica estos filtros de color, y, después volver a montar el bloque como si nada, puesto que quedaría por analizar la influencia de los parámetros optoelectrónicos de la cámara y la tarjeta digitalizadora. Por tanto, la forma final de $s_R(\lambda)$, $s_G(\lambda)$ y $s_B(\lambda)$, como pseudo-funciones de igualación, será fruto de todas estas variables por lo que se requerirá un método experimental de obtención de las mismas, sin invadir el funcionamiento interno del sistema digital de captura.

Si bien ésta parece ser la arquitectura de separación del color más común, la cual está alcanzando una mayor difusión por sus altas prestaciones en conseguir imágenes de gran resolución (Lemstrom, Reini

1996; Martínez-Uriegas 1997) y fiabilidad en entornos diferentes de trabajo, no debemos descartar la funcionalidad en la separación del color de otros métodos (Lake 1996; Lemstrom, Reini 1996; Tredwell 1995): filtros estáticos (*static filter*) y tiras de filtros microscópicos sobre los píxeles del mosaico CCD (*stripe filter*) (Fig. 2.17). El diseño *static filter* se basa en utilizar una cámara CCD B/N (en blanco y negro) con el adosamiento de una rueda sincronizada de tres filtros de colores, uno rojo (R), uno verde (G) y uno azul (B). Sin embargo, tal diseño no es el adecuado para captar imágenes en movimiento. El diseño *stripe filter* abarca multitud de diseños pictóricos (en RGB, CMY, GCMY, etc) del mosaico CCD, desde líneas verticales RGB hasta estructuras geométricas en mosaico –estructura Bayer (Dillon, Lewis, Kaspar 1978), 3G/R/B, etc–, pero que sufre defectos por una diversidad no coordinada de algoritmos electrónicos de reconstrucción cuasi-perfecta del código completo RGB para cada píxel, y de aliasing en bordes luminosos de alto contenido espacio-frecuencial (Kuno, et al. 1999).

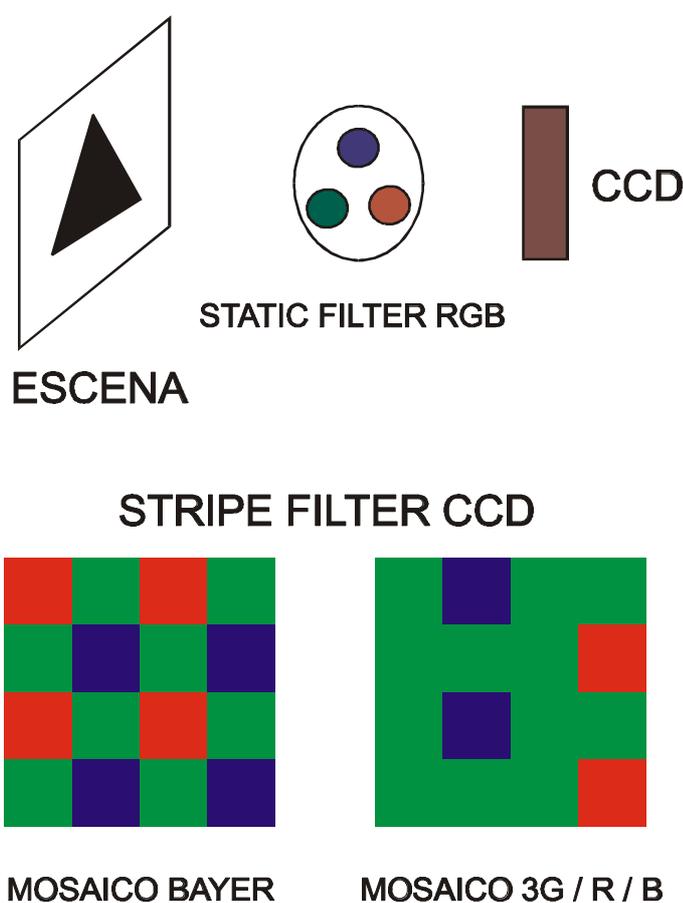


Figura 2.17: Otros tipos de separación/codificación del color en una cámara CCD-RGB: *static filter* RGB y *stripe filter* (Bayer, 3G/R/B).

Sin duda, el diseño *static filter* es el más sencillo de controlar colorimétricamente porque el número de variables espectrales se reducen a cinco: $\tau_{B/N} = \tau_{OBJ} \tau_{IR}$, s_{CCD} , τ_R , τ_G y τ_B . A no ser que se desee efectuar medidas de color en objetos en movimiento, una cámara CCD-RGB con diseño *static filter* convertida eficientemente en colorímetro es suficiente para la mayoría de las situaciones. Si no fuera el caso, siempre es preferible elegir entre el diseño 3-CCD *prisma block* que el *stripe filter*: las diferencias son evidentes,

tanto en ajuste opto-mecánico como en fabricación óptica, y también las consecuencias en salida colorimétrica.

2.2.3.2 Digitalización

La información de salida de una cámara es eminentemente electrónica, de carácter analógico, en voltaje o en intensidad, por las características fotoeléctricas de los sensores. Y, así se ha usado durante mucho tiempo en las cámaras con tubos Vidicón o Plumbicón, pero con el descubrimiento de las ventajas de la codificación digital de la imagen y el invento del sensor CCD (Boyle, Smith 1970), la mayoría de las cámaras actuales incorporan interna o externamente el conversor analógico-digital C_{AD} para la mayoría de sistemas de tratamiento/control de la imagen digital, puesto que éste es imprescindible si existe una conexión directa posterior con un ordenador convencional. El principio de la digitalización sería el siguiente (Fig. 2.18):

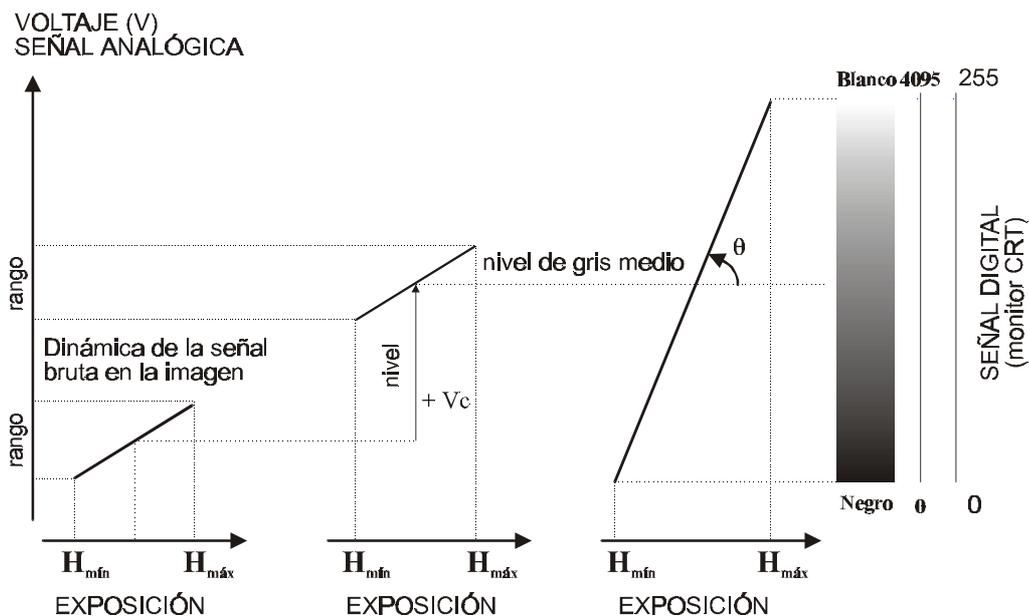


Figura 2.18: Esquema del proceso de digitalización ($offset = V_c$, $gain = q$) en niveles de gris (a 12 bits o a 8 bits para una tarjeta gráfica de monitor CRT de una imagen inicialmente captada en formato analógico (voltaje)).

- El rango dinámico de la respuesta bruta de la imagen-escena vendrá dado por los valores mínimo y máximo de exposiciones que recibe el sensor, lo cual corresponderá con los voltajes mínimo y máximo brutos, respectivamente.
- Configuración del *offset* (brillo): suma de la componente continua V_c para adaptar el nivel de gris (digital) medio seleccionado a voluntad, como por ejemplo para la visualización de la imagen en un monitor CRT a través de una tarjeta gráfica SVGA de 8 bits por canal RGB.

- Configuración del *gain* (contraste): amplificación G_2 ($\equiv \theta$) de la señal para adaptarse a la dinámica o rango de niveles de salida digital/analógica seleccionada, como por ejemplo para la visualización de la imagen en un monitor CRT a través de una tarjeta gráfica SVGA de 8 bits por canal RGB.

No obstante, este esquema está bastante simplificado, puesto que el conversor $C_{A/D}$ forma parte de la estructura más compleja de un registrador de la imagen (*frame grabber*, tarjeta digitalizadora) en que interviene también la codificación eficiente de la información espacial (Holst 1998, 327; Lake 1996). Y, todo combinado, no parece que la interpretación sea fácilmente asumible como un proceso completamente lineal (Holst 1998, 174). Es lo que Holst sugiere con los conceptos de *no-linealidad diferencial* (*differential nonlinearity* - DNL) y *no-linealidad integral* (*integral nonlinearity* - INL) como parámetros de calidad sobre el comportamiento supuestamente lineal de un conversor analógico-digital (Fig. 2.19). La no-linealidad diferencial (DNL) se utiliza para cuantificar los códigos enteros perdidos o desplazados en la función escalonada simétrica que ha de ser $E[x]$: dos códigos adyacentes deben estar separados por 1 LSB (bit significativo más pequeño). La no-linealidad integral (INL) es la desviación entre pendientes de las líneas rectas (funciones de transferencia) real e ideal, de forma que INL debería ser buena para aplicaciones radiométricas.

De forma paralela, referente a la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850, las variables de control del rango dinámico de salida digital en color son el offset y el gain, ambos configurados en escalas discretas locales de valor 0 hasta 255, siguiendo según las especificaciones técnicas del fabricante los algoritmos siguientes:

Ecuación 2.18

$$V_{SALIDA} = G_1 \cdot G \cdot n_{pe} \Rightarrow [V_{min}, V_{max}] \text{ rango dinámico analógico con } V_m = \frac{V_{min} + V_{max}}{2} = 0$$

- si $offset = 0 \Rightarrow V'_{min} = V_{min} + 0.2$
 - si $gain = 0 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83$
 - si $gain = 127 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 + 0.2$
 - si $gain = 255 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 + 0.4$

- si $offset = 127 \Rightarrow V'_{min} = V_{min}$
 - si $gain = 0 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 - 0.2$
 - si $gain = 127 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83$
 - si $gain = 255 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 + 0.2$

- si $offset = 255 \Rightarrow V'_{min} = V_{min} - 0.2$
 - si $gain = 0 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 - 0.4$
 - si $gain = 127 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 - 0.2$
 - si $gain = 255 \Rightarrow V'_{max} = V_{max} + 0.83 - 0.4$

Ecuación 2.19

$$V'_{min} = V_{min} + \left(-\frac{0.4}{255} offset + 0.2 \right)$$

$$V'_{max} = V_{max} + \left(-\frac{0.4}{255} offset + 0.2 \right) + \left(\frac{0.4}{255} gain - 0.2 \right) + 0.83$$

$$\Rightarrow \text{digitalización: } ND = E \left[\frac{255 (V_{SALIDA} - V'_{min})}{V'_{max} - V'_{min}} \right]$$

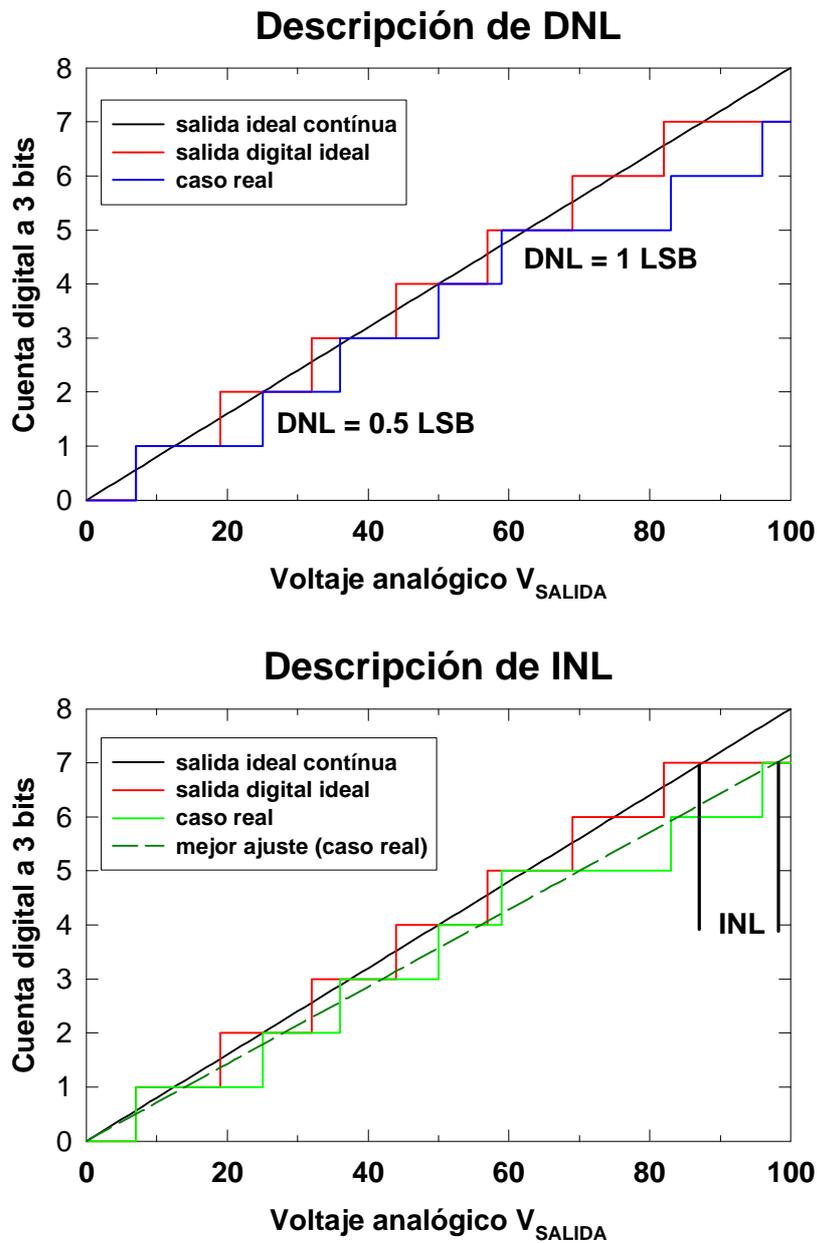


Figura 2.19: Digitalización: interpretación de los parámetros de no-linealidad DNL e INL.

Por tanto, la menor influencia de los parámetros offset y gain de la digitalización sobre el voltaje bruto de salida de la cámara es configurando ambos a 127.5 (valor entero 127 según el software SAMBA). Con esto, nos aseguramos las mínimas perturbaciones de tipo DNL o INL sobre la respuesta cromática bruta de la cámara CCD-RGB, con lo que el espacio de color RGB dependiente de la cámara permanece inalterado, con sus propias características de reproducción del color.

Sin embargo, la variación indiscriminada del gain y offset (Corbalán 1997) pone de manifiesto las no-linealidades que provoca el sistema $C_{A/D}$ para la salida considerada valor pseudo-triestímulo ND de la cámara CCD-RGB. Si bien, dicha manipulación puede ser conveniente desde el punto de vista del procesamiento digital de la imagen, no lo será desde el punto de vista colorimétrico. En primer lugar, tal variación indiscriminada de ambos parámetros de la digitalización configuraría tantos espacios RGB dependientes de cada combinación offset-gain, con lo que la gama original o bruta de colores reproducibles quedaría gravemente alterada, con efectos altamente metaméricos: una configuración offset-gain puede codificar diferencialmente dos estímulos color, pero se podría encontrar una nueva combinación offset-gain que no los discriminara, y viceversa. Con este comentario nos referimos que, con tal variación indiscriminada de los parámetros de la digitalización parece que un estímulo color determinado, con una codificación fija CIE-XYZ, resulta tener tantas codificaciones CIE- $L^*a^*b^*$ diferentes como combinaciones offset-gain, lo cual es una incongruencia desde el punto de vista colorimétrico. Es decir, tal finalidad de variar los parámetros de la digitalización tendría sentido si, para cada combinación offset-gain, se pudiera invertir el proceso de codificación cromática RGB para obtener la misma especificación triestímulo real CIE-XYZ. Por tanto, eso equivaldría a trabajar simultáneamente con n -caracterizaciones colorimétricas, en ambos sentidos de ejecución, para tantas n -combinaciones offset-gain, lo cual resulta evidentemente una tarea inabordable. Así pues, con este ejemplo no colorimétrico, acentuamos que la finalidad de esta tesis doctoral es, seleccionar unas condiciones bien delimitadas de contorno sobre el funcionamiento del sistema cámara CCD-RGB más digitalizador para desarrollar un método de caracterización espectral y colorimétrica sobre sus cualidades brutas de reproducción del color, y de esta manera transformarlo en un instrumento de medida del color, más o menos eficaz y eficiente desde el punto de vista de la incertidumbre sistemática y aleatoria de la medida, respectivamente.

2.2.3.3 Ruido de la imagen

Al considerar dispositivos fotosensores reales, el ruido aleatorio planteado en la fotodetección ideal estará presente junto con otros de naturaleza sistemática, debido a las características optoelectrónicas de la fotodetección en un CCD o en un CMOS. Por tanto, independientemente de la exactitud que consigamos con la conversión de la cámara CCD-RGB caracterizada colorimétricamente en un tele-colorímetro absoluto, el grado de precisión de esta medida vendrá condicionada por el funcionamiento intrínseco de tipo optoelectrónico de todo el sistema, incluida la tarjeta digitalizadora. Esto significa que, si cabe la posibilidad de aumentar la precisión de la medida colorimétrica, que no su exactitud, ésta se conseguirá averiguando de qué forma se pueden minimizar algunas fuentes sistemáticas de error optoelectrónico. Aunque parece contradictorio el uso que hacemos de la precisión y la exactitud de la medida a partir del

nivel de gris o nivel digital del sistema, creemos que son cosas bastante diferentes desde el punto de vista colorimétrico. Si nos atenemos a lo explicado en el primer capítulo, con exactitud nos referimos al grado de cercanía del valor medido hacia el valor verdadero, de la especificación pseudo-triestímulo CIE-1931 XYZ, obtenida a partir de la caracterización espectrocolorimétrica y la optimización del diseño del perfil colorimétrico del sistema cámara CCD-RGB + digitalizador, con respecto a la especificación triestímulo CIE-1931 XYZ según el tele-espectrocolorímetro Photo Research PR-650, u otro similar. Al usar el término precisión, nos referimos a la dispersión estadística de los valores medidos, de su repetibilidad a corto y largo plazo, la cual, puede estar condicionada por fuentes de errores aleatorios y sistemáticos del dispositivo de medida; es decir, por el funcionamiento optoelectrónico intrínseco del sistema compuesto por la cámara CCD-RGB + digitalizador.

A diferencia del esquema sobre la creación del nivel digital de una imagen (Fig. 2.15), el diagrama sobre el proceso optoelectrónico de formación del ruido en la imagen es bastante diferente (Fig. 2.20). Aunque ambos sistemas optoelectrónicos, el de la señal y el del ruido, tienen funciones diferentes de transferencia diferentes, deben considerarse conjuntamente con la finalidad de maximizar el valor SNR , es decir, minimizar el coeficiente de variación v de una medida (m, s_m) , tal como se aplica en términos estadísticos. Según este esquema sobre el ruido, tenemos varias fuentes de error (Holst 1998, 123-145), entre las que destacan:

- *Ruido de disparo* σ_{PSN}^2 (*Photon Shot Noise* - PSN), el cual incluye la estadística de Poisson para los fotoelectrones generados idealmente n_{pe} y para la corriente oscura o de fondo, aquella respuesta digital que surge espontáneamente sin presencia de luz incidente en el plano focal fotosensor, y que es altamente dependiente de la temperatura del entorno (Holst 1998, 79-83; Janesick 2001). Así pues, intercambiando el símbolo de incertidumbre σ por número de fotoelectrones n , tenemos que:

Ecuación 2.20

$$\sigma_{PSN}^2 \equiv n_{PSN}^2 = n_{pe}^2 + n_{OSCURA}^2 = n_{pe} + n_{OSCURA}$$

- *Ruido de patrón* $\sigma_{PATRÓN}^2$, compuesto por el ruido de patrón fijo (*Fixed Pattern Noise* - FPN) y el ruido causado por la no-uniformidad espacial de la respuesta (*Photo-Response Non-Uniformity* - PRNU). El primero se refiere a las variaciones inter-píxel que tienen lugar en plena oscuridad, por lo que se deben principalmente a diferencias de corriente oscura, por lo que promediando varias imágenes de la misma escena se minimiza considerablemente. El segundo se utiliza para describir la dispersión espacial en la respuesta cuando se expone de forma uniforme en todo el área del fotodetector, como consecuencia de las diferencias individuales en responsividad de los píxels (píxels trampa, píxels muertos, etc). Sin embargo, aunque ambos errores son conceptualmente diferentes, se suelen asociar conjuntamente como el ruido típico de la escena, o simplemente, ruido de patrón como una fracción U del número total de fotoelectrones:

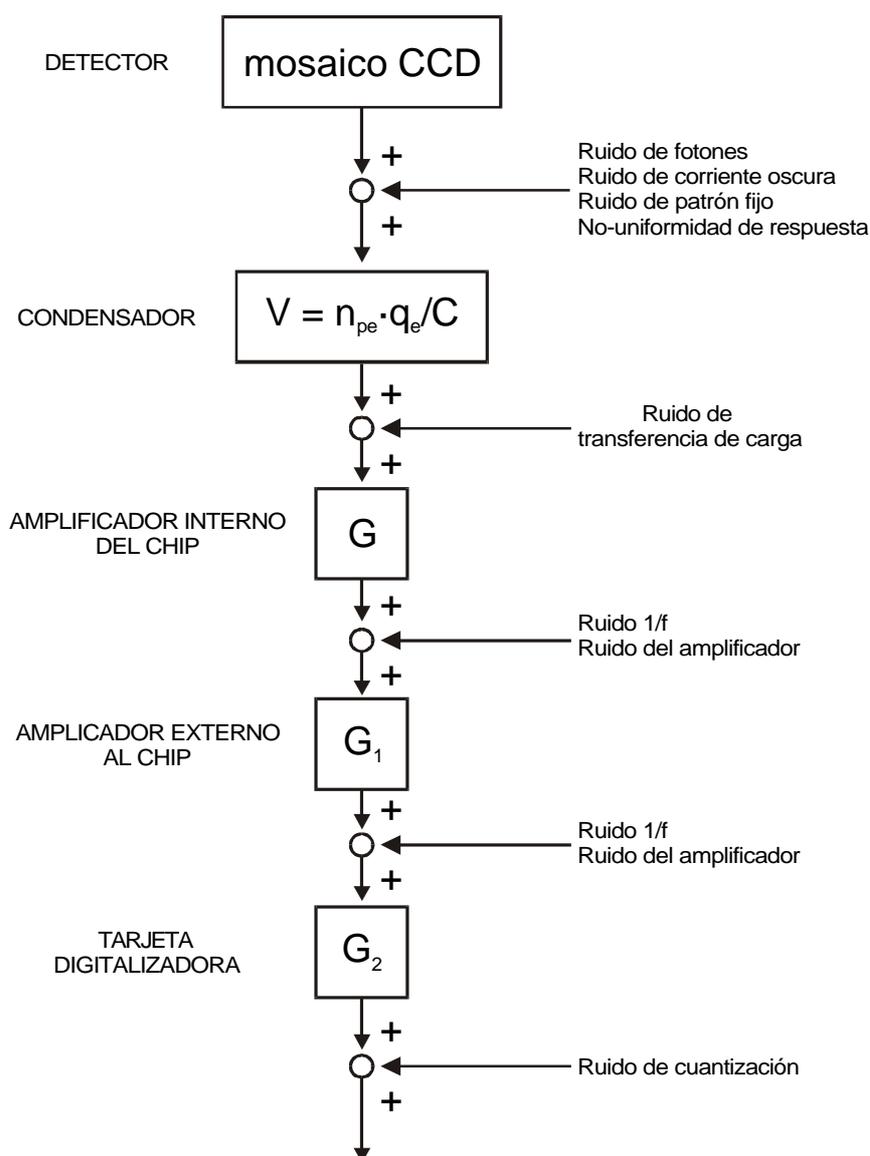


Figura 2.20: Esquema del proceso optoelectrónico ideal sobre la formación del ruido en una imagen digital.

Ecuación 2.21

$$\sigma_{PATRÓN} \approx \sigma_{PATRÓN} = U n_{pe}$$

- *Ruido base* σ_{BASE}^2 , compuesto por procesos electrónicos como la transferencia de carga que realiza el condensador con capacidad C y las amplificaciones de los circuitos interno (G) y externo (G_1). Todos ellos pueden reducirse considerablemente si la cámara CCD-RGB incorpora un circuito electrónico de muestreo doble correlacionado (*Correlated Double Sampling - CDS*) entre las señales de recarga (*reset*) del condensador del CCD y la señal de vídeo que se genera como salida analógica.

- *Ruido de cuantización* σ_{ADC}^2 de la tarjeta digitalizadora, el cual se expresa mediante la capacidad máxima de fotoelectrones generados o capacidad de pozo lleno N_{pozo} y la profundidad de bits de la digitalización:

Ecuación 2.22

$$\sigma_{ADC} = \frac{N_{pozo}}{2^{bits} \sqrt{12}}$$

Así, de este modo, tenemos que el ruido optoelectrónico total del sistema $\mathbf{s}_{SISTEMA} \equiv n_{SISTEMA}$, puede aproximarse con bastantes garantías para la mayoría de los casos como:

Ecuación 2.23

$$n_{SISTEMA} \approx \sqrt{n_{pe} + n_{OSCURA} + (n_{BASE})^2 + (U n_{pe})^2 + (n_{ADC})^2}$$

Con lo que, en términos generales, la relación señal-ruido *SNR*, quedaría como:

Ecuación 2.24

$$SNR = \frac{n_{pe}}{\sqrt{n_{pe} + n_{OSCURA} + (n_{BASE})^2 + (U n_{pe})^2 + (n_{ADC})^2}}$$

Ahora bien, estas dos expresiones nos conducen de nuevo a varios aspectos ya tratados en la fotodetección ideal, concretamente: el concepto de curva espectral de transferencia fotónica (FTSC), como la relación incertidumbre vs. exposición cuántica (Fig. 2.9), y, la relación *SNR* vs. respuesta fotónica normalizada (Fig. 2.11). En particular, resulta de bastante interés saber cuál es la contribución de cada uno de los factores o fuentes principales de ruido optoelectrónico según la respuesta optoelectrónica, puesto que de este análisis se extraen conclusiones muy importantes sobre la posterior caracterización espectral y optoelectrónica que efectuaremos sobre nuestro sistema digital de captura.

En primer lugar, centrémonos en la profundidad óptima de digitalización para minimizar su incertidumbre correspondiente n_{ADC} . De la expresión anterior sobre n_{ADC} resulta evidente que si aumentamos el nivel de digitalización *bits* reduciremos la contribución al ruido de la digitalización, lo cual nos marca un límite teórico para la variable *SNR*: una cámara digital con una profundidad de 8 bits (256 niveles de gris) no puede tener un rango dinámico instantáneo o *SNR* mayor que $2^8 \sqrt{12} = 887:1 = 59$ dB, como ocurre en nuestro caso particular con *SNR* = 56 dB, según las especificaciones técnicas del fabricante.

Además, podemos limitar aún más el valor máximo de *SNR*, el cual ya resulta evidente que es dependiente de la respuesta espectral optoelectrónica, o equivalentemente, de la exposición espectral. El valor máximo de n_{pe} es N_{pozo} , y, el valor mínimo de $n_{SISTEMA}$ es n_{pe} , igual en este caso a N_{pozo} , con lo que resultaría que el máximo teórico para *SNR* es $\sqrt{N_{pozo}}$, el cual, representaría tal como ya se comentó en la fotodetección ideal un límite superior de precisión relativa como $100 \cdot 1 / \sqrt{N_{pozo}}$ (%). Por tanto, con un

cálculo numérico sencillo como el siguiente debemos desconfiar de la información sobre SNR que proporciona el fabricante: primero, porque no especifica para qué valor de respuesta espectral optoelectrónica corresponde, y segundo, que el valor de precisión relativa que sugiere está lejos realmente de ser cierto en condiciones normales de funcionamiento.

Ecuación 2.25

si $SNR = 56 \text{ dB}$ para la cámara CCD - RGB Sony DXC - 930P

$$\Rightarrow N_{\text{pozo}} = \left(10^{\frac{SNR \text{ (dB)}}{20}} \right)^2 = 398107 e^- \quad \text{valor desproporcionado para las dimensiones de su píxel CCD}$$

$$\Rightarrow \text{precisión relativa máxima} = \frac{100}{\sqrt{N_{\text{pozo}}}} = 0.158 \%$$

Esto nos conduce de nuevo a la interconexión conceptual entre los conceptos de rango dinámico de salida rd_s (optoelectrónica o digital), el cociente señal-ruido SNR y el nivel óptimo de digitalización. El rango dinámico de salida rd_s representa una cota superior del valor efectivo SNR , como si fuera el rango dinámico instantáneo, y que suele identificarse con el cociente teórico compuesto por

Ecuación 2.26

$$rd_s = \frac{\text{respuesta máxima posible}}{\text{respuesta mínima posible}} = \frac{N_{\text{pozo}}}{\sqrt{n_{\text{OSCURA}} + (n_{\text{BASE}})^2}} = \frac{2^{\text{bits}} - 1}{ND_{\text{BASE}}}$$

Por tanto, el nivel de digitalización $bits$ debe ser mayor que el rango dinámico de respuesta. Ahora bien, si suponemos el valor $SNR = 56 \text{ dB}$ como el verdadero rango dinámico de salida (tal como suelen hacer la mayoría de los fabricantes), resulta que el nivel óptimo de digitalización para la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P debería ser al menos de 10 bits, es decir 1024 niveles $> 631 = 10^{(56/20)}$. Este resultado también coincide con el que se deduce utilizando criterios estrictamente colorimétricos: si tenemos en cuenta el efecto del rango de cuantización/digitalización de acuerdo con criterios perceptuales (Hunt 1997; Ikeda, Dai, Higaki 1992; Stokes, Fairchild, Berns 1992) en la discriminación cromática de imágenes como estímulos visuales, los niveles óptimos de cuantización para la visualización y la precisión computacional son, respectivamente, de 7 y 10 bits para la variable psicométrica L^* (claridad), 8 y 11 bits para las variables psicométricas a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul) del espacio CIE- $L^*a^*b^*$. Por tanto, parece razonable que si, alguna vez, disponemos de un tele-colorímetro basado en una cámara digital, éste debe apoyarse sobre un nivel de digitalización de 12 bits, o sea, con 4096 niveles de gris por cada canal de color RGB. Así pues, de este razonamiento se extrae una limitación importante de tipo sistemático que afectará a la efectividad en la conversión de la cámara CCD-RGB real que disponemos para transformarla en un instrumento de medida del color, puesto que la profundidad de bits de trabajo es de 8 bits por canal.

Volvamos de nuevo a la expresión optoelectrónica general de SNR para entender cómo contribuyen cada una de las fuentes sistemáticas de error optoelectrónico. Por ejemplo, sin presencia de exposición radiante, el ruido del sistema n_{SISTEMA} quedaría limitado a las contribuciones del ruido de disparo de

corriente oscura $\sqrt{n_{OSCURA}}$ y el ruido base n_{BASE} . Por eso resulta muy importante en aplicaciones metrológicas con cámaras CCD trabajar con dispositivos optoelectrónicos enfriados (Holst 1998, 79-83; Janesick 2001), para así minimizar la respuesta oscura. Podemos contrarrestarla capturando una imagen-fondo promedio y restársela a todas las imágenes reales para considerar niveles digitales efectivos, pero la contribución de la corriente oscura en la incertidumbre del nivel digital permanecerá. En el caso de nuestra cámara CCD-RGB de trabajo, como no incorpora algún dispositivo termoelectrónico para enfriar el mosaico CCD, debemos considerar desde un principio este inconveniente para toda la resolución posterior de esta tesis doctoral.

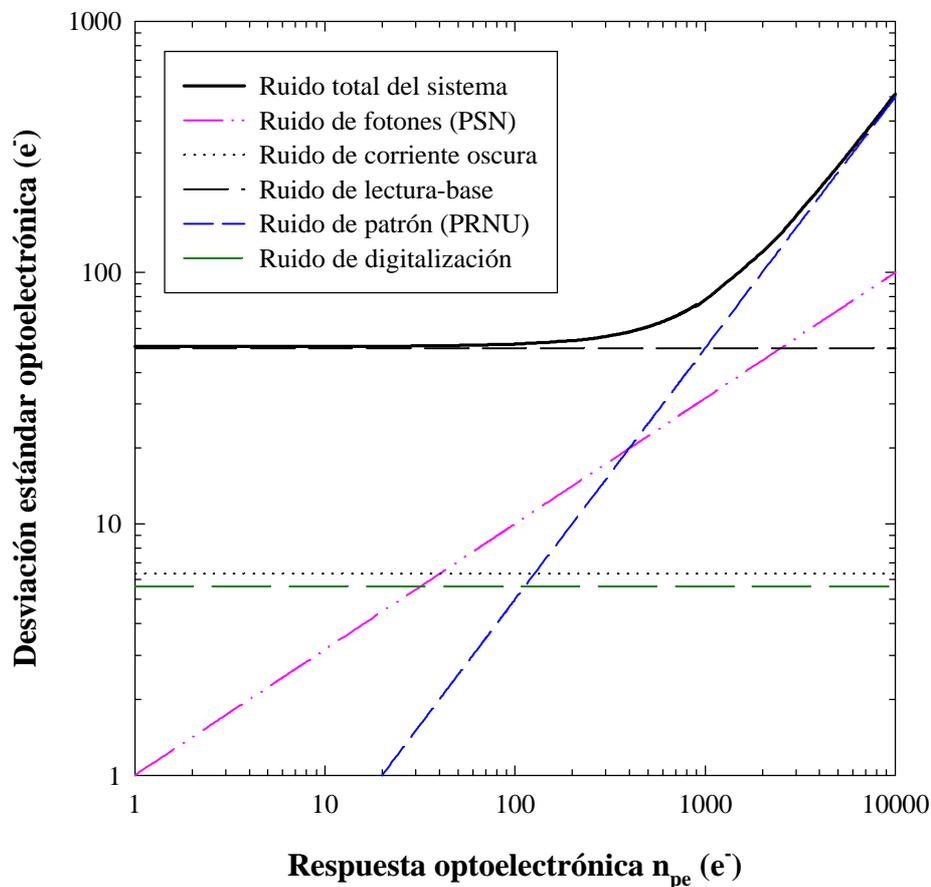


Figura 2.21: Incertidumbre en la respuesta optoelectrónica causada por varias fuentes sistemáticas de error, propias de la tecnología inherente de los dispositivos optoelectrónicos de captura. Ejemplo gráfico: $N_{pozo} = 5000 e^-$, $n_{OSCURA} = 40 e^-$, $n_{BASE} = 50 e^-$, $U = 2.5 \%$. (No se representa el descenso brusco del error optoelectrónico total al llegar a los límites de saturación del sistema.)

Si representamos gráficamente por separado y de forma conjunta cada una de las fuentes de error optoelectrónico (Fig. 2.21) y su efecto sobre la relación señal-ruido SNR (Fig. 2.22), nos encontraremos para la mayoría de los casos –con los efectos de corriente oscura y de digitalización optimizados– que,

para respuestas bajas, domina el ruido base o de lectura base n_{BASE} , para respuestas medias, domina el ruido estadístico de disparo de fotones n_{PSN} , y, para respuestas altas, cercanas a la saturación, domina el ruido de patrón n_{PRNU} . Por tanto, resulta ya incuestionable, cosa que no aclaran casi nunca los datos técnicos del fabricante, que la relación SNR es dependiente de la señal optoelectrónica n_{pe} , o en su caso, del nivel digital ND , siempre considerándola para una longitud de onda λ determinada, y que, el rango dinámico de salida rd_s es una cota superior teórica de SNR como N_{pozo}/n_{BASE} .

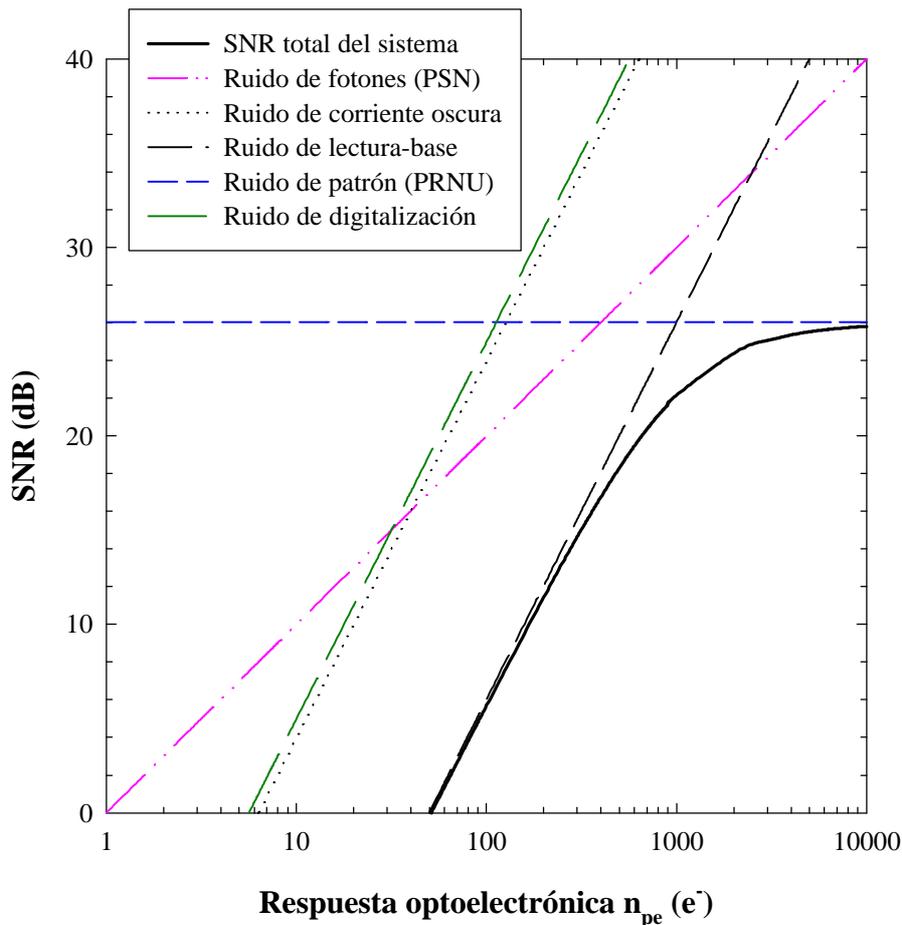


Figura 2.22: La relación señal-ruido SNR (dB) en función del error optoelectrónico. Ejemplo gráfico: $N_{pozo} = 5000 e^-$, $n_{OSCURA} = 40 e^-$, $n_{BASE} = 50 e^-$, $U = 2.5 \%$.

2.2.3.4 Parámetros condicionantes finales en la codificación y transmisión del color

Tras un análisis general sobre la formación bruta de la respuesta optoelectrónica/digital y su incertidumbre, llega el momento de analizar qué papel juegan algunos de los parámetros técnicos que suelen incorporar los fabricantes en el menú de funcionamiento de una cámara CCD-RGB. Nos referimos a aquellas variables marcadas con un asterisco (*) de las Tablas 2.4-7. Algunos de ellos ya han sido

analizados –offset y gain del digitalizador, SNR – con conclusiones muy importantes para el devenir exitoso de esta tesis doctoral; al resto, les ha llegado su hora. Vayamos, por tanto, por orden, tal como se muestran en las tablas citadas.

El fabricante Sony especifica para la cámara CCD-RGB DXC-930P como "sensibilidad" el dato siguiente: "N5 a 2000 lx". Esto significa que, configurando la apertura relativa del objetivo fotográfico a $N = 5.6$, la cámara CCD-RGB parece que todavía no se satura con una iluminación blanca, espectralmente desconocida, de valor 2000 lx. Tras el conocimiento ya acumulado en esta introducción, preguntamos entonces: ¿no sería más informativo dar algún valor de responsividad espectral para ciertas longitudes de onda, por ejemplo, la de los picos de responsividad λ_R , λ_G y λ_B para cada canal RGB?

Como dato de "iluminación mínima", el fabricante proporciona "19 lx con N1.4 y +18 dB". Es decir, seleccionando una apertura relativa $N = 1.4$, cercana a su valor máximo $N = 1$, y con un control de ganancia de vídeo externo G_3 (GAIN) –diferente de los internos G , G_1 y el de digitalización G_2 – a 18 dB, o sea, que la señal digital bruta ha sido aumentada 7.94 veces su valor original, la cámara CCD-RGB parece que responde con el nivel digital mínimo, sin referencia a la contribución de la señal oscura y de patrón fijo. Entonces, preguntamos: ¿no sería más informativo dar los valores de exposición espectral equivalentes de ruido (EEER)?

Como dato de control de ganancia de vídeo (GAIN), el menú de la cámara permite trabajar con un modo automático, pero donde nunca se conoce su valor G_3 instantáneo, y un modo manual, o por pasos (STEP) de +1 dB entre 0 y 18 dB. Por tanto, tras lo asimilado anteriormente, no parece lógico que seleccionemos este parámetro del menú en modo automático (AGC) puesto que alteraríamos cada vez el espacio de color RGB dependiente de la cámara CCD-RGB. Parece, por tanto, necesario fijar este parámetro, por ejemplo a su mínima influencia: $G_3 = 0$ dB, es decir, que la señal optoelectrónica/digital bruta se mantenga. Por otro lado, podemos intuir, aunque no lo comprobaremos a lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral, la influencia de variar paso a paso el valor G_3 : quizás no altere tanto el valor de la exposición espectral equivalente de ruido (EEER), pero sí que parece que alterará bastante el valor de la exposición espectral equivalente de saturación en representaciones (Fig. 2.23) tipo funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF), tal como ya se presentó en la fotodetección ideal.

Sobre el obturador electrónico (SHUTTER), la cámara CCD-RGB dispone de dos opciones, por pasos (STEP) o manual (MANU), aparte de la opción por defecto de $t_0 = 1/50 = 20$ ms, la optimizada para generar la señal cromática de vídeo PAL. Así, en el modo manual (Tabla 2.8), se puede optar por dos variables locales: la unidad de frame F para tiempos de integración t superiores a t_0 , y, el periodo de registro/barrido horizontal P_H , para tiempos inferiores a t_0 . Esto puede resultar importante si deseamos controlar de forma externa la exposición H_λ sobre el plano focal CCD, tal como ya se explicó en secciones anteriores; pero, parece lógico a priori, mantener desactivado el tiempo de exposición o integración optoelectrónica ($t = t_0 = 20$ ms), aunque su variación controlada no signifique que vamos a alterar el espacio de color RGB dependiente en el sistema.

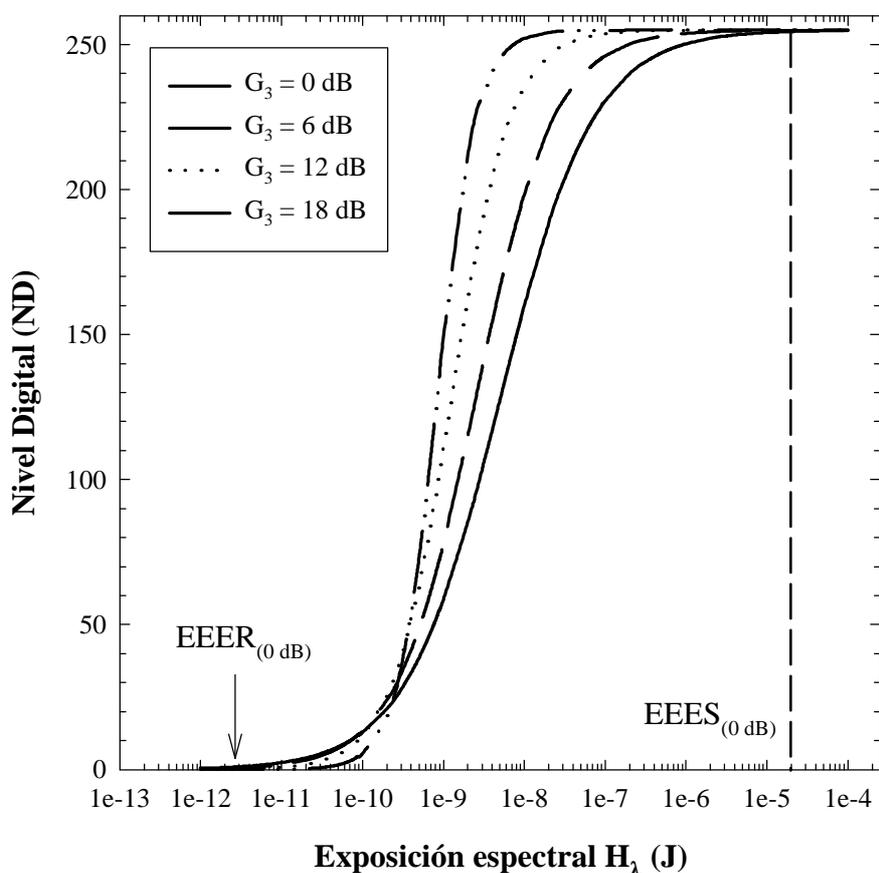


Figura 2.23: Efecto simulado de la ganancia externa de vídeo (GAIN = G_3) sobre la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF).

Tabla 2.8: Variabilidad manual del tiempo de exposición/integración optoelectrónica de la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P.

MARCA: Sony MODELO: DXC-930P			
Tiempo de exposición en modo desactivado: $t_0 = 20$ ms			
	VARIABLE LOCAL	RANGO	ECUACIÓN
$t > t_0$	Unidad de frame (F)	[2, 3, ..., 255, 256]	$t = \frac{1}{25} F$
$t < t_0$	Periodo de registro horizontal (P_H)	[1, 2, ..., 309, 310]	$t = 64 \cdot 10^{-6} P_H + 35.6 \cdot 10^{-6}$

Otra variable a tener en cuenta en el menú de funciones de esta cámara CCD-RGB es el control de la apertura relativa (CCD IRIS). En principio, la apertura relativa N del objetivo fotográfico se presenta sobre una escala continua, donde se marcan de forma discreta los valores estándar 1: 1.4: 2: 2.8: 4: 5.6: 8: 11: 16: 22, valores que se ajustan de forma manual pero que, en ningún momento se controla de forma

micrométrica, función que sí puede realizar la unidad adicional de control remoto RM-930. Pero, la función "CCD IRIS" significa la posibilidad de ajustar de forma instantánea el valor N para evitar la saturación en alguno de los tres canales RGB, es como un mecanismo artificial de adaptación a la exposición incidente. Tampoco se tiene constancia a partir de las notas del menú la relación matemática exacta entre el nivel de exposición incidente, si es monocromático o continuo, y el valor de la apertura relativa. Por tanto, aunque parece obvio su aplicabilidad en tareas de vigilancia, ya sea en condiciones diurnas o nocturnas, resulta evidente que tal función automática de adaptación luminosa debe descartarse. Así pues, en el control numérico exacto de la exposición espectral H_λ , se presupone que el ajuste manual de N , cuando sea necesario, es el correcto.

El balance de negro (BLACK) es una función automática de configuración de cero del nivel analógico de respuesta. Esto se realiza colocando la tapa del objetivo fotográfico y pulsando la tecla correspondiente, pero esto no evita la respuesta de corriente oscura y de patrón fijo, variables que nunca han de subestimarse.

De entre los parámetros que estamos citando, el control del balance de blanco (WHT.BAL) es uno de los aspectos claves para la resolución exitosa de esta tesis doctoral. Debe de tratarse de un circuito electrónico interno en el que se configura los valores RGB brutos ($R \neq G \neq B$) de un estímulo-color, el cual da justamente saturación en uno de los tres canales, a valores $R = G = B = 2^8 - 1 = 255$ mediante una ganancia no equivalente en los tres canales. En modo manual puede variarse de $[-99, \dots, 0, \dots, +99]$ dB para las señales R y B, no G, y eso se aplicará consecuentemente a todos los niveles digitales codificados en la escena. En modo automático, este circuito electrónico efectúa estas ganancias de acuerdo con una estimación binaria de la cromaticidad de la iluminación, supuesto estímulo-blanco de referencia altamente reflectivo: temperatura de color T_C a 3200 K (fuentes cálidas - amarillentas) o a 5600 K (fuentes frías - azuladas). Este algoritmo no simula, por tanto, una adaptación cromática clásica tipo von Kries (Fairchild 1998, 201-204; Wyszecki & Stiles 1982, 429-432), por ser discreta, ambigua, no unívoca para fuentes fluorescentes tipo F1, F2, ..., F7, ..., F12, y no homogénea para los tres canales RGB. Si bien, su comportamiento en modo automático ha sido analizado parcialmente (Corbalán 1997) bajo la filosofía de color WYSIWYG, este factor debe ser también excluido como variable de contorno. Por tanto, el balance de blanco de la cámara Sony DXC-930P es una adaptación cromática falsa porque no utiliza en ningún momento una codificación de color independiente del dispositivo. Es más, si los pilares de cualquier espacio de representación del color, dependiente o no del dispositivo, son las funciones de igualación T_{RGB} y la elección del blanco de referencia, parece que no tiene sentido cambiar el balance de blanco de la cámara cada vez que pasemos de un ambiente luminoso cálido (iluminación de interiores) a un ambiente frío (iluminación de exteriores): estaríamos cambiando inevitablemente de espacio RGB dependiente del dispositivo, con las consecuencias negativas que eso acarrea para la reproducción exacta o colorimétrica del color, pero no por ejemplo para reproducciones equivalentes o preferidas del color, tal como suele hacerse en TV o en cualquier reportaje videográfico. Si nuestro objetivo es convertir este dispositivo multimedia en un instrumento tele-colorimétrico absoluto, que tiene como iluminante de referencia al estímulo equienergético E ($T_C \cong 5600$ K) esto significa que la medida del color está siempre ligada a desplazamientos colorimétricos provocados por la fuente luminosa, y en todo caso después se efectúan a nivel sensorial en el sistema visual humano los corrimientos adaptativos de compensación

(recordar el paso de CIE-XYZ a CIE-L*a*b*), función que quedaría reservada a la implementación posterior de cualquier modelo de apariencia del color (CIECAM'97, por ejemplo). Por tanto, el valor más conveniente de configuración del balance de blanco sería en modo manual con fijación 0 dB en los canales R y B, al unísono que se configura en modo automático en $T_C = 5600$ K. La cuestión que se resolverá simultáneamente con la determinación de las funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} de esta cámara CCD-RGB es si el balance de blanco electrónico será el correcto desde el punto de vista colorimétrico:

Ecuación 2.27

$$\text{si } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{¿ } \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{E} = \begin{bmatrix} R_E \\ G_E \\ B_E \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} ND_R(E) \\ ND_G(E) \\ ND_B(E) \end{bmatrix} \text{ con } R_E = G_E = B_E ?$$

Otro aspecto a tener en cuenta es el control de la gamma del monitor CRT de visualización (GAMMA). En estado activo, se presupone que todas las respuestas RGB brutas se alteran según $R^{1/\gamma}$, $G^{1/\gamma}$, $B^{1/\gamma}$, siendo γ el parámetro intrínseco de contraste en la caracterización colorimétrica de un monitor CRT (CIE 122, 1996), para que, si es el caso que solamente interesa la visualización sobre un monitor CRT como en los casos de vigilancia, la acción colorimétrica final del monitor mantenga casi inalterada la gama de colores reproducibles propios de la cámara CCD-RGB. Si suponemos por simplicidad uno de los tres canales, como si lo fuera tratado de manera acromática, y consideramos su rango relativo de respuesta analógica $V_{\text{CCD-RGB}}$ entre 0 y 1, y un valor $\gamma = 2.2$, típico de los monitores CRT en el espacio estándar sRGB (pero que se desconoce realmente el aplicado en esta cámara), la compensación o no del monitor CRT debe interpretarse simultáneamente de dos formas (Fig. 2.24): si interesa trabajar con la imagen digitalizada directamente tal como se visualiza (operaciones morfológicas, etc), o, por el contrario, si interesa trabajar con la imagen digitalizada desde el punto de vista computacional, como para tareas metrológicas de tipo colorimétrico. La tarjeta digitalizadora registrará la imagen final de dos modos, los cuales representarán diferentes espacios de color dependientes del dispositivo:

Ecuación 2.28

$$\text{con compensación } \gamma: NDR_{\text{ADC}} = (V_{\text{CCD-RGB}})^{\frac{1}{2.2}} \text{ pero } NDR_{\text{sRGB}} = \left[(V_{\text{CCD-RGB}})^{\frac{1}{2.2}} \right]^{2.2} = V_{\text{CCD-RGB}}$$

$$\text{sin compensación } \gamma: NDR_{\text{ADC}} = V_{\text{CCD-RGB}} \text{ pero } NDR_{\text{sRGB}} = (V_{\text{CCD-RGB}})^{2.2}$$

Las consecuencias de esto dos modos de procesado sobre la imagen digital resulta evidente:

- Para tareas de procesado directamente sobre la imagen digital visualizada, la función compensatoria de la gamma del monitor mantiene el contraste de grises original, tal como la cámara CCD-RGB lo capta, mientras que la función des-compensatoria de la gamma del monitor reduce drásticamente el contraste en la imagen final: los grises bajos y medios se oscurecen más que los grises altos.

- Para tareas estrictamente computacionales o metrológicas sobre la imagen digital, la función descompensatoria de la gamma del monitor mantiene el contraste de grises original, o sea, la codificación bruta de color de la cámara CCD-RGB, mientras que la función compensatoria de la gamma del monitor reduce drásticamente el contraste en la imagen final: los grises bajos y medios se aclaran más que los grises altos.

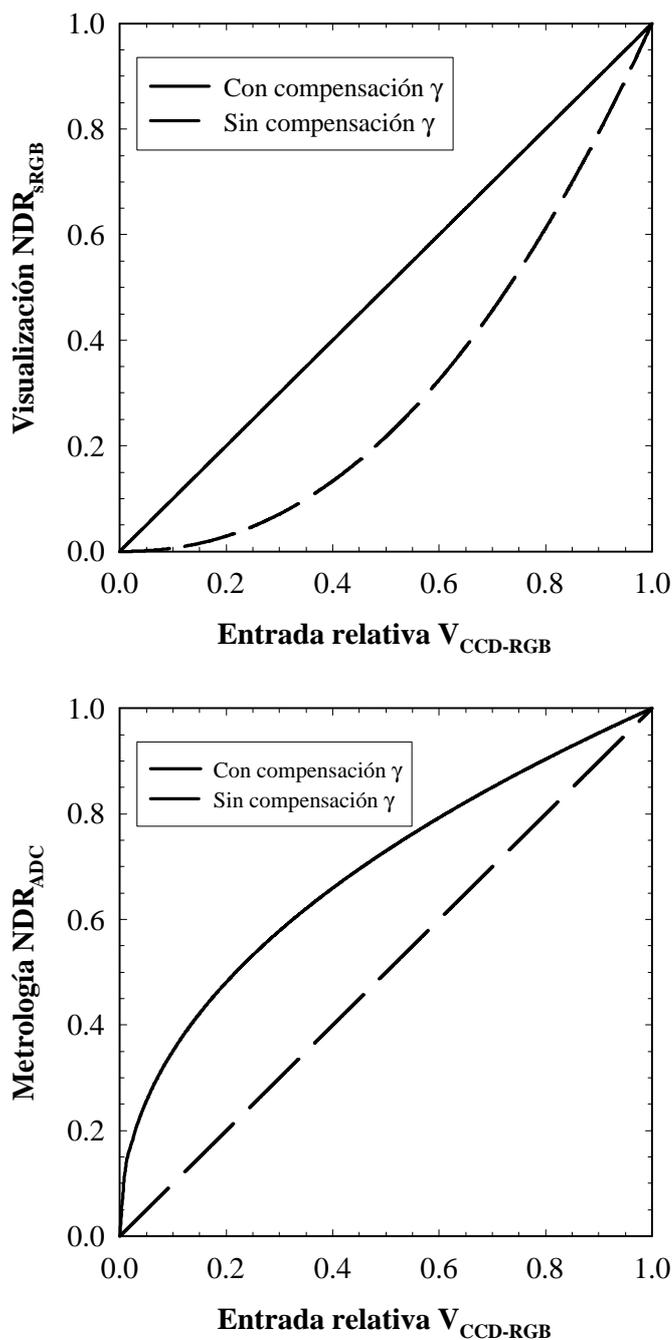


Figura 2.24: Efecto de la compensación de la gamma del monitor CRT convencional sobre la codificación digital final de una imagen capturada por una cámara CCD-RGB.

Por tanto, parece lógico que, si deseamos mantener la codificación cromática bruta de la cámara CCD-RGB + digitalizador, debemos optar por no aplicar la compensación gamma del monitor de visualización.

Respecto a la salida cromática de vídeo, debemos descartar el uso de la señal cromática PAL o cualquier otra del tipo claridad Y / croma C. A simple vista, podríamos optar por este espacio de color RGB, puesto que es el común en los formatos de TV o vídeo, pero como depende originariamente del espacio RGB bruto de la cámara, aspecto que sí que no es común en todas las cámaras CCD-RGB del mercado, parece lógico rechazar el formato de salida PAL, o NTSC si fuéramos norteamericanos: aunque toda la información cromática que se procesa en producción TV, ya sea en cámaras o en televisores, es de tipo PAL, las diferencias en los rangos cromáticos de visualización (niveles de saturación en los blancos, etc) son evidentes con una observación detenida de la mayoría de los programas (telediarios, documentales, etc) que solemos ver en casa. Así pues, debemos optar por la salida R/G/B en la cámara, aspecto que debe estar coordinado también con la tarjeta digitalizadora: no todas las tarjetas digitalizadoras permiten la entrada sincronizada y separada R/G/B de una cámara, la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850 sí.

Nos queda analizar otras variables del menú de la cámara Sony DXC-930P denotadas como "nivel de pedestal" (M.PED), "detalle" (DTL) y el "modo de integración" CCD (FLD/FRM). El nivel de pedestal es la opción de configurar manualmente el nivel inicial de calibración del negro; por tanto, sería la opción electrónica de minimizar la señal de corriente oscura y de patrón fijo. Pero significaría descartar de nuevo el espacio de color bruto de la cámara CCD-RGB: así pues, mejor fijarlo a 0 dB. La función detalle (DTL) sirve para ajustar la nitidez de los bordes de los objetos representados en la imagen, aspecto que quizás sea conveniente en tareas de vigilancia o reproducción preferida del color, pero no para reproducción exacta del color como tarea metroológica que perseguimos conseguir. Por tanto, parece también lógico descartar su influencia configurándola a 0 dB. El modo de integración CCD se refiere a la forma de rastrear o barrer la imagen en el mosaico CCD. Ya que esta cámara CCD-RGB no es de tipo barrido progresivo, el fabricante permite optar entre la captura de objetos móviles (modo FLD, *field*-campo) o estacionarios (modo FRM, *frame*-cuadro), aspecto que condiciona más arriba la configuración manual del obturador electrónico (SHUTTER).

En resumen, si deseamos seleccionar la codificación cromática bruta del sistema digital de captura compuesto por una cámara CCD-RGB Sony DXC-930P y una tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850, con las implicaciones que ello representa para su conversión en un instrumento tele-colorimétrico, más o menos exacto y preciso, es necesario seleccionar las variables de funcionamiento que se muestran en la Tabla 2.9. A la vista de esta tabla de configuración inicial de nuestro sistema de trabajo, dejamos libre en principio la variación de la apertura relativa N del objetivo fotográfico VCL-712BXEA y el tiempo de exposición t del obturador electrónico, aunque después demostraremos la conveniencia de configurarlo en su modo desactivado $t_0 = 1/50 = 20$ ms. Otro aspecto que hemos incluido y que se aprovechará más tarde es el formato espacial de la imagen digital de salida (512 x 512). En principio, la imagen CCD tiene unas dimensiones diferentes, 752 x 582, por lo que parece lógico que deberemos tener en cuenta una conversión de escalado entre la imagen CCD-RGB y la imagen digital final que proporciona la tarjeta digitalizadora.

Selección de una cámara digital científica

Tabla 2.9: Configuración inicial de trabajo para conseguir la codificación cromática bruta en un sistema digital de captura compuesto por una cámara CCD-RGB y una tarjeta digitalizadora.

Cámara CCD-RGB Sony DXC-930P	
VARIABLE	ESTADO
Ganancia de vídeo (GAIN)	Desactivada (0 dB)
CCD IRIS	Desactivado
Nivel de pedestal (M.PED)	Desactivado (0 dB)
Detalle (DTL)	Desactivado (0 dB)
Compensación- γ monitor	Desactivada
Modo de integración CCD	FRM
Salida de vídeo	R/G/B
Balance de negro (BLACK)	Automático
Balance de blanco (WHT.BAL)	A 0 dB, configurado automáticamente a 5600 K
Apertura relativa (N)	Sujeta a variaciones controladas
Tiempo de exposición (t) (SHUTTER)	Sujeto a variaciones controladas

Tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850	
VARIABLE	ESTADO
Entrada analógica	R/G/B
Offset	127
Gain	127
Conversión A/D	8 bits (256 niveles de gris)
Formato-imagen	512 x 512

2.2.4 Parámetros funcionales de una cámara digital científica

Una conclusión global bastante rotunda sobre lo explicado en este apartado 2.2 es que las especificaciones técnicas de una cámara CCD-RGB distan mucho de dar información fiable sobre las capacidades reales de su funcionamiento. Es decir, tenemos todos la impresión que, la mayoría de los fabricantes de dispositivos multimedia (Fotografía Digital, Vídeo, TV, etc) de captura de imágenes (cámaras CCD-RGB y escáneres), salvo contadas excepciones², proporcionan escasa información real sobre el funcionamiento de sus productos, o bien porque tienen conocimientos limitados, o bien porque se atienen a criterios científico-empresariales. La cuestión es que con la información tan diversa que proporcionan los fabricantes de cámaras CCD-RGB (Advanced Imaging 2000), el usuario no puede deducir con total seguridad cuál entre dos cámaras CCD-RGB, aparentemente con prestaciones idénticas, es mejor que la otra para las aplicaciones científicas que desee desarrollar apoyándose en este dispositivo. No existe una tabla estándar de parámetros técnicos, reconocida internacionalmente, sobre el funcionamiento optoelectrónico de escáneres y cámaras CCD-RGB. Otra cuestión paralela pero conceptualmente muy distinta es que, debido originariamente a la tolerancia cromática perceptual del sistema visual humano, la mayoría de las aplicaciones visuales multimedia se rigen por las leyes de reproducción correspondiente o preferida del color, por lo que este margen perceptual es aprovechado inconscientemente por las empresas del sector para confundir aún más a los usuarios, ya sean profesionales o domésticos. Por tanto, lo que vamos a proponer en esta sección es una tabla estándar de especificaciones técnicas reales sobre el funcionamiento científico de dispositivos optoelectrónicos de captura de imágenes (escáneres y cámaras). Resulta ya evidente llegado a este punto que nuestro sistema de trabajo, cámara Sony DXC-930P + Matrox MVP-AT 850, no puede catalogarse como una verdadera

² Esto no ocurre por ejemplo en las técnicas astrofísicas mediante dispositivos CCD (Janesick 2001). Aquí, las cámaras CCD son realmente científicas, en el sentido de que la mayoría de los parámetros técnicos (SNR, corriente oscura, constante de conversión optoelectrónica, etc) explicados en estas secciones se tienen muy en cuenta para optimizar la captura casi residual de los objetos estelares.

cámara digital científica. Para probarlo, tanto en aspectos optoelectrónicos como en aspectos colorimétricos, puesto que los primeros condicionan en parte las propiedades de los segundos, desarrollaremos de forma original técnicas espectralométricas y métodos físico-matemáticos alternativos para evaluar el nivel de reproducción del color de esta cámara digital o cualquier otra.

Para el desarrollo o propuesta personal sobre las especificaciones técnicas del comportamiento optoelectrónico-colorimétrico real de una cámara digital tendremos que apoyarnos en parte de los conceptos explicados desde el primer capítulo de esta tesis doctoral. Para ello, vamos a imaginar una cámara digital muy especial: aquella que se caracteriza por tener tres canales de color cuyas sensibilidades espectrales son las funciones de igualación CIE-1931 XYZ para todo el rango dinámico de entrada-salida. Es decir, consideremos al observador patrón CIE-1931 XYZ como un dispositivo fotosensor lineal, donde sus respuestas son valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} en cd/m^2 , tal como se expresan matemáticamente de la forma convencional del primer capítulo (Ec. 1.9). El hecho de que consideremos como hipótesis que esta "cámara digital" sea lineal en su rango espectral de respuesta significa que:

- Para este caso particular, tiene más sentido sustituir como entrada energética la exposición espectral H_λ [J] por la radiancia espectral $L_{e\lambda}$ [W/sr·m²], como si dispusiera de un objetivo fotográfico de apertura relativa fija $N = 1$ y con un tiempo de exposición $t = 1$ s.
- De acuerdo con las definiciones de responsividad espectral y de espectro de acción, conceptualmente relacionadas con el concepto general de sensibilidad espectral, quedaría para este caso de dispositivo fotosensor que se mantiene el escalado relativo de responsividad/espectro de acción con la radiancia espectral o entrada energética (Fig. 2.25).

Ecuación 2.29

como $\mathbf{t}_{XYZ} = K_m \cdot \mathbf{T}_{XYZ} \cdot (\mathbf{b} \Delta\lambda)$

ya que $\mathbf{t}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K_m \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{380} & \bar{x}_{390} & \dots & \bar{x}_{780} \\ \bar{y}_{380} & \bar{y}_{390} & \dots & \bar{y}_{780} \\ \bar{z}_{380} & \bar{z}_{390} & \dots & \bar{z}_{780} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_{e380} \cdot \Delta\lambda \\ L_{e390} \cdot \Delta\lambda \\ \vdots \\ L_{e780} \cdot \Delta\lambda \end{bmatrix}$, con $K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

\Rightarrow de $\text{responsividad} = \frac{\text{respuesta}}{\text{energía} = \text{cte}} \rightarrow [\mathbf{r}_X(\lambda) \ \mathbf{r}_Y(\lambda) \ \mathbf{r}_Z(\lambda)] = 683 \cdot [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}] \ \forall L_{e\lambda}$

\Rightarrow de $\text{espectro de acción} = \frac{\text{respuesta} = \text{cte}}{\text{energía}} \rightarrow [\mathbf{a}_X(\lambda) \ \mathbf{a}_Y(\lambda) \ \mathbf{a}_Z(\lambda)] = 683 \cdot [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}] \ \forall \mathbf{t}_{XYZ}$

Pero esto no se puede extrapolar a priori en el comportamiento espectral de cámaras digitales reales. Para Fotografía Digital, parece más conveniente considerar de partida $r(\lambda, H)$, no $r(\lambda)$, y $a(\lambda, NDR)$, no $a(\lambda)$, para cada canal de color. Ésta será, por tanto, una de las cuestiones iniciales que resolverá esta tesis

doctoral para el sistema digital de captura de imágenes compuesto por la cámara CCD-RGB Sony DXC-930P y la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

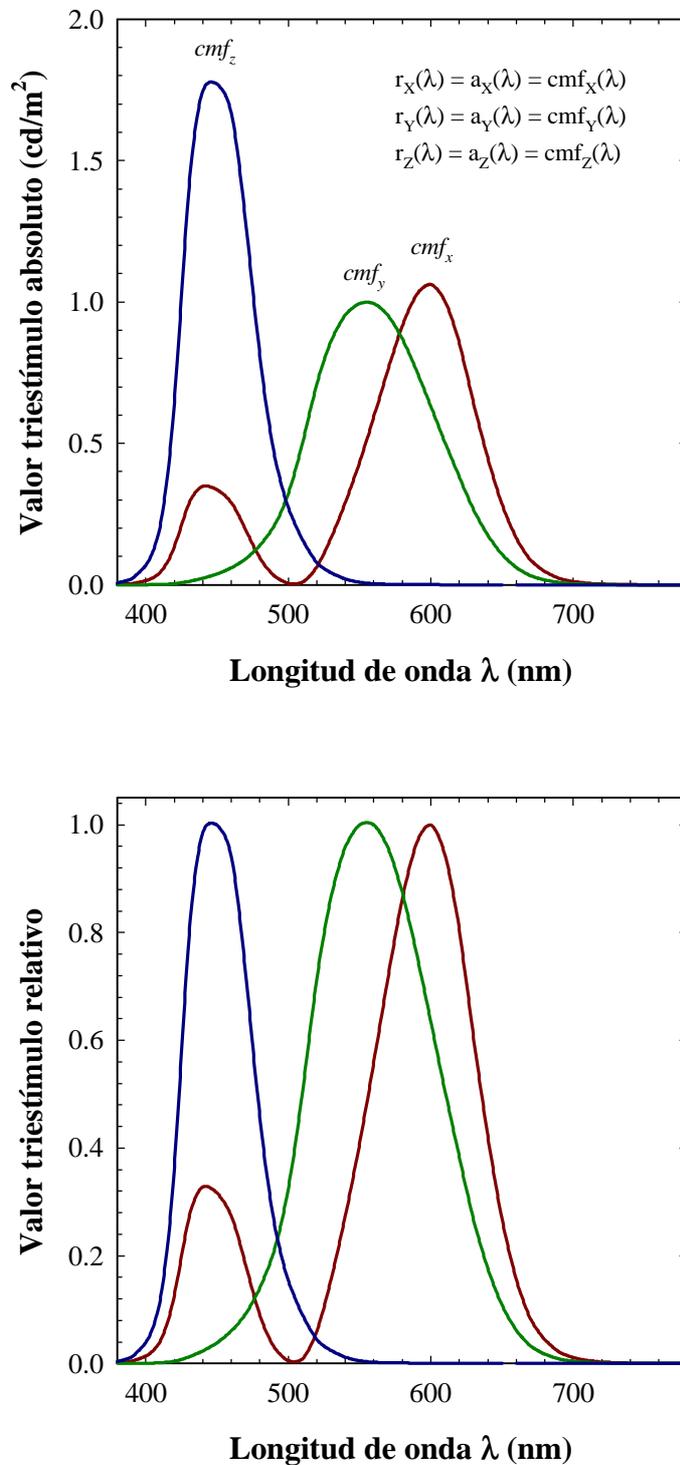


Figura 2.25: Escalado absoluto, balanceado al blanco equi-energético, y relativo de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ.

- Ahora bien, aunque se mantenga el escalado relativo de respuesta en los canales XYZ con la radiancia espectral (Fig. 2.25), eso no significa que ya estaría balanceada respecto al estímulo equi-energético \mathbf{E} . Es decir, la información completa sobre sensibilidad espectral la proporciona el escalado absoluto balanceado al estímulo equi-energético de las responsabilidades espectrales relativas de los canales XYZ, lo que convencionalmente se denotan como funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} (Fig. 2.25). Dado que el estímulo equi-energético se define vectorialmente como $[1, 1, \dots, 1]^t$, es fácil comprobar que los productos escalares $\bar{\mathbf{x}}^t \cdot \mathbf{E}_{\bar{e}}, \bar{\mathbf{y}}^t \cdot \mathbf{E}_{\bar{e}}, \bar{\mathbf{z}}^t \cdot \mathbf{E}_{\bar{e}}$ valen igual, en concreto 21.3714 (Wyszecki, Stiles 1982, 737). Otra cuestión diferente será comprobar si el balance de blanco configurado electrónicamente para nuestro sistema fotosensor de trabajo será correcto desde el punto de vista colorimétrico, como ya hemos advertido párrafos antes.
- Teniendo en cuenta el concepto ya utilizado de función espectral de conversión optoelectrónica OECSF, como la función matemática de ajuste entre la salida del dispositivo fotosensor y la entrada equi-energética L_e , resulta que aplicada en el caso de CIE-1931 XYZ sería:

Ecuación 2.30

$$OECSF_X \equiv X_\lambda = (683 \bar{x}_\lambda \Delta\lambda) L_e$$

$$OECSF_Y \equiv Y_\lambda = (683 \bar{y}_\lambda \Delta\lambda) L_e$$

$$OECSF_Z \equiv Z_\lambda = (683 \bar{z}_\lambda \Delta\lambda) L_e$$

- Ahora bien, esto significa que observando las dos versiones gráficas de OECSF_{XYZ} (Fig. 2.26), esta cámara digital no posee radiancia espectral equivalente de ruido (REER) ni radiancia espectral equivalente de saturación (REES): tendría un rango dinámico infinito de salida, sin umbral de respuesta ni valor de saturación, tal como presuponemos por su comportamiento estrictamente lineal.

Por supuesto, la cuestión obligada que surge de esto es cuál será la OECSF para cada longitud de onda λ , y para cada canal RGB, de nuestro sistema digital de captura de imágenes, donde ya presuponemos inicialmente que no se comportará estrictamente lineal como la cámara digital CIE-1931 XYZ. Es decir, partiendo del mismo concepto de OECSF, deberíamos suponer para Fotografía Digital real que:

Ecuación 2.31

$$OECSF_R \equiv NDR_R = f_R(\lambda, H)$$

$$OECSF_G \equiv NDR_G = f_G(\lambda, H) \quad \text{siendo} \quad NDR_k = \frac{ND_k}{2^{bits} - 1} \quad \text{para } k \text{ canales - color}$$

$$OECSF_B \equiv NDR_B = f_B(\lambda, H)$$

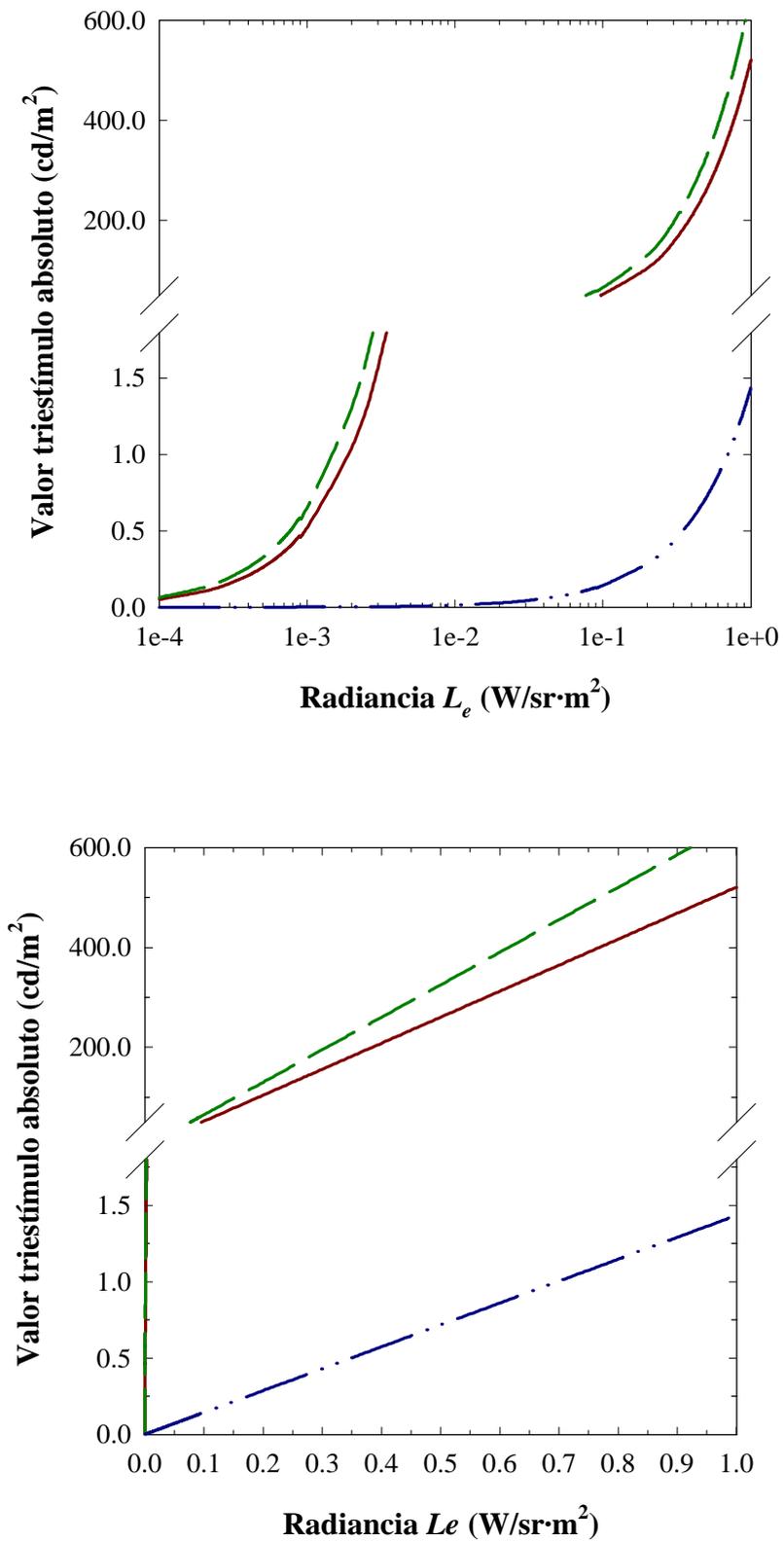


Figura 2.26: OECSFs calculadas para $\lambda = 570$ nm, correspondientes a los canales XYZ del observador patrón CIE-1931. (Línea continua: canal X; línea discontinua: canal Y; línea semi-punteada: canal Z). La figura superior se representa con escala logarítmica para la radiancia L_e , mientras que en la figura inferior se representa la misma variable en escala lineal.

- Hasta ahora, no hemos aplicado todavía ningún concepto optoelectrónico a esta cámara digital XYZ, es más, solamente hemos hablado del comportamiento radiométrico y colorimétrico de tal dispositivo fotosensor. Por tanto, podríamos aplicar conceptualmente las características funcionales de la fotodetección ideal: QE , DQE en función de L_e y de λ . Pero también resulta evidente que, para esta simulación colorimétrica, sería mejor aplicar los parámetros optoelectrónicos reales que hemos presentado en las secciones anteriores. Supongamos, por tanto, que esta cámara digital XYZ posee dos especificaciones triestímulo, la estrictamente optoelectrónica con valores triestímulo XYZ en fotoelectrones n_{pe} , y la estrictamente radiométrica/digital en niveles digitales ND . Entonces, el parámetro de nexo entre ambas especificaciones sería lo que ya hemos denotado como constante de conversión opto-electrónica K [e^-/ND]. Ha llegado, por tanto, el momento de explicar cómo se calcula este parámetro clave entre el comportamiento radiométrico y optoelectrónico de una cámara digital, ya sea la ideal XYZ o la nuestra de trabajo. El método de transferencia fónica de Janesick (Gardner 1999; Janesick, Klaasen, Elliott 1987; Janesick 1999; Janesick 2001) va a resultar crucial para resolver el dilema de cómo presentar unos parámetros técnicos en unidades absolutas sobre el comportamiento funcional radiométrico-colorimétrico y optoelectrónico de cualquier cámara digital, ya sea para uso profesional, científico o doméstico. El punto de partida, al igual que en la caracterización espectral de la cámara digital, será conseguir una captura digital de una imagen monocromática λ con cierta exposición uniforme H , o radiancia L_e para la cámara digital XYZ. Entonces, se representa gráficamente como abscisas el nivel digital absoluto ND y como ordenadas la desviación estándar s_{ND} de una muestra estadística de niveles digitales ND de una zona de la imagen monocromática. Estamos, por tanto, repitiendo conceptualmente la misma gráfica error vs. señal que ya hemos visto en la sección anterior (Fig. 2.21). J. Janesick propone ingeniosamente el método siguiente para determinar K , el cual podemos seguir con la gráfica-ejemplo original de sus investigaciones (Fig. 2.27):

- Capturada la imagen monocromática λ , se le resta la imagen de fondo, la que informa sobre el nivel de ruido de patrón fijo (y de corriente oscura, si el dispositivo CCD no está enfriado). De la imagen monocromática resultante, seleccionamos una región de píxeles (N_p), los cuales en teoría han sido expuestos radiométricamente de forma uniforme con un valor H , para calcular el valor medio ND y la desviación estándar s_{ND} asociados a esa exposición H :

Ecuación 2.32

Seleccionada una región N_p de la imagen monocromática λ capturada con exposición uniforme $H \Rightarrow$

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (ND_{i\text{bruto}} - ND_{i\text{fondo}})}{N_p} \quad , \quad s_{ND}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (ND_{i\text{bruto}} - ND_{i\text{fondo}} - ND)^2}{N_p - 1} \quad , \quad \text{para } N_p \geq 100$$

- Ahora bien, como ya se analizó antes, el ruido total s_{TOTAL} de la escena estará influenciado principalmente por tres fuentes de error: s_{BASE} (ruido de lectura-base), s_{PSN} (ruido de disparo) y s_{PRNU} (ruido de patrón); cada una de ellas dominando,

respectivamente, en rangos bajos, medios y altos de respuesta. Entonces, tendremos que $s_{ND}^2 \equiv s_{TOTAL}^2 = s_{BASE}^2 + s_{PSN}^2 + s_{PRNU}^2$. Pero $s_{PSN} = \sqrt{n_{pe}}$, y como definimos la constante de conversión optoelectrónica K en unidades fotoelectrones (e^-)/nivel digital (ND), nos queda simplemente, sin hacer referencia al comportamiento electrónico interno de la cámara CCD, que

Ecuación 2.33

$$\text{como } s_{PSN} [e^-] = \sqrt{n_{pe}} \quad \text{y} \quad K = \frac{\text{fotoelectrones} \left[\frac{e^-}{ND} \right]}{\text{nivel digital} \left[ND \right]} \Rightarrow$$

$$K \cdot s_{PSN} [ND] = \sqrt{K \cdot ND} \Rightarrow K = \frac{ND}{s_{PSN}^2} \cong \frac{ND}{s_{ND}^2}$$

$$\Rightarrow \log s_{PSN} = -\frac{1}{2} \log K + \frac{1}{2} \log ND \Rightarrow \text{si } s_{PSN} = 1 \Rightarrow ND = K \text{ (método gráfico)}$$

Es decir, prolongando gráficamente los niveles digitales intermedios dispuestos linealmente en una escala log-log con respecto a su incertidumbre, el corte de esa línea sobre el eje de abscisas (ND) nos proporciona directamente el valor numérico de la constante de conversión optoelectrónica K [e^-/ND].

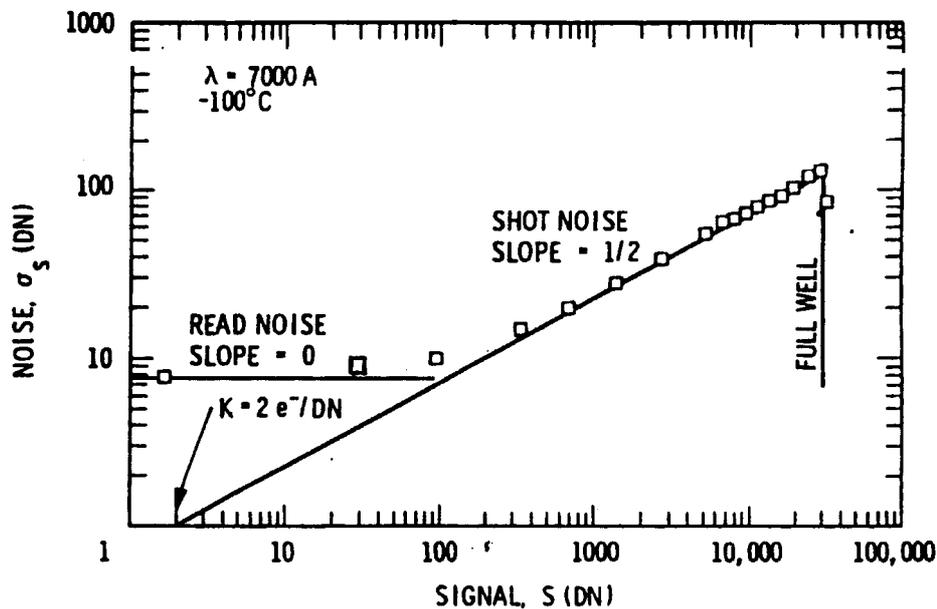


Figure 2. Photon Transfer curve with pixel nonuniformity removed.

Figura 2.27: Gráfica original del método gráfico del cálculo de la constante de conversión optoelectrónica K para una cámara científica CCD con 15 bits de nivel de digitalización, para $\lambda = 700$ nm sobre el dispositivo CCD enfriado a -100 °C (Janesick, Klaasen, Elliott 1987; Janesick 1999).

De la gráfica superior, podemos concluir que la constante de conversión optoelectrónica K debe ser dependiente de la longitud de onda λ , o sea, mejor considerar K_λ . Además, las condiciones ambientales, la presión atmosférica y sobre todo la temperatura ambiente (T), deben tenerse muy en cuenta. O sea, que aunque el ruido de corriente oscura en versión optoelectrónica n_{OSCURA} no dependerá de la longitud de onda de la radiación incidente, sí que dependerá de λ en formato digital: como se resta una imagen fija de fondo para cada imagen monocromática λ , como tenemos K_λ , resulta que la incertidumbre o ruido (espectral) de corriente oscura está siempre presente como $ND_{OSCURA \lambda} = K_\lambda \cdot n_{OSCURA}$ para cada λ . Pero, por supuesto, esto no tendrá mucha importancia para dispositivos CCD enfriados, como los que utiliza Janesick y sus colaboradores en Astrofísica, pero sí para cámaras digitales convencionales de tipo multimedia como la nuestra que funciona en condiciones ambientales normales, a temperatura ambiente.

El ruido de lectura-base rlb (s_{BASE}) es el corte sobre el eje de ordenadas. En principio, esta fuente de error optoelectrónico lo asociamos a las características internas electrónicas del CCD y sus circuitos adyacentes por lo que parece obvio que, en versión optoelectrónica n_{BASE} no será dependiente de λ , pero sí en formato digital, por efecto de la constante de conversión K_λ : $rlb_\lambda \equiv ND_{BASE \lambda} = K_\lambda \cdot n_{BASE}$.

De la misma curva espectral de transferencia fotónica (PTSC) podemos extraer la *capacidad de pozo lleno* N_{pozo} (*full well*). Antes de descender bruscamente la incertidumbre total de los valores digitales por cercanía de la saturación, se alcanza el valor máximo de incertidumbre $s_{m\acute{a}x}$, valor que irá asociado a una respuesta digital $ND_{pozo} < ND_{m\acute{a}x} = 2^{bits} - 1$, entonces aplicando la constante de conversión K_λ , tenemos que

Ecuación 2.34

$$N_{pozo \lambda} = K_\lambda \cdot ND_{pozo \lambda} \quad , \quad s_{pozo \lambda} = K_\lambda \cdot s_{m\acute{a}x \lambda}$$

$$\Rightarrow SNR_{pozo \lambda} = 20 \cdot \log \left(\frac{N_{pozo \lambda}}{s_{pozo \lambda}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{ND_{pozo \lambda}}{s_{m\acute{a}x \lambda}} \right) \text{ en dB}$$

Trabajando con la representación gráfica incertidumbre vs. señal en versión optoelectrónica, con fotoelectrones, resulta que la incertidumbre o ruido total del sistema era

$$s_{TOTAL}^2 = s_{PSN}^2 + s_{OSCURA}^2 + s_{BASE}^2 + s_{PRNU}^2 + s_{ADC}^2$$

$$n_{TOTAL}^2 = n_{pe} + n_{OSCURA} + n_{BASE}^2 + (U n_{pe})^2 + \left(\frac{N_{pozo}}{2^{bits} \sqrt{12}} \right)^2$$

por lo que representando los datos espectrales como s_{ND}^2 a s_{TOTAL}^2 y ND a n_{pe} mediante la constante K , queda s_{TOTAL}^2 vs. n_{pe} , podemos aprovechar un ajuste de regresión lineal con un polinomio de orden 2 del estilo $y = y_0 + a \cdot x + b \cdot x^2$, donde $y \equiv s_{TOTAL}^2$, $x \equiv n_{pe}$, y las variables del ajuste son

Ecuación 2.35

$$y_0 = n_{BASE}^2 + n_{OSCURA} + \left(\frac{N_{pozo}}{2^{bits} \sqrt{12}} \right)^2 \Rightarrow n_{BASE} = \sqrt{y_0 - n_{OSCURA} - \left(\frac{N_{pozo}}{2^{bits} \sqrt{12}} \right)^2} \xrightarrow{K} ND_{BASE} = rlb$$

$$a = 1$$

$$b = U^2 \Rightarrow U = 100 \sqrt{b} (\%) \quad , \quad \forall \lambda$$

Respecto a los rangos dinámicos de entrada rd_E y de salida rd_S , no podemos presuponer que serán iguales para una cámara digital real, debido a la forma tipo S de OECSF, tal como ya sucedía en la fotodetección ideal. Sin embargo, para la cámara digital XYZ, rd_E y rd_S serían infinitos puesto que esta cámara digital no se saturaría nunca. Así pues, a priori, debido a la forma matemática de OECSF, tendríamos para la Fotografía Digital que

Ecuación 2.36

$$\text{si } OECSF_{\lambda k} \equiv \frac{ND_{\lambda k}}{2^{bits} - 1} = NDR_{\lambda k} = f_k(\lambda, H) \quad \text{siendo } k = R, G, B$$

$$\text{y } [OECSF_{\lambda k}]^{-1} = g_k(\lambda, NDR) \quad \text{su función inversa generalizada}$$

$$\Rightarrow \forall \lambda, \text{ canal - color } k :$$

$$rd_E = 20 \cdot \log \left(\frac{EEES}{EEER} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{g_k \left(\lambda, NDR = \frac{2^{bits} - 2}{2^{bits} - 1} \right)}{g_k \left(\lambda, NDR = \frac{1}{2^{bits} - 1} \right)} \right) [\text{dB}]$$

$$rd_S = 20 \cdot \log \left(\frac{N_{pozo}}{n_{BASE}} \right) [\text{dB}] < 20 \cdot \log \left(\frac{2^{bits} - 1}{rlb} \right)$$

Respecto a la relación señal-ruido SNR , ya se explicó que varía con la respuesta optoelectrónica, o con la exposición incidente si consideramos la OECSF. Por tanto, en general se cumplirá siempre que $SNR < rd_S$, puesto que ésta última es una cota superior teórica. Ahora bien, si buscamos una tabla estándar de parámetros técnicos sobre el funcionamiento radiométrico-colorimétrico y optoelectrónico de cualquier cámara digital, no tiene sentido tabular SNR para cada canal RGB, cada λ y cada valor digital ND o valor optoelectrónico n_{pe} . Por lo pronto, habiendo determinado el escalado absoluto balanceado al espectro equi-energético en las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} , podríamos seleccionar las longitudes de onda λ_R, λ_G y λ_B que correspondan con los máximos relativos de cada función de igualación $\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{g}}, \bar{\mathbf{b}}$. Por ejemplo, para la "cámara digital" XYZ tenemos $\lambda_R = 600$ nm, $\lambda_G = 560$ nm y $\lambda_B = 450$ nm. Y, quizás, como respuesta optoelectrónica más representativa debemos considerar al valor de pozo lleno N_{pozo} , o su equivalente digital relativo NDR_{pozo} , o incluso a la mitad de estos valores. Por tanto, los parámetros técnicos a tabular quedan sensiblemente reducidos pero, como veremos a continuación, al seleccionar la terna λ_R, λ_G y λ_B y NDR_{pozo} , podríamos recuperar completamente el resto de los datos para cada longitud de onda, nivel digital y canal-color. Así, respecto a SNR , un valor fidedigno del significado real de este parámetro sería tabular dicho valor SNR para N_{pozo} , para λ_R, λ_G y λ_B :

Ecuación 2.37

$$\text{para } \lambda_R, \lambda_G, \lambda_B : SNR_{\text{pozo}} = 20 \cdot \log \left(\frac{N_{\text{pozo}}}{S_{\text{pozo}}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{ND_{\text{pozo}}}{S_{\text{máx}}} \right) [\text{dB}]$$

Nos resta expresar las variables radiométricas-optoelectrónicas responsividad espectral (espectro de acción), eficiencia cuántica, QE y DQE , y la ganancia incremental $IGSF$ según todo el formalismo que hemos desarrollado originalmente a lo largo de este apartado. Es decir, al seleccionar la terna espectral λ_R, λ_G y λ_B y la respuesta optoelectrónica N_{pozo} podemos expresar las dos primeras variables anteriores de forma relativa como:

Ecuación 2.38

$$\begin{aligned} \text{responsividad espectral } r_k(\lambda, H): \quad \tilde{r}_{\lambda k} &= \frac{r_k(\lambda, H)}{r_k(\lambda_k, H)} = \frac{f_k(\lambda, H)}{f_k(\lambda_k, H)} \\ &\rightarrow \text{curva } \lambda \text{ vs. } \tilde{r}_k \in [0, 1] \text{ para } H_{\text{pozo}_k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{espectro de acción } a_k(\lambda, NDR): \quad \tilde{a}_{\lambda k} &= \frac{a_k(\lambda, NDR)}{a_k(\lambda_k, NDR)} = \frac{g_k(\lambda, NDR)}{g_k(\lambda_k, NDR)} \\ &\rightarrow \text{curva } \lambda \text{ vs. } \tilde{a}_k \in [0, 1] \text{ para } NDR_{\text{pozo}_k} \end{aligned}$$

aunque recordemos que $a_k(\lambda, NDR) = r_k(\lambda, H)$ en unidad física $[J^{-1}]$ porque $f_k^{-1}(\lambda, H) = g_k(\lambda, NDR)$

Respecto a la eficiencia cuántica espectral QE , quedaría como:

Ecuación 2.39

$$\begin{aligned} \text{como } QE_{\lambda k} &= 100 \frac{hc}{\lambda} (2^{\text{bits}} - 1) K_{\lambda} \cdot r_{\lambda k} [\%] \Rightarrow \tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda k} = \frac{QE_{\lambda k}}{QE_{\lambda_k}} = \frac{\lambda_k}{\lambda} \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda_k}} \tilde{r}_{\lambda k} = \frac{\lambda_k}{\lambda} \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda_k}} \tilde{a}_{\lambda k} \\ &\rightarrow \text{curva } \tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda k} \text{ vs. } \lambda \text{ para } H_{\text{pozo}_k} (NDR_{\text{pozo}_k}) \end{aligned}$$

Ahora bien, la deducción de la eficiencia cuántica relativa de detección para DQE no es tan directa. Primero, debemos deducir DQE de forma absoluta en Fotografía Digital a partir de la definición dada en la fotodetección ideal:

Ecuación 2.40

$$DQE \equiv \varepsilon = \frac{\sigma_q^2}{\sigma_l^2 \left(\frac{\partial q}{\partial l} \right)^2} \quad \text{en fotodetección ideal}$$

$$\Rightarrow \forall \lambda: DQE = \frac{\sigma_{PSN}^2}{\sigma_{pe}^2 \left(\frac{\partial n_v}{\partial n_{pe}} \right)^2} = \frac{\sigma_{PSN}^2}{\sigma_{pe}^2} \left(\frac{\partial n_{pe}}{\partial n_v} \right)^2 = \frac{n_v}{n_{TOTAL}^2} IGSF^2$$

$$\text{con } \sigma_{pe}^2 \equiv n_{TOTAL}^2 = n_{pe} + n_{OSCURA} + n_{BASE}^2 + (U n_{pe})^2 + \left(\frac{N_{pozo}}{2^{bits} \sqrt{12}} \right)^2$$

Por lo que DQE de forma relativa quedaría como:

Ecuación 2.41

$$\tilde{D}\tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda k} = \frac{DQE_{\lambda k}}{DQE_{\lambda_k}} = \frac{\lambda}{\lambda_k} \frac{n_{TOTAL_k}^2}{n_{TOTAL}^2} \left(\frac{IGSF}{IGSF_k} \right)^2$$

$$\rightarrow \text{curva } \tilde{D}\tilde{Q}\tilde{E}_{\lambda k} \text{ vs. } \lambda \text{ para } H_{pozo_k} (NDR_{pozo_k})$$

Respecto a la función espectral de ganancia incremental (IGSF), las deducciones para Fotografía Digital de las expresiones unidades absolutas y relativas son bastante más sencillas:

Ecuación 2.42

$$IGSF \equiv g = \frac{\partial l}{\partial q}$$

$$\Rightarrow \forall \lambda, \text{ canal-color } k = R, G, B:$$

$$IGSF = \frac{\partial n_{pe}}{\partial n_v} = \frac{\partial}{\partial n_v} \left[(2^{bits} - 1) K \cdot NDR \right] = \frac{\partial}{\partial n_v} \left[(2^{bits} - 1) K \cdot f \left(\lambda, \frac{hc}{\lambda} n_v \right) \right]$$

$$\Rightarrow IGSF_{\lambda k} = (2^{bits} - 1) K_{\lambda k} \cdot \frac{\partial}{\partial n_v} \left[f_k \left(\lambda, \frac{hc}{\lambda} n_v \right) \right] = (2^{bits} - 1) K_{\lambda k} \cdot f'_k \left(\frac{hc}{\lambda} n_v \right)$$

$$\Rightarrow \tilde{I}\tilde{G}\tilde{S}\tilde{F}_{\lambda k} = \frac{IGSF_{\lambda k}}{IGSF_{\lambda_k}} = \left(\frac{K_{\lambda k}}{K_{\lambda_k}} \right) \frac{\frac{\partial}{\partial n_v} \left[f_k \left(\lambda, \frac{hc}{\lambda} n_v \right) \right]}{\frac{\partial}{\partial n_v} \left[f_k \left(\lambda_k, \frac{hc}{\lambda_k} n_v \right) \right]} = \left(\frac{K_{\lambda k}}{K_{\lambda_k}} \right) \frac{f'_k \left(\frac{hc}{\lambda} n_v \right)}{f'_k \left(\frac{hc}{\lambda_k} n_v \right)}$$

$$\rightarrow \text{curva } \tilde{I}\tilde{G}\tilde{S}\tilde{F}_{\lambda k} \text{ vs. } \lambda \text{ para } H_{pozo_k} (NDR_{pozo_k})$$

En resumen, bajo unas condiciones ambientales controladas de temperatura y presión atmosférica, a partir de una serie de imágenes-escena completamente monocromáticas capturadas con exposiciones uniformes H , y para cada uno de los k canales-color (generalmente RGB, $k = 3$) sensibles a esa longitud de onda λ , la caracterización espectral-radiométrica-colorimétrica y optoelectrónica de una cámara digital cualquiera ha de pasar por la obtención de los parámetros-curva siguientes de acuerdo con el orden algorítmico siguiente (Fig. 2.28):

1. Comportamiento espectral-radiométrico-colorimétrico: $(\lambda \times k)$ OECSFs: $f_k(\lambda, H)$ y $g_k(\lambda, NDR)$
 - a) k curvas 3-D $r_k(\lambda, H)$
 - b) k curvas 3-D $a_k(\lambda, NDR)$
 - c) k longitudes de onda de responsividad/acción máxima para los k canales-color $\rightarrow \lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$
 - d) k valores sobre el balance bruto de blanco ideal \mathbf{E}
 - e) k pseudo-funciones de igualación (\mathbf{T}_{RGB})
 - f) $(\lambda \times k)$ $EEES$ y $(\lambda \times k)$ $EEER \Rightarrow (\lambda \times k)$ rd_E , pero seleccionaremos k $rd_E(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$

2. Comportamiento optoelectrónico: $(\lambda \times k)$ curvas PTSCs (ND vs. s_{ND}), pero seleccionaremos k curvas $PTSC(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$
 - a) $(\lambda \times k)$ constantes de conversión optoelectrónica $K \rightarrow K_{\lambda_R}, K_{\lambda_G}, K_{\lambda_B}$
 - b) $(\lambda \times k)$ capacidades optoelectrónicas de pozo-lleño $N_{pozo} \rightarrow N_{pozo\lambda_R}, N_{pozo\lambda_G}, N_{pozo\lambda_B}$
 - c) k incertidumbres optoelectrónicas de digitalización $n_{ADC} \rightarrow n_{ADC\lambda_R}, n_{ADC\lambda_G}, n_{ADC\lambda_B}$
 - d) $(\lambda \times k)$ fracciones de patrón fijo o no-uniformidad U (%) $\rightarrow U_{\lambda_R}, U_{\lambda_G}, U_{\lambda_B}$
 - e) k incertidumbres optoelectrónicas de lectura-base $n_{BASE} \Rightarrow (\lambda \times k)$ rd_s , pero seleccionaremos k $rd_s(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$
 - f) $(\lambda \times k)$ curvas n_{pe} vs. $n_{TOTAL} \rightarrow k$ curvas n_{pe} vs. $n_{TOTAL}(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$
 - g) $(\lambda \times k)$ curvas n_{pe} vs. $SNR \rightarrow k$ curvas n_{pe} vs. $SNR(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$
 - h) $(\lambda \times k)$ curvas H vs. $SNR \rightarrow k$ curvas H vs. $SNR(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$
 - i) $(\lambda \times k)$ curvas NDR vs. $SNR \rightarrow k$ curvas NDR vs. $SNR(\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B)$

3. Comportamiento fotodetector global
 - a) $(\lambda \times k)$ curvas $QE \rightarrow k$ curvas λ vs. $\tilde{Q}\tilde{E}$ con $H_{pozo\lambda_R}, H_{pozo\lambda_G}, H_{pozo\lambda_B}$
 - b) $(\lambda \times k)$ curvas $DQE \rightarrow k$ curvas λ vs. $\tilde{D}\tilde{Q}\tilde{E}$ con $H_{pozo\lambda_R}, H_{pozo\lambda_G}, H_{pozo\lambda_B}$
 - c) $(\lambda \times k)$ curvas $IGSF \rightarrow k$ curvas λ vs. $\tilde{I}\tilde{G}\tilde{S}\tilde{F}$ con $H_{pozo\lambda_R}, H_{pozo\lambda_G}, H_{pozo\lambda_B}$

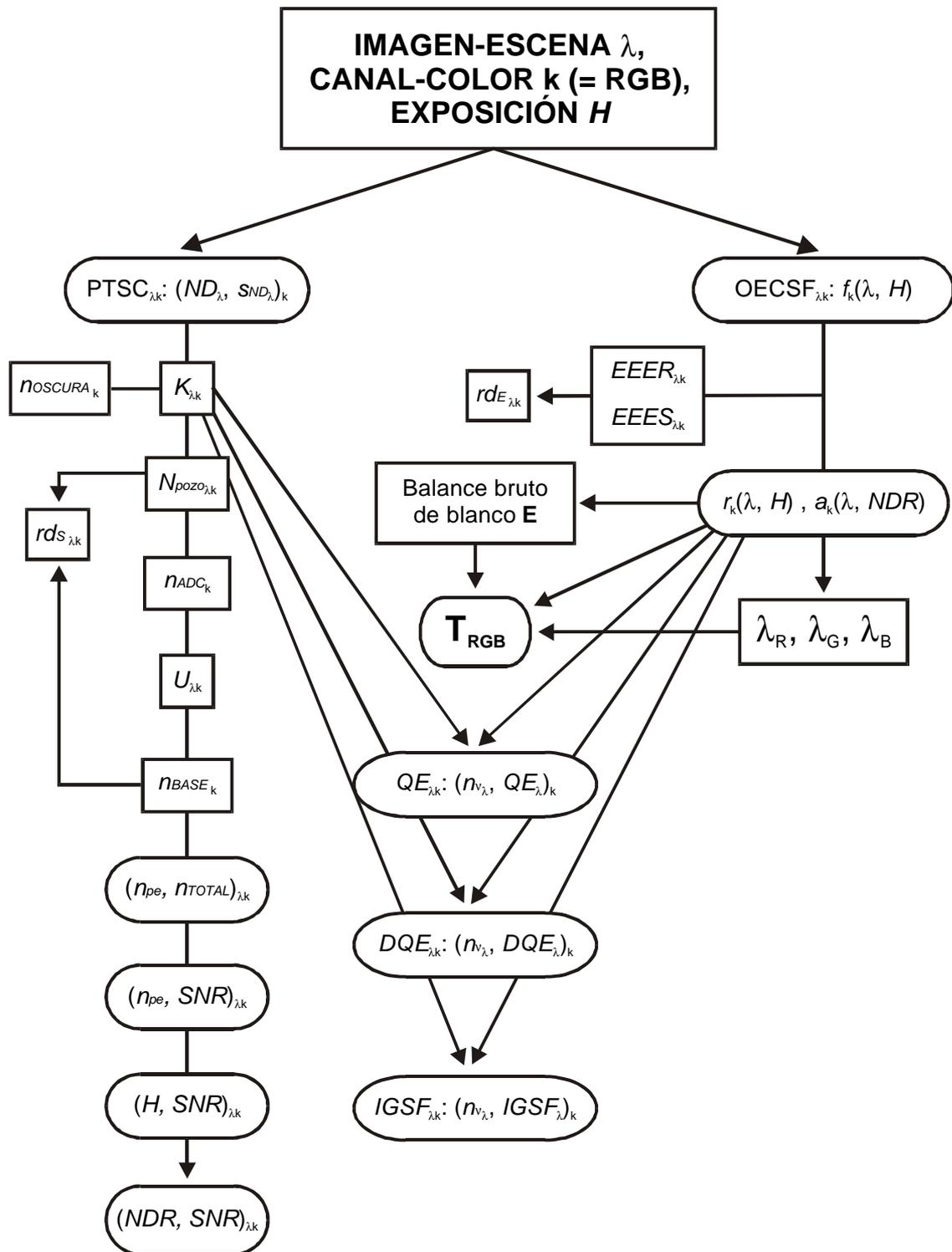


Figura 2.28: Esquema algorítmico sobre la propuesta de caracterización espectral radiométrico-colorimétrica y optoelectrónica para una cámara digital cualquiera.

Por otro lado, y para terminar esta sección clave para la resolución posterior de esta tesis doctoral, podemos considerar simultáneamente los parámetros funcionales macroscópicos importantes en el

diseño/construcción o selección de una cámara digital científica, presta para convertirse en un instrumento de medida del color tras su caracterización espectralradiométrica-colorimétrica y optoelectrónica. Nos referimos a que, dentro de la diversidad de modelos, prestaciones de cámaras CCD en el mercado actual, es evidente que un grupo muy reducido, con prestaciones muy específicas, será el elegido para optimizar tal transformación de un dispositivo multimedia en un instrumento científico. La tabla siguiente recoge ese club selecto de cámaras digitales actuales, donde ya resulta evidente que nuestro equipo de trabajo, cámara CCD-RGB Sony DXC-930P y la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850, no pertenece a él. Otra cosa diferente, y que forma parte de la resolución de esta tesis doctoral, será analizar su comportamiento espectralradiométrico-colorimétrico y optoelectrónico para demostrar su nivel de calidad dentro de los grupos funcionales existentes de calidad: gama alta, media y baja. Esto además, puede conllevar explícitamente la definición funcional absoluta entre los límites de estos grupos de cámaras digitales.

Tabla 2.10: Cámara CCD-RGB ideal para caracterizarla y perfilarla como un tele-colorímetro absoluto.

ASPECTO TÉCNICO	TIPO / CONFIGURACIÓN
Sensor imagen CCD	Hyper HAD con barrido progresivo en modo IT
Elemento de imagen	1024 (H) x 1024 (V) con píxel cuadrado (15x15 μm)
Registro del color	Filtros estáticos RGB, teniendo en cuenta la óptica de entrada
Objetivo fotográfico	Telecéntrico, de enfoque variable, con N ajustable micrométricamente
Obturador	En modo desactivado, pero con opción a ser variable
Ganancia interna de vídeo G_1	a 0 dB, con opción a ser variable
Balance de blanco electrónico	No existe
Nivel de pedestal	No existe
Nivel de detalle	No existe
Modo de integración CCD	FRM (cuadro)
Gamma de compensación CRT	No existe
Convertor analógico-digital $C_{A/D}$	A 12 bits (supuestamente lineal), sin offset ni gain
Salida cromática	R / G / B en formato analógico/digital

2.3 Aspectos técnicos en la estandarización internacional de la Fotografía Digital

Una vez que hemos presentado ya en las secciones previas los aspectos generales colorimétricos y optoelectrónicos referentes al control del color en Fotografía Digital, aportando a veces de forma original algunas variaciones que se extenderán más adelante, nos resta presentar cuáles son los aspectos técnicos referentes a la caracterización colorimétrica de cámaras digitales en organizaciones internacionales de estandarización. Aunque las secciones anteriores se han desarrollado extensamente, algunos aspectos de la bibliografía especializada sobre el campo de acción de esta tesis doctoral aparecen y se desarrollan exclusivamente en el ámbito de la estandarización internacional. Por tanto, parece necesario dedicar la última parte de este capítulo a los aspectos más específicos sobre el control del color en Fotografía Digital. Así, en parte, podremos justificar más adelante que algunas aportaciones de este trabajo mejorarían significativamente, a nuestro entender, algunos aspectos colorimétricos y optoelectrónicos desarrollados en las normativas internacionales siguientes.

Vimos en el capítulo anterior que la problemática de la Tecnología del Color, de los Sistemas de Gestión del Color, es el espacio de color dependiente del dispositivo multimedia y los problemas derivados de la reproducción cruzada del color. Si cada fabricante de cualquier tipo de dispositivo multimedia –escáner, cámara digital, monitor CRT, pantalla LCD, impresora de chorro de tinta, impresora láser a color, etc– y cada fabricante de hardware y software –sistema operativo, aplicación informática de diseño gráfico y tratamiento digital de imágenes, etc– usara su propio espacio de representación del color, entonces la operabilidad funcional de controlar el color de esta forma sería muy reducida. Para evitar cualquier imprevisto de incompatibilidad ante la realidad del "sistema abierto" de los equipos multimedia profesionales y caseros, parece imprescindible cierta coordinación técnica entre al menos todos los principales fabricantes anteriores. De esto surgió en 1993 el denominado Consorcio Internacional del Color (*International Color Consortium - ICC*), formado inicialmente por los grupos siguientes:

1. Vendedores de plataformas (hardware): Apple, Sun, Silicon Graphics
2. Vendedores de programas (software): Microsoft, Adobe, Taligent
3. Vendedores de películas fotográficas y afines: Kodak, Agfa
4. Instituciones: Instituto de Investigación de Artes Gráficas de Alemania (FOGRA), como coordinador.

Por otro lado, estos problemas de coordinación técnica no son nada nuevos, si consideramos otros campos tecnológicos, para las principales organizaciones internacionales sobre estandarización: ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) e ITU (*International Telecommunication Union*). ISO es responsable de la estandarización de todos los campos técnicos y tecnológicos, excepto la ingeniería eléctrica y electrónica, la cual es competencia de IEC. Sin embargo, es importante remarcar que los estándares regulados internacionalmente son responsabilidad de ITU, la cual se organiza y se gobierna bajo los auspicios de la Naciones Unidas (ONU), y sus estándares son administrados por los gobiernos y tratados gubernamentales, a diferencia de entre empresas de los sectores tecnológicos, como lo hacen los estándares de ISO e IEC. En particular, a partir de la sede central de ISO, se expanden y se controlan las aplicaciones de los estándares mediante los organismos nacionales

de estandarización: ANSI para Estados Unidos, DIN para Alemania, BSI para Reino Unido, UNE para España, etc.

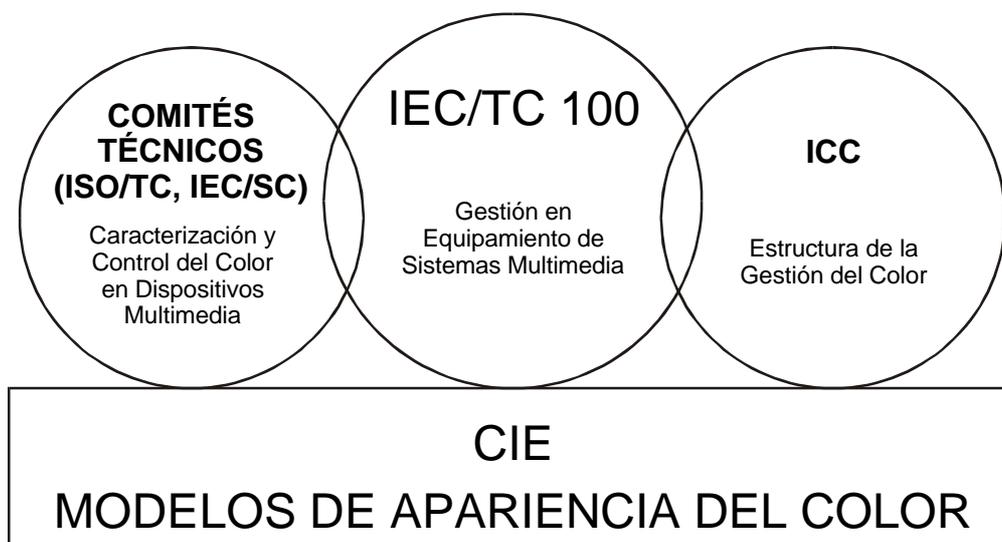


Figura 2.29: Esquema donde se muestran las interrelaciones administrativas y científicas entre las principales organizaciones internacionales de estandarización de la Tecnología del Color.

El grupo consejero técnico de coordinación ISO/IEC denominado JTAG2 (*ISO/IEC Joint Technical Advisory Group 2*) es el responsable de proporcionar enlaces y coordinación entre aquellos comités internacionales de estandarización técnica sobre Tecnología de la Imagen (*Imaging Science*), en el que también se incluye la Tecnología del Color (Fig. 2.29). La forma de actuar de este grupo coordinador durante la última década ha sido la de promover y coordinar reuniones de carácter técnico entre las diferentes organizaciones internacionales de estandarización, grupos de expertos y científicos de renombre en los campos de la Visión y Color, como los miembros de los comités técnicos de CIE y representantes de las principales empresas dedicadas a este campo tecnológico. Los objetivos de estos encuentros técnicos que todavía perduran con cierta regularidad, aunque ya en algunos aspectos en estado de gran avance de coordinación, son:

1. "Compartir información de contenido técnico y establecer proyectos que involucren la caracterización o definición del color de las imágenes".
2. "Identificar áreas donde existan o se propongan enfoques que son divergentes o iniciar una discusión hacia la resolución".
3. "Identificar áreas que requieran conocimientos o tecnologías nuevas, y recomendar las actividades necesarias de CIE, la industria y otros grupos de estandarización para conseguir soluciones".

Existen tres categorías de estandarización basadas en la estandarización colorimétrica básica (según CIE) y que, por tanto, delimitan las relaciones entre las organizaciones ISO, IEC, CIE e ICC (Fig. 2.29). Son las siguientes:

Estandarización de la Fotografía digital

1. Estandarización orientada sobre el control del color propio de los dispositivos.
2. Estandarización orientada sobre la caracterización del equipamiento, la cual será necesaria para la gestión del color de los sistemas multimedia.
3. Estandarización para proporcionar esquemas comunes para la gestión global del color.

El comité técnico IEC/TC100 (*Equipamiento y sistemas en el campo del sonido, vídeo e ingeniería visual*) con el proyecto internacional PT 61966: *Medida y gestión del color en equipos multimedia* (IEC 1999), es el coordinador de esta gran tarea de estandarización de las nuevas tecnologías multimedia. La caracterización y el control del color en los dispositivos multimedia –escáneres, cámaras, pantallas de visualización e impresoras– es tarea de algunos comités técnicos de ISO y sub-comités de IEC. Por ejemplo, ISO/TC42 es el comité técnico sobre Fotografía Fotoquímica (clásica) y Digital, mientras que ISO/TC130 controla la Tecnología de las Artes Gráficas (Martínez-Verdú 1999). Dentro del campo más específico de la Fotografía Digital –escáneres y cámaras–, las normativas técnicas (Tabla 2.11) abarcan desde aspectos estrictamente de normalización lingüística hasta puramente tecnológicos (ISO/TC42 2001; PIMA 2001). Dado el carácter multidisciplinar de la Fotografía Digital, y sobre todo la caracterización colorimétrica de dispositivos de captura, los comités técnicos ISO/TC42 WG18 (*Electronic Still Picture Imaging*) e ISO/TC130 WG3 (*Prepress Digital Data Exchange*) se han unido formando el comité técnico JWG20, encargado exclusivamente de la reproducción del color, por lo que resulta de gran interés para esta tesis doctoral todos los aspectos de trabajo que desarrollen.

Tabla 2.11: Normativas internacionales sobre Fotografía Digital.

ISO 12331	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Terminology</i>
ISO 14524	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs)</i>
ISO 15739	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Noise measurements</i>
ISO 12232	<i>Photography–Electronic still-picture cameras– Determination of ISO speed</i>
ISO 12233	<i>Photography–Electronic still-picture cameras– Resolution measurements</i>
ISO 17321	<i>Graphic Technology and Photography– Colour characterisation of digital still cameras (DSCs)</i>
IEC 61966-9	<i>Digital cameras</i>
ISO 12234-1	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Removable memory, Part 1: Basic removable memory reference model</i>
ISO 12234-2	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Removable memory, Part 2: Image data format - TIFF/EP</i>
ISO 12234-3	<i>Photography–Electronic still-picture cameras–Removable memory, Part 3: Design rule for camera file system (DCF)</i>
ISO 15740	<i>Photography–Electronic still-picture cameras– Picture Transfer Protocol (PTP) for Digital Still Photography Devices</i>

Aunque el núcleo de estudio de esta tesis doctoral es ISO 17321, parte de lo desarrollado en este estándar se apoya en normativas previas, sobretodo en ISO 14524, por lo que hemos optado por presentar, a veces muy brevemente, cada una de las normativas internacionales referentes a Fotografía Digital. De esta forma, introduciremos nomenclatura técnica que seguiremos más adelante, como complemento de la desarrollada en las secciones anteriores.

2.3.1 Sobre terminología

Aunque cada normativa técnica presenta siempre un listado de definiciones y nomenclaturas a utilizar, ISO 12231 es el compendio de todos estos listados, donde es evidente que parte de estas definiciones y nomenclaturas son comunes en algunas normativas. Por eso, cuando lo creamos conveniente, remarcaremos en lo que sigue el carácter normativo de algunas de las variables que usaremos ahora y más adelante en la resolución de esta tesis doctoral.

2.3.2 Sobre sensibilidad fotográfica

ISO 14524 (Funciones de conversión optoelectrónica), ISO 15739 (Ruido) e ISO 12232 (Velocidad de captura) son una extensión aplicada de los conocimientos aprehendidos en Fotografía Fotoquímica (clásica). Como la normativa base es la primera, y puesto que también se usará en los aspectos de reproducción del color, hemos optado por presentar un ejemplo numérico de cámara digital donde ejecutaremos parte de los aspectos que se desarrollan conjuntamente en estas tres normativas.

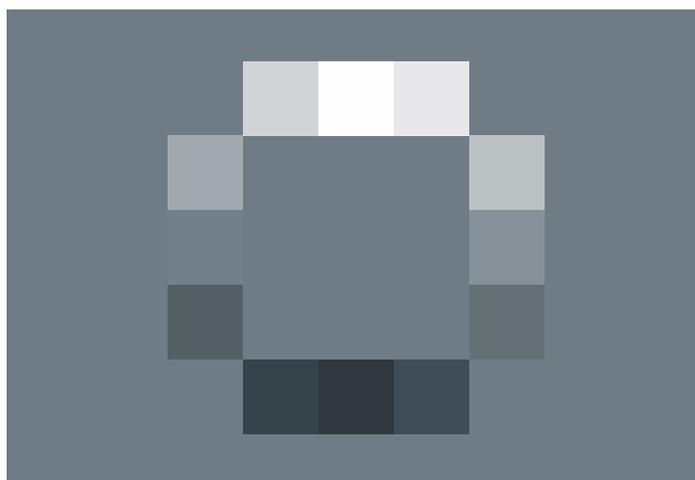


Figura 2.30: Carta de grises utilizada en la normativa ISO 14524.

ISO 14524 propone un método de medida de la función de conversión optoelectrónica (OECF), de carácter análogo a la curva característica o corrección gamma para cámaras TV y a la curva "H&D" o "DlogH" en Fotografía Fotoquímica. OECF indica la relación entre una entrada energética y la respuesta asociada (digital) del dispositivo de captura. La entrada energética referente a la luz siempre se presenta en formato fotométrico, nunca radiométrico. Es decir, si se opta por la opción "camera OECF", la variable independiente debe ser $\log L$ (cd/m^2); si se opta por "focal plane OECF", debe ser $\log H$ ($\text{lx}\cdot\text{s}$). En ambos casos, se parte de una carta-test de captura compuesta por colores grises de claridad variable (Fig. 2.30), la cual puede generarse mediante varios métodos. Aunque se puede representar indistintamente "camera OECF" o "focal plane OECF", la primera depende de la escena, de la distribución espacial de los colores y otros efectos como el de difusión (*flare*). En cambio, la segunda es característica del dispositivo de

captura, de ahí que se proponga también un método alternativo de obtención de "focal plane OECF" a partir de las luminancias de los grises de la carta: si se ha comprobado previamente que las muestras de la carta emiten lambertianamente, la iluminación E (lx) incidente en el plano focal fotosensible es directamente proporcional a la luminancia L de la muestra e inversamente proporcional a la apertura relativa efectiva N' del objetivo fotográfico.

Ecuación 2.43

$$E = 0.65 \frac{L}{N'^2}, \text{ siendo } N' = N(1 + m_{\text{OBJETIVO}})$$

El ejemplo gráfico que mostramos (Fig. 2.31) es el mismo que propone la normativa, en el que debe constar entre otras cosas el tipo de balance de blanco que se fija, la cromaticidad de la fuente luminosa y la clase de series de exposición que se ejecuta, si variando el tiempo de exposición t ("time scale exposure series") o la apertura relativa N ("illuminance scale exposure series").

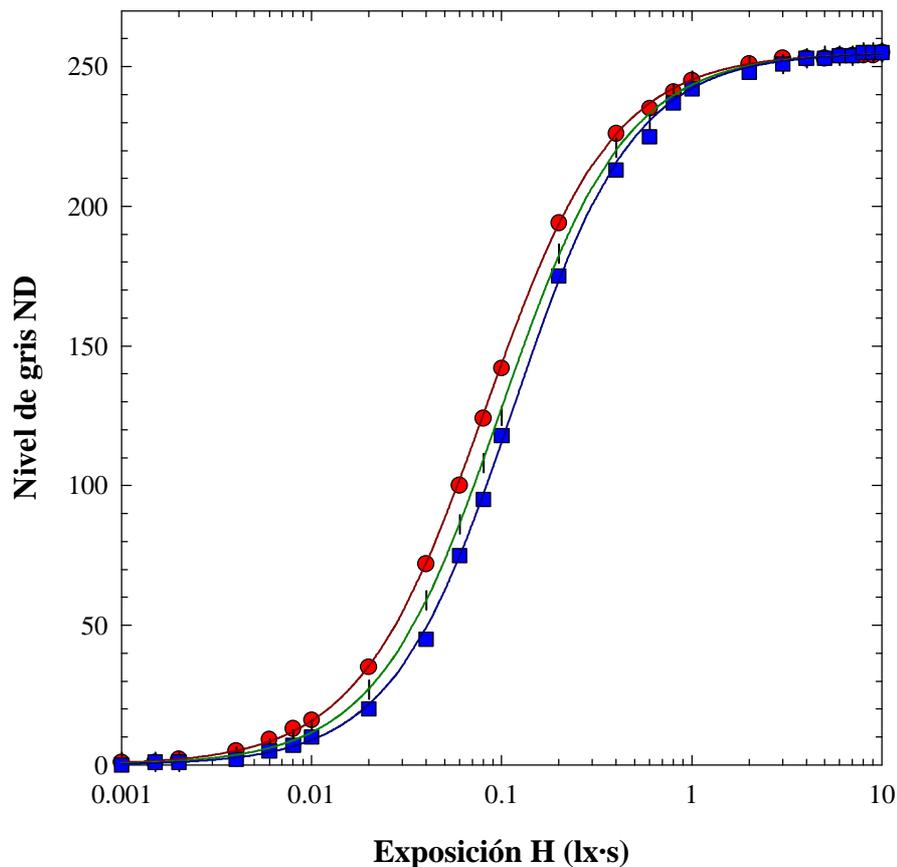


Figura 2.31: Funciones de conversión optoelectrónica (OECFs) de un dispositivo típico de captura según la normativa ISO 14524.

Antes de proseguir con la presentación de estas normativas, es necesario poner de relieve las observaciones siguientes:

1. OECF no es un parámetro de caracterización espectral de un dispositivo de captura (escáner, cámara), sino de caracterización fotométrica. Por tanto, no es lo mismo el concepto espectralradiométrico OECSF (Ec. 2.31) que OECF. El primero parte del concepto general de irradiancia fotónica $n_v(\lambda)$ (Ec. 2.11) (Holst 1998) o su equivalente macroscópico $H(\lambda)$ (Ec. 2.15), mientras que el segundo se basa en una aproximación fotométrica. Por lo tanto, sería interesante obtener una relación directa entre OECSF y OECF.
2. ISO 14524 hace hincapié en separar los resultados obtenidos según el tipo de serie de exposición que se sigue. Esto indica que dan por supuesto que no se obtendrían los mismos resultados si se alterna entre el tiempo de exposición t y la apertura relativa N . O sea, que se da por sentado que no se verifica la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital.

ISO 15739 es un método de aproximación a lo desarrollado sobre ruido optoelectrónico en secciones anteriores (Holst 1998; Janesick 2001). Separa directamente el ruido digital de captura en dos componentes. El ruido de patrón fijo, representa las variaciones sistemáticas que son consistentes en cada exposición. En cambio, el ruido temporal representa las variaciones aleatorias que engloba la corriente oscura, el ruido de disparo de fotones, el procesamiento analógico de la señal y la cuantización. Por tanto, el ruido temporal de una imagen capturada varía de una a otra. La carta de colores es una variante de la ya usada en ISO 14524 (Fig. 2.30). El algoritmo estadístico que se desarrolla para calcular tales tipos de ruidos digitales y otras variables como SNR y el rango dinámico de entrada rd_E es el siguiente:

1. Captar un mínimo de 8 imágenes de la misma escena con una extensión mínima de 64x64 píxels;
2. Calcular la imagen promedio y la desviación estándar s_{ave} de la imagen promedio;
3. Calcular la diferencia de cada imagen inicial respecto a la imagen promedio;
4. Calcular la desviación estándar s_{diffj} de cada una de las imágenes restadas anteriores ($j = 1, \dots, 8$);
5. Calcular el valor medio s_{diff} de todas las desviaciones estándar de las imágenes restadas anteriores;
6. Calcular la desviación estándar s_{temp} del ruido temporal a partir de $s_{temp} = \sqrt{\frac{8}{7}} s_{diff}$;
7. Calcular la desviación estándar s_{fp} del ruido de patrón fijo a partir de $s_{fp} = \sqrt{s_{ave}^2 - \frac{1}{7} s_{diff}^2}$.

ISO 12232 es una aplicación directa del formalismo utilizado en Fotografía Fotoquímica respecto a la velocidad ISO dentro de un rango de sobreexposición y de infraexposición ("ISO speed latitude"). La presentación de este parámetro es del tipo ISO xxx D/T, ISO yyy-zzz D/T. El valor "xxx" está relacionado con $SNR = 40$ y con el valor asociado de exposición. El valor "yyy" está relacionado con la exposición H_{sat} que satura el dispositivo de captura. El valor "zzz" está relacionado con $SNR = 10$ y con el

valor asociado de exposición. Las etiquetas "D" (luz diurna, azulada) o "T" (luz incandescente, amarillenta) indican la cromaticidad de la fuente luminosa utilizada, la cual debe elegirse en concordancia con el balance de blanco fijado previamente. El algoritmo de cálculo de la velocidad ISO se realiza a partir de dos sub-algoritmos, uno sobre la saturación, y el otro sobre el ruido:

Ecuación 2.44

\forall canal – color :

$$S_{sat} = \frac{78}{H_{sat}}, \text{ con } H_{sat} = OECF^{-1} \left(NDR = \frac{2^{bits} - 2}{2^{bits} - 1} \right)$$

$$S_{noise_x} = \frac{10}{H_{SNR_x}}, \text{ con } H_{SNR_x} = \frac{SNR_x \cdot s(ND_H)}{IGF(H)}, x = 10, 40$$

donde H_{sat} es la exposición asociada al nivel digital previo a la saturación, H_{SNR} son las exposiciones asociadas a $SNR = 10$ y 40 , $s(ND_H)$ es el ruido digital asociado a un nivel de exposición H , e, IGF es la función de ganancia incremental, obtenida a partir de la primera derivada de OECF.

Esto significa que se necesita del conocimiento de las OECFs de ISO 14524, en particular de una expresión matemática común de ajuste para las OECFs. En este ejemplo, tales curvas pueden ajustarse con la función logística (o de Naka-Rushton en el ámbito de Óptica Fisiológica):

Ecuación 2.45

$$ND_R = 255 \frac{H^{1.292}}{H^{1.292} + (0.0820)^{1.292}}$$

$$ND_G = 255 \frac{H^{1.322}}{H^{1.322} + (0.0995)^{1.322}}$$

$$ND_B = 255 \frac{H^{1.359}}{H^{1.359} + (0.1147)^{1.359}}$$

Ya que necesitamos invertir y derivar las OECFs para hallar para cada canal-color H_{sat} e IGF , partiremos del modelo general de función logística para aplicar cuando convenga las ecuaciones siguientes:

Ecuación 2.46

\forall canal – color :

$$OECF \equiv ND = (2^{bits} - 1) \frac{H^n}{H^n + s^n}, \text{ con } s : \text{ constante de semisaturación y } n : \text{ ganancia (contraste)}$$

$$\Rightarrow OECF^{-1} \equiv H = s \left[\frac{ND}{(2^{bits} - 1) - ND} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{y} \quad OECF' = \frac{\partial OECF}{\partial H} = (2^{bits} - 1) \frac{n s^n H^{n-1}}{(H^n + s^n)^2}$$

La representación gráfica de IGF (Fig. 2.32) se ajusta a la forma que ya se presentó en la primera sección de este apartado (Fig. 2.2). Por otro lado, ya que necesitamos también los resultados experimentales de ISO 15739 para calcular SNR , vamos a suponer un modelo sencillo de ruido digital, donde el ruido de patrón fijo (sistemático) sea pequeño -0.69 para el canal R, 0.79 para el canal G y 0.86 para el canal B— y el ruido temporal (aleatorio) varíe linealmente con el nivel digital ND : pendiente $1/70$ para el canal R, $1/63$ para el canal G y $1/78$ para el canal B. Con estos datos simulados, podemos calcular SNR y representarla (Fig. 2.33) en función de la exposición H .

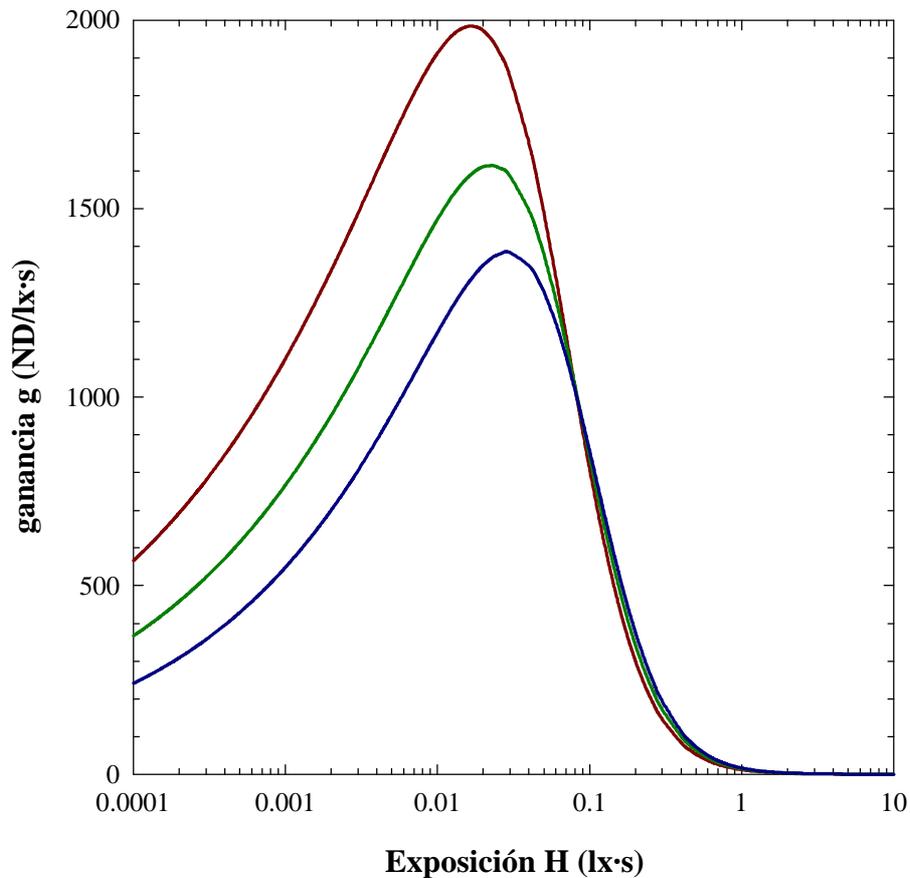


Figura 2.32: Funciones de ganancia incremental (IGFs) correspondientes al ejemplo de dispositivo de captura.

Así pues, aplicando consecuentemente esta simulación, nuestro ejemplo de dispositivo de captura presenta los resultados siguientes, donde el nivel mínimo de iluminación E_{\min} (lx) se obtendría a partir de:

Ecuación 2.47

$$E_{\min} = 270 \frac{N_{\min}^2}{S_{noise10} \cdot t} \quad , \text{tomando } N_{\min} = 1.4 \text{ y } t = 20 \text{ ms}$$

Tabla 2.12: Resultados numéricos del ejemplo aplicando ISO 12232.

CANAL	H_{sat} (lx·s)	H (SNR = 10)	H (SNR = 40)	$S_{noise = 10}$	$S_{noise = 40}$	S_{sat}	E_{min} (lx)
R	5.96	4.276 e-3	0.01602	2339	624	13	11
G	6.56	6.071 e-3	0.02349	1647	426	12	16
B	6.74	7.877 e-3	0.02762	1270	362	12	21

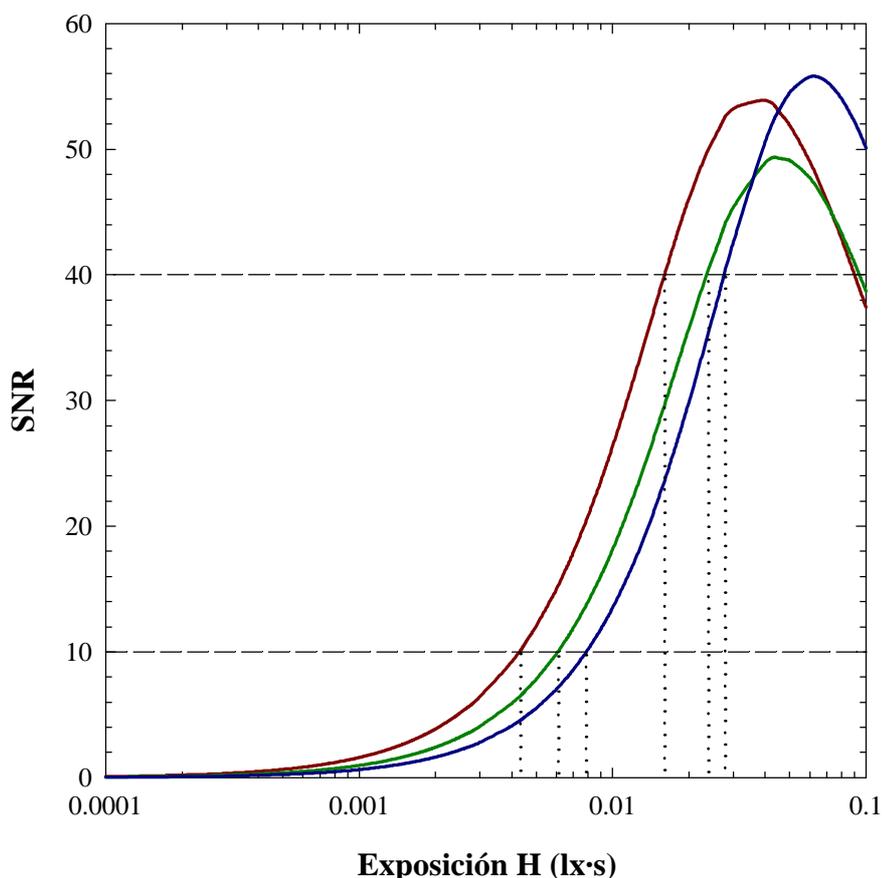


Figura 2.33: SNRs calculadas para el ejemplo de dispositivo de captura.

Finalmente, considerando los niveles de referencia nos queda que el canal R presenta una sensibilidad fotográfica expresada como ISO 500 D e ISO 16–2000 D, el canal G como ISO 400 D e ISO 12–1600 D, y el canal B como ISO 320 D e ISO 12–1250 D.

ISO 516 (*Camera shutters – Timing*) se centra en la obturación temporal en la captura de una imagen. Depende de WG4 (*Mechanical Elements for Photography*), no WG18 (*Electronic Still Picture Imaging*), por lo que básicamente es una revisión de la normativa ISO 516:1986 aplicada a los obturadores electromecánicos ("electro-mechanical shutter"), no para los obturadores electrónicos ("electronically shuttered sensor") acoplados al plano focal fotosensible, que son los más habituales, como el que se aplica

en la cámara electrónica de trabajo Sony DXC-930P (Tabla 2.8). Tampoco se hace referencia en ningún lugar a lo largo del texto del problema de la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital, dando por supuesto que ésta no se verifica bajo ninguna circunstancia, ni variando la apertura relativa N ni el tiempo de obturación t .

2.3.3 Sobre resolución espacial

ISO 12233 es la normativa encargada de estudiar y proponer métodos de medida de la resolución espacial que poseen las cámaras digitales, lo cual involucra la obtención de parámetros ópticos como el límite de resolución (a un contraste especificado) y la MTF, pero no presenta nada referente a la inhomogeneidad espacial intrínseca de respuesta de los planos focales fotosensores. La carta-test de referencia se muestra a continuación.

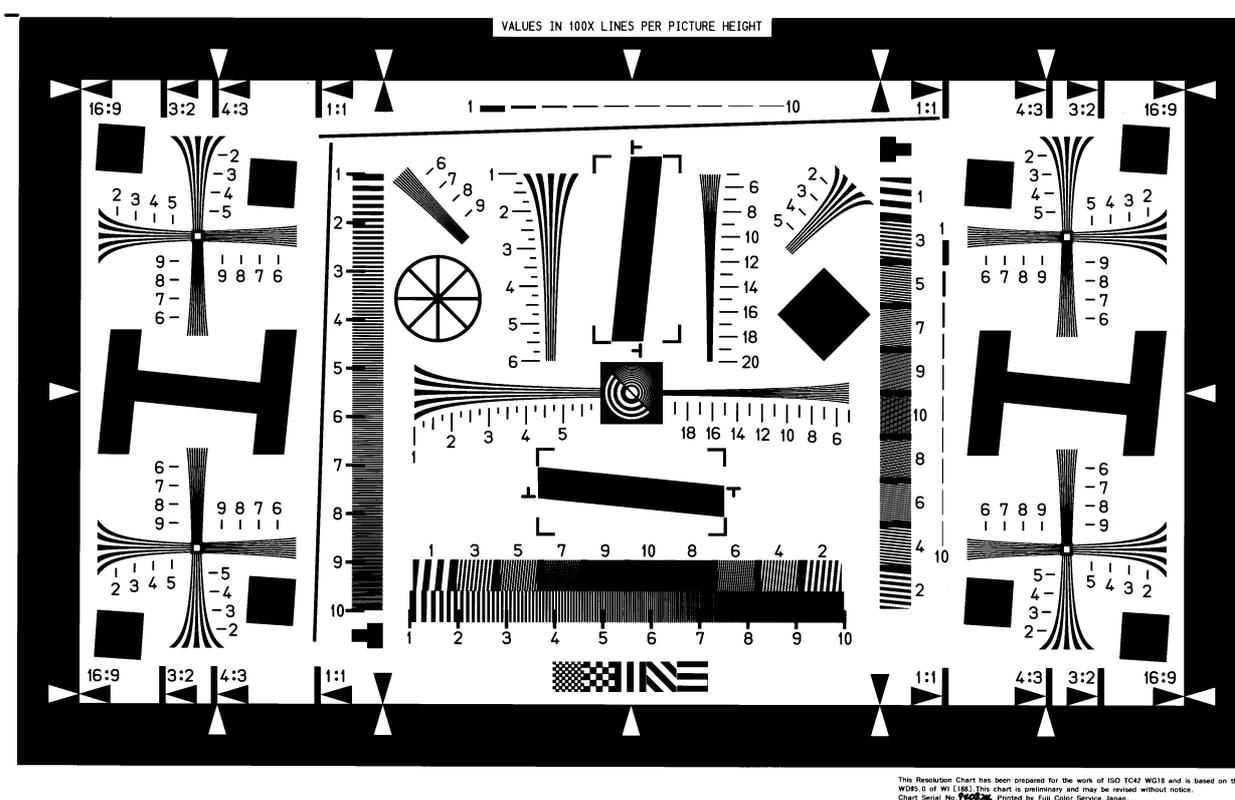


Figura 2.34: Test de captura para las medidas de resolución espacial según ISO 12233.

2.3.4 Sobre reproducción del color

ISO 17321 es una normativa sobre la que se viene trabajando desde 1997 sin que, hasta el momento, se haya aprobado un borrador definitivo. Ha pasado por diferentes fases pero, al fin, parece ser que la normativa se dividirá en varias partes debido al papel que juegan los dispositivos de captura (escáneres,

cámaras) en la cadena de la reproducción del color de una imagen digital. Esta cadena puede esquematizarse del modo siguiente (Fig. 2.35):

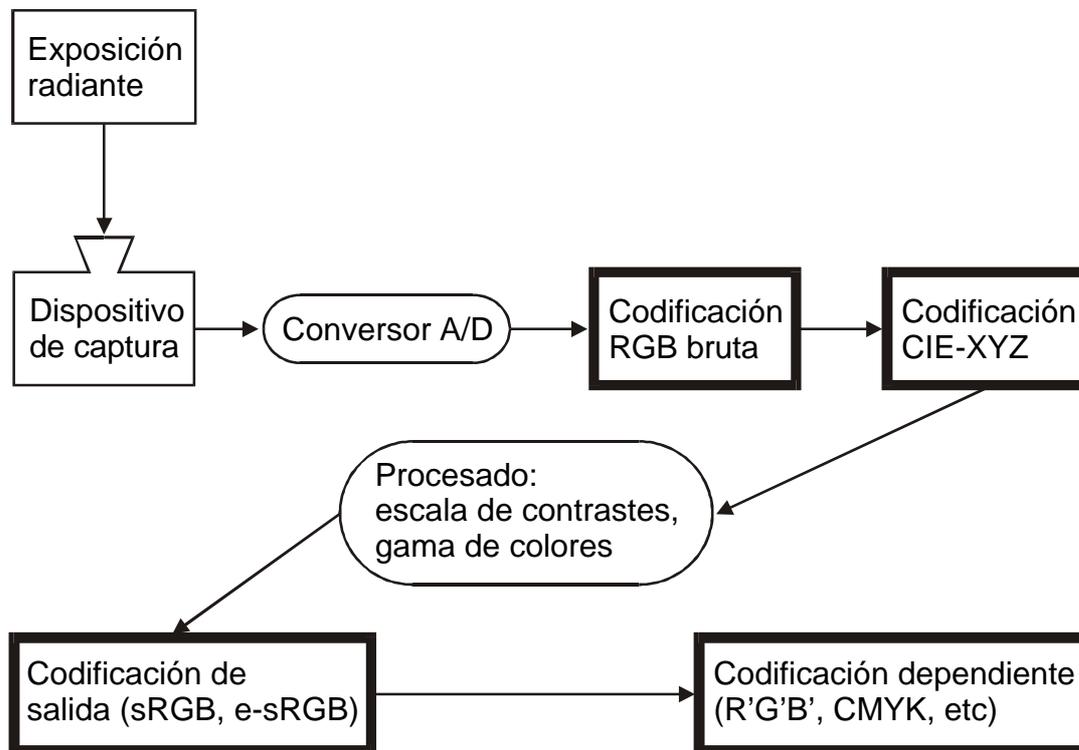


Figura 2.35: Cadena de reproducción del color de una imagen digital y su representación en espacios diferentes de representación de color.

1. Codificación RGB bruta de la escena ("raw DSC image data"): datos producidos por o internamente en un dispositivo de captura que no han sido procesados, excepto la conversión analógica-digital y los pasos opcionales siguientes:
 - linealización (si fuera necesario);
 - sustracción del ruido (corriente oscura y patrón fijo);
 - corrección de campo plano ("shading & sensitivity correction");
 - sustracción de efectos de difusión ("flare removal"), dependiente del tipo de escena;
 - balance de blanco (que el "blanco adoptado" tenga los niveles digitales idénticos);
 - reconstrucción del color del píxel (para sensores del tipo "stripe color filter", Fig. 2.17).

Casi todos estos aspectos ya han sido anteriormente analizados al plantear el control general de la codificación RGB bruta de nuestra cámara digital de trabajo. En todo caso, es necesario aclarar algunos de estos pasos opcionales. La corrección de campo plano se aplica directamente al utilizar un objetivo fotográfico telecéntrico, como el que lleva acoplado nuestra cámara. Los efectos de difusión pueden contrarrestarse captando estímulos-color completamente aislados, ya porque sean estímulos luminosos en un entorno completamente oscuro, o porque, en el caso de una carta de colores, se tapan el resto de colores con una cartulina negra excepto el que interesa. El concepto de balance de blanco de la normativa

se ajusta al criterio convencional ya explicado, pero merece especial atención la distinción entre los términos "blanco adoptado" y "blanco adaptado" de la normativa. El primero se corresponde con un área de la escena que, gracias a su distribución espectral de potencia radiante, se considera o se ajusta como blanco difusor perfecto, por lo que el dispositivo de captura lo codificará como $R = G = B$. Por otro lado, el blanco adaptado se corresponde con el área de la escena que el observador patrón CIE-1931 XYZ considera como el blanco difusor perfecto, y, éste no es otro que el estímulo equienergético $E = [1, 1, \dots, 1]^t$. Por tanto, como la normativa hace referencia a un control de balance de blanco "adoptado", no "adaptado", debemos tener presente este detalle puesto que esto significa que el balance de blanco equienergético, o estrictamente colorimétrico, no se ha tenido en cuenta en toda la normativa.

2. Codificación colorimétrica de la escena ("scene-referred image data"): tal como se registraría a través de un tele-espectrocolorímetro o calculando paso a paso los valores triestímulo XYZ, absolutos o relativos, a partir del conocimiento la distribución espectral de potencia radiante de la fuente luminosa y las reflectancias (transmitancias) espectrales de los objetos que componen la escena. La transformación $RGB \leftrightarrow XYZ$ es el perfil colorimétrico bruto del dispositivo de captura, del que se presentaron varias alternativas (§ 1.2.3.2). Tal como advertimos en el capítulo anterior, si las funciones de igualación T_{RGB} no son combinaciones lineales exactas de T_{XYZ} (condición de Luther), se producirán desviaciones sistemáticas de color que, en todo caso, y ya posteriormente al proceso bruto de reproducción del color, se podrán compensar mediante métodos matemáticos, ya no colorimétricos, con mayor o menor eficacia.

Los borradores actuales ISO 17321-1 e ISO-17321-2 se centran exclusivamente en estos dos aspectos como evaluación del nivel de reproducción del color de una cámara digital. El primero presenta un método de obtención de las curvas de sensibilidad espectral relativa, y por ende de T_{RGB} , utilizando la codificación RGB bruta de la escena. El segundo, tras aplicar un perfil colorimétrico determinado (pero con preferencia por el método WPPLS), presenta un algoritmo de análisis de los errores colorimétricos sistemáticos de una escena tipificada ("DSC colour analysis error index"). Ambos procedimientos se analizarán detenidamente a continuación.

3. Procesado posterior para adecuar características tonales y gama de colores en cualquier modelo de reproducción ("color rendering"). El rango dinámico de contrastes (OECF) y la gama de colores reproducibles de un dispositivo de captura no coinciden con los propios de un monitor CRT o de una impresora de chorro de tinta. Aunque tales características se ajustan bastante a las propiedades del espacio fundamental sRGB (Ec. 2.48), representativo para una pantalla ideal de visualización, parece necesario extender este enfoque para permitir que, por ejemplo, las capacidades tonales de una impresora se aprovechen mejor de forma que el resultado impreso no se vea limitado por el rango dinámico de contrastes del dispositivo de captura o de la pantalla de visualización, sino por el sistema de impresión. Esta "ampliación" del espacio sRGB, denotada ya como e-sRGB (PIMA 7667; Spaulding, Woolfe, Giorgianni 2000), se debatió recientemente en el Simposio de Expertos de la CIE sobre Tecnología del Color en la 8th Color Imaging Conference, en Scottsdale (Arizona) durante los primeros días de noviembre de 2000.

Ecuación 2.48

\forall canal – color $k = R, G, B$

$$\text{nivel digital } ND_k = \begin{cases} (2^{\text{bits}} - 1)12.92 ENLF_k & , \text{ si } ENLF_k \leq 0.00313 \\ (2^{\text{bits}} - 1)[1.055 ENLF_k^{1/2.4} - 0.055] & , \text{ si } ENLF_k > 0.00313 \end{cases}$$

siendo $ENLF_k = \frac{L_k}{L_w}$ el factor de luminancia neutro equivalente o valor triestímulo relativo sRGB,

$$\text{verificándose } \mathbf{t}'_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ENLF_R \\ ENLF_G \\ ENLF_B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{D65} \cdot \mathbf{t}'_{sRGB} \quad \text{bajo iluminante D65}$$

- Codificación dependiente del dispositivo de salida ("image representation in device space"): una vez que se han reconvertido los datos colorimétricos relativos de la imagen a un espacio de color común de salida ("output-referred image data"), ya sea en sRGB o e-sRGB, el sistema de gestión del color aplicaría vía el espacio ICC-PCS (ICC 2000) el correspondiente perfil colorimétrico del dispositivo multimedia de salida (R'G'B' para un monitor CRT, CMYK para una impresora de chorro de tinta, etc) utilizando el espacio de color ROMM-RGB (PIMA 7666; Spaulding, Woolfe, Giorgianni 2000).

2.3.4.1 ISO 17321-1, Método A: obtención de las curvas de sensibilidad espectral relativa

El método consiste básicamente en registrar las respuestas del dispositivo de captura frente a estímulos monocromáticos. Parte también de la suposición de que no se verifica la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital, por lo que es un método híbrido, espectralradiométrico y fotométrico, al necesitar de la información obtenida en ISO 15424, o sea de las funciones de conversión optoelectrónica (OECF). El dispositivo experimental consta de una fuente luminosa de distribución de potencia espectral relativa conocida, un monocromador, una superficie transparente y lambertiana, un radiómetro y el dispositivo de captura en cuestión, con todos los parámetros de configuración ajustados para trabajar con el modo de reproducción bruta de color. El procedimiento experimental consiste para cada canal-color en capturar imágenes monocromáticas desde 360 nm hasta 1100 nm³, en incrementos de 10 nm. Simultáneamente, cada imagen monocromática se le asocia la radiancia relativa $L_{e\lambda}/L_{e\lambda_{\max}}$ obtenida a partir del radiómetro. Por otra parte, se supone que se ha obtenido previamente las OECFs para cada canal-color según ISO 15424. Con todos estos datos y los grupos de imágenes monocromáticas, la obtención de las sensibilidades espectrales relativas del dispositivo de captura sigue los pasos siguientes:

³ El rango de longitudes de onda se extiende hasta en infrarrojo próximo (1100 nm) como precaución de que el dispositivo de captura no presentara un filtro de corte IR.

- Aplicar $OECF^{-1}$ para linealizar en cada canal-color las respuestas brutas en cada longitud de onda: $OECF_k^{-1}(ND_{k\lambda})$. Las unidades métricas de esta conversión son, por tanto, en lux·s, no en J, puesto que OECF es una función fotométrica no radiométrica.
- Aplicar para cada canal-color el logaritmo de las respuestas linealizadas: $\log [OECF_k^{-1}(ND_{k\lambda})]$. Promediar en un bloque de 64x64 píxeles del centro de la imagen los valores logaritmizados para determinar las respuestas brutas logarítmicas en cada longitud de onda: $\text{mean}\{\log [OECF_k^{-1}(ND_{k\lambda})]\}$. Aplicar el antilogaritmo de los valores promediados para obtener las respuestas brutas linealizadas en cada longitud de onda: $\text{antilog}(\text{mean}\{\log [OECF_k^{-1}(ND_{k\lambda})]\})$.
- Calcular para cada canal-color la sensibilidad espectral relativa dividiendo la respuesta bruta linealizada por la radiancia relativa correspondiente:

Ecuación 2.49

$$s_k(\lambda) = \frac{10^{-\text{mean}\{\log [OECF_k^{-1}(ND_{k\lambda})]\}}}{L_{e\lambda} / L_{e\lambda, \max}}$$

- Las respuestas espectrales para cada canal-color en cada longitud de onda, o sea, las funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} del dispositivo de captura, se crean multiplicando las sensibilidades espectrales relativas por la distribución espectral de potencia relativa $SPD(\lambda)$ del iluminante que interese considerar (si, por ejemplo, el dispositivo de captura proporciona directamente un sistema de iluminación).

Ecuación 2.50

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{10^{-\text{mean}\{\log [OECF_R^{-1}(ND_{R\lambda})]\}}}{L_{e\lambda} / L_{e\lambda, \max}} SPD(\lambda)$$

$$\bar{g}(\lambda) = \frac{10^{-\text{mean}\{\log [OECF_G^{-1}(ND_{G\lambda})]\}}}{L_{e\lambda} / L_{e\lambda, \max}} SPD(\lambda)$$

$$\bar{b}(\lambda) = \frac{10^{-\text{mean}\{\log [OECF_B^{-1}(ND_{B\lambda})]\}}}{L_{e\lambda} / L_{e\lambda, \max}} SPD(\lambda)$$

- Normalizar las funciones de igualación por una constante tal que la suma de las respuestas espectrales por cada canal-color sea igual a 1: $\bar{\mathbf{r}}^t \cdot \mathbf{E} = 1$, $\bar{\mathbf{g}}^t \cdot \mathbf{E} = 1$, $\bar{\mathbf{b}}^t \cdot \mathbf{E} = 1$. Esto significa imponer directamente un balance de blanco equienergético sin comprobarlo empíricamente.

Este método empírico es bastante similar al utilizado en la caracterización espectral de cámaras TV (EBU 1989) o las aplicadas en videoconferencia para Internet (IEC 61966-9). En principio, el formalismo base de obtención de la sensibilidad espectral relativa, como el cociente entre la respuesta y la radiancia relativa, es el mismo. No obstante, algunos aspectos metodológicos del montaje experimental y del procesado de los datos impiden una comparación directa entre estas tres normativas. Por ejemplo, en el caso de la normativa IEC 61966-9, las sensibilidades espectrales relativas presentan valores negativos en algunas longitudes de onda, lo cual no tiene sentido colorimétrico ya que deben ser totalmente positivas. Por tanto, esto indica directamente que, o el procesado de las respuestas no se efectúa a nivel bruto, o que el procesado posterior de los datos incurre en algún error colorimétrico grave.

Por otro lado, ISO 17321-1 ya no hace referencia directa a otros métodos matemáticos alternativos de caracterización espectral de dispositivos de captura. En concreto, no plantea el método clásico de estimación de Wiener (Pratt, Mancill 1975; Pratt 1991; Vora, et al. 1997), ni otros que utilizan métodos de regresión condicionada (Chang, Chen 2000; Finlayson, Hordley, Hubel 1998; Hardeberg, et al. 1999) o de proyecciones de conjuntos convexos (POCS) (Sharma, Trussell 1996; Sharma 2000) para estimar las sensibilidades espectrales relativas a partir del conocimiento de la escena, de las reflectancias espectrales de un conjunto acertado de colores. Este enfoque matemático se puede plantear fácilmente aplicando el formalismo vectorial a la colorimetría de un dispositivo de captura. Tal como ya hemos expresado anteriormente, si la matriz \mathbf{K} representa un conjunto de estímulos-color \mathbf{b} dispuestos en columnas, o más sencillamente de reflectancias espectrales $\rho(\lambda)$ (como las de la carta ColorChecker), podemos escribir que las respuestas de un dispositivo de captura son $\mathbf{t}_{\text{RGB}} = \mathbf{T}_{\text{RGB}} \cdot \mathbf{K}$. Por tanto, la primera estimación de las funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} es aplicar el método de la matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose:

Ecuación 2.51

$$\mathbf{T}_{\text{RGB}} = (\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^t)^{-1} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{t}_{\text{RGB}}^t$$

En el caso de dispositivos reales de captura, con la presencia de ruido, esta estimación deja mucho que desear (Chang, Chen 2000; Hardeberg, Brettel, Schmitt 1998; Hardeberg, et al. 1999). Esto mejora bastante, pero resulta altamente dependiente de la elección de los estímulos-color, si se enfoca el problema algebraico planteando el método de componentes principales (PE) al aplicar la descomposición del valor singular (SVD) a la matriz \mathbf{K} .

En conclusión, opinamos que ISO 17321-1 ha optado acertadamente por el método espectralradiométrico en vez de estimaciones matemáticas altamente dependientes de información espectral previa. Aun así, creemos que, siendo el método propuesto el mejor de los disponibles hasta el momento, carece de un enfoque espectralradiométrico estricto puesto que incluye las OECFs, de enfoque claramente fotométrico, en el procesado de los datos espectrales. Esto es también consecuencia de no considerar a priori la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital puesto que no se confía inicialmente en valores espectralradiométricos de exposición H , es decir, en J y no en lux·s. Como veremos más adelante, esto supone también que no se está aplicando correctamente el principio subyacente en la responsividad espectral o en el espectro de acción de un dispositivo de captura.

2.3.4.2 ISO 17321-2, Método B: estimación colorimétrica de una escena tipificada

Aunque las ideas o algoritmos no están todavía presentes en un documento oficial, existen documentos previos elaborados por algunos miembros del JWG20 donde se muestran las tendencias investigadoras de esta sub-normativa.

El primer trabajo (Holm, Tastl, Hordley 2000) se centra en el análisis de la mejor opción de minimización del error colorimétrico para la obtención del perfil colorimétrico \mathbf{M} , la matriz de cambio $\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}$, considerando las opciones duales de conocimiento espectral previo o no de la escena, es decir, las opciones algorítmicas de máxima ignorancia (MaxIgLS, perfil \mathbf{M}_1 , Ec. 1.44) o mínima ignorancia (No-MaxIgLS, perfil \mathbf{M}_7 , Ec.1.51). Para ello, tal como ya adelantamos al final del primer capítulo, analizan qué tipos de espacios de color y métricas asociadas –CIE-XYZ, CIE- $L^*a^*b^*$, ITU RGB, RIMM, etc– mejoran el ajuste con el correspondiente criterio de minimización psicofísica (XYZ, RGB) o psicométrica ($L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$). El método que siguen consiste básicamente en pre-procesar (linealización vía OECF según ISO 15424, balance de blanco, etc) una imagen natural RGB capturada realmente para transformarla a código sRGB una vez aplicado el tipo de perfil colorimétrico, de forma que, supuestamente, está optimizada para poder visualizarla en un monitor CRT previamente caracterizado colorimétricamente. Con este preámbulo, se realizan experimentos psicofísicos de comparación doble y forzada de imágenes sRGB, tal como queda según el dispositivo de captura con respecto a la que se estima directamente con el observador patrón CIE-XYZ. De forma sorprendente, los autores llegan finalmente a la conclusión de que necesitan un nuevo espacio de color asociado con su correspondiente métrica (fórmula de diferencia de color) para correlacionar los resultados psicofísicos con imágenes asociadas a ningún conocimiento espectral previo de ellas. Con los experimentos psicofísicos asociados al conocimiento espectral previo de las imágenes, los autores concluyen que las métricas psicométricas (CIE- $L^*a^*b^*$, ΔE_{94} , etc) son las mejores, lo cual aprobamos.

A partir de esta descripción compacta del trabajo, hemos encontrado varios problemas conceptuales, que hemos intentado solucionar en este trabajo original:

- En primer lugar, y creemos que es el aspecto clave de todo, no queda claro y demostrado que el pre-proceso de los datos RGB brutos sea el adecuado para formalizar el perfil colorimétrico. Por ejemplo, se usan las funciones inversas de las OECF que, como ya vimos son fotométricas, como deben ser, pero no obtenidas a partir de medidas espectralradiométricas, las que se consideran de "máxima ignorancia". Por tanto, interesa establecer de nuevo un nexo entre las OECSFs, propias de la caracterización espectral, con las OECFs, exclusivas de la caracterización fotométrica y colorimétrica. Del mismo modo, no existe un criterio homogéneo de balance de blanco ideal, puesto que se prefiere aplicarlo según el blanco adoptado al adaptado (equienergético \mathbf{E}). Por otro lado, en ningún momento se plantea o se sugiere un escalado o balance de adaptación luminosa, tal como se opera realmente con la apertura relativa N , más bien se escala de forma manual y preconcebida, nunca siguiendo una pauta algorítmica bien establecida.

- En segundo lugar, si la herramienta final de evaluación colorimétrica se basa en experimentos psicofísicos de comparación de imágenes para un grupo de observadores sobre un monitor CRT, existen algunos aspectos conceptuales discutibles:
 - Si se utilizan observadores humanos para juzgar imágenes complejas sobre una pantalla, estaremos analizando juicios de apariencia de colores relacionados cuando, supuestamente, la cámara digital captura y codifica el color de manera aislada. ¿No sería más correcto utilizar un espacio psicométrico y psicocuantitativo de color asociado a la percepción de colores aislados, basado en el espacio psicofísico CIE-XYZ?
 - ¿Por qué utilizar un soporte o medio RGB, con limitaciones de gama de colores reproducibles, para hacer juicios de apariencia, ya sean incorrectamente de imágenes complejas como correctamente de estímulos aislados? ¿No sería más correcto partir del espacio psicofísico CIE-XYZ, sin ninguna limitación de gama de colores, y aplicar posteriormente un algoritmo psicométrico y psicocuantitativo de apariencia de colores aislados para evaluar el nivel de reproducción del color del dispositivo de captura?
- Y, por último, aunque tiene sentido haber corroborado de nuevo que los mejores resultados se obtienen minimizando el error cuadrático medio basado en un espacio perceptualmente uniforme (CIE-L*a*b*), si ejecutamos este perfil colorimétrico perderemos la oportunidad de averiguar cómo el dispositivo de captura codifica a nivel bruto los estímulos visuales porque éste carece de una etapa psicométrica, en todo caso "psicofísica" o RGB aunque no coincida con la del sistema visual humano. Si elegimos una optimización perceptual o psicométrica del perfil colorimétrico perderemos toda oportunidad de analizar los errores sistemáticos de reproducción bruta del color porque al ejecutar el perfil ya los estaremos compensado. Por tanto, nunca podremos evaluar qué desviaciones colorimétricas comete a nivel bruto nuestro sistema al tener un conjunto de funciones de igualación que no son combinaciones lineales de las del observador patrón CIE.

El segundo trabajo (Hung 2000) plantea de nuevo un índice de calidad de reproducción del color, pero conlleva, a nuestro juicio, algunos errores conceptuales. El algoritmo pretende ser un "trasvase" del ya usado para evaluar el rendimiento en color de fuentes luminosas (CIE 13.3 1995; Martínez-Verdú, Pujol 2000). Se parte de una carta de colores \mathbf{K} , en este caso los 14 colores de CIE 13.3 (aunque se discute actualmente el diseño de una carta específica y más numerosa), y, conociendo las sensibilidades espectrales relativas (o funciones de igualación) \mathbf{T}_{RGB} de los canales-color, se calculan los valores triestímulo \mathbf{t}'_{RGB} por el método triestímulo habitual $\mathbf{t}_{\text{RGB}} = \mathbf{T}_{\text{RGB}} \cdot \mathbf{K}$; o bien, se parte de datos RGB realmente capturados. Simultáneamente, se calculan los valores triestímulo relativos \mathbf{t}'_{XYZ} . Sin tener en cuenta el balance de blanco ideal (o blanco adaptado) en las funciones de igualación, ni ningún escalado adecuado sobre los valores triestímulo \mathbf{t}_{RGB} o sobre los datos digitales RGB reales, se procede a la búsqueda del perfil colorimétrico \mathbf{M} mediante mínimos cuadrados entre los primeros 8 colores de la carta:

Ecuación 2.52

$$\hat{\mathbf{t}}'_{XYZ} = \mathbf{M} \mathbf{t}'_{RGB}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} \mathbf{B}^t (\mathbf{B} \mathbf{B}^t)^{-1}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_8 \\ Y_1 & \cdots & Y_8 \\ Z_1 & \cdots & Z_8 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} R_1 & \cdots & R_8 \\ G_1 & \cdots & G_8 \\ B_1 & \cdots & B_8 \end{bmatrix}$$

La comprobación del grado de exactitud entre \mathbf{t}'_{XYZ} y $\hat{\mathbf{t}}'_{XYZ}$ se trata con el mismo algoritmo original de CIE 13.3: como si de colores correspondientes se tratara, se aplica la transformación de adaptación cromática del algoritmo para, a continuación, evaluar el grado de exactitud con el algoritmo de diferencias de color basado en el espacio UCS-1964, ya en desuso salvo en esta normativa de la CIE. Al final, del mismo modo que en CIE 13.3, se propone el índice de rendimiento en color $R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$ y los promedios R_a (con los 8 primeros colores) y R_b (con los 14).

A nuestro juicio, existen, por tanto, varios aspectos conceptuales discutibles de este trabajo:

- En primer lugar, el mismo conjunto-entrenamiento de 8 colores se utiliza como conjunto-test para calcular R_i , con lo cual no se parte de la suposición de máxima ignorancia espectral, es decir, el perfil colorimétrico está condicionado al contenido colorimétrico de la escena, con lo cual los resultados no son extrapolables a un conjunto-test diferente del de entrenamiento, por ejemplo, calcular R_i por simulación y compararlo con una captura real RGB. ¿No sería mejor, pues, un perfil colorimétrico basado en la máxima ignorancia espectral de la escena para que fuera lo más versátil posible?
- En segundo lugar, como la simulación de \mathbf{t}'_{RGB} no tiene en cuenta el rango dinámico real de luminancias de la escena, algún grupo de colores se estimarán colorimétricamente peor que otros. Por ejemplo, si se opta por seleccionar niveles digitales RGB realmente capturados, la misma escena captada con niveles absolutos diferentes de iluminación proporcionará valores RGB diferentes que, como se insertan directamente en el método de mínimos cuadrados, conllevarán estimaciones colorimétricas \mathbf{t}'_{XYZ} diferentes de los colores de la escena cuando éstos siguen siendo esencialmente los mismos. ¿No sería, pues, más acertado incluir en el perfil colorimétrico un algoritmo de adaptación luminosa que estimara siempre colorimétricamente la escena a pesar de la variación del nivel absoluto de iluminación?
- Y, en tercer lugar, el uso de la transformación de adaptación cromática y la fórmula anticuada de diferencia de color está supeditado a la simulación de juicios humanos de apariencia de colores relacionados, nunca como colores aislados. ¿No sería, pues, más adecuado ejecutar en la segunda parte del algoritmo un modelo de apariencia de colores aislados junto con un algoritmo de evaluación de las desviaciones cromáticas que aparecerán?

En resumen, estas dos sub-normativas muestran mucho más interrogantes que respuestas cuando se pasa de simulaciones teóricas a capturas reales RGB de un dispositivo de captura. Creemos firmemente que los trabajos realizados hasta ahora arrastran varios errores conceptuales: el dispositivo de captura no debe porqué tener una curva de visibilidad idéntica a la del ser humano, y, codifica de manera aislada, nunca relacionada, con un balance de blanco adoptado siempre supeditado finalmente al balance de blanco ideal o adaptado. Y, de forma paralela, nunca se ha planteado hasta ahora una simulación más fidedigna de las variables que intervienen en una captura real RGB cuando el nivel absoluto de intensidad y la cromaticidad de la fuente luminosa. Por tanto, creemos concienzudamente, y así pretendemos demostrar a partir de los capítulos siguientes, que nuestro trabajo solucionará parte de los problemas planteados, con lo cual esperamos que en un futuro no muy lejano se incorpore como base metodológica de estas normativas sobre reproducción del color en Fotografía Digital.

2.3.5 Sobre almacenamiento de las imágenes registradas

Dada la popularidad de las cámaras digitales, existe una necesidad creciente de intercambiar imágenes entre cámaras y otros dispositivos para permitir que las imágenes captadas en una cámara se puedan visualizar sobre otra, o puedan transferirse a una impresora. ISO 12334 es la normativa internacional encargada de la creación de un entorno en el que los consumidores puedan combinar más libremente los periféricos asociados a una cámara digital e intercambiar más eficaz y eficientemente los diferentes formatos de imagen. Para conseguir este fin, esta normativa, subdividida en tres, especifica reglas sobre el almacenamiento, lectura y manipulación de los formatos de imagen y otros archivos relacionados que se usan en las cámaras digitales y dispositivos asociados (pantallas LCD, impresoras, etc). ISO 12234-1 se dedica a la especificación de un modelo básico de tarjeta de memoria sustituible. ISO 12234-2 se centra en la estructura del formato de archivo TIFF/EP (*Tagged Image Format File / Electronic Photography*), compatible con todos los softwares de manipulación de imágenes, donde se pretende dar cabida mediante etiquetas (*tags*) o variables a todos los aspectos que influyen en la formación de un espacio de color dependiente de un dispositivo de captura y en el perfil colorimétrico RGB ↔ sRGB: arquitectura de color, tipo de exposición, velocidades de captura, sensibilidades espectrales, iluminante de la escena, OECFs, etc. ISO 12234-3 se centra, por otro lado, en la especificación de un tipo de archivo (DCF), basado en varios formatos de archivos de imagen, apropiado para la transmisión y transferencia sobre dispositivos LCD acoplados a las cámaras, monitores e impresoras.

2.3.6 Sobre la interconexión con otros dispositivos multimedia

ISO 15740 proporciona un lenguaje común de comunicación para el intercambio de imágenes con y entre dispositivos de captura. Esto incluye la comunicación entre dispositivos de captura y ordenadores, impresoras y otros dispositivos multimedia. Presenta un protocolo de comunicación que sea transportable e independiente de la plataforma digital. El objetivo es, por tanto, permitir la implementación de este protocolo en una variedad de periféricos estandarizados de conexión y transferencia de datos digitales (USB, IEEE 1394, IrDA, etc).

Capítulo 3. Definición de la Tesis

En los capítulos anteriores, hemos centrado progresivamente el problema de la caracterización de un dispositivo de captura (escáner, cámara) como un instrumento de medida del color y las repercusiones que puede generar la resolución del mismo a nivel científico y tecnológico. En primer lugar, se ha presentado el contexto en el que se enmarca la medida del color, destacando sobretodo el formalismo vectorial básico en el que se relacionan los valores triestímulo, los primarios y las funciones de igualación para diferenciar entre errores sistemáticos y aleatorios en la especificación de colores aislados y relacionados. En segundo lugar, se ha presentado la problemática actual del control del color en las tecnologías multimedia, centrándola mucho más en la transformación de los datos no colorimétricos RGB de un dispositivo de captura en datos colorimétricos estándar CIE-XYZ, como proceso necesario para evaluar el nivel de reproducción del color de este tipo de dispositivo multimedia generador y manipulador de señales de color. En tercer lugar, tras analizar los principios físicos y matemáticos que subyacen en la fotodetección ideal, se han presentado una serie de parámetros funcionales (OECSF, QE, IGSF, FTSC, SNR y DQE) de caracterización espectral y optoelectrónica de dispositivos de captura, los cuales permiten aclarar el principio de univariancia y los conceptos ambivalentes de responsividad espectral y espectro de acción. A continuación, en cuarto lugar, se analizaron qué variables de las especificaciones técnicas del fabricante de un dispositivo de captura debemos tener en cuenta para controlar rigurosamente el tipo de reproducción bruta RGB del dispositivo, lo cual permite, tras controlar y evitar transformaciones posteriores en las señales originarias de color, comparar a nivel cualitativo y cuantitativo modelos/marcas diferentes aparentemente similares utilizando un algoritmo novedoso de caracterización espectral y optoelectrónica. Por último, y en quinto lugar, se analizó el estado actual de estandarización internacional de la Fotografía Digital, centrándonos mucho más en el problema de la caracterización del color, el cual conlleva en primer término la obtención de las curvas de sensibilidad espectral relativa (método A, ISO 17321-1) y la estimación colorimétrica de una escena tipificada (método B, ISO 17321-2), pero controlando la intensidad y la cromaticidad de la iluminación incidente en la escena y conociendo previamente alguna información espectral sobre la iluminación y los objetos presentes en la escena.

Con todo esto, vamos a desarrollar a continuación un algoritmo general de caracterización de cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara) como un instrumento de medida del color. Para ello, desarrollaremos de forma original técnicas espectral y métodos matemáticos alternativos para determinar el nivel de reproducción del color de esta clase de dispositivos multimedia. Esto supone analizar paralelamente en qué medida el dispositivo de captura seleccionado podría utilizarse para medidas colorimétricas absolutas y relativas independientemente de la intensidad y cromaticidad de la iluminación incidente y del contenido espectral de los objetos de la escena. En concreto, esto nos conducirá a comparar el grado de exactitud y precisión del dispositivo de captura con respecto a un tele-espectrocolorímetro convencional (p.e. Photo Research SpectraScan PR-650) utilizando entornos reales variables de iluminación y color. Esto no significa en ningún momento que desarrollaremos o pondremos en práctica cualquiera de los métodos actuales propuestos de estimación de la reflectancia/transmitancia espectral de objetos, como si pretendiéramos convertir el dispositivo de captura en un espectrofotómetro. Más bien, nos hemos centrado en la especificación triestímulo del color puesto que con ella es suficiente

para desarrollar en un futuro cercano un tele-colorímetro perceptual con el que resolver, aplicando un modelo de apariencia del color, numerosos problemas colorimétricos que requieren, por ejemplo, una técnica colorimétrica no invasiva sobre el producto (microbiología, industria textil, geología, etc).

3.1 Distinción entre escáneres y cámaras

Aunque a lo largo de las secciones anteriores se han indicado algunas similitudes y diferencias entre los escáneres y las cámaras, conviene matizarlas del modo siguiente puesto que en las secciones posteriores, núcleo de la Tesis, no habrá distinciones explícitas entre ambos tipos de dispositivos de captura. Así pues, los aspectos diferenciadores entre escáneres y cámaras son:

- Un escáner es un dispositivo multimedia estático, sin capacidad para registrar o captar una imagen que no se coloque sobre su plano de captación. En esto difiere bastante una cámara digital, totalmente dinámica, adaptable a cualquier ambiente luminoso o de visualización variando la apertura relativa N y/o el tiempo de exposición t . Una cámara digital puede ser un instrumento tele-colorimétrico, mientras que un escáner no, tal vez un colorímetro estático.
- La fuente luminosa en un escáner siempre será fija y estará bien caracterizada, mientras que no ocurrirá lo mismo en una cámara digital, dispuesta y preparada para capturar imágenes ante multitud de ambientes de iluminación, siempre más complejos por la existencia de varias fuentes de iluminación e interreflexiones que en un escáner. Por ejemplo, recordando la dualidad entre caracterización vs. calibración colorimétrica (§ 1.2.1), el fabricante debería proporcionar al usuario un modelo de reproducción del color del escáner que incorpore las propiedades radiantes o colorimétricas de la fuente luminosa del escáner, de forma que, ante una sustitución eventual de la fuente luminosa, generalmente fluorescente, el usuario pudiera calibrar de nuevo el dispositivo según el modelo de caracterización colorimétrica de que dispone.
- La óptica de captura/registro de la imagen puede ser muy diferente entre ambos dispositivos. En particular, y ligado al aspecto anterior, el nivel de iluminación en un escáner siempre estará limitado, mientras que en una cámara digital no. El uso inteligente del iris (N) o diafragma de la lente-objetivo o del obturador electrónico (t) de la cámara añade más complejidad a la caracterización colorimétrica de ésta frente a la de un escáner convencional (plano o de sobremesa).
- De igual modo, la formación y registro de la imagen, así como las características de codificación/transmisión de la misma, ofrecen diferencias sustanciales entre ambos periféricos. En un escáner, el fotodetector es generalmente un CCD trilineal, mientras que en una cámara es un mosaico CCD. Además, las tarjetas digitalizadoras (gráficas, o de vídeo) multimedia son radicalmente distintas a las utilizadas en aplicaciones de visión artificial. Las primeras, las comunes en todos los ordenadores personales, están diseñadas para editar vídeo y sonido, por lo que el compromiso entre coste computacional y efectividad se decanta a favor de esta última: imágenes de baja resolución espacial y uso de técnicas de compresión de la imagen que reducen la calidad de la imagen, y,

sobretudo, distorsionan la codificación cromática original de la imagen por lo que se pierde el sentido metrológico en estas aplicaciones multimedia. En cambio, lo importante en las otras es que el coste computacional sea el óptimo para resolver eficaz y eficientemente cualquier procesado sobre la imagen, con lo que es posible mantener el sentido metrológico en casi todas las operaciones que sufra la imagen original. Claro está, la diferencia de precios es abismal entre ambas. Más aún, existen estándares internacionales de conexión (*Multimedia Control Interface* - MCI, TWAIN, etc) en las tarjetas multimedia, mientras que en las otras, cada fabricante desarrolla su propia estrategia en las arquitecturas de diseño, por lo que los softwares de aplicación se programan a medida para cada tarjeta digitalizadora, mientras que las primeras son compatibles para softwares tan comunes ya como Photoshop, Corel PhotoPaint, etc.

Así pues, aunque el instrumento de trabajo de esta Tesis Doctoral es una cámara digital, ya descrita en el capítulo anterior, creemos que el algoritmo de caracterización del color que desarrollaremos a continuación es totalmente compatible con cualquier tipo de dispositivo de captura, ya sea escáner o cámara, independientemente del tipo de arquitectura de color (Fig. 2.16-17) y del sensor optoelectrónico. Esto significa que estamos considerando el dispositivo de captura, compuesto básicamente por un sensor optoelectrónico analógico y un conversor analógico-digital, como una "caja negra", por lo que las propuestas de este trabajo se pueden aplicar directamente a cualquier variación de los componentes básicos de esta clase de dispositivos.

3.2 Caracterización de un dispositivo de captura como un instrumento de medida del color

Suponiendo, pues, un dispositivo de captura de la marca/modelo que sea, con los parámetros fijos N , t , arquitectura de color, ganancia, balance de blanco, y los asociados a la digitalización, ya ha quedado claro que esta configuración acarrea un espacio RGB determinado. Ahora bien, es bastante habitual encontrarse con modelos diferentes de la misma marca que no consiguen codificar un estímulo-color, salvo el inevitable error aleatorio, con la misma terna RGB, el cual tiene una codificación CIE-XYZ invariable. Por tanto, los espacios RGB asociados a cada dispositivo son colorimétricamente diferentes. Es lo mismo que ocurriría cuando, si eligiendo uno de ambos, alteráramos la ganancia externa o el balance de blanco: se codificaría entonces con ternas RGB diferentes el mismo estímulo-color. En consecuencia, cuando propongamos a continuación los aspectos referentes a la caracterización espectral y colorimétrica de estos dispositivos, lo haremos conscientemente sobre un (y único) tipo de espacio RGB dependiente, ya sea éste supuestamente el verdaderamente bruto o uno alterado involuntariamente. Evidentemente, los algoritmos de caracterización espectrocolorimétrica que desarrollaremos más adelante serán aplicables a cualquier tipo de espacio RGB, pero siempre resultará más interesante desde el punto de vista científico el espacio RGB bruto del dispositivo, aunque éste pueda diferir entre modelos de la misma marca. De esta forma, la caracterización serviría para evaluar el grado de reproducción del color, como un factor clave de calidad, entre modelos diferentes de la misma marca o entre modelos con las mismas prestaciones aparentes de marcas diferentes.

La propuesta de caracterización de un dispositivo de captura se descompone básicamente en un algoritmo de caracterización espectral y otro de caracterización colorimétrica. Cada uno de ellos se basa en medidas experimentales diferentes pero al mismo tiempo complementarias: se necesita la caracterización espectral para abordar con éxito la caracterización colorimétrica. Esto significa que cada algoritmo necesita también montajes experimentales diferentes.

El montaje de caracterización espectral (montaje A) es el que permite obtener todos los parámetros asociados a la caracterización espectral de un dispositivo de captura, los cuales están esquematizados en la Fig. 2.28. Las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSFs) servirán, pues, de punto de partida para todos los aspectos siguientes:

1. Verificación de la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital: averiguar hasta qué punto la respuesta del sistema es independiente frente a valores idénticos de exposición espectral, pero obtenidos variando la apertura relativa N y/o el tiempo de exposición t . En principio, tal ley no se verifica completamente en la Fotografía Fotoquímica o clásica, pero poco se sabe hasta ahora si se verifica o no en Fotografía Digital.
2. Determinación de las sensibilidades espectrales completas: obtener para cada canal/color los términos ambivalentes de responsividad espectral $r_k(\lambda, H)$ y espectro de acción $a_k(\lambda, NDR)$, pero también si es posible una función general de sensibilidad espectral relativa del tipo $s_k(\lambda)$, la que serviría más adelante para la obtención de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} . La dificultad inicial e inherente de esta sección es que los dispositivos de captura no son estrictamente lineales, como así consideramos al observador patrón CIE-1931 XYZ. Por tanto, a lo largo de esta sección se compararán los mismos tipos de resultados entre dispositivos lineales (CIE-1931 XYZ) y no lineales (Sony DXC-930P + Matrox MVP-AT 850) de captura.
3. Determinación del comportamiento de transferencia fotónica: a partir del análisis de cada curva espectral de transferencia fotónica (FTSC) se calcularán para cada λ /canal-color el rango dinámico rd_E , la relación señal-ruido SNR , la capacidad de pozo lleno N_{pozo} , la función espectral de ganancia incremental $IGSF$, la eficiencia cuántica QE y la eficiencia cuántica de detección DQE . Estos resultados se podrán utilizar, por tanto, para estudiar comparativamente la fotodetección ideal (§ 2.1) con la real.
4. Modelo de codificación del color: se presentará una ecuación sobre la formación optoelectrónica del valor digital a partir de la exposición radiante, mono o multi-espectral. Con este sencillo modelo, se comprobará el balance colorimétrico de blanco (ideal o equienergético) que, supuestamente, está verificando el dispositivo según las instrucciones del fabricante.
5. Obtención de las pseudo-funciones de igualación: aplicar los resultados anteriores, sobretudo el desbalance de blanco ideal y el escalado absoluto entre las responsividades espectrales para calcular \mathbf{T}_{RGB} . De esta forma, se propondrá un cambio de modelo analítico absoluto de codificación del color a un modelo vectorial relativo utilizando directamente las \mathbf{T}_{RGB} obtenidas. Esto permitirá comparar

entre los niveles digitales RGB realmente capturados de una escena con los predichos a partir del conocimiento de T_{RGB} y las distribuciones espectrales de potencia radiante absoluta de los objetos de la escena.

El montaje de caracterización colorimétrica (montaje B) se utilizará principalmente para la evaluación del nivel de reproducción bruta del color, es decir, la transformación de los valores digitales RGB en valores triestímulo XYZ frente a condiciones espectralradiométricas variables y desconocidas a priori. Los pasos necesarios para tal fin son los siguientes:

1. Preparación de los datos RGB: pasar los niveles digitales ND_R , ND_G , ND_B a valores colorimétricos relativos RGB.
2. Balance de adaptación luminosa: estimar a partir de las curvas espectralradiométricas *OECSFs* las curvas fotométricas *OECSFs* según el nivel de iluminación incidente en la escena variando la apertura relativa N de la cámara. Con ello, podremos invertir las *OECSFs* calculadas en función de N para calcular los correspondientes valores colorimétricos relativos RGB.
3. Obtención del perfil colorimétrico al espacio CIE-1931 XYZ: calcular la matriz de cambio de base M según los algoritmos posibles MaxIgLS, MaxIgWPPLS, No-MaxIgLS y PC.
4. Evaluación del nivel de reproducción del color: aplicar un modelo general de perfil colorimétrico CIE con balance de adaptación luminosa para comparar de forma cuantitativa y cualitativa los grados de exactitud y precisión de la cámara digital con respecto al tele-espectrocolorímetro PR-650. Esto supondrá, en primer lugar, evaluar las desviaciones de medida como tele-colorímetro absoluto en estado bruto de reproducción; y, segundo lugar, aplicar un algoritmo matemático de corrección de color para minimizar los errores colorimétricos sistemáticos iniciales o brutos. En ambos casos, se compararán los errores aleatorios que marcan ambos dispositivos. Las métricas utilizadas para evaluar el nivel bruto y compensado de reproducción del color serán el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ y el algoritmo de índice de reproducción del color (CRI) tras implementar previamente el modelo de apariencia de colores aislados Hunt'91 a los valores absolutos XYZ estimados a partir de los valores digitales RGB.
5. Determinación de la gama de colores reproducibles: obtener los pseudo-primarios fundamentales RGB según los perfiles colorimétricos aplicados y comparar con los primarios clásicos para dispositivos de captura de MacAdam e Ives-Abney-Yule, pero también evaluar en estado bruto de reproducción del color los locus de colores óptimos o límites de MacAdam con respecto al observador patrón CIE-1931 XYZ en el diagrama cromático CIE-(x,y,Y) y en el espacio CIE- $L^*C_{ab}^*h_{ab}^*$.

Como conclusión de este trabajo, se mostrará un análisis global de todos los resultados parciales y, sobretudo, de los grados de exactitud y precisión como colorímetro triestímulo XYZ en varias regiones de

Caracterización de un dispositivo de captura

tono, claridad y croma; y una breve disertación sobre el interés industrial y la transferencia tecnológica que se derivan de este trabajo, así como sobre las líneas futuras de investigación dentro de este campo.

La figura siguiente muestra las interrelaciones entre las fases de desarrollo y resolución de este trabajo. Las fases coloreadas del mismo modo en las dos columnas va indicar que parte de la información obtenida en la primera fase principal (caracterización espectral) se va a utilizar en la segunda (caracterización colorimétrica).

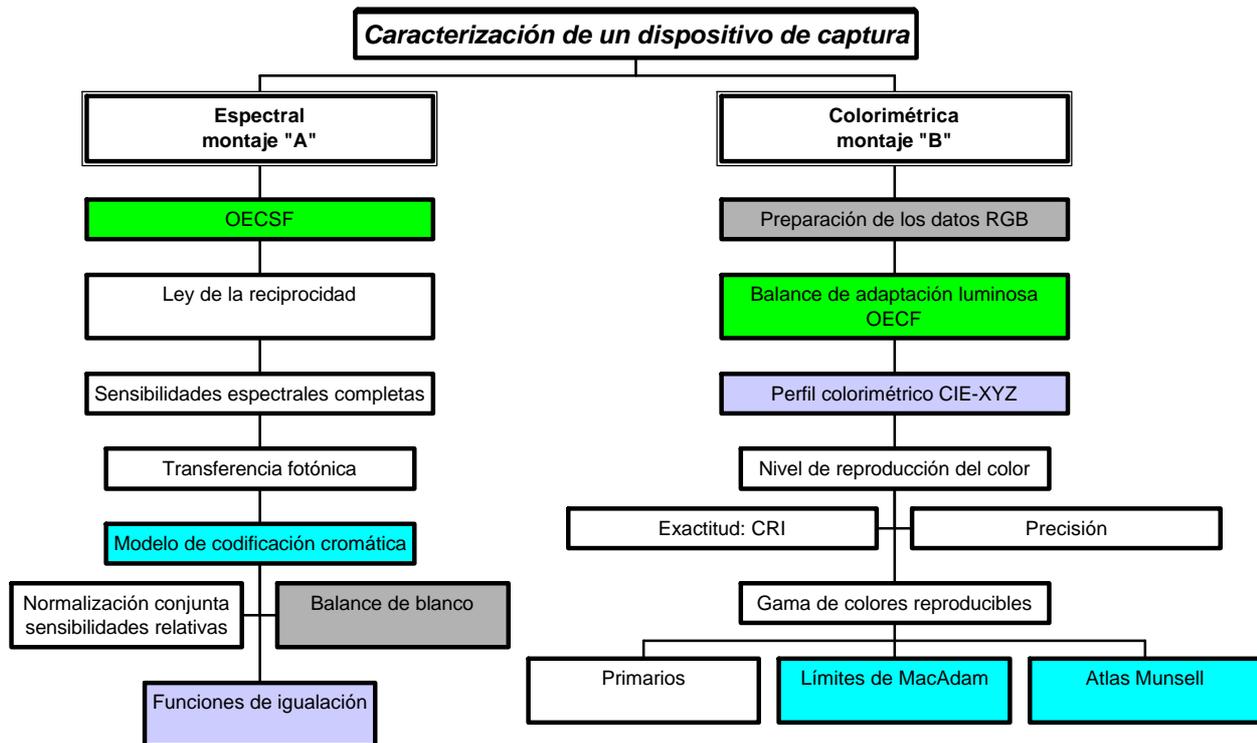


Figura 3.1: Organigrama de esta tesis doctoral.

Capítulo 4. Caracterización espectral

Vamos a proponer a continuación un algoritmo general de cálculo de las pseudo-funciones de igualación T_{RGB} de cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara).

4.1 Montajes experimentales

Aunque el montaje estrictamente necesario es el primero, hemos considerado oportuno incluir ya el segundo porque algunos resultados parciales se pueden utilizar para analizar globalmente la efectividad de la caracterización espectral que proponemos.

4.1.1 Montaje experimental para la caracterización espectral (Montaje A)

Consiste básicamente en controlar la exposición espectral $H(\lambda)$ sobre el plano focal fotosensible, es decir, que el dispositivo capte luz monocromática energéticamente controlada. Por tanto, los componentes básicos son una fuente luminosa, un monocromador, un radiómetro y el dispositivo de captura, dentro de un entorno oscuro a temperatura y presión atmosférica ambientales, en el que incluso las paredes del laboratorio estén pintadas de negro para evitar la captura de luz residual. En nuestro caso, la disposición espacial de estos elementos y otros complementarios se esquematiza en la figura siguiente.

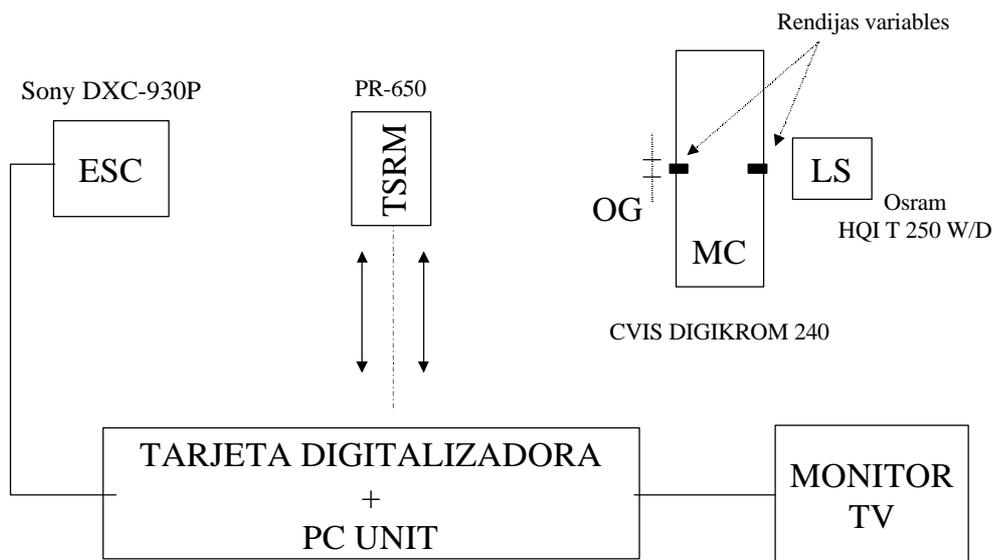


Figura 4.1: Esquema del montaje experimental A para la caracterización espectral.

La fuente luminosa (LS) es una lámpara de descarga, marca Osram modelo HQI T 250W/Daylight, de vapor de mercurio, muy intensa y con una temperatura de color $T_C = 6000$ K e índice de rendimiento en color R superior a 95, o sea, clasificada como 1A. La coraza protectora metalizada, y al mismo tiempo luminaria, que se acopló a la lámpara permite situarla bastante cerca de la rendija de entrada del monocromador (MC), marca CVIS Laser, modelo Digikröm 240, con control remoto y automático de la longitud de onda y las aperturas de las rendijas de entrada y salida. A la salida del monocromador, se coloca un vidrio opalino o difusor (OG) que, convenientemente diafragmado, nos permite asegurar que tenemos un estímulo espectral lambertiano y espacialmente homogéneo. A medio camino entre el test monocromático y la cámara electrónica (ESC) Sony DXC-930P se intercala un tele-espectroradiómetro (TRSM), marca Photo Research modelo PR-650, de forma que el test queda perfectamente enfocado a través del ocular del instrumento y el spot de medida no sobrepasa las dimensiones del test. De esta forma, inmediatamente antes o después de captar la imagen monocromática, se puede medir el nivel de radiancia $L_e(\lambda)$ de la escena. La cámara electrónica (ESC) Sony DXC-930P se sitúa sobre eje respecto el test y a una distancia tal que el objetivo fotográfico telecéntrico permite enfocararlo con nitidez y con el mayor aumento posible. Separado respecto el montaje espectroradiométrico, se encuentran la unidad de adquisición y tratamiento digital de imágenes, la cual consta de la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850, insertada dentro de un ordenador personal Pentium, y un monitor Sony de visualización.

4.1.1.1 Diseño del estímulo lambertiano espectral

Antes de proseguir con el procedimiento experimental de captura de las imágenes monocromáticas, nos pareció absolutamente necesario comprobar la resolución espectral del monocromador cuando se varía la apertura de entrada/salida $\phi_{E/S}$. En principio, según el fabricante CVIS Laser, este modelo ha sido diseñado intencionadamente con resolución espectral constante, pero queríamos estar seguros de hasta qué punto esto era cierto y, sobretodo, cuáles podían ser las repercusiones si esto no se cumplía al completo. Este aspecto es crucial para diseñar un estímulo lambertiano espectral: lo ideal sería conseguir un estímulo monocromático lo más puro posible, como si pudiéramos describirlo con una función puntual (delta de Dirac). Como esto no es posible, debemos por lo menos intentar que su distribución espectral de potencia radiante sea lo más monocromática posible. Por otro lado, ya que la resolución espectral del tele-espectroradiómetro PR-650 es de 4 nm, era necesario averiguar cuál de los dos sistemas, el monocromador o el tele-espectroradiómetro, iba a limitarnos la resolución espectral del estímulo monocromático. Las Figuras 4.2-3 muestran la influencia de la variación de las rendijas $\phi_{E/S}$ sobre la pureza del estímulo monocromático. Dado que el rango de apertura de las rendijas va desde 0 hasta 2000 μm , los resultados anteriores nos indican que:

- Como la resolución espectral del monocromador es más fina que la del tele-espectroradiómetro, $0.1 < 4$ nm, no tiene sentido seleccionar estímulos monocromáticos a intervalos menores que 10 nm porque la anchura de banda espectral en la medida será de 8 nm.

- Siempre y cuando los valores de rendija no excedan de 1500 μm , podemos asegurar que, a la vista del espectro tipo lorentziana del estímulo monocromático, la pureza de excitación p_e es siempre mayor que el 97 % para el rango visible.

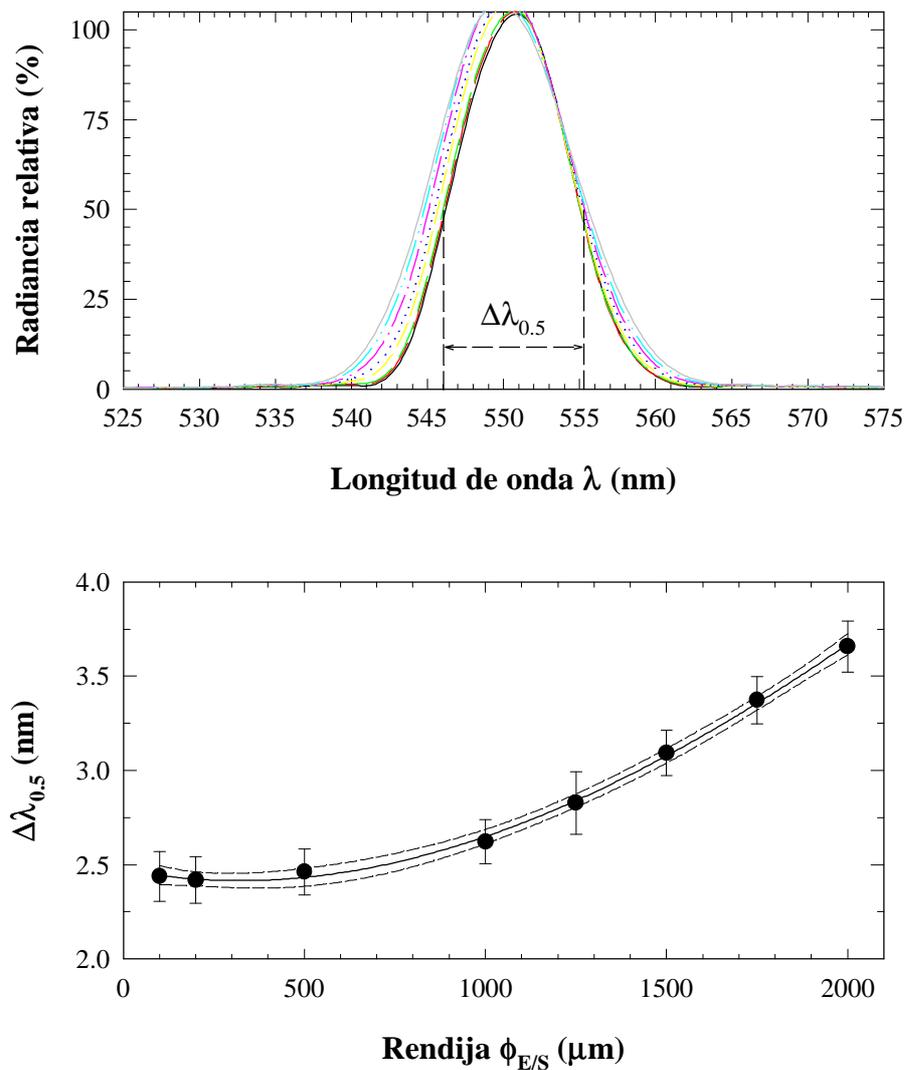


Figura 4.2: Efecto de la variación de las rendijas $\phi_{E/S}$ de entrada/salida del monocromador CVIS Laser Digikröm 240 sobre la anchura $\Delta\lambda_{0.5}$ del estímulo monocromático de salida. Ejemplo para $\lambda = 550 \text{ nm}$.

- Podemos extraer una función biunívoca de calibración en el monocromador entre la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ y el valor de apertura $\phi_{E/S}$, fruto del tipo de fuente luminosa y de las características espectrales del vidrio difusor. Para nuestro caso tenemos un polinomio de tercer orden (Fig. 4.3).

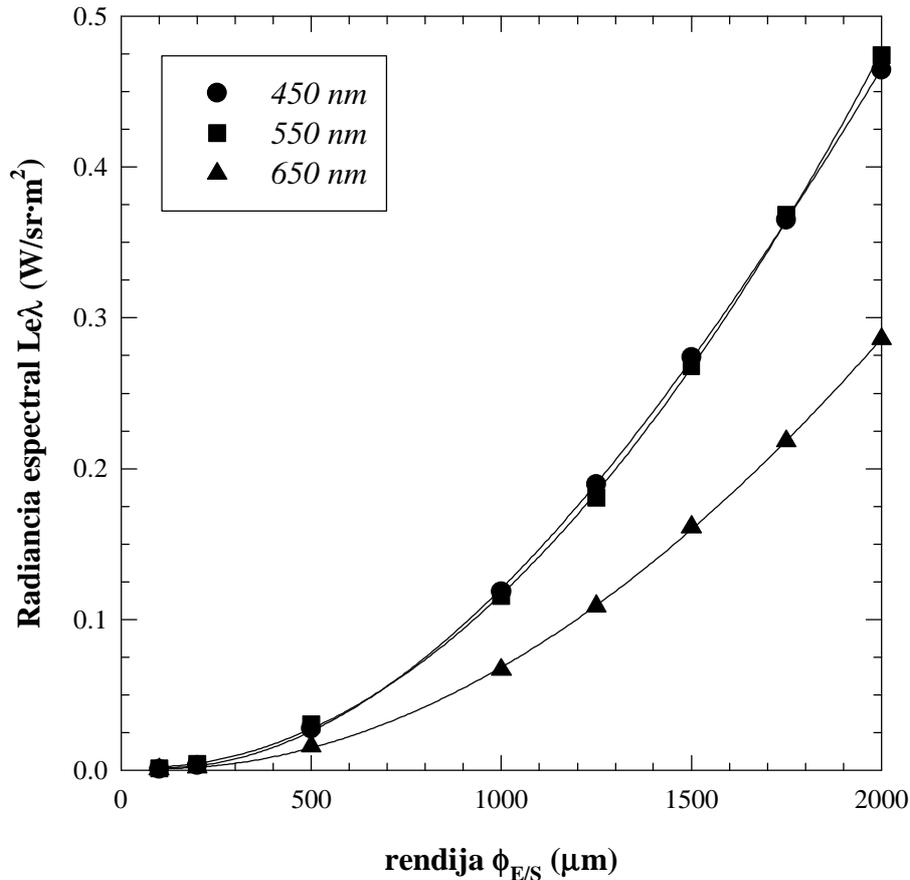


Figura 4.3: Variación de la rendija $\phi_{E/S}$ sobre el rango posible de radiación espectral $L_{e\lambda}$ sobre el estímulo monocromático de la pantalla difusora. Ejemplos para $\lambda = 450, 550$ y 650 nm. El efecto notado en 650 nm está causado por el descenso de la potencia radiante de la lámpara que ésta no es espectralmente uniforme.

Que, a la vista de la Fig. 4.3 tengamos limitado el rango numérico de radiancias espectrales, no debe preocuparnos a priori. Recordemos que el dispositivo de captura es sensible a la exposición espectral $H(\lambda)$, donde la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ es una de las tres variables principales (§ Ec. 2.15) junto con la apertura relativa N y el tiempo de exposición t . Lo que sí que es crucial es que, independientemente de cómo variemos las series de exposición ($L_e(\lambda)$, N , t) para una misma exposición espectral $H(\lambda)$, el dispositivo de captura responda siempre lo mismo, salvo la variación aleatoria. Es lo que hemos descrito como *ley de la reciprocidad*, y que posteriormente comprobaremos.

4.1.1.2 Cálculo de la exposición radiante sobre el plano focal fotosensible

El cálculo de la exposición espectral $H(\lambda)$ sobre cada plano CCD se va estimar a partir de Ec. 2.15:

Ecuación 4.1

$$H(\lambda) = \alpha \frac{L_e(\lambda)}{N^2} t \quad , \quad \text{siendo} \quad \alpha = \frac{\pi}{4} \frac{A_{\text{SENSOR}}}{(1 + m_{\text{OBJETIVO}})^2} \tau_{\text{OBJETIVO}} \cdot T_{\text{ATM}}$$

Las variables que quedan fijadas según la configuración experimental pero que debemos calcular son el área efectivamente irradiada del plano focal fotosensor (A_{SENSOR}) y el aumento lateral del objetivo fotográfico (m_{OBJETIVO}), puesto que en el rango visible hemos considerado $\tau_{\text{OBJETIVO}} = 1$ y $T_{\text{ATM}} = 1$, tal como indica la literatura científica (Holst 1998). Para ello, aplicaremos directamente Óptica paraxial entre el estímulo monocromático (objeto), la cámara (sistema óptico) y el plano CCD (imagen). Si el estímulo monocromático es circular, de diámetro $\phi = 8$ mm, y se encuentra a una distancia $d = -96.8$ cm de la lente objetivo, teniendo en cuenta que la focal imagen f' del objetivo fotográfico telecéntrico es de 90 mm, el aumento lateral m_{OBJETIVO} queda como:

Ecuación 4.2

$$\begin{aligned} \text{si } r = \frac{\phi}{2} \text{ radio - objeto y } f = -f' &\Rightarrow r' = r \left(\frac{-f}{d-f} \right) = -410.0228 \mu\text{m radio - imagen} \\ \Rightarrow m_{\text{OBJETIVO}} = \frac{r'}{r} &= -0.1025 \end{aligned}$$

El área CCD irradiada es $A_{\text{SENSOR}} = \pi(r')^2 = 528.1604e-9 \text{ m}^2$. Como, el área de un píxel $A_{\text{pixel}} = 8.5 \times 8.2 \mu\text{m}^2 = 6.9700e-11 \text{ m}^2$, el número de píxels irradiados o activados es de 7578 en el plano CCD. Pero, como al digitalizar la imagen, ésta sufre una conversión de escalado entre el formato original 552x582 píxels al formato final 512x512 píxels, el número de píxels en la imagen bruta digitalizada es de:

Ecuación 4.3

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{SENSOR}} &= \pi(r')^2 = 528.1604e-9 \text{ m}^2 \\ A_{\text{pixel}} &= 6.9700e-11 \text{ m}^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow n^\circ \text{ pixels - CCD} = \frac{A_{\text{SENSOR}}}{A_{\text{pixel}}} \cong 7578$$

$$\text{escalado - imagen} = \frac{512 \times 512}{752 \times 582} = 0.5990 \Rightarrow n^\circ \text{ pixels - imagen} = 0.5990 \times 7578 = 4539$$

Esto significa que, aunque la extensión útil de la imagen no supera el 2 % del total, podremos obtener ventanas de muestreo estadístico superiores a 4000 píxels, tal como recomienda ISO 15424 e ISO 17321.

En consecuencia, según estos cálculos, la exposición radiante sobre el plano focal fotosensible es:

Ecuación 4.4

$$H(\lambda) = 514.9823e-12 \frac{L_e(\lambda)}{N^2} t \quad [\text{J}]$$

con $L_e(\lambda)$ en $\text{mW}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ y t en segundos

4.1.1.3 Análisis inicial de las medidas efectuadas

El procedimiento de toma de datos a partir de la captación de una imagen monocromática tiene en cuenta el proceso de estabilización temporal de la fuente luminosa Osram HQI 250W/D. Así, tras el encendido del monocromador y la fuente luminosa, aprovechamos los diez minutos iniciales para configurar la cámara (balance de blanco, etc), delimitar el rango de exposición para las longitudes de onda seleccionadas con la variación de las rendijas del monocromador y la apertura relativa N , y cargar el programa de adquisición de imágenes SAMBA, desde donde se controlan, por ejemplo, los valores gain y offset (a 127) del conversor analógico-digital y el canal de color de captura. Durante aproximadamente 1 hora, se registran un promedio de 25 series de exposición, entendidas éstas como que cada serie de exposición $(L_e(\lambda), N, t)$ representa un conjunto estadístico de 8 imágenes (N y t fijos) con sus respectivas medidas radiométricas $L_e(\lambda)$. Posteriormente, tras grabar las imágenes promedio resultantes en un formato RAW, previamente corregidas de la imagen de fondo según el canal-color, éstas se analizan mediante un programa específico denominado ANCOL, el cual carga individualmente cada imagen (Fig. 4.4) para poder visualizarla y extraer de ella mediante técnicas de segmentación una ventana estadística superior a 4000 píxels a partir de la cual se obtiene el valor medio de nivel digital ND y la varianza s_{ND}^2 asociado a la serie de exposición $(L_e(\lambda), N, t)$. En el caso de que el test se haya captado con respuesta relativamente baja tal que al visualizarlo directamente en el ANCOL no se visualiza aparentemente nada, este software incorpora una función de umbralización con pseudocoloración que permite destacar el test sobre el fondo.

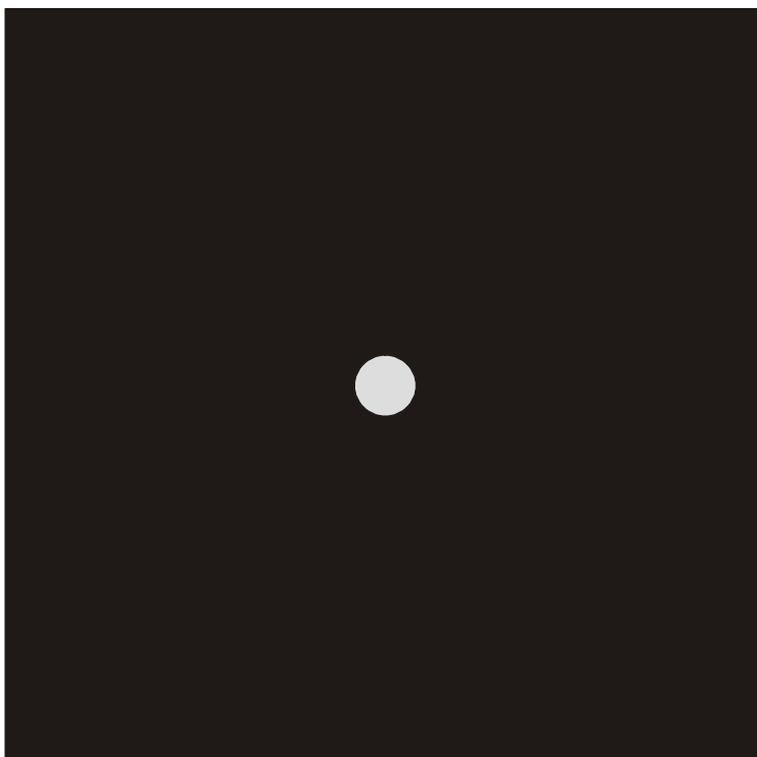


Figura 4.4: Imagen monocromática tipificada (en blanco y negro) tal como es capturada y visualizada a través del programa ANCOL, que permite marcar una ventana cuadrada o circular sobre el test para calcular estadísticamente la respuesta del sistema.

La corrección de fondo en cada imagen bruta se ejecutó según el cálculo estándar del error de lectura base en una imagen digital (Janesick 1987; Janesick 2001). Para ello, sin entrar en los detalles optoelectrónicos del ruido de una imagen (§ 2.2.3.3.), se necesita captar al menos 10 imágenes de fondo (con la tapa puesta del objetivo). El promedio de las 10 imágenes sirve de imagen digital de fondo que, como consideramos tres canales de color (Fig. 4.5) los denominaremos f_R , f_G y f_B . El promedio de la desviación estándar de las restas por parejas correlativas de las 10 imágenes captadas sirve como estimación directa del nivel digital de corriente oscura en cada canal-color. En nuestro caso, los valores obtenidos fueron:

Tabla 4.1: Resultados del valor de fondo en cada imagen/canal.

	CANAL R	CANAL G	CANAL B
Valor medio de fondo (f)	15.2	17.7	11.9
Corriente oscura	0.44	0.37	0.38

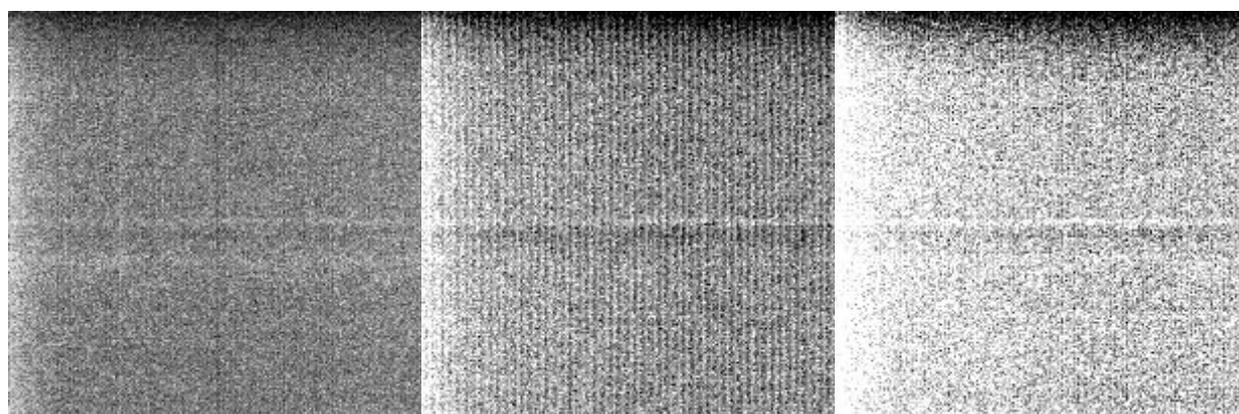


Figura 4.5: Vista de las imágenes de fondo de cada canal-color (R, izquierda; G, centro; B, derecha) donde se puede apreciar la inhomogeneidad espacial de cada patrón CCD de la cámara 3CCD-RGB Sony DXC-930P.

4.1.2 Montaje para la caracterización colorimétrica (Montaje B)

Consiste básicamente en diseñar una escena con objetos y captarla directamente con el dispositivo de captura bajo unas condiciones controladas de iluminación. Los niveles digitales brutos ND_R , ND_G y ND_B se utilizarán posteriormente para estimar los datos colorimétricos absolutos (t_{XYZ} en cd/m^2) de la escena, los cuales pueden obtenerse inicialmente mediante un tele-espectroradiómetro como el PR-650 de Photo Research. Habitualmente, y para reducir problemas de brillo sin consideráramos objetos tridimensionales, la escena típica suele ser una carta de colores mate, como por ejemplo una de las utilizadas en Artes Gráficas (modelo IT8) o la carta GretagMacbeth ColorChecker (Fig. 1.17).

En nuestro caso, como estábamos interesados desde el principio en probar simultáneamente la efectividad de nuestro algoritmo de caracterización colorimétrica bajo cualquier iluminante, tenga la distribución espectral de potencia radiante absoluta (en $\text{W/sr}\cdot\text{m}^2$) que tenga, decidimos aprovechar el surtido de tres fuentes de luz que nos proporcionaba una cabina luminosa diseñada y construida en el propio

Montajes experimentales

departamento con fines docentes e investigadores. En general, sea o no sea una cabina luminosa comercial (Verivide, etc), todas ellas presentan un problema de homogeneidad espacial de iluminación que nunca debe darse por supuesta. Si, por ende, tenemos en cuenta el campo reducido de visión que nos queda para captar la carta ColorChecker dentro de la cabina luminosa, esto nos obliga a colocarla verticalmente para poder captarla de modo más eficiente en una pseudo-configuración geométrica del tipo $d/0$ (Fig. 4.6) situando la cámara a la distancia necesaria (2.3 m) para encuadrar exactamente la carta.

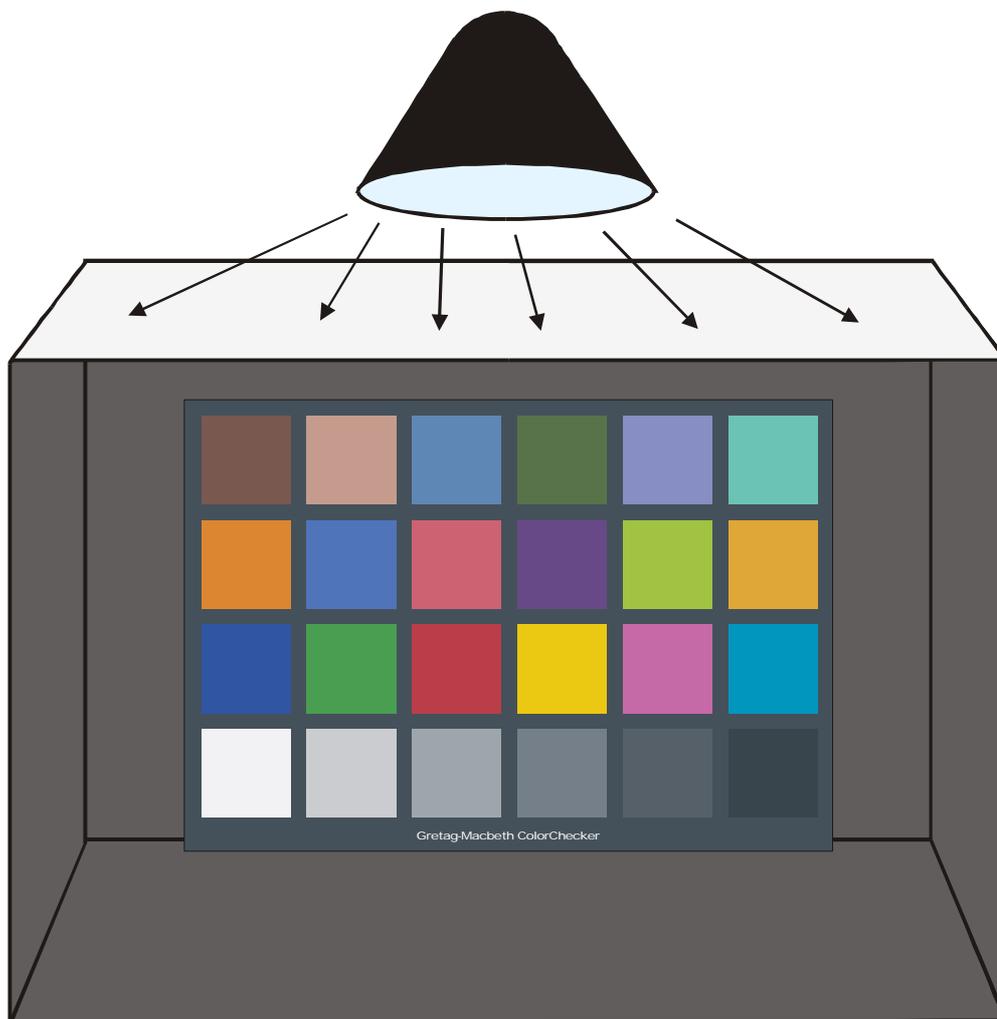


Figura 4.6: Esquema de la posición de captación de la carta de colores dentro de la cabina luminosa. (Las paredes interiores están realmente pintadas de negro, excepto la de arriba, que es donde se encuentra un cristal difusor.)

Las fuentes luminosas o lámparas son:

Tabla 4.2: Descripción de las lámparas de la cabina luminosa

TIPO	MARCA	MODELO	T_c (K)	R_a / R_b	ETIQUETA
Halógena	Osram	HALOSPOT 70 41970 FL	2885	99.54 / 99.44	INC
Fluorescente	Osram	L 8W/12-950 Luz Día	4692	88.58 / 83.71	DAY
Descarga	Osram	HWL 160	3039	75.13 / 67.31	HWL

Con la ayuda de un blanco-patrón Halón ($\rho > 99\%$ en toda la banda visible) obtuvimos las distribuciones espectrales de potencia radiante de cada fuente luminosa (Fig. 4.7) mediante el tele-espectroradiómetro PR-650. Por otro lado, dada la posición vertical de la carta de colores respecto a las fuentes luminosas, nos pareció evidente que la distribución espacial de iluminación sobre la carta no iba a ser homogénea. Por tanto, colocando el blanco Halón en cada posición-color de la carta, obtuvimos para cada fuente luminosa l un mapa de iluminación que da cuenta del nivel de iluminación incidente E_{ml} (Fig. 4.8-10) para cada una de las 24 posiciones-color de la carta, siendo $m = 1, \dots, 24$ muestras-color. Los valores E_{ml} , o en su caso como $E_{ml}/\pi = L_{ml}$ representan unos datos fotométricos muy importantes puesto que nos dan el nivel fotométrico –el factor de luminancia β_E o el valor triestímulo $Y_E (= L_E)$ en cd/m^2 – que correspondería al blanco ideal \mathbf{E} si estuviera colocado en esa posición de la escena. Si fuera el caso de que no es posible medir directamente la iluminación sobre la escena, sería necesario estimarla mediante modelos teóricos de iluminación, los cuales combinan las leyes de la Fotometría con aspectos geométricos del espacio 3-D y las características emisivas de las fuentes de luz.

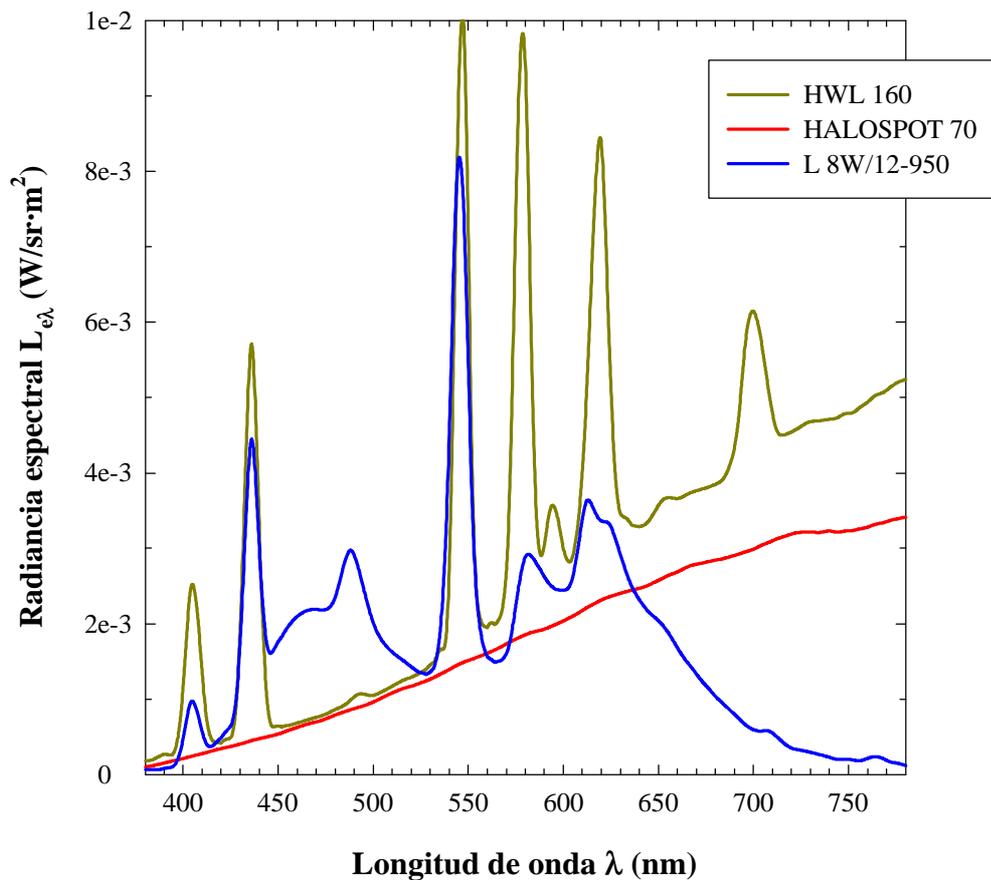


Figura 4.7: Distribuciones espectrales de potencia radiante de las fuentes luminosas de la cabina.

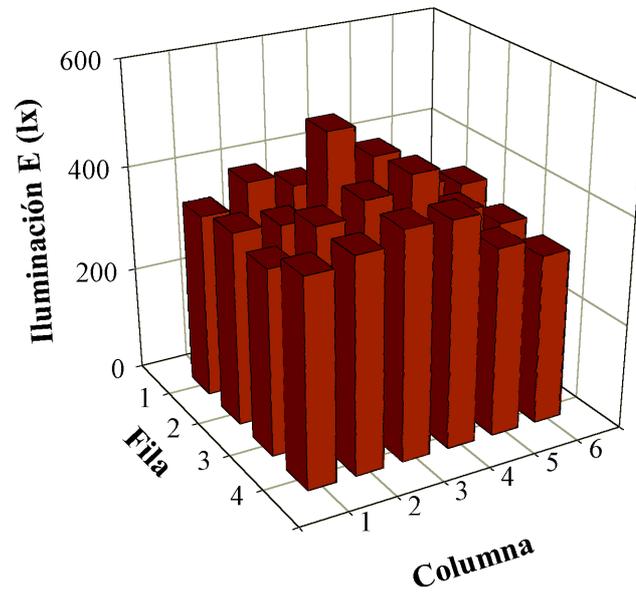


Figura 4.8: Mapa de iluminación sobre la carta ColorChecker con diseño luminoso INC. La carta se ha esquematizado como una matriz 4x6 donde cada celda representa un color, de forma que, por ejemplo, la posición (4,1) es la muestra blanca de la carta.

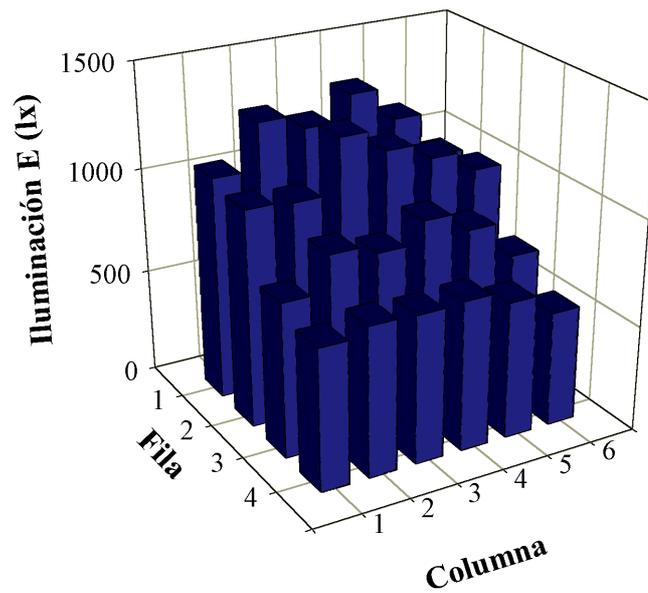


Figura 4.9: Mapa de iluminación sobre la carta ColorChecker con diseño luminoso DAY.

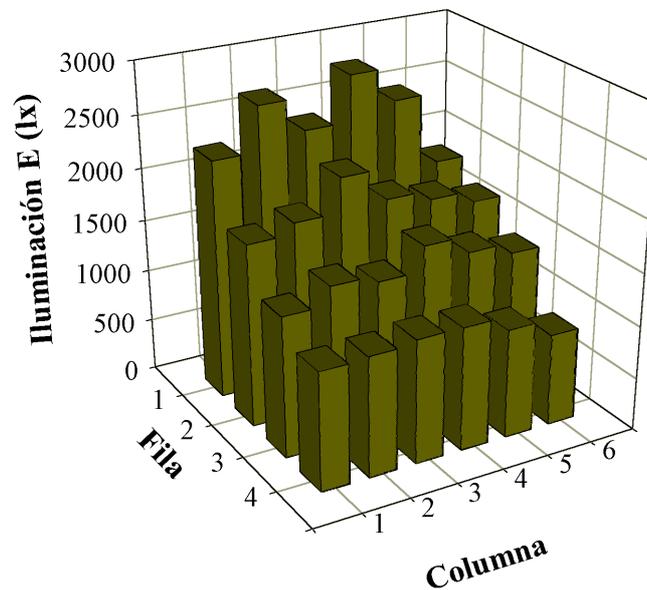


Figura 4.10: Mapa de iluminación sobre la carta ColorChecker con diseño luminoso HWL.

La cámara Sony DXC-930P, con balance de blanco prefijado y apertura relativa N variable con la intención de incluir el máximo número de colores útiles ($0 < ND_R < 255$ y $0 < ND_G < 255$ y $0 < ND_B < 255$) en el rango dinámico fotométrico reducido de ésta, captó la carta con cada configuración iluminación-carta. En este caso, la apertura relativa N para las lámparas DAY y HWL fue de 5.6, mientras fue necesario reducir a $N = 4$ para captar de forma óptima con la lámpara INC. Sin embargo, para evitar efectos de difusión (*flare*) de los colores vecinos sobre el color-test, se captó de manera aislada cada color de la carta utilizando unas plantillas de cartulina negra (Fig. 4.11). Aunque también se hicieron captaciones completas de la escena y se observaron algunas diferencias pequeñas entre los niveles digitales ND_{RGB} "aislados" y "relacionados", no pudimos establecer claramente un factor de difusión luminosa debido a que la distribución espacial de la iluminación no era uniforme.

Con estos datos preliminares, y teniendo en cuenta las reflectancias espectrales $\rho(\lambda)$ (Fig. 1.29) de las muestras Munsell de la carta, se mostrará conjuntamente en las figuras siguientes (Fig. 4.12-14) las distribuciones espectrales de potencia radiante $\mathbf{b}_{ml} = \text{diag}(\mathbf{L}_l) \cdot \rho_m$, tal como se obtuvieron con el telespectroradiómetro PR-650, junto con una impresión simulada de los colores capturados. Del mismo modo, las Tablas 4.3-5 muestran los niveles digitales $ND_{RGB ml}$ de las 24x3 captaciones, así como los correspondientes valores triestímulo absolutos $\mathbf{t}_{XYZ ml}$ de los \mathbf{b}_{ml} junto con los correspondientes valores L_{ml} . Los datos digitales tabulados son los valores medios de cada ventana estadística abierta con el software ANCOL e incorporan respectivamente las desviaciones estándar s_{ND} para un tamaño fijo aproximado de 6000 (± 200) píxels.

Montajes experimentales

A la vista de estos resultados, se puede observar el grado de inconstancia del color del dispositivo de captura. A diferencia del sistema visual humano, que sí que posee mecanismos de adaptación con el que compensa parcialmente la cromaticidad de la fuente luminosa, nuestro dispositivo de captura, al prefijar previamente el balance de blanco a $T_c = 5600$ K (luz día), presenta aisladamente las ternas \mathbf{ND}_{RGB} claramente dependientes con la cromaticidad de la fuente luminosa porque no existe previamente ninguna transformación electrónica interna que compense tal efecto. Lo mismo ocurre con los datos colorimétricos del PR-650, por lo que no tiene sentido captar cada escena con balance de blanco optimizado, puesto que nos tocaría trabajar simultáneamente con tres espacios RGB dependientes del dispositivo frente a un único espacio colorimétrico CIE-XYZ. Por tanto, los datos colorimétricos tabulados previamente (§ Tabla 1.5) de la carta ColorChecker (§ Fig. 1.17) son meramente ilustrativos, ya que no tienen ninguna relación directa con los tabulados a continuación, salvo que tienen en común las mismas reflectancias espectrales. Es decir, los datos cromáticos tabulados en las Tabla 4.3-5 serán el punto de partida de la caracterización colorimétrica del dispositivo de captura, que tiene como objetivo principal establecer una relación matemática entre ambos espacios de codificación teniendo en cuenta que la apertura relativa N es una variable de entrada más junto con las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} y el verdadero balance de blanco (ideal o equienergético) del dispositivo de captura.

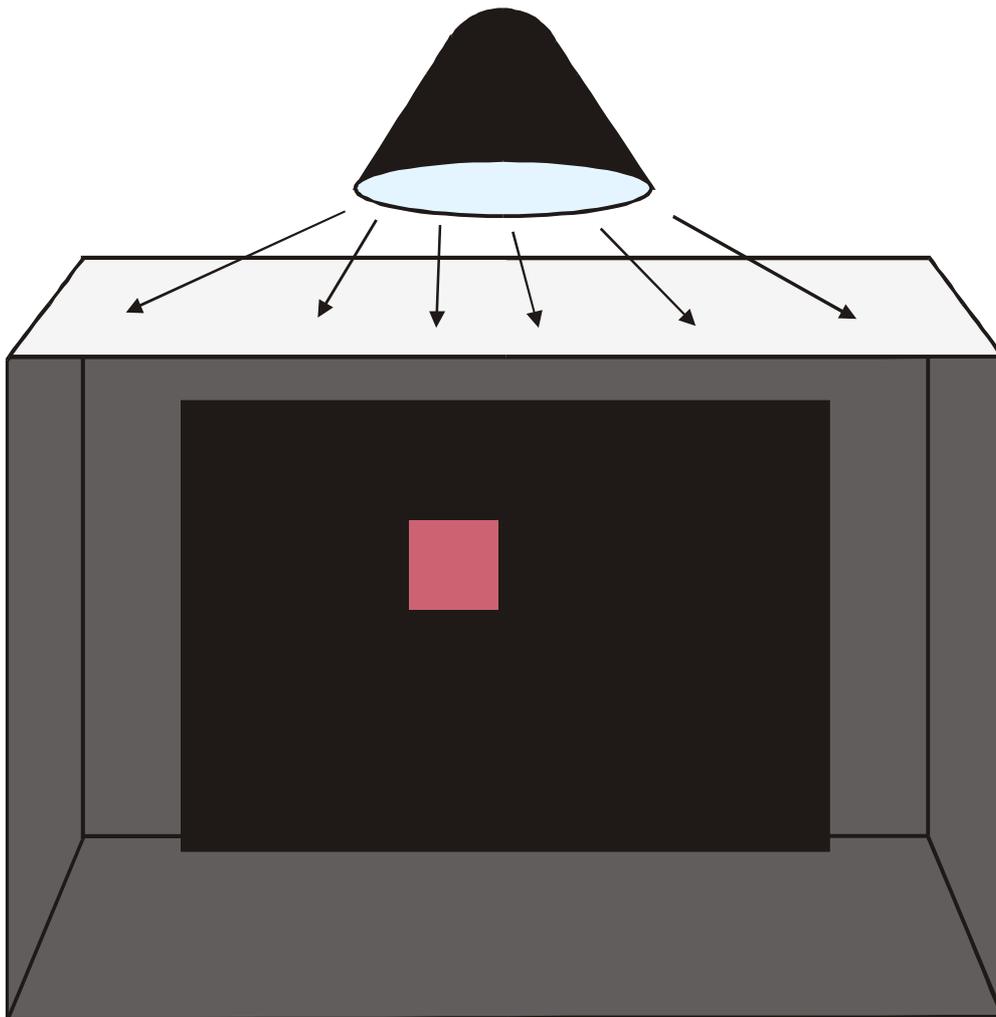


Figura 4.11: Esquema final de captación aislada de cada una de las muestras color de la carta ColorChecker.

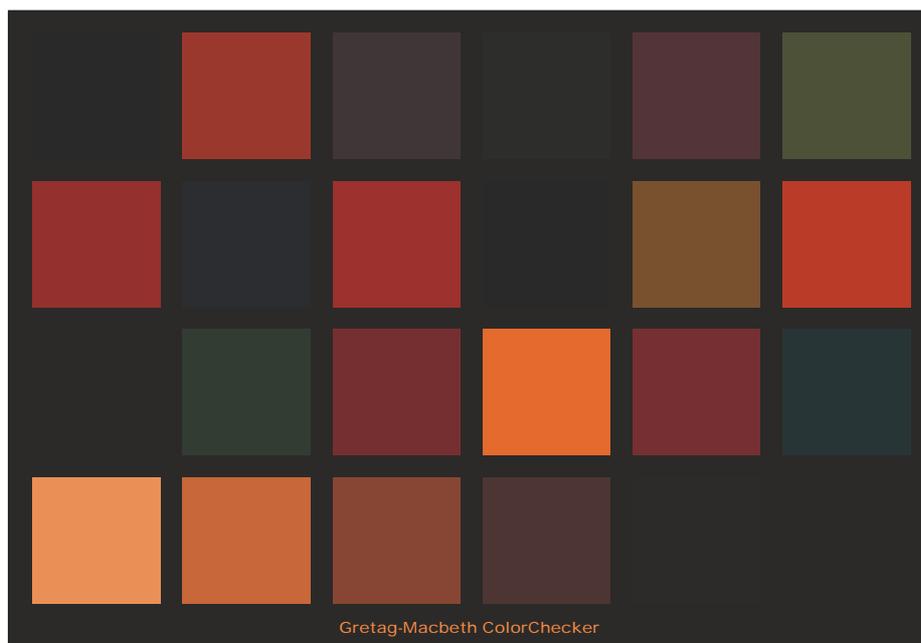
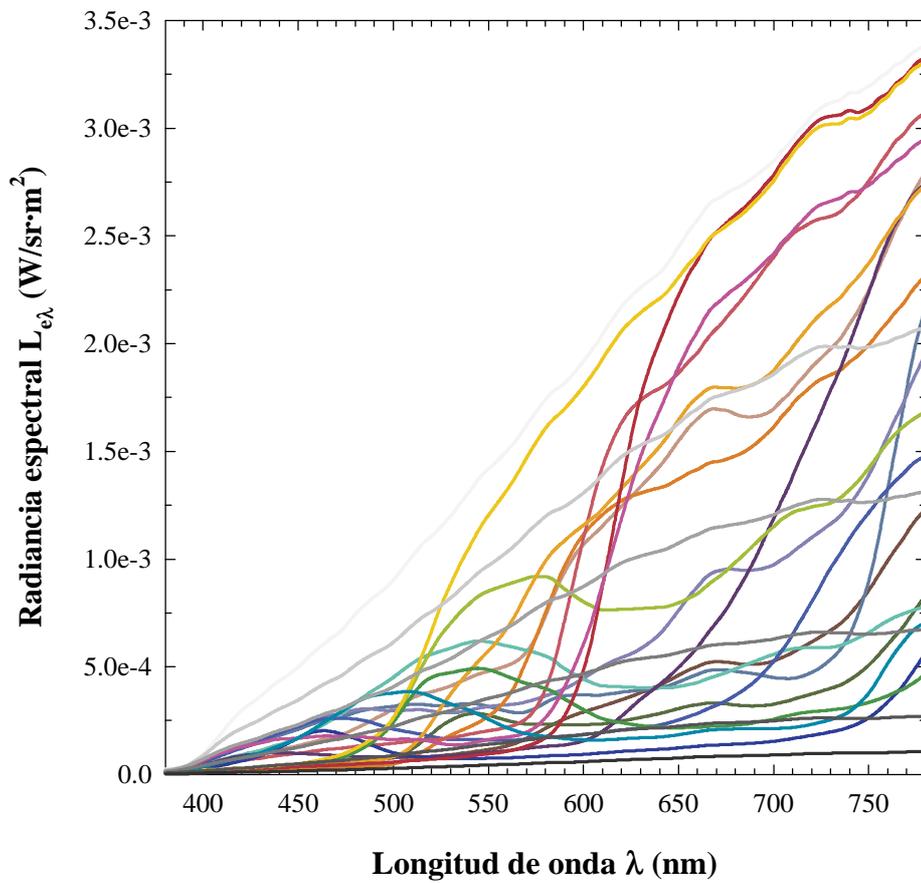


Figura 4.12: Arriba, estímulos-color b_{mINC} que inciden sobre la cámara Sony DXC-930P; abajo, simulación impresa de la codificación aislada de los estímulos-color con apertura relativa $N = 4$.

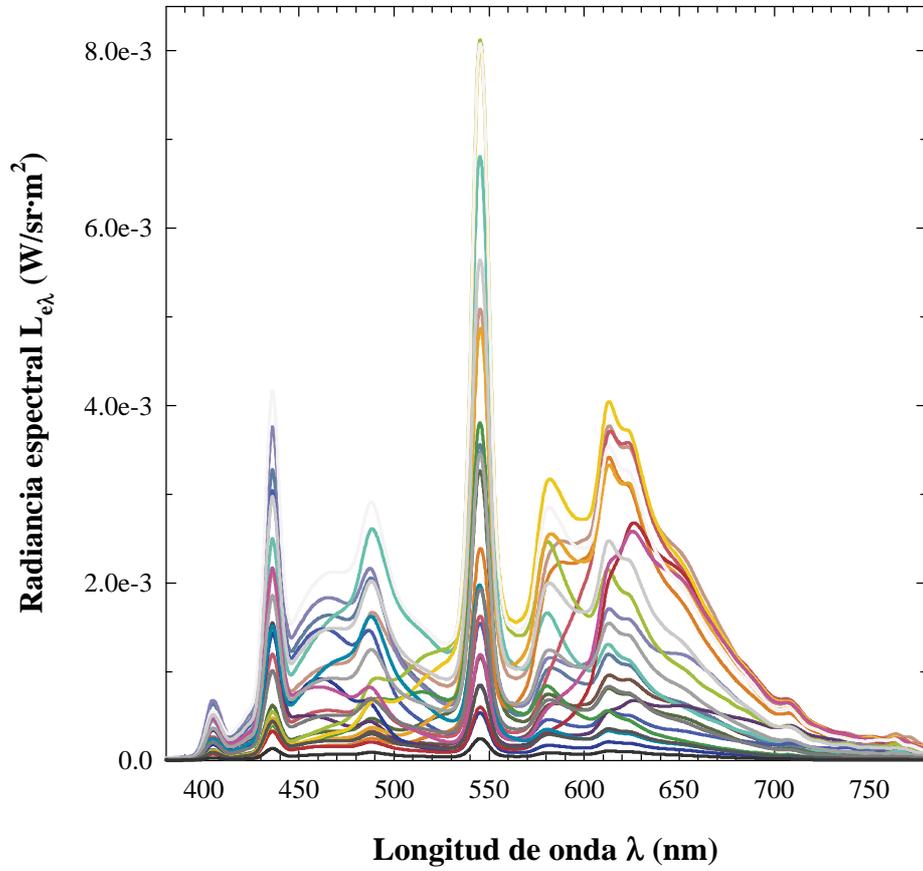


Figura 4.13: Arriba, estímulos-color b_{mDAY} que inciden sobre la cámara Sony DXC-930P; abajo, simulación impresa de la codificación aislada de los estímulos-color con apertura relativa $N = 5.6$.

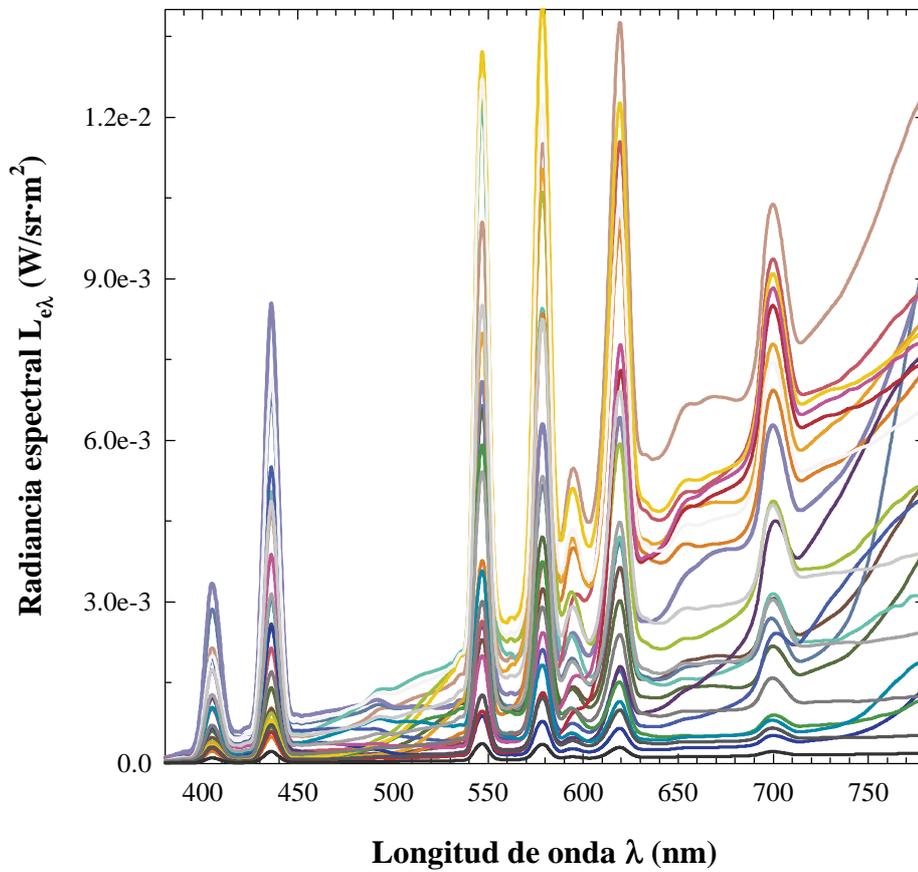


Figura 4.14: Arriba, estímulos-color b_{mHwL} que inciden sobre la cámara Sony DXC-930P; abajo, simulación impresa de la codificación aislada de los estímulos-color con apertura relativa $N = 5.6$.

Montajes experimentales

Tabla 4.3: Resultados de la captura de los estímulos-color de la escena bajo iluminación tipo INC según la cámara Sony DXC-930P y el tele-espectroradiómetro Photo Research PR-650.

Nº	Codificación cromática según Sony DXC-930P						Codificación cromática absoluta (en cd/m ²) según PR-650							
	ND _R	s _R	ND _G	s _G	ND _B	s _B	X	s _X	Y	s _Y	Z	s _Z	L _E	s _E
1	31.5	1.8	1.3	1.0	0.0	0.2	16.87	0.68	12.67	0.51	2.38	0.10	111.28	4.45
*2	140.0	5.0	37.8	2.1	12.2	1.6	60.20	2.44	47.50	1.90	11.13	0.45	126.22	5.05
*3	42.9	2.2	25.6	1.7	22.3	1.6	24.58	0.97	24.47	0.98	16.00	0.63	118.24	4.73
4	24.3	2.3	13.2	1.6	0.1	0.4	15.82	0.63	16.68	0.67	3.23	0.13	122.96	4.92
*5	63.4	3.6	25.6	2.1	25.7	2.0	31.67	1.23	27.61	1.10	17.11	0.66	110.57	4.42
*6	65.1	3.6	62.2	3.5	23.0	1.9	33.22	1.27	40.01	1.60	15.93	0.61	93.65	3.75
7	138.4	7.2	13.9	1.6	0.1	0.3	57.63	2.28	39.63	1.59	2.00	0.08	116.48	4.66
*8	17.4	1.7	8.9	1.4	21.1	1.7	14.22	0.57	13.28	0.53	15.31	0.61	114.77	4.59
*9	146.4	5.7	10.8	1.6	6.5	1.5	61.33	2.44	67.47	1.50	7.56	0.30	163.30	6.53
10	21.9	2.1	0.6	0.8	5.0	1.2	14.14	0.57	10.21	0.41	6.66	0.27	143.85	5.75
*11	110.4	4.4	66.1	3.3	1.7	1.2	51.22	2.04	54.28	2.17	5.62	0.22	120.45	4.82
12	170.5	6.6	38.7	2.2	0.6	0.9	69.03	2.70	53.89	2.16	3.39	0.13	115.93	4.62
13	3.6	1.2	0.1	0.3	11.6	1.2	7.57	0.30	6.59	0.26	10.51	0.42	111.67	4.67
14	32.2	2.0	36.6	1.9	0.8	0.9	20.79	0.83	27.63	1.11	4.89	0.20	129.03	5.16
15	110.2	3.4	0.4	0.7	0.1	0.4	46.38	1.86	24.44	0.98	2.75	0.11	137.77	5.51
16	239.5	1.1	90.8	3.2	2.6	1.5	107.00	4.30	92.58	3.70	6.21	0.25	146.90	5.88
*17	108.9	4.1	7.5	1.4	15.1	1.6	46.85	1.88	27.94	1.12	11.84	0.48	119.24	4.77
*18	13.2	1.5	23.5	1.4	18.5	1.4	13.64	0.54	17.98	0.72	14.66	0.58	106.25	4.25
19	239.7	0.6	131.6	2.6	68.1	2.0	120.00	4.86	109.80	4.39	39.00	1.58	123.77	4.95
*20	181.9	5.1	87.3	3.1	44.8	2.1	84.25	3.31	77.44	3.10	27.96	1.09	128.39	5.14
*21	117.1	3.6	52.9	2.1	26.1	1.6	53.77	2.20	49.27	1.87	17.95	0.73	136.11	5.44
*22	57.7	2.6	24.0	1.5	10.1	1.3	29.47	1.18	27.30	1.09	9.93	0.40	135.34	5.41
23	15.7	1.6	3.3	1.1	0.6	0.8	11.72	0.47	10.87	0.43	3.93	0.16	113.04	4.52
24	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.92	0.15	3.58	0.14	1.32	0.05	102.01	4.08

En las Tablas 4.3-5 los estímulos-color marcados con un asterisco (*) son los denominados colores útiles puesto que, teniendo en cuenta que sus correspondientes valores digitales ND_{RGB} han sido previamente corregidos de fondo, cumplen la condición siguiente:

Ecuación 4.5

$$ND_{RGB} = \begin{bmatrix} ND_R \\ ND_G \\ ND_B \end{bmatrix} \text{ es útil } \Leftrightarrow$$

$$ND_R \in]0, (2^{bits} - 1) - f_R[\wedge ND_G \in]0, (2^{bits} - 1) - f_G[\wedge ND_B \in]0, (2^{bits} - 1) - f_B[$$

En este caso, los colores útiles bajo iluminación INC son {2,3,5,6,8,9,11,17,18,20,21,22}.

Por otro lado, la incertidumbre de la medida colorimétrica absoluta según PR-650 se ha estimado según la información proporcionada por el fabricante (§ Tabla 1.2) y la teoría de propagación de errores aleatorios (§ Ec. 1.23). Según esto, si el coeficiente de variación en medidas de luminancia es del 4 % (supongamos también que lo es para medidas radiométricas) y que los errores instrumentales de medida directa \mathbf{b} no

son correlacionados con la longitud de onda, la matriz covarianza S_b será diagonal, y, por tanto, las varianzas s_x^2 , s_y^2 e s_z^2 se obtendrán a partir del cálculo matricial siguiente:

Ecuación 4.6

$$S_b = (0.04)^2 (b \cdot b^t) \Rightarrow S_{t_{xyz}} = T_{xyz}^t \cdot S_b \cdot T_{xyz} = \begin{bmatrix} s_x^2 & & \\ & s_y^2 & \\ & & s_z^2 \end{bmatrix}, \text{ con } T_{xyz} \equiv 683 \cdot 4 \cdot T_{xyz}$$

el cual proporciona siempre valores ligeramente inferiores que los obtenidos directamente por propagación de errores no correlacionados tomando directamente los datos del fabricante $\Delta L = 0.04L$ ($\Delta Y = 0.04Y$), $\Delta x = 0.001$ y $\Delta y = 0.001$.

Tabla 4.4: Resultados de la captura de los estímulos-color de la escena bajo iluminación tipo DAY según la cámara Sony DXC-930P y el tele-espectroradiómetro Photo Research PR-650.

Nº	Codificación cromática según Sony DXC-930P						Codificación cromática absoluta (en cd/m ²) según PR-650							
	ND _R	s _R	ND _G	s _G	ND _B	s _B	X	s _X	Y	s _Y	Z	s _Z	L _E	s _E
*1	38.9	3.1	11.9	1.6	9.4	1.5	41.25	1.66	35.66	1.43	16.89	0.68	337.75	13.51
*2	170.5	5.9	83.9	3.2	67.4	2.8	163.20	6.51	147.10	5.88	77.68	3.10	405.94	16.24
*3	53.4	2.5	59.5	2.4	103.5	3.4	78.22	3.14	82.76	3.31	113.10	4.54	384.63	15.39
*4	33.5	2.1	40.1	2.1	13.4	1.4	48.45	1.94	60.25	2.41	23.51	0.94	421.93	16.88
*5	75.1	3.6	59.0	3.0	117.9	5.0	96.75	3.86	91.25	3.65	127.20	5.08	372.38	14.90
*6	72.8	4.8	118.3	6.7	94.3	5.8	101.90	4.04	136.30	5.45	105.10	4.17	304.81	12.19
*7	147.2	7.8	30.8	2.6	5.0	1.7	126.10	5.04	97.10	3.88	12.50	0.50	327.25	13.09
*8	18.7	1.8	22.4	1.7	90.6	3.7	43.43	1.78	39.50	1.58	96.95	3.99	323.02	12.92
*9	130.4	5.7	19.9	1.9	30.4	2.2	118.50	4.75	79.50	3.18	40.30	1.61	402.92	16.12
*10	17.8	1.8	5.5	1.2	30.8	2.0	32.30	1.29	25.07	1.00	41.03	1.64	370.14	14.81
*11	115.8	5.1	119.9	5.4	16.1	1.9	126.50	5.06	159.70	6.39	28.92	1.16	345.52	13.82
*12	159.5	10.0	65.5	4.6	8.4	1.9	144.50	5.78	131.80	5.27	18.73	0.75	314.88	12.60
*13	1.5	1.1	1.5	1.1	42.8	2.7	19.17	0.77	15.24	0.61	52.91	2.12	233.27	9.33
*14	25.9	2.3	53.6	2.9	9.4	1.4	44.21	1.77	67.97	2.72	20.66	0.83	286.25	11.45
*15	71.1	3.7	1.2	1.0	3.3	1.2	67.03	2.69	38.86	1.55	11.54	0.46	271.92	10.88
*16	191.2	8.4	115.5	5.6	11.1	2.1	182.20	7.30	186.70	7.47	22.65	0.90	303.75	12.15
*17	82.2	4.7	13.3	1.7	52.4	3.1	85.99	3.44	55.73	2.23	63.32	2.53	274.50	10.98
*18	7.5	1.5	30.9	2.1	54.1	2.9	32.01	1.28	42.66	1.71	65.72	2.63	219.81	8.79
*19	167.0	7.1	132.5	5.7	132.4	5.7	187.40	7.49	193.30	7.73	148.10	5.93	212.65	8.51
*20	114.8	5.6	90.3	4.4	92.2	4.6	130.80	5.24	134.70	5.39	104.60	4.19	225.37	9.01
*21	67.4	3.8	51.2	2.9	54.2	3.1	81.24	3.26	83.22	3.33	65.27	2.61	223.18	8.93
*22	30.9	2.3	23.1	1.9	25.0	1.9	44.47	1.78	46.11	1.84	35.91	1.44	225.88	9.04
*23	7.0	1.4	4.1	1.2	6.1	1.2	19.15	0.77	19.91	0.80	15.60	0.63	205.87	8.23
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.83	0.23	5.98	2.39	4.82	0.19	173.14	6.93

Los colores útiles bajo iluminación DAY son todos los posibles excepto el n° 24.

Montajes experimentales

Tabla 4.5: Resultados de la captura de los estímulos-color de la escena bajo iluminación tipo HWL según la cámara Sony DXC-930P y el tele-espectroradiómetro Photo Research PR-650.

Nº	Codificación cromática Según Sony DXC-930P						Codificación cromática absoluta (en cd/m^2) según PR-650							
	ND _R	s _R	ND _G	s _G	ND _B	s _B	X	s _X	Y	s _Y	Z	s _Z	L _E	s _E
*1	105.9	7.6	23.7	2.6	9.0	1.7	103.80	4.15	81.85	3.27	18.78	0.75	726.16	29.05
2	239.8	0.6	132.7	8.7	68.4	5.1	391.40	15.03	318.50	12.74	86.09	3.45	859.30	34.37
*3	140.7	8.6	86.0	5.8	100.1	6.8	163.70	6.48	154.90	6.20	121.90	4.82	762.22	30.49
*4	100.9	6.2	67.2	4.5	13.9	1.8	116.70	4.65	125.70	5.03	26.80	1.07	899.36	35.97
*5	209.1	12.1	97.7	6.6	129.9	8.8	225.00	8.75	191.60	7.66	150.50	5.85	800.49	32.02
*6	226.5	12.6	198.2	12.1	101.7	6.9	219.50	8.28	253.20	10.13	105.00	3.96	587.63	23.51
7	239.6	0.8	50.2	4.1	3.5	2.2	261.20	10.25	191.60	7.66	10.76	0.42	554.77	22.19
*8	52.4	3.9	28.4	2.6	74.8	5.2	75.16	3.01	63.75	2.55	93.18	3.73	587.65	23.51
9	235.9	6.5	28.8	3.8	24.9	3.7	235.00	9.47	147.50	5.90	37.12	1.51	690.17	27.61
*10	47.2	3.7	8.7	1.7	29.5	2.6	59.61	2.26	42.40	1.70	42.83	1.62	597.47	23.90
11	238.1	3.8	157.3	9.5	11.1	2.7	249.20	9.71	270.90	10.84	23.84	0.94	568.18	22.73
12	239.7	0.8	102.8	7.4	7.3	1.7	298.50	12.04	250.00	10.00	16.40	0.67	531.97	21.28
*13	11.4	1.9	2.6	1.3	28.5	2.8	29.35	1.18	23.06	0.92	44.81	1.81	426.62	17.06
*14	66.5	4.8	64.3	4.5	4.9	1.6	82.77	3.32	106.50	4.26	16.12	0.66	480.54	19.22
*15	143.2	8.5	4.4	1.4	2.5	1.2	133.50	5.37	73.46	2.94	10.39	0.43	459.43	18.38
16	239.8	0.6	154.8	10.4	8.4	3.5	379.80	15.18	346.60	13.86	20.22	0.82	532.88	21.32
*17	171.6	10.8	19.4	2.4	47.4	3.9	173.00	6.83	104.80	4.19	63.66	2.52	481.99	19.28
*18	32.8	3.5	40.4	3.6	42.4	3.7	59.11	2.36	68.74	2.75	60.71	2.43	447.70	17.91
19	239.7	0.6	158.7	8.9	99.2	6.3	348.00	13.95	320.40	12.82	127.30	5.11	358.34	14.33
*20	221.6	12.0	104.7	6.3	66.3	4.7	222.40	9.33	204.60	8.18	83.18	3.47	363.74	14.55
*21	140.3	8.5	62.4	4.3	39.4	3.3	151.40	6.04	138.80	5.55	56.69	2.26	375.35	15.01
*22	71.6	4.7	29.5	2.5	17.3	2.0	82.61	3.25	76.44	3.06	30.99	1.22	373.50	14.94
*23	24.6	2.4	6.9	1.4	3.6	1.2	33.78	1.36	31.34	1.25	12.89	0.52	330.14	13.21
24	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.1	10.48	0.41	9.61	0.38	4.12	0.16	278.18	11.13

En este caso, bajo iluminación HWL, los colores útiles posibles son {1,3,4,5,6,8,9,10,11,13,14,15,17,18,20,21,22,23}.

En definitiva, tenemos disponibles $12 + 23 + 18 = 53$ estímulos-color, todos espectralmente diferentes, para buscar más adelante una relación directa entre las ternas ND_{RGB} y t_{XYZ} (en cd/m^2).

Finalmente, al igual que en el montaje experimental A, podemos estimar la exposición espectral en cada área-color de la carta Color Checker. Como en este caso resulta imposible obtener la distancia focal f' en el objetivo telecéntrico (puesto que usamos los dos sistemas de enfoque), hemos estimado los parámetros necesarios A_{SENSOR} y m_{OBJETIVO} apoyándonos en el cálculo siguiente:

Ecuación 4.7

$$n^\circ \text{ píxels} - \text{imagen} = 6000 \equiv n \quad \text{y} \quad \text{escalado} - \text{imagen} = \frac{512 \times 512}{752 \times 582} = 0.5990 \equiv r$$

$$\Rightarrow A_{\text{SENSOR}} = \frac{n}{r} A_{\text{pixel}} = \frac{6000}{0.5990} 6.9700 e^{-11} = 6.9826 e^{-7} \text{ m}^2 \quad \Rightarrow \quad y' = -8.3562 e^{-4} \text{ m}$$

$$\Rightarrow m_{\text{OBJETIVO}} = \frac{y'}{y} = \frac{-8.3562 e^{-4}}{0.04} = -0.0209$$

Con estos datos y considerando de nuevo el tiempo de obturación $t = 20$ ms (en modo desactivado), $T_{ATM} = 1$ y $\tau_{OBJETIVO} = 1$, nos queda finalmente:

Ecuación 4.8

$$H(\lambda) = 1.1441e - 8 \frac{L_e(\lambda)}{N^2} \text{ [J] , con } L_e(\lambda) \text{ en W/sr}\cdot\text{m}^2$$

El único aspecto que cabe citar ahora, como presuposición clave de este montaje experimental y en conexión con el anterior, es que asumimos que las tres áreas CCD de la cámara responden espacialmente (en su globalidad, no a nivel local que es como se calcula la varianza de la medida) de forma homogénea, cosa que no será cierta al 100 %, pero que no hemos valorado en este trabajo. Es decir, hemos supuesto que la corrección de campo plano no era necesaria, o sea, que aunque los resultados que obtendremos de la caracterización espectral correspondan directamente al centro de cada área CCD, los extenderemos y aplicaremos a toda el área CCD.

4.2 Funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSFs)

Las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSFs) son el primer parámetro funcional de la caracterización espectrocolorimétrica y optoelectrónica de un dispositivo de captura. Especifica directamente la relación *salida vs. entrada* (§ 2.1, 2.2.4), en este caso, los niveles digitales de respuesta ND_{RGB} frente a la exposición espectral $H(\lambda)$. Utilizando el montaje experimental A (del monocromador), se preparaba un estímulo monocromático de radiancia variable mediante la variación sistemática de las rendijas de entrada/salida del monocromador y, en el caso de que fuera necesario, variando también la apertura relativa N del objetivo fotográfico. (Esto último significaba dar por verificada la ley de la reciprocidad, aspecto que se tratará en § 4.3.) El intervalo espectral utilizado fue originalmente de 380 nm a 780 nm con $\Delta\lambda = 10$ nm, pero que se redujo inmediatamente a 380-700 nm puesto que la fuente luminosa Osram HQI no emite más lejos de 700 nm. Aún así, se comprobó más adelante con una lámpara halógena, de emisión extensa en el IR, que la cámara Sony DXC-930P no es sensible más allá de 700 nm, lo cual evidencia la existencia de un filtro de corte de luz IR. Con la Ecuación 4.4, se calculan los valores correspondientes de exposición espectral $H(\lambda)$ en función de la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ y la apertura relativa N . Por otra parte, a través del programa ANCOL, se edita la imagen monocromática captada correspondiente y resultante de un promedio de 8 imágenes para obtener el valor medio característico ND y la varianza s_{ND}^2 .

Vamos a incluir como ejemplos iniciales los resultados directos para $\lambda = 450$ nm en el canal B, $\lambda = 550$ nm en el canal G y $\lambda = 650$ nm en el canal R. En principio, esta selección es completamente aleatoria, sin ningún sentido optoelectrónico o espectrocolorimétrico previo, salvo que, al igual que en otros grupos de longitudes de onda la cámara responde exclusivamente en un único canal-color, por lo que únicamente se pretende mostrarla como ejemplo. Una vez seguido el preámbulo experimental anterior, se tabula y se

Funciones espectrales de conversión optoelectrónica

representan gráficamente ND_B vs. H_{450} , ND_G vs. H_{550} y ND_R vs. H_{650} pasando previamente los datos ND a niveles digitales relativos $NDR = ND/255$, puesto que tenemos 8 bits de nivel de digitalización. La Figura 4.15 muestra la distribución de los puntos experimentales en una forma característica tipo S. El aumento progresivo y la reducción brusca de los intervalos de incertidumbre muestra directamente el comportamiento de transferencia optoelectrónica del sistema fotodetector (§ 2.1, 2.2.4).

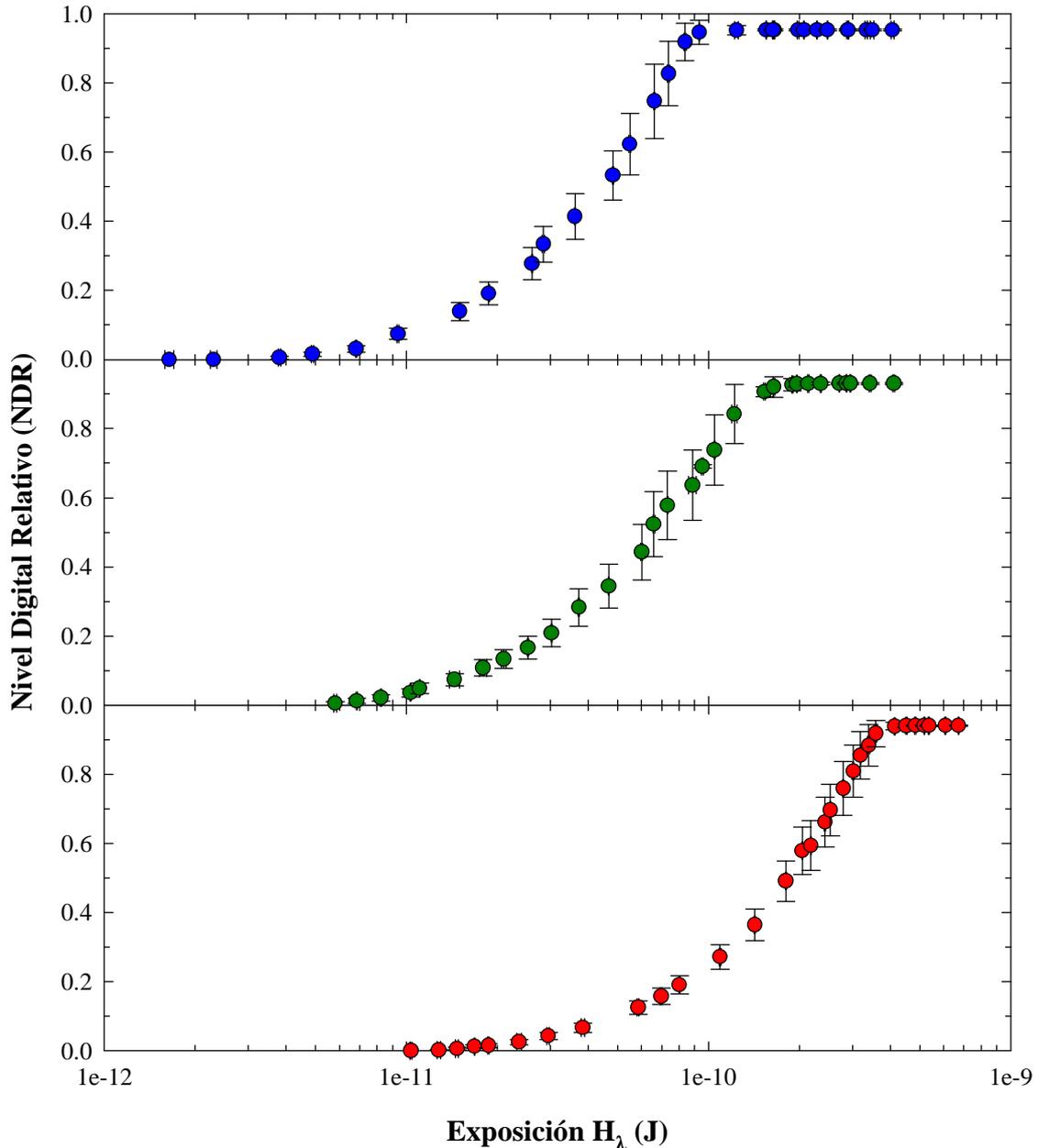


Figura 4.15: OECSFs experimentales para las combinaciones 450 nm - canal B (arriba), 550 nm - canal G (centro) y 650 nm - canal R (abajo) bajo las series de exposición ($L_e(\lambda)$, $N = 5.6$, $t = t_0 = 20$ ms). Los intervalos de incertidumbre están representados al 95 % de confianza.

El método matemático más directo de describir la forma analítica de las curvas OECSFs es presentar un test de bondad de ajuste matemático para un conjunto bien seleccionado de funciones o curvas de transición. La Tabla 4.6 muestra este grupo de curvas (extraído del programa *TableCurve*) pensando un número reducido de ecuaciones con el mínimo número de parámetros y que presenten alguna simplicidad a la hora de manejarlas.

Tabla 4.6: Cuadro esquemático de las curvas de transición seleccionadas inicialmente en este trabajo con su número de parámetros de ajuste a , b , c , d y e . La función $erf(x)$ es la función integral de probabilidad o función error.

NOMBRE	ECUACIÓN	PARÁMETROS
Cumulativa Weibull	$y = a + b \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{x + d \ln 2^{1/e} - c}{d} \right)^e \right) \right]$	5
Sigmoide asimétrica	$y = a + \frac{b}{\left[1 + \exp \left(\frac{x + d \ln \left(2^{1/e} - 1 \right) - c}{d} \right) \right]^e}$	5
Cumulativa gausiana	$y = a + \frac{b}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - c}{d\sqrt{2}} \right) \right]$	4
Sigmoide	$y = a + \frac{b}{1 + \exp \left(- \frac{x - c}{d} \right)}$	4
Logística	$y = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x}{c} \right)^d}$	4

A la vista de la tabla anterior, parece ser que el mínimo número de parámetros para describir una curva de transición es 4 y que a medida que aumentamos este número las ecuaciones se complican. Por lo tanto, nos hemos decidido por las funciones Cumulativa Gausiana, Sigmoide y Logística para efectuar el test inicial sobre cuál de ellas presentará el mejor ajuste matemático a los resultados experimentales OECSFs.

Existe una relación importante entre la función Logística y la función que describe la respuesta dinámica de los fotorreceptores humanos (Hunt 1991; Hunt 1995), denominada *función de Naka-Rushton*, la cual se usa en el modelo de apariencia del color CIECAM'97s (Fairchild 1998). La función Naka-Rushton se expresa como:

Ecuación 4.9

$$y = A + B \frac{x^n}{x^n + s^n}$$

Funciones espectrales de conversión optoelectrónica

donde A , B , n y s son los parámetros de ajuste. El parámetro n indica la pendiente o valor γ de la curva y s es la constante de semi-saturación. Esta función es equivalente a la función Logística haciendo $A = a$, $B = b$, $s = c$ y $n = -d$.

Tras esta aclaración sobre las curvas de transición, las Tablas 4.7-9 muestran los resultados de los ajustes matemáticos de los datos experimentales anteriores. La Figura 4.16 muestra los resultados gráficos de los ajustes para la función Sigmoide (SIG), la cual alcanzó en los tres casos el rango de bondad del ajuste n° 2 (error estándar de ajuste < 0.020), y, ya que presenta una simplicidad intermedia entre las funciones Cumulativa Gausiana (CUM) y la función Logística (LOG), se decidió representar todos los resultados OECSFs bajo esta función. Así, el valor máximo de la función Sigmoide es $(a + b)$ y el cociente c/d es la pendiente o valor γ de esta función. El valor de exposición $H_{0.5}$ es la exposición tal que su valor sigmoide es $(a + b)/2$ y representa el desplazamiento de la función a lo largo del rango de la variable independiente o valor exposición espectral. El valor $H_{0.5}$ viene dado por:

Ecuación 4.10

$$H_{0.5} = c - d \ln \left(\frac{b+a}{b-a} \right)$$

Tabla 4.7: Resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales ($L_e(450 \text{ nm})$, $N = 5.6$, $t = t_0 = 20 \text{ ms}$) de la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal B. Los errores estándar de los parámetros de ajuste (a , b , c , d) están entre paréntesis.

FUNCIÓN	PARÁMETROS DEL AJUSTE				ERROR ESTÁNDAR AJUSTE
	a	b	c	d	
CUM	-0.201 (0.043)	1.157 (0.045)	3.381 (0.197) e-11	3.366 (0.175) e-11	0.016425
SIG	-0.197 (0.043)	1.155 (0.045)	3.395 (0.196) e-11	2.025 (0.174) e-11	0.020010
LOG	0.022 (0.015)	0.954 (0.021)	4.008 (0.133) e-11	-2.448 (0.176)	0.034270

Tabla 4.8: Resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales ($L_e(550 \text{ nm})$, $N = 5.6$, $t = t_0 = 20 \text{ ms}$) de la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal G. Los errores estándar de los parámetros de ajuste (a , b , c , d) están entre paréntesis.

FUNCIÓN	PARÁMETROS DEL AJUSTE				ERROR ESTÁNDAR AJUSTE
	a	b	c	d	
CUM	-0.420 (0.071)	1.355 (0.073)	3.593 (0.461) e-11	6.252 (0.304) e-11	0.011189
SIG	-0.339 (0.057)	1.279 (0.059)	4.122 (0.365) e-11	3.617 (0.175) e-11	0.013773
LOG	0.026 (0.013)	0.957 (0.023)	6.255 (0.178) e-11	-2.157 (0.137)	0.026153

Tabla 4.9: Resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales ($L_e(650 \text{ nm})$, $N = 5.6$, $t = t_0 = 20 \text{ ms}$) de la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal R. Los errores estándar de los parámetros de ajuste (a , b , c , d) están entre paréntesis.

FUNCIÓN	PARÁMETROS DEL AJUSTE				ERROR ESTÁNDAR AJUSTE
	a	b	c	d	
CUM	-0.162 (0.027)	1.113 (0.030)	14.934 (0.521) e-11	13.337 (0.512) e-11	0.012768
SIG	-0.170 (0.031)	1.132 (0.035)	14.974 (0.584) e-11	8.236 (0.399) e-11	0.016357
LOG	0.020 (0.012)	1.018 (0.032)	18.198 (0.601) e-11	-2.273 (0.165)	0.029708

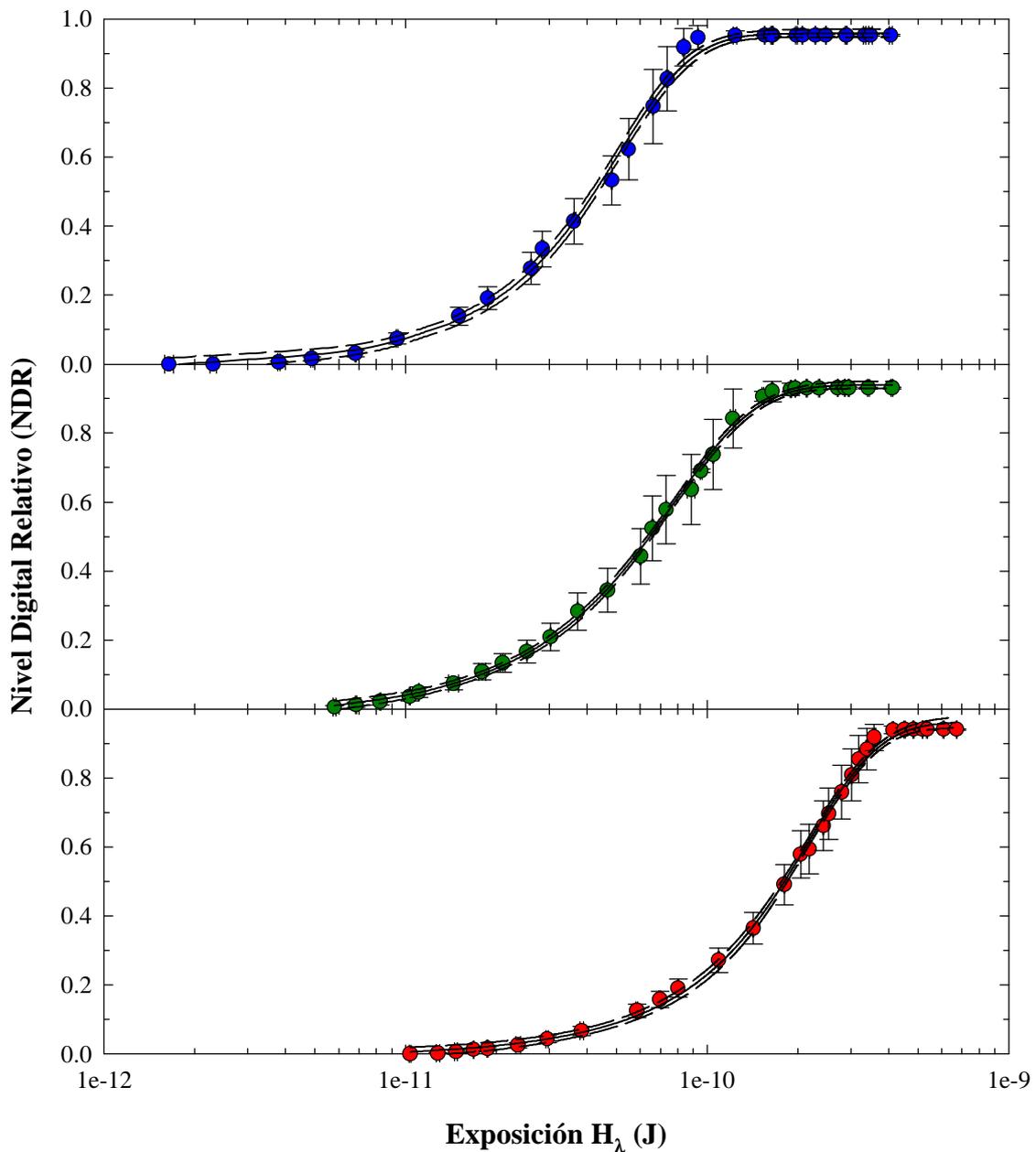


Figura 4.16: OECSFs experimentales para las combinaciones 450 nm - canal B (arriba), 550 nm - canal G (centro) y 650 nm - canal R (abajo) bajo las series de exposición ($L_e(\lambda)$, $N = 5.6$, $t = t_0 = 20$ ms). La curva de transición seleccionada para ajustar los datos experimentales (símbolos sólidos, barras de error como nivel de confianza al 95 %) es la función Sigmoide (línea sólida) junto con los intervalos de confianza al 95 % (líneas discontinuas).

De las tablas y figuras anteriores se desprende el siguiente análisis inicial. Para las longitudes de onda seleccionadas, el comportamiento de respuesta de los canales RGB de la cámara es diferente a lo largo de los rangos de exposición a los que son sensibles. En primer lugar, los valores de saturación en los tres

canales RGB son diferentes entre ellos porque el ruido de patrón fijo y de corriente oscura resulta ser diferente para cada canal debido a la propia naturaleza de la arquitectura de color de esta cámara CCD-RGB, porque es de tipo 3-CCD. En segundo lugar, si calculamos los valores $H_{0.5}$ de las funciones sigmoides en los tres ejemplos (4.093 e-11 J para el canal B, 6.086 e-11 J para el canal G, 17.467 e-11 J para el canal R), podemos deducir que el canal R es el menos sensible de los tres canales para las selecciones λ /canal propuestas, como así se observa con el mayor desplazamiento lateral de las tres curvas hacia la derecha del eje horizontal. Esto significa también que de los tres canales RGB, el canal R es que presenta la menor sensibilidad espectral para las tres λ seleccionadas. Por tanto, esta información de índole matemático servirá de pista para caracterizar espectralmente más adelante nuestro dispositivo de captura.

Ya que el intervalo espectral analizado fue [380, 700] nm a intervalos de 10 nm, presentamos en las figuras siguientes los valores sigmoidales (a, b, c, d) en función de la longitud de onda y canal de color. A la vista de estas representaciones se puede concluir que los parámetros a, b y c/d son aproximadamente independientes de la longitud de onda y también del canal, pero no así para el resto de los parámetros. Los valores c, d y $H_{0.5}$ describen unas parábolas en función de λ que indican claramente información sobre sensibilidad, con lo que podemos aproximar que las sensibilidades espectrales máximas en cada canal están entre 450-60 nm para el canal B, 520-40 nm para el canal G y 580-90 nm para el canal R.

Antes de pasar a la sección siguiente nos queda analizar hasta qué punto podemos considerar a nuestro dispositivo de captura como un sistema fotodetector lineal. En principio, las formas tipo S de las OECSFs muestran que tal comportamiento no se consigue estrictamente, sobretodo para respuestas cercanas al umbral y a la saturación. Aún así, ya que es bastante común considerar a estos dispositivos como lineales, vamos a proceder a continuación a un análisis sencillo sobre cómo se ajustan linealmente las OECSFs quitando los datos de la cola de saturación. Si hacemos esto, al cambiar la escala logarítmica de exposición $H(\lambda)$ a una escala lineal, parece razonable suponer que los datos OECSFs se ajustan perfectamente a una recta. Sin embargo, si comparamos el ajuste sigmoide y el ajuste lineal en escala logarítmica (Fig. 4.20) se puede apreciar en qué zonas de los datos experimentales ajusta mejor la una que la otra. El ajuste lineal no predice la cola inferior, la que parte desde los valores umbrales de respuesta; en cambio, ajusta bien los datos intermedios: por ejemplo, con $H = 2e-11$ J las respuestas sigmoide y lineal en el canal R muestran una desviación porcentual del 12 %, mientras que con $H = 9e-11$ J queda en un -5 % (Fig. 4.20 derecha).

Así pues, como primera aproximación, no es descabellado considerar lineales a los datos OECSFs, excepto que perdemos irremediamente el carácter optoelectrónico de los datos: con una OECSF lineal no podríamos considerar en ningún momento exposiciones espectrales equivalentes de ruido (EEER) ni de saturación (EEES). Por otro lado, el hecho de que las respuestas intermedias se ajusten bien a una recta nos indica que algún tipo de caracterización lineal se puede aplicar siempre y cuando se parta de un enfoque espectralradiométrico y optoelectrónico estricto. Esto es justamente lo que haremos más adelante en la obtención de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} de nuestro dispositivo de captura (§ 4.7).

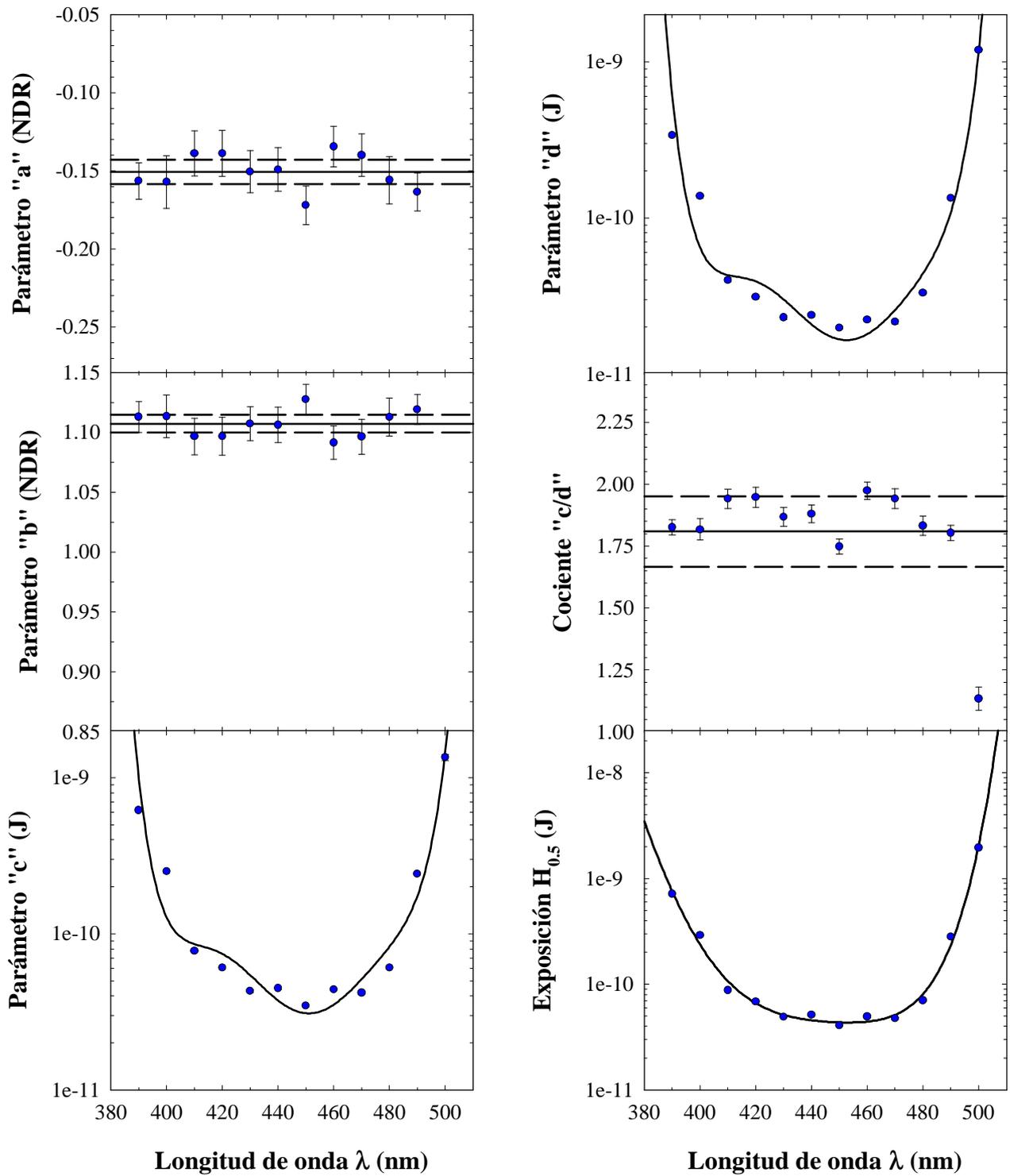


Figura 4.17: Valores sigmoidales {a, b, c, d} y parámetros c/d y $H_{0.5}$ de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal B. Los intervalos estadísticos en las gráficas "a", "b" y "c/d" vs. λ son al 95 % de confianza. Los ajustes en las gráficas "c", "d" y $H_{0.5}$ son polinomios de orden superior.

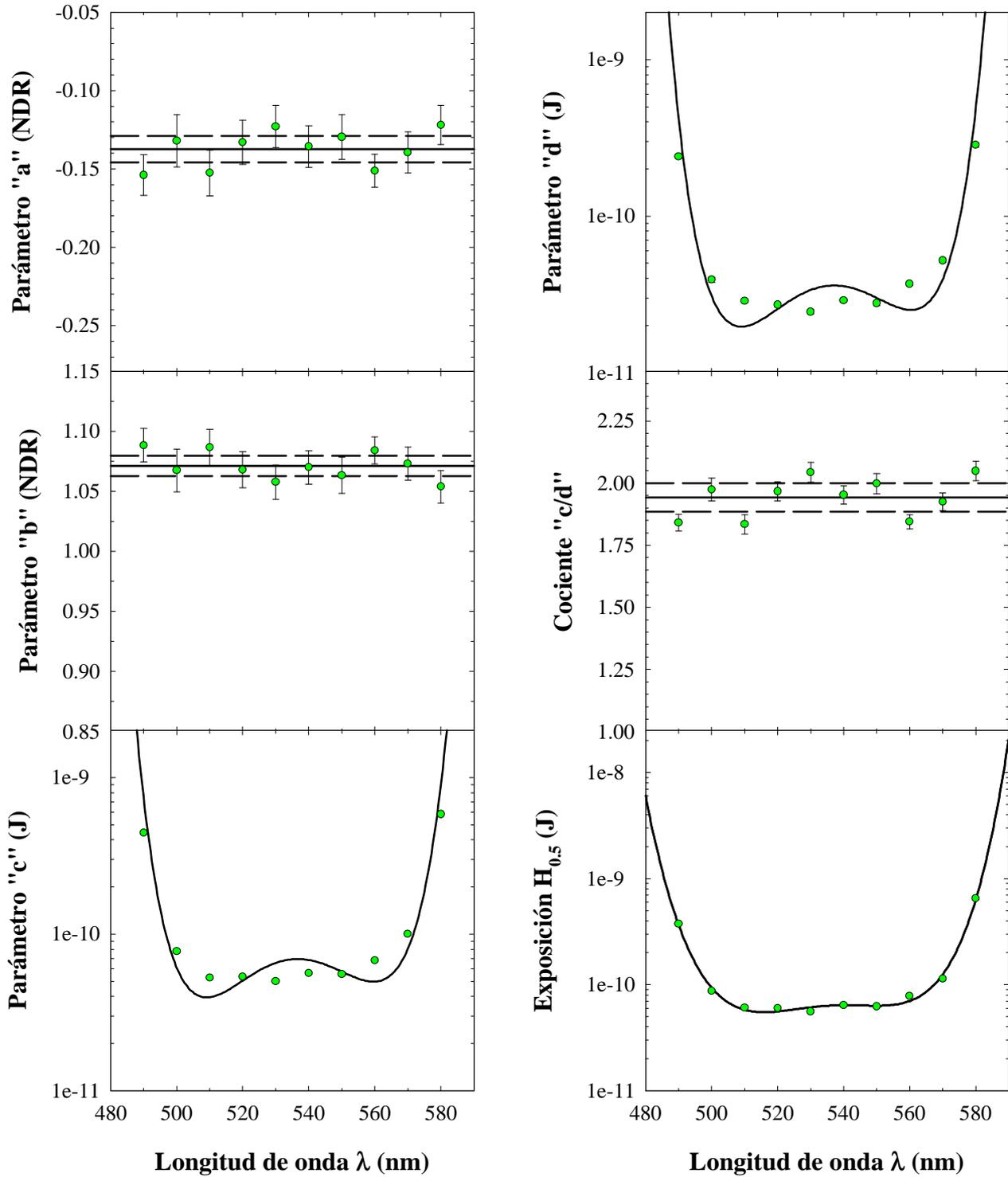


Figura 4.18: Valores sigmoidales {a, b, c, d} y parámetros c/d y $H_{0.5}$ de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal G. Los intervalos estadísticos en las gráficas "a", "b" y "c/d" vs. λ son al 95 % de confianza. Los ajustes en las gráficas "c", "d" y $H_{0.5}$ son polinomios de orden superior.

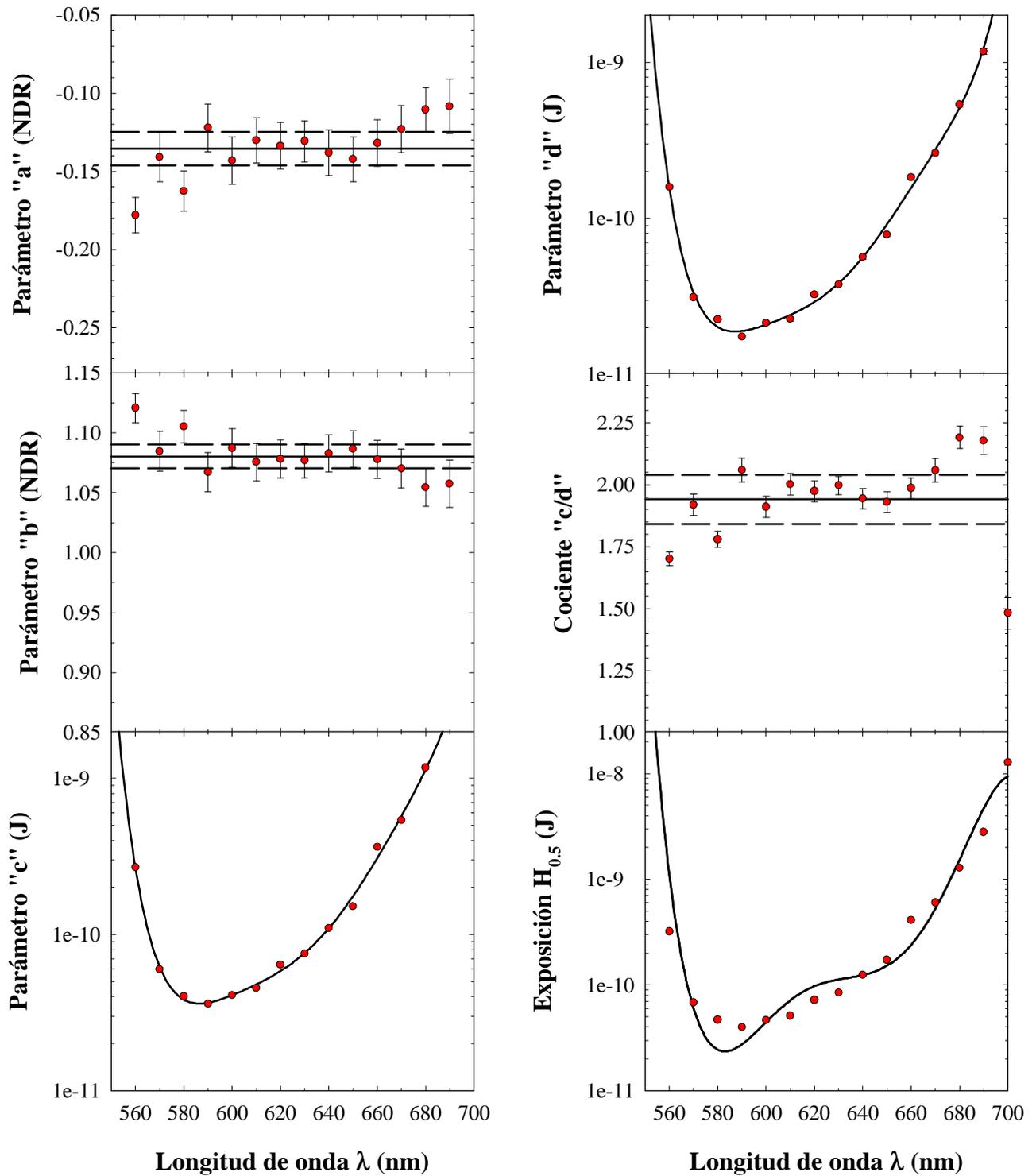


Figura 4.19: Valores sigmoidales {a, b, c, d} y parámetros c/d y $H_{0.5}$ de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF) del canal R. Los intervalos estadísticos en las gráficas "a", "b" y "c/d" vs. λ son al 95 % de confianza. Los ajustes en las gráficas "c", "d" y $H_{0.5}$ son polinomios de orden superior.

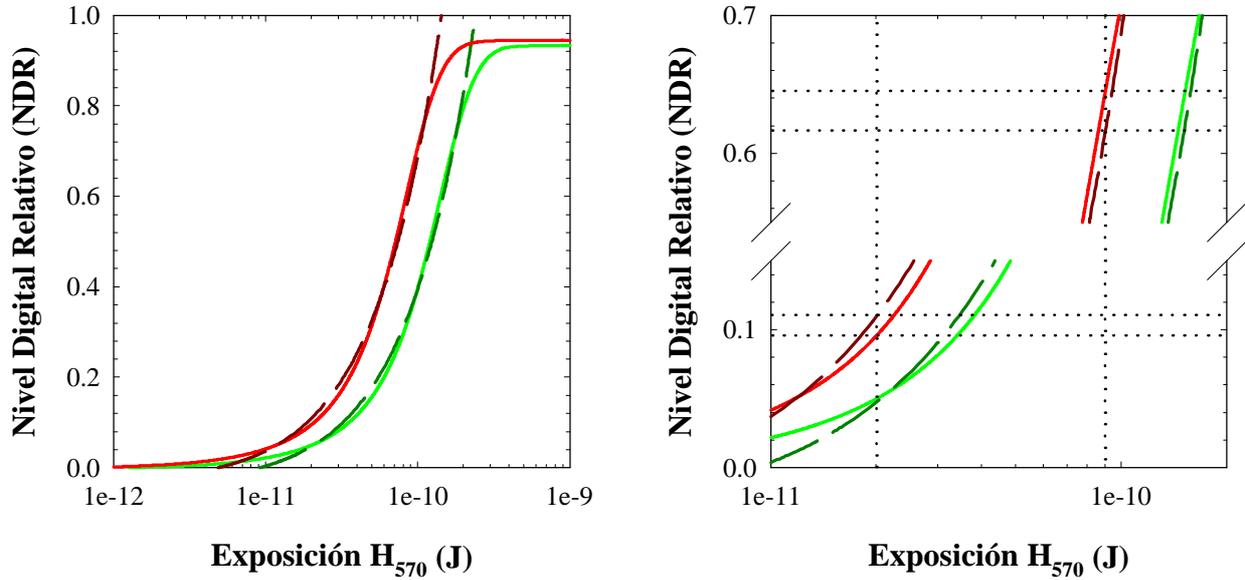


Figura 4.20: OECSFs de los canales R y G correspondientes a $\lambda = 570$ nm (el canal B no es sensible en esta longitud de onda), pero ajustando los datos según la función sigmoide (líneas continuas) o una recta (líneas discontinuas). La figura derecha es una ampliación de la parte central para mostrar los ejemplos numéricos del texto.

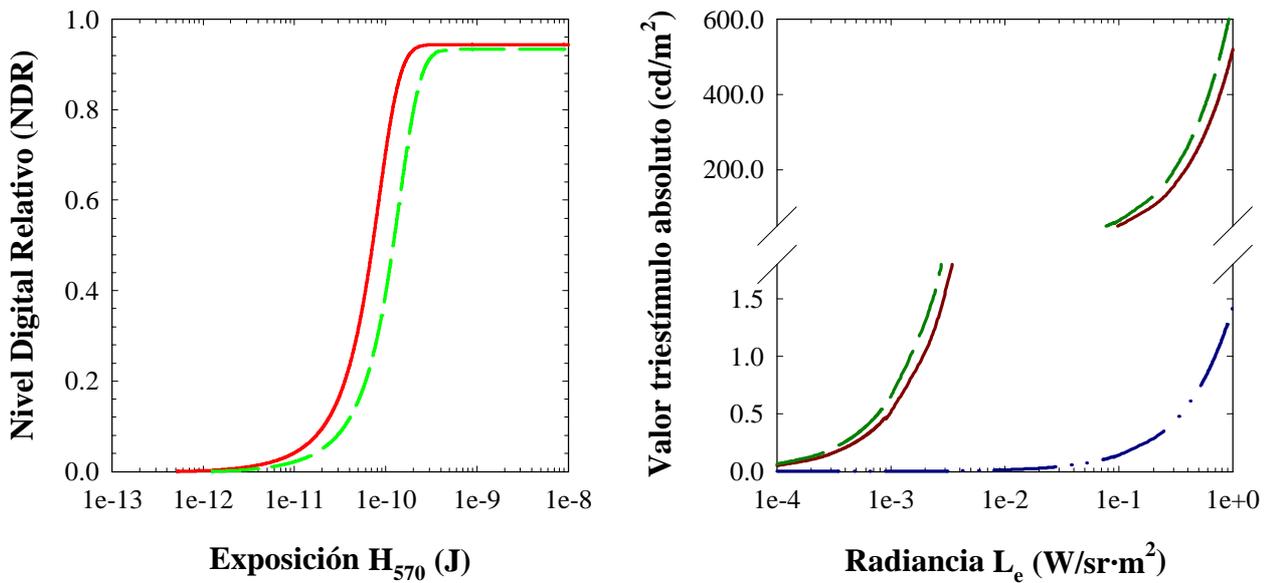


Fig. 4.21: OECSFs para dos dispositivos de captura para $\lambda = 570$ nm: izquierda, caso real (respuesta no lineal); derecha, observador patrón CIE-1931 XYZ (respuesta completamente lineal). Línea continua: canal R o X; línea discontinua: canal G o Y; línea discontinua y doblemente punteada: canal Z (el dispositivo ejemplo de captura no es sensible a esta longitud de onda).

Si comparamos este comportamiento optoelectrónico estrictamente no lineal con el considerado ideal para el observador patrón CIE-1931 XYZ como un sistema fotodetector lineal (Ec. 2.30. Fig. 2.26), nos queda un formato comparativo entre ambos tipos de dispositivos de captura que volveremos a repetir más adelante. De momento, la Figura 4.21 muestra claramente la disparidad de comportamientos espectralradiométricos y optoelectrónicos de ambos sistemas.

4.3 Verificación de la ley de la reciprocidad

La exposición espectral $H(\lambda)$ es directamente proporcional a la radiancia espectral $L_e(\lambda)$ del objeto a visualizar y el tiempo de integración t , e inversamente proporcional al cuadrado de la apertura relativa N .

Ecuación 4.11

$$H(\lambda) = k \frac{L_e(\lambda)}{N^2} t, \quad k = \frac{\pi}{4} \frac{A_{SENSOR}}{(1 + m'_{OBJETIVO})^2}$$

Con la expresión anterior, e independientemente de considerar procesos de exposición con patrones espectrales o no espectrales, parece ser que siempre se encontrarán combinaciones diferentes de radiancia L_e , apertura relativa N y tiempo de exposición t que proporcionarán exposiciones equivalentes, que equivaldrían a respuestas analógicas y digitales idénticas del dispositivo de captura. Es decir, si consideramos solamente los dos parámetros intrínsecos de la cámara, N y t , las series (N, t) pueden dar series equivalentes o no de valores de radiancia L_e . Por ejemplo:

Ecuación 4.12

$$N \text{ fijo, } t \text{ variable : } (N_1 = 2.8, t_1 = 20 \text{ ms}) \leftrightarrow (N_2 = 2.8, t_2 = 5 \text{ ms}) \rightarrow m = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2} = 4$$

es decir, $L_{e2} = mL_{e1} = 4L_{e1} \Rightarrow$ **NO SON SERIES EQUIVALENTES**

$$N \text{ variable, } t \text{ fijo : } (N_1 = 5.6, t_1 = 20 \text{ ms}) \leftrightarrow (N_2 = 2.8, t_2 = 20 \text{ ms}) \rightarrow m = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2} = 0.25$$

es decir, $L_{e2} = mL_{e1} = \frac{1}{4}L_{e1} \Rightarrow$ **NO SON SERIES EQUIVALENTES**

$$N \text{ variable, } t \text{ variable : } (N_1 = 4, t_1 = 20 \text{ ms}) \leftrightarrow (N_2 = 2, t_2 = 5 \text{ ms}) \rightarrow m = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2} = 1$$

es decir, $L_{e2} = mL_{e1} = L_{e1} \Rightarrow$ **SÍ SON SERIES EQUIVALENTES**

Este argumento se conoce como *ley de la reciprocidad*, ya sea en Fotografía Fotoquímica o Digital. Si bien, parece bien establecido históricamente que los materiales de AgX no verifican completamente esta ley (Dainty, Shaw 1984; Hamilton 1977; Carroll, Higgins, James 1980; Johnson, Hesselink, Goodman

Verificación de la ley de la reciprocidad

1984; Proudfoot 1997), poco se ha sabido hasta ahora si esta misma ley se verifica o no en los dispositivos de captura (escáneres, cámaras).

4.3.1 Diseño del test

Los primeros problemas con que nos encontraremos en Fotografía Digital son que las escalas de N y t no son continuas, más bien son discretas. Por ejemplo, la escala de N en un objetivo fotográfico parece continua, pero solamente ciertos valores de N sobre el objetivo son marcados para ser seleccionados, valores que no siguen una gradación lineal (1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, 22.4). Igual ocurre con el tiempo de exposición t : la escala de t por menú también suele ser discreta, incluso con pasos diferentes para tiempos mayores y menores del tiempo de exposición denominado *offset*, o por defecto. En particular, los datos que proporciona el fabricante para nuestra cámara CCD-RGB son:

Tabla 4.10: Menú de configuración del tiempo de obturación (exposición) de nuestro dispositivo de captura.

MARCA: Sony MODELO: DXC-930P			
Tiempo de exposición en modo offset: $t_0 = 20$ ms			
	VARIABLE LOCAL	RANGO	ECUACIÓN
$t > t_0$	Unidad de frame (F)	[2, 3, ..., 255, 256]	$t = \frac{1}{25} F$
$t < t_0$	Periodo de registro horizontal (P_H)	[1, 2, ..., 309, 310]	$t = 64e - 6P_H + 35.6e - 6$

Otro problema ligado con la verificación de la ley de la reciprocidad es que los dispositivos de captura no presentan un comportamiento lineal a lo largo de todo el rango de exposición, espectral o no, a los que son sensibles. Es lo que hemos descrito en la sección anterior con las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF).

Por tanto, para verificar el cumplimiento de la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital, proponemos los algoritmos siguientes:

- **Enfoque estadístico:** A partir de nuestros datos experimentales mediante series espectrales de exposición, estudiaremos el comportamiento de las OECSFs mediante la dispersión estadística de los parámetros de ajuste de la función sigmoide $\{a, b, c, d\}$. Es decir, comprobaremos si, independientemente de los valores $(L_e(\lambda), N, t)$ seleccionados, la salida digital de la cámara es la misma y constante a lo largo del rango lineal y no lineal de exposición espectral a la que es sensible.
- **Enfoque físico-matemático:** A partir de nuestros datos experimentales mediante series espectrales de exposición y la descripción matemática de las correspondientes OECSFs, estudiaremos si existe una relación lineal sencilla y predecible entre dos grupos de radiancias espectrales $L_e(\lambda)$ calculadas mediante la inversión de las funciones sigmoides ($= f_k(\lambda, H) \equiv OECSF_{\lambda k}$) asociadas a pares de series espectrales de exposición, equivalentes o no.

4.3.2 Enfoque estadístico

Manteniendo las mismas condiciones de contorno que en el apartado anterior, las mismas combinaciones λ -canal, proponemos separar por simplicidad argumental los resultados y análisis de este algoritmo mediante la subdivisión experimental siguiente:

- Selección de resultados experimentales a partir de series de exposición espectral con variación exclusiva de la apertura relativa N . Escogeremos como ejemplo la combinación 650 nm - canal R.
- Selección de resultados experimentales a partir de series de exposición espectral con variación exclusiva del tiempo de obturación t . Escogeremos como ejemplo la combinación 550 nm - canal G.
- Selección de resultados experimentales a partir de tres series equivalentes de exposición espectral con variación selectiva de los parámetros N y t . Escogeremos como ejemplo la combinación 450 nm - canal B.

4.3.2.1 Variación exclusiva de la apertura relativa

Hemos obtenido la respuesta digital del sistema bajo series de exposición espectral con el mismo tiempo de obturación $t = t_0 = 20$ ms cambiando solamente la apertura relativa N a valores 5.6, 4 y 2.8. La representación gráfica de las correspondientes curvas *OECSFs* se muestra en la Figura 4.22. Los resultados estadísticos de este algoritmo se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.11: Resultados estadísticos de los parámetros ($a, b, c, d, c/d$) de las funciones sigmoides que ajustan las curvas experimentales *OECSFs* para la selección 650 nm - canal R bajo series de exposición donde solamente se ha variado la apertura relativa N . El valor CV es el coeficiente de variación, el cociente desviación estándar vs. valor medio, el cual indica el grado de precisión relativa.

CANAL R	SERIES DE EXPOSICIÓN (650 nm, N, t)			VALOR MEDIO	DESV. ESTÁNDAR	CV (%)
	(5.6, 20 ms)	(4, 20 ms)	(2.8, 20 ms)			
a	-0.170	-0.192	-0.203	-0.188	0.017	8.92
b	1.132	1.154	1.171	1.152	0.020	1.70
c	1.497 e-10	1.384 e-10	1.450 e-10	1.444 e-10	0.057 e-10	3.93
d	8.236 e-11	8.036 e-11	8.710 e-11	8.327 e-11	0.346 e-11	4.16
c/d	1.818	1.722	1.665	1.735	0.077	4.46

Con estos resultados gráficos y numéricos es completamente cierto que la ley de la reciprocidad se está verificando al cambiar exclusivamente la apertura relativa N en las series de exposición (L_e (650), N, t_0). Esta afirmación es así de categórica porque se puede observar que los coeficientes de variación de los parámetros (a, b, c, d) son muy bajos, alrededor del límite de precisión del experimento. Otra justificación que reafirma esto es que los cocientes c/d , o valores γ , de las tres curvas *OECSFs* muestran también una dispersión estadística muy pequeña. Por lo tanto, esto tiene que significar que el sistema cámara CCD-RGB + ADC es capaz de responder con el mismo rango de respuestas digitales ante series diferentes de exposición, concretamente a series diferentes de radiancias espectrales. La constatación más directa de

Verificación de la ley de la reciprocidad

esta argumentación a favor del cumplimiento de la ley de la reciprocidad es que los datos digitales experimentales se solapan entre ellos en un rango estrecho de exposiciones espectrales tal como se observa en la figura siguiente.

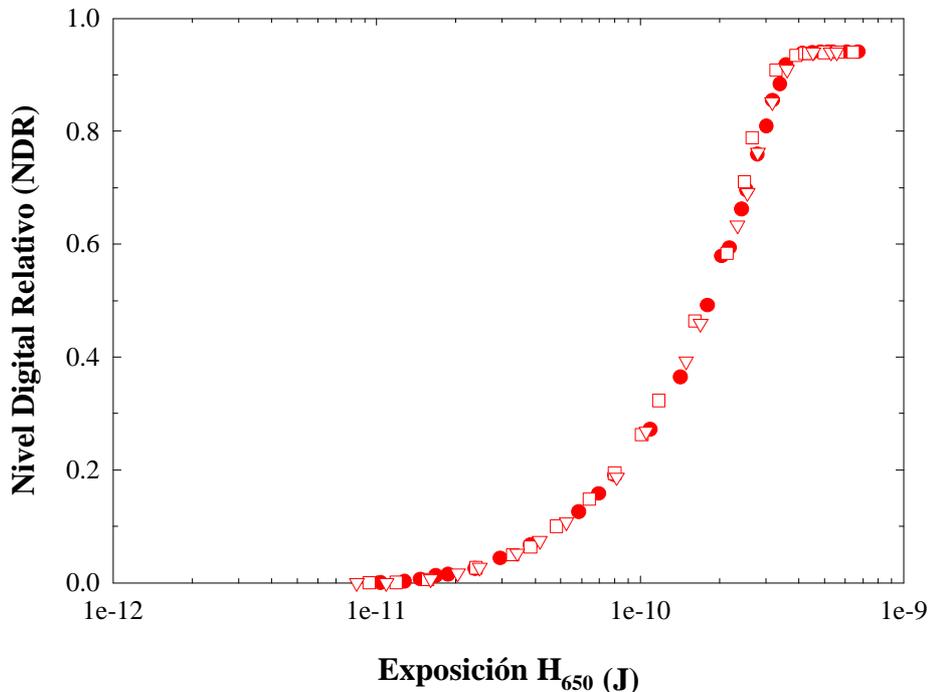


Figura 4.22: OECSFs en el canal R bajo series de exposición de $\lambda = 650$ nm, variando N como 5.6 (●), 4 (□) y 2.8 (▽) con el mismo tiempo de obturación $t_0 = 20$ ms.

También se efectuaron medidas análogas con las otras combinaciones λ - canal y los resultados y las conclusiones de los mismos fueron idénticos a lo comentado en el párrafo anterior: la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital se cumple al variar exclusivamente la apertura relativa N del objetivo fotográfico de la cámara.

4.3.2.2 Variación exclusiva del tiempo de exposición

Hemos medido la respuesta digital del sistema bajo series de exposición espectral con la misma apertura relativa $N = 2.8$ cambiando solamente el tiempo de exposición t a valores 20, 10 y 5 ms, valores inferiores al tiempo de exposición “offset”. Esto significa que los valores de la variable local P_H , periodo de registro horizontal, fueron 159 (10 ms) y 78 (5 ms). (No se captaron series de exposición variando la unidad de frame F porque fijando $N = 2.8$, la serie de radiancias espectrales captadas resultarían demasiado bajas para ser medidas por nuestro equipo tele espectralradiométrico.) La representación gráfica de las

correspondientes curvas *OECSFs* se muestra en la Figura 4.23. Los resultados estadísticos de este algoritmo se muestran en la Tabla 4.12.

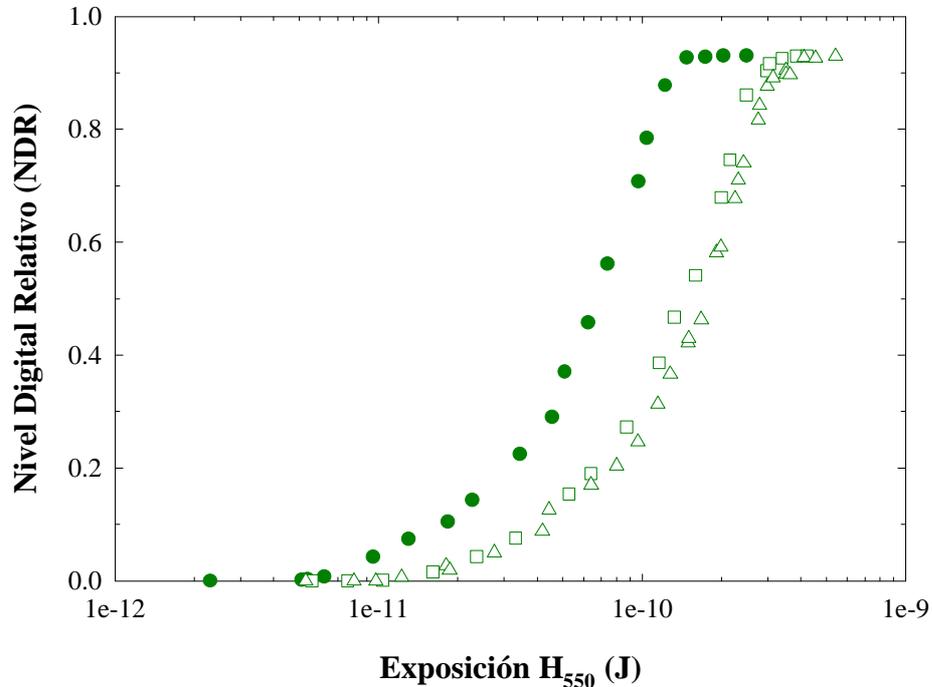


Figura 4.23: *OECSFs* en el canal G bajo series de exposición de $\lambda = 550$ nm, variando t como 20 ms (●), 10 ms (□) y 5 ms (△) con la misma apertura relativa $N = 2.8$.

Tabla 4.12: Resultados estadísticos de los parámetros ($a, b, c, d, c/d$) de las funciones sigmoides que ajustan las curvas experimentales *OECSFs* para la selección 550 nm - canal G bajo series de exposición donde solamente se ha variado el tiempo de obturación t . El valor CV es el coeficiente de variación, el cociente desviación estándar vs. valor medio, el cual indica el grado de precisión relativa.

CANAL R	SERIES DE EXPOSICIÓN (550 nm, N, t)			VALOR MEDIO	DESV. ESTÁNDAR	CV (%)
	(2.8, 20 ms)	(2.8, 10 ms)	(2.8, 5 ms)			
a	-0.161	-0.194	-0.133	-0.163	0.031	18.77
b	1.110	1.159	1.090	1.120	0.036	3.17
c	5.460 e-11	1.350 e-10	1.431 e-10	1.042 e-10	0.452 e-10	43.39
d	2.962 e-11	6.783 e-11	7.217 e-11	5.654 e-11	2.341 e-11	41.41
c/d	1.843	1.695	1.983	1.840	0.144	7.83

La primera impresión de la última figura es que la ley de la reciprocidad no se está verificando cuando se varía exclusivamente el tiempo de obturación t en los procesos de exposición porque las tres curvas *OECSFs* representadas no se solapan entre ellas. Este hecho se corrobora con la observación de los datos estadísticos de la Tabla 4.12. La variación estadística de los parámetros c y d de las funciones sigmoides, los más importantes, es muy elevada, al contrario que los parámetros a y b , sobretudo el parámetro b . Esto significa que por el hecho de cambiar el tiempo de obturación de 20 ms a 10 ó 5 ms, parece ser que

Verificación de la ley de la reciprocidad

se ha producido un traslado de las curvas *OECSFs* desde la posición denominada “offset”. Esta conjetura se demuestra al calcular los cocientes c/d o valores γ de las tres curvas y los resultados de la Tabla 4.12 muestran que la dispersión estadística del cociente c/d es muy baja, cercana a los valores de la Tabla 4.11. Es como si se estuviera verificando la ley de la reciprocidad para dos grupos de tiempos de obturación diferentes, manteniendo $t = t_0$ o variando t_0 , porque si no tuviéramos en cuenta la curva *OECSF* para t_0 , las restantes curvas *OECSFs* sí estarían verificando la ley de la reciprocidad.

4.3.2.3 Variación selectiva de ambos parámetros

A la vista de los resultados anteriores, parece ser que la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital se verifica cuando se varía únicamente el parámetro óptico N y no cuando se varía el parámetro electrónico t . Una primera causa de esta suposición es que no existe ningún control de tipo electrónico sobre la apertura del iris del objetivo fotográfico, más bien los valores de N se tomaron de forma manual. Sin embargo, como el tiempo de exposición t del obturador de la cámara sí afecta más directamente al tiempo de integración optoelectrónico del área-sensor CCD, y ambos se rigen mediante mecanismos electrónicos, siempre parecerá más difícil de controlar cualquier parámetro de naturaleza electrónica que de naturaleza óptica o radiométrica.

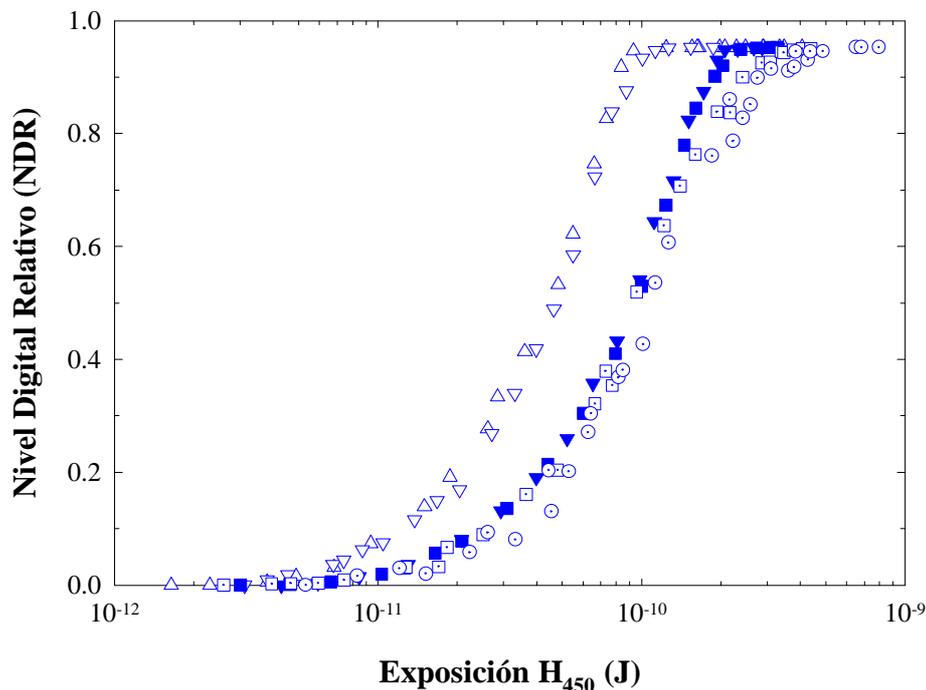


Figura 4.24: OECSFs en el canal B bajo series de exposición de $\lambda = 450$ nm variando N y t para escoger dos grupos de tres series equivalentes de exposición: (\triangle) para ($N = 5.6$, $t = t_0 = 20$ ms), (∇) para ($N = 4$, $t = 10$ ms) y (\square) para ($N = 2.8$, $t = 5$ ms), y, (∇) para ($N = 4$, $t = t_0 = 20$ ms), (\blacksquare) para ($N = 2.8$, $t = 10$ ms) y (\odot) para ($N = 2$, $t = 5$ ms).

Para reafirmar esta conjetura y como variante conclusiva de los apartados anteriores, se seleccionaron dos grupos de series equivalentes de exposición: el grupo formado por las series ($N = 5.6, t = 20$ ms), ($N = 4, t = 10$ ms) y ($N = 2.8, t = 5$ ms), y, el grupo ($N = 4, t = 20$ ms), ($N = 2.8, t = 10$ ms) y ($N = 2, t = 5$ ms), todos ellos para la combinación 450 nm – canal B. Las curvas *OECSFs* de la Figura 4.24 muestran esta sub-división de la verificación de la ley de la reciprocidad: o se verifica para series de exposición ($L_e(\lambda), N, t = t_0$), o bien para series de exposición ($L_e(\lambda), N, t \neq t_0$) con resultados bastante diferentes. No obstante, si tenemos en cuenta que el coeficiente de variación CV del cociente c/d o valor γ es pequeño (15.62 %), esto puede significar que la ley de la reciprocidad se esté verificando correctamente y con igual valor de cumplimiento en los dos casos de t , es como si el tiempo de obturación t controlado mediante las especificaciones del fabricante no fuera el verdadero tiempo de exposición que debe tenerse en cuenta en el control de la exposición espectral. Entonces si esto fuera verdad, encontrando la relación matemática entre el tiempo $t_{\text{menú}}$ por control electrónico y el tiempo de exposición t verdadero, todas las curvas *OECSFs* de la Figura 4.24 se solaparían. Esto es lo que vamos a demostrar en el siguiente algoritmo de verificación de la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital.

4.3.3 Enfoque físico-matemático

Recordando lo expresado en la Ec. 4.12, si realmente se verificara la ley de la reciprocidad entonces sería cierto que existiría una relación lineal sencilla y directa entre dos grupos de radiancias espectrales asociadas a dos series de exposición:

Ecuación 4.13

$$\lambda \text{ fija} \Rightarrow H = k \frac{L_{e1}}{N_1^2} t_1 = k \frac{L_{e2}}{N_2^2} t_2 \Rightarrow L_{e2} = m L_{e1} \quad \text{con } m = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2}$$

Como se vio en la Ec. 4.12, la pendiente m entre dos series equivalentes de exposición es igual a 1. Si comparamos dos series no equivalentes de exposición, la pendiente m nunca es igual a 1.

Ahora bien, en el supuesto de que la ley de la reciprocidad no se esté verificando en este dispositivo de captura digital tal como se explicó en el apartado anterior, esto significa que quizás el cumplimiento de la ley se da siempre y cuando consideremos que el tiempo de exposición o integración indicado por el fabricante $t_{\text{menú}}$ que denominaremos tiempo de obturación electrónica no es el verdadero tiempo de exposición t aplicable en la ley de la reciprocidad. Entonces, con el fondo argumental de este algoritmo podemos determinar al mismo tiempo la verificación de la ley de la reciprocidad y una relación matemática más exacta y precisa entre los parámetros electrónicos P_H y F del tiempo de obturación $t_{\text{menú}}$ y el tiempo de exposición t de la ley de la reciprocidad.

Respecto a la inversión de la función sigmoide de ajuste de una curva *OECSF*, la expresión matemática de la misma no es complicada, y, dado que conocemos los parámetros del ajuste sigmoide (a, b, c, d), el cálculo de las radiancias espectrales asociadas a una serie de exposición espectral nos queda como:

Verificación de la ley de la reciprocidad

Ecuación 4.14

$$\text{canal-color, } \lambda \text{ fijos} \Rightarrow L_{e_i} = \frac{N^2}{k t} \left[c - d \ln \left(\frac{b}{NDR_i - a} - 1 \right) \right]$$

con NDR : nivel digital relativo, $i = 1, \dots, n$ datos experimentales

Así, para una combinación λ / canal de color, se escogen dos pares de grupos L_{e1} y L_{e2} , los cuales pueden ajustarse por mínimos cuadrados a través de un polinomio de 2º grado para predecir el comportamiento no lineal del sistema:

Ecuación 4.15

$$L_{e2} = a_0 + a_1 L_{e1} + a_2 L_{e1}^2 \Rightarrow a_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2} \equiv m_{\text{ajuste}}$$

mientras que $m_{\text{teórico}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_{\text{menú1}}}{t_{\text{menú2}}}$

Así, de esta manera, podemos definir el índice de verificación de la ley de la reciprocidad (RLI) como la desviación porcentual entre el valor m_{ajuste} respecto el valor $m_{\text{teórico}}$ correspondiente entre dos series de exposición espectral:

Ecuación 4.16

$$RLI = 100 \frac{m_{\text{ajuste}} - m_{\text{teórico}}}{m_{\text{teórico}}}$$

Este índice de verificación RLI se puede interpretar de la siguiente forma:

Ecuación 4.17

$$\begin{aligned} \text{si } |RLI| \rightarrow 0 &\Rightarrow \text{SE VERIFICA LA LEY DE LA RECIPROCIDAD} \\ \text{si } |RLI| \rightarrow \infty &\Rightarrow \text{NO SE VERIFICA LA LEY DE LA RECIPROCIDAD} \end{aligned}$$

Manteniendo las mismas condiciones de contorno que en el apartado anterior y con las mismas combinaciones λ / canal, proponemos separar de nuevo por simplicidad argumental los resultados y análisis de este algoritmo mediante la misma subdivisión experimental.

4.3.3.1 Variación exclusiva de la apertura relativa

Con los datos NDR_i bajo series de exposición espectral con el mismo tiempo de integración $t_{\text{menú}} = t_0 = 20$ ms cambiando solamente la apertura relativa N a valores 5.6, 4 y 2.8, los índices RLI se aproximan a cero, tal como se indica en los resultados de la Tabla 4.13 y la Figura 4.25. Esto confirma de nuevo que,

cuando el parámetro extrínseco de tipo óptico N se varía, la ley de la reciprocidad en Fotografía Digital se verifica.

Tabla 4.13: Resultados de verificación de la ley de la reciprocidad en las tres combinaciones λ - canal a partir de los índices RLI en las comparaciones de dos pares de series de exposición espectral en las que se ha variado la apertura relativa N entre 2.8, 4 y 5.6, pero se ha fijado el tiempo de obturación $t_{\text{menú}}$ en 20 ms como valor por defecto.

	Series de exposición (L_e (λ), N , t)					
	(N = 4 , t = 20 ms) vs. (N = 5.6 , t = 20 ms s)			(N = 2.8 , t = 20 ms) vs. (N = 5.6 , t = 20 ms)		
	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)
650-R	0.4801	0.5	-3.98	0.2589	0.25	+3.56
550-G	0.5617	0.5	+12.34	0.2763	0.25	+10.52
450-B	0.5933	0.5	+18.66	0.2587	0.25	+3.48

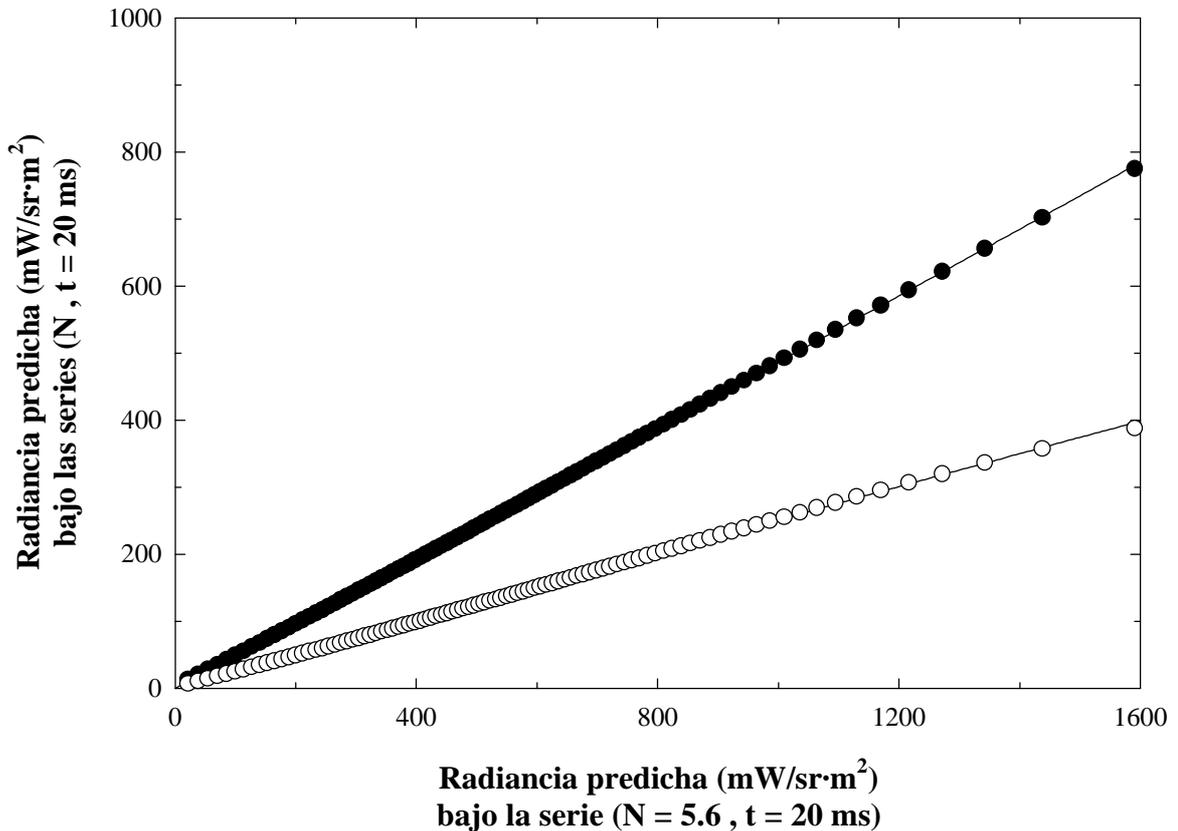


Figura 4.25: Representación polinomial de 2º grado por mínimos cuadrados entre las radiancias asociadas a tres series de exposición espectral en la combinación 650 nm - canal R: (●) para (4, 20 ms) vs. (5.6, 20 ms) y (○) para (2.8, 20 ms) vs. (4, 20 ms).

Verificación de la ley de la reciprocidad

4.3.3.2 Variación exclusiva del tiempo de exposición

Con los datos NDR_i bajo series de exposición espectral con la misma apertura relativa $N = 2.8$ cambiando solamente el tiempo de obturación mediante la variable local electrónica P_H a valores 310 (20 ms), 159 (10 ms) y 78 (5 ms), los índices RLI no se aproximan a cero en todos los casos, tal como se indica en los resultados de la Tabla 4.14 y la Figura 4.26.

Tabla 4.14: Resultados de verificación de la ley de la reciprocidad en las tres combinaciones λ - canal a partir de los índices RLI en las comparaciones de dos pares de series de exposición espectral en las que se ha variado el tiempo de obturación $t_{menú}$ entre 20, 10 y 5 ms, pero se ha fijado la apertura relativa N en 2.8.

	Series de exposición (L_e (λ), N , t)					
	(N = 2.8 , t = 20 ms) vs. (N = 2.8 , t = 10 ms s)			(N = 2.8 , t = 5 ms) vs. (N = 2.8 , t = 10 ms)		
	m_{ajuste}	$m_{teórico}$	RLI (%)	m_{ajuste}	$m_{teórico}$	RLI (%)
650-R	0.2087	0.5	-58.26	1.7665	2	-11.68
550-G	0.2181	0.5	-56.38	2.3834	2	+19.17
450-B	0.2254	0.5	-54.92	1.6897	2	-15.67

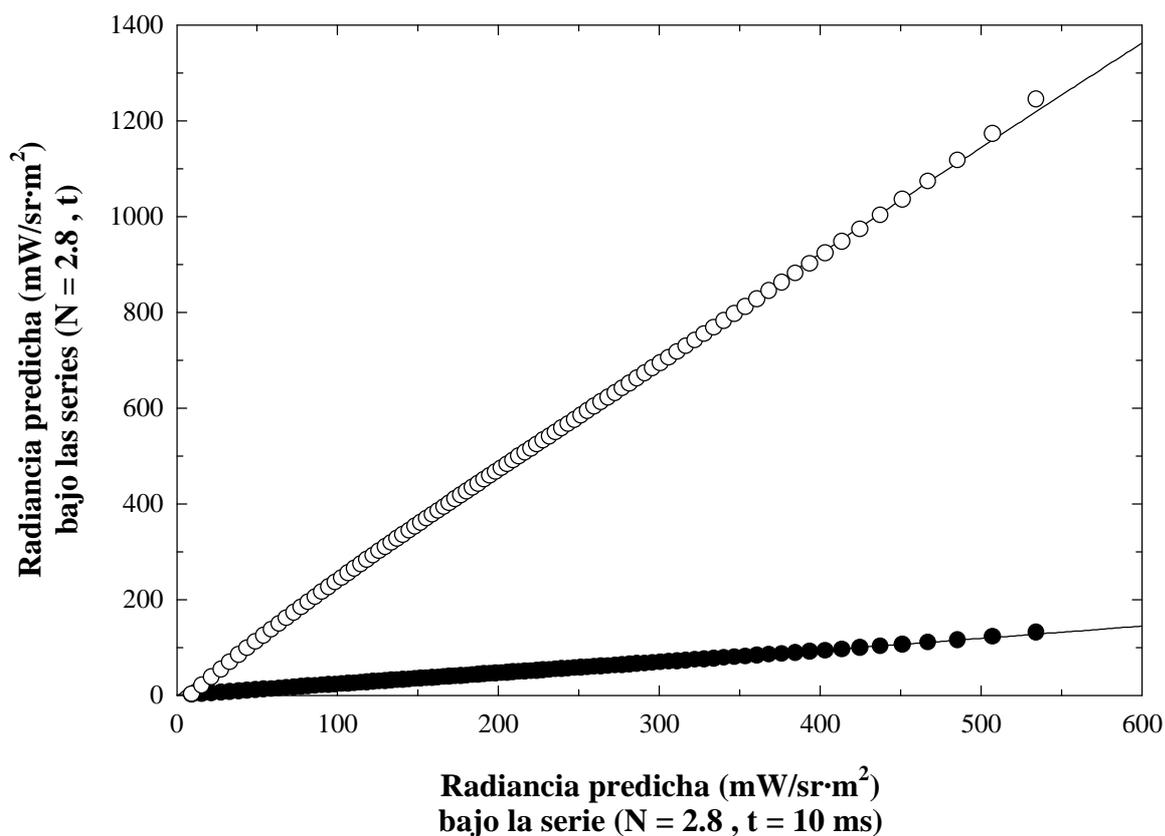


Figura 4.26: Representación polinomial de 2º grado por mínimos cuadrados entre las radiancias asociadas a tres series de exposición espectral en la combinación 550 nm - canal G: (●) para (2.8, 20 ms) vs. (2.8, 10 ms) y (○) para (2.8, 5 ms) vs. (2.8, 10 ms).

Un análisis más exhaustivo de estos resultados debe desdoblarse en si comparamos el cambio del tiempo de obturación entre valores $t_{\text{menú}}$ diferentes de $t_0 = 20$ ms, o, si comparamos el cambio de $t_{\text{menú}}$ con respecto el tiempo por defecto t_0 . Los resultados de la tabla anterior muestran lo ya comentado en secciones anteriores. Los índices RLI en el primer caso (20 ms vs. 10 ms) son altos, lo cual indica que no se está verificando la ley de la reciprocidad. Sin embargo, al comparar las series (2.8, 5 ms) y (2.8, 10 ms), con los tiempos $t_{\text{menú}}$ diferentes de t_0 , los índices RLI se aproximan a los valores de verificación del apartado anterior. Entonces, en estos casos, parece ser que la ley de la reciprocidad sí se verifica al cambiar el tiempo de obturación electrónico. ¿Cuál es la causa de esta disparidad de conclusiones? Pues que, parece ser que el tiempo de obturación electrónico no es el verdadero tiempo de exposición o de integración de la ley de la reciprocidad, tal como se indicó en apartados anteriores.

4.3.3.3 Variación selectiva de ambos parámetros

Con los datos NDR_i bajo series equivalentes de exposición espectral con la variación adecuada de la apertura relativa N y el tiempo de obturación (20, 10, 5) ms, los índices RLI fluctúan con la verificación de la ley de la reciprocidad según los dos grupos de análisis comentados en el apartado de arriba, tal como se indican en los resultados de las Tablas 4.15-16 y la Figura 4.27 para dos grupos de 3 series equivalentes de exposición espectral.

Tabla 4.15: Resultados de verificación de la ley de la reciprocidad en las tres combinaciones λ - canal a partir de los índices RLI en las comparaciones de dos pares de series equivalentes de exposición espectral.

	Series de exposición (L_e (λ), N , t)					
	(N = 5.6 , t = 20 ms) vs. (N = 4 , t = 10 ms)			(N = 2.8 , t = 5 ms) vs. (N = 4 , t = 10 ms)		
	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)
650-R	0.4800	1	-52.00	1.0542	1	+5.42
550-G	0.4336	1	-56.64	1.3875	1	+38.75
450-B	0.4306	1	-56.94	0.8283	1	-17.17

Tabla 4.16: Resultados de verificación de la ley de la reciprocidad en las tres combinaciones λ - canal a partir de los índices RLI en las comparaciones de dos pares de series equivalentes de exposición espectral diferentes a los de la tabla anterior.

	Series de exposición (L_e (λ), N , t)					
	(N = 4 , t = 20 ms) vs. (N = 2.8 , t = 10 ms)			(N = 2 , t = 5 ms) vs. (N = 2.8 , t = 10 ms)		
	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)	m_{ajuste}	$m_{\text{teórico}}$	RLI (%)
650-R	0.3843	1	-61.57	0.9099	1	-9.01
550-G	0.4327	1	-56.73	1.0472	1	+4.72
450-B	0.5222	1	-48.78	0.8128	1	-18.72

El análisis final del algoritmo nº 2 para la verificación de la ley de la reciprocidad concluye que esta ley se verifica en Fotografía Digital, tanto si se varía la apertura relativa N como si se varía el tiempo de obturación electrónica $t_{\text{menú}}$. No obstante, bien es cierto que cabe comprobar si el tiempo de obturación electrónica se corresponde con el verdadero tiempo de exposición o integración t . Con el fundamento teórico de este algoritmo, la relación matemática entre los parámetros del fabricante para indicar el tiempo de exposición y el verdadero tiempo de integración se puede determinar.

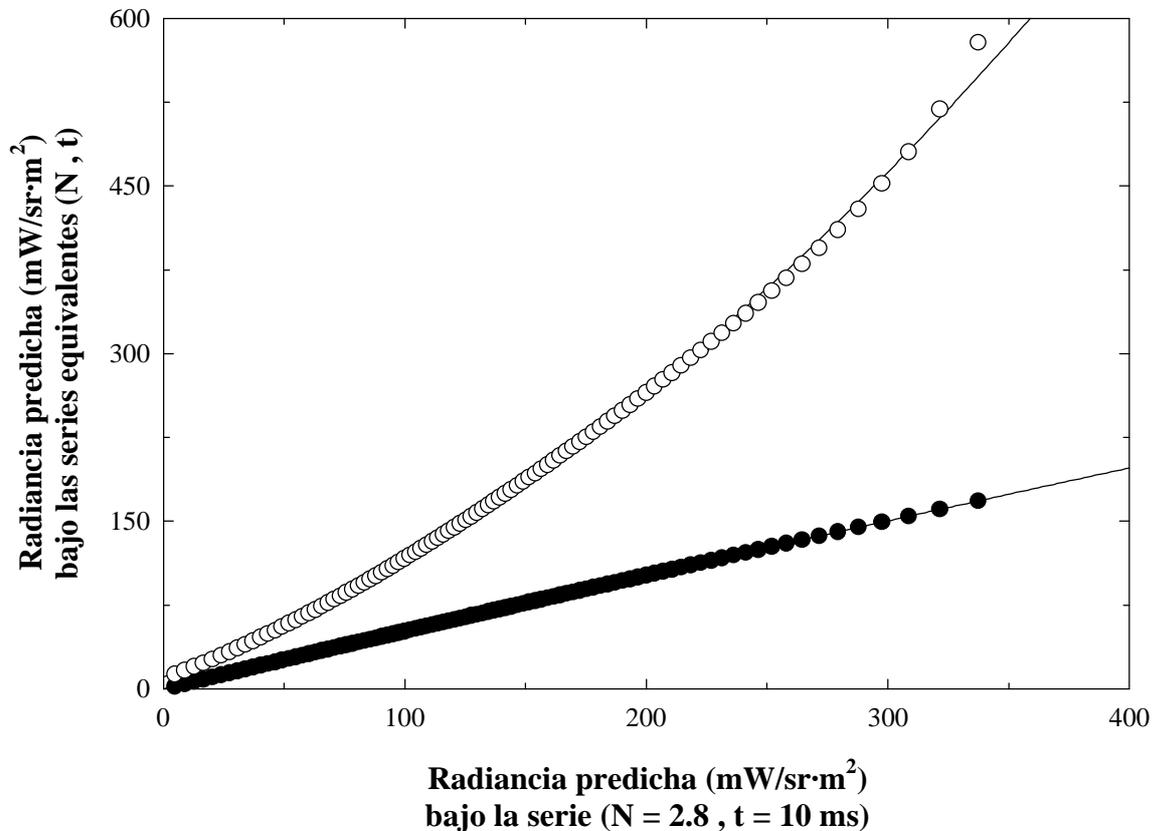


Figura 4.27: Representación polinomial de 2º grado por mínimos cuadrados entre las radiancias asociadas a tres series equivalentes de exposición espectral en la combinación 450 nm - canal B: (●) para (4, 20 ms) vs. (2.8, 10 ms) y (○) para (2, 5 ms) vs. (2.8, 10 ms).

4.3.3.4 Relación matemática entre el tiempo de obturación y el tiempo de exposición

La determinación de la relación matemática entre el tiempo de obturación, o sus variables locales según las especificaciones del fabricante, y el tiempo de exposición en el área sensor presenta varias dificultades iniciales de contorno. Así, en nuestro caso de dispositivo de captura, compuesto por una cámara electrónica CCD-RGB y un convertor analógico-digital, el fabricante proporciona dos variables de control del tiempo de obturación electrónica (Tabla 4.10), F para $t_{\text{menú}} > t_0 = 20 \text{ ms}$ y P_H para $t_{\text{menú}} < t_0$.

Aunque, en principio, parece factible estudiar esta relación matemática con los dos rangos de valores posibles, las condiciones de contorno de la configuración experimental en la caracterización espectral del sistema son responsables de ciertas restricciones. Así, en nuestro caso particular de estudio, la selección de valores $t_{\text{menú}}$ superiores a t_0 a través de la variable local F no es factible porque existen incompatibilidades serias entre las señales generadas por la cámara y el convertor analógico-digital, cosa que debería comprobarse siempre antes de iniciar este estudio con otros dispositivos de captura. Si esta

compatibilidad cámara / ADC se verificara, entonces nos encontraríamos con una limitación radiométrica puesto que si $t_{\text{menú}} \gg t_0$, las radiancias asociadas a esta configuración de serie de exposición, aún teniendo en cuenta la apertura relativa N , serían muy bajas, difícilmente medibles con el tele-espectroradiómetro del que se dispone.

Así que, lo más normal es que estudiemos esta relación con tiempos de obturación $t_{\text{menú}}$ menores que el tiempo por defecto t_0 , siempre y cuando no existan problemas de incompatibilidad temporal entre la cámara y el ADC. Una variación del algoritmo n° 2 sobre la verificación de la ley de la reciprocidad nos permitirá obtener una relación matemática entre la variable local P_H (periodo de registro horizontal) y el tiempo de exposición o de integración t . Según lo expresado en la Ec. 4.15, existe una disparidad entre los valores $a_1 = m_{\text{ajuste}}$ y $m_{\text{teórico}}$ entre las radiancias espectrales asociadas o dos series de exposición espectral. Por lo tanto, el cociente ($m_{\text{teórico}}/a_1$) puede servir para comparar los cocientes $t_2/t_{\text{menú}2}$ y $t_1/t_{\text{menú}1}$:

Ecuación 4.18

$$a_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_1}{t_2}, \quad m_{\text{teórico}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{t_{\text{menú}1}}{t_{\text{menú}2}} \Rightarrow \frac{t_2}{t_{\text{menú}2}} = \left(\frac{m_{\text{teórico}}}{a_1} \right) \frac{t_1}{t_{\text{menú}1}}$$

Ahora bien, si suponemos que el tiempo de obturación electrónica t_0 es verdaderamente el tiempo de exposición, si comparamos siempre series de exposición espectral ($L_{e1}, N_1, t_{\text{menú}1}$) y ($L_{e2}, N_2, t_{\text{menú}2}$) donde $t_{\text{menú}1} = t_1 = t_0 = 20$ ms, nos queda entonces que:

Ecuación 4.19

$$t_2 = \left(\frac{m_{\text{teórico}}}{a_1} \right) t_{\text{menú}2}$$

Esto significa que, con las anteriores series de exposición espectral, las utilizadas como ejemplo en los dos algoritmos de verificación de la ley de la reciprocidad: ($Le(\lambda), 5.6, 20$ ms), ($Le(\lambda), 4, 20$ ms), ($Le(\lambda), 2.8, 20$ ms), ($Le(\lambda), 4, 10$ ms), ($Le(\lambda), 2.8, 10$ ms), ($Le(\lambda), 2.8, 5$ ms) y ($Le(\lambda), 2, 5$ ms); de la selección de tres valores P_H , 310 (20 ms), 159 (10 ms) y 78 (5 ms), es posible encontrar 15 combinaciones ($N_1, t_{\text{menú}1} = 20$ ms) vs. ($N_2, t_{\text{menú}2}$) diferentes que representan 15 valores para una tabla de representación gráfica P_H vs. t . Por ejemplo, en la Tabla 4.17 mostramos los resultados del ajuste polinómico de 2° grado entre las 15 comparaciones de series posibles con $t_{\text{menú}1} = 20$ ms y que, de esta manera, t_2 resulta ser $(m_{\text{teórico}}/a_1)t_{\text{menú}2}$.

Así pues, tenemos una tabla de 15 pares de valores (P_H, t_2) para cada combinación λ - canal de color, con la que podemos determinar el mejor ajuste matemático por mínimos cuadrados. Hemos seleccionado tres posibles ecuaciones de ajuste:

- La relación lineal proporcionada por el fabricante: $t = 64e - 6P_H + 35.6e - 6$
- La relación lineal general: $t = a + bP_H$

Verificación de la ley de la reciprocidad

- Una ecuación hiperbólica:

$$\frac{1}{t} = a + \frac{b}{\sqrt{P_H}}$$

Tabla 4.17: Resultados polinomiales de 2º grado por mínimos cuadrados (r^2) de la relación entre las radiancias asociadas entre pares de series de exposición espectral en la combinación 650 nm - canal R. Las cabeceras de las columnas de la tabla representan t_1 como $t_{\text{menú1}}$, t_2 como $t_{\text{menú2}}$, m como $m_{\text{teórico}}$. Entonces, tras lo comentado en el texto, el verdadero tiempo de exposición t se representa en la tabla como $(m/a_1)t_2$.

(N_1, t_1) vs. (N_2, t_2)	m	a_0	a_1	a_2	r^2	$(m/a_1)t_2$	P_H
(5.6, 20) vs. (4, 20)	0.5	0.0965	0.4801	6.383 e-6	1.0000	20.8310	310
(5.6, 20) vs. (2.8, 20)	0.25	-2.3410	0.2589	-5.164 e-6	0.9997	19.3161	310
(5.6, 20) vs. (4, 10)	1	-9.3208	2.0335	-1.810 e-4	0.9999	4.9177	159
(5.6, 20) vs. (2.8, 10)	0.5	-36.8650	1.2065	-1.389 e-4	0.9976	4.1440	159
(5.6, 20) vs. (2.8, 5)	1	-58.4015	2.2103	-5.257 e-5	0.9988	2.2621	78
(5.6, 20) vs. (2, 5)	0.5	-41.6120	1.2002	9.712 e-5	0.9987	2.0830	78
(4, 20) vs. (2.8, 20)	0.5	-2.4084	0.5390	-3.581 e-5	0.9999	18.5517	310
(4, 20) vs. (4, 10)	2	-9.4939	4.2276	-8.607 e-4	0.9999	4.7308	159
(4, 20) vs. (2.8, 10)	1	-37.3954	2.5104	-6.453 e-4	0.9982	3.9835	159
(4, 20) vs. (2.8, 5)	2	-59.3269	4.6049	-3.438 e-4	0.9919	2.1716	78
(4, 20) vs. (2, 5)	1	-42.3187	2.5058	3.328 e-4	0.9991	1.9953	78
(2.8, 20) vs. (4, 10)	4	6.4889	7.9020	-2.373 e-3	0.9999	5.0620	159
(2.8, 20) vs. (2.8, 10)	2	-27.5843	4.6870	-1.897 e-3	0.9989	4.2671	159
(2.8, 20) vs. (2.8, 5)	4	-37.9743	8.5285	-9.617 e-5	0.9997	2.3451	78
(2.8, 20) vs. (2, 5)	2	-28.2125	4.5903	2.068 e-3	0.9997	2.1785	78

La representación gráfica de estos ajustes se puede observar en la Figura 4.28 para la combinación 650 nm - canal R, mientras que los resultados numéricos en las tres combinaciones λ - canal de este trabajo se pueden ver en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Resultados de los ajustes por mínimos cuadrados para encontrar la mejor relación matemática entre P_H y t . Los números entre paréntesis es el error estadístico del correspondiente parámetro de ajuste. Se indica el valor unidad para los coeficientes de regresión r^2 proporcionados por el fabricante, aunque esto es una mera suposición.

λ / CANAL	AJUSTE	A	b	r^2
650 nm / R	Fabricante	35.6 e-6	64.0 e-6	-
	Lineal	1 (1802) e-6	47.7 (10.1) e-6	0.7804
	Hiperbólico	-374 (24)	7491 (417)	0.9942
550 nm / G	Fabricante	35.6 e-6	64.0 e-6	-
	Lineal	1 (1920) e-6	44.8 (9.4) e-6	0.7907
	Hiperbólico	-369 (27)	7437 (476)	0.9919
450 nm / B	Fabricante	35.6 e-6	64.0 e-6	-
	Lineal	1 (1920) e-6	45.6 (10.8) e-6	0.7517
	Hiperbólico	-331 (51)	6718 (890)	0.9625

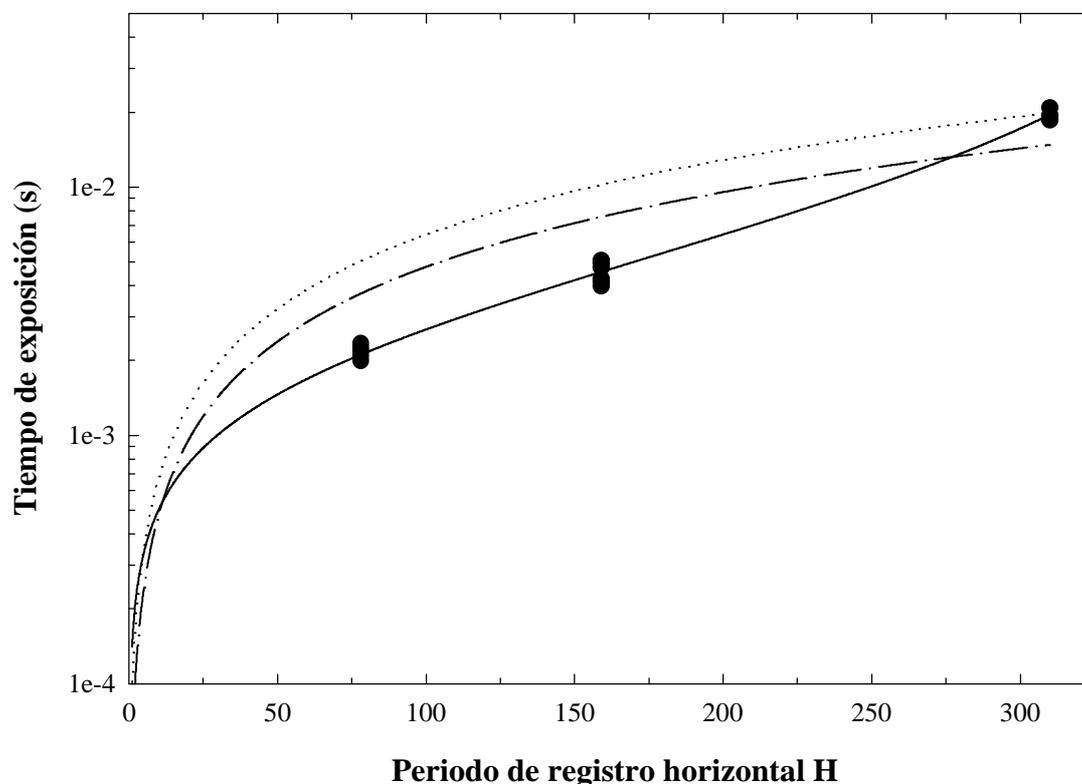


Figura 4.28: Representación gráfica del ajuste t vs. P_H para los datos de la combinación 650 nm - canal R. Los símbolos representan los datos experimentales de la Tabla 4.17, mientras que la línea continua es el ajuste por la función hiperbólica, la línea discontinua por la función lineal general y la línea de puntos por la función lineal proporcionada por el fabricante.

Una observación detenida de los últimos resultados numéricos y gráficos indica lo siguiente:

- La ecuación lineal proporcionada por el fabricante no es suficiente para determinar de forma exacta y precisa la relación P_H vs. t .
- Aunque 15 pares de valores aseguran un criterio de bondad alto para cualquier regresión por mínimos cuadrados, esto no es suficiente para el análisis de este trabajo. En realidad, es como si hubiésemos realizado una regresión con solamente tres puntos. Por lo tanto, parece ser conveniente ampliar este estudio de P_H vs. t a un número mucho mayor.
- Aunque lo comentado arriba es totalmente cierto, si comparamos los resultados de los ajustes entre las funciones lineal e hiperbólica, ésta última presenta aparentemente con 3 puntos una bondad de ajuste mucho mejor que la primera. Por tanto, podemos afirmar que la función hiperbólica seleccionada determina con mejor exactitud y precisión la relación empírica entre P_H y t .

4.4 Determinación de sensibilidades espectrales completas

Uno de los resultados importantes de la sección anterior es que las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSFs) de un dispositivo real de captura no son rectas, sino funciones tipo S. De esta forma, la función analítica $f_k(\lambda, H)$ asociada a cada OECSF $_{\lambda k}$ ($k = R, G, B$) queda plenamente caracterizada, al igual que su función inversa $g_k(\lambda, NDR)$. Del mismo modo, y en conexión con la sección 2.2.4 (Parámetros funcionales de una cámara digital científica), al comparar cualitativamente dos dispositivos de captura, uno estrictamente lineal (CIE-1931 XYZ) y otro real (no lineal), parece que no van a comportarse igual los conceptos derivados y equivalentes de sensibilidad espectral (Ec. 2.10), responsividad espectral $r_k(\lambda, H)$ y espectro de acción $a_k(\lambda, NDR)$. En el primer caso, ya se derivó que estas funciones radiométricas eran independientes del nivel de exposición o energía radiante, es decir: $a_x(\lambda) \equiv r_x(\lambda) = \bar{x}(\lambda)$, $a_y(\lambda) \equiv r_y(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$, $a_z(\lambda) \equiv r_z(\lambda) = \bar{z}(\lambda)$. Sin embargo, en el segundo caso, tal conclusión no puede extraerse directamente de nuestras OECSFs sigmoidales, puesto que la variable energética $H(\lambda)$ pertenece al argumento de una función exponencial, lo cual impide también relacionar directamente estas funciones radiométricas con las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} . Como la caracterización espectral de un dispositivo de captura consiste esencialmente en la obtención de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} , o sea, las sensibilidades espectrales relativas según la arquitectura de color elegida más un factor colorimétrico de escala, parece necesario de momento establecer un nexo entre nuestras OECSFs y las sensibilidades espectrales relativas, derivables de alguna forma de las funciones radiométricas $r_k(\lambda, H)$ y $a_k(\lambda, NDR)$.

Tenemos, pues, como punto de partida las expresiones siguientes:

Ecuación 4.20

$$\begin{aligned} \text{responsividad espectral } r_k(\lambda, H) &\equiv \frac{\text{respuesta}}{\text{energía constante}} = \frac{f_k(\lambda, H)}{H} \\ \text{espectro de acción } a_k(\lambda, NDR) &\equiv \frac{\text{respuesta constante}}{\text{energía}} = \frac{NDR}{g_k(\lambda, NDR)} \end{aligned}$$

Como conocemos las expresiones analíticas de $f_k(\lambda, H)$ y $g_k(\lambda, NDR)$ y los parámetros de ajuste $\{a_{\lambda k}, b_{\lambda k}, c_{\lambda k}, d_{\lambda k}\}$ (Fig. 4.17-19), las expresiones anteriores quedan como:

Ecuación 4.21

$$r_k(\lambda, H) = \frac{a_{\lambda k} + \frac{b_{\lambda k}}{1 + \exp\left(-\frac{H - c_{\lambda k}}{d_{\lambda k}}\right)}}{H} ; \quad a_k(\lambda, NDR) = \frac{NDR}{c_{\lambda k} - d_{\lambda k} \ln\left(\frac{b_{\lambda k}}{NDR - a_{\lambda k}} - 1\right)}$$

Siguiendo con el mismo ejemplo de longitud de onda ($\lambda = 570$ nm), podemos comparar las formas gráficas de las responsabilidades espectrales y los espectros de acción entre nuestro dispositivo de captura y el observador patrón CIE-1931 XYZ (Figura 4.29).

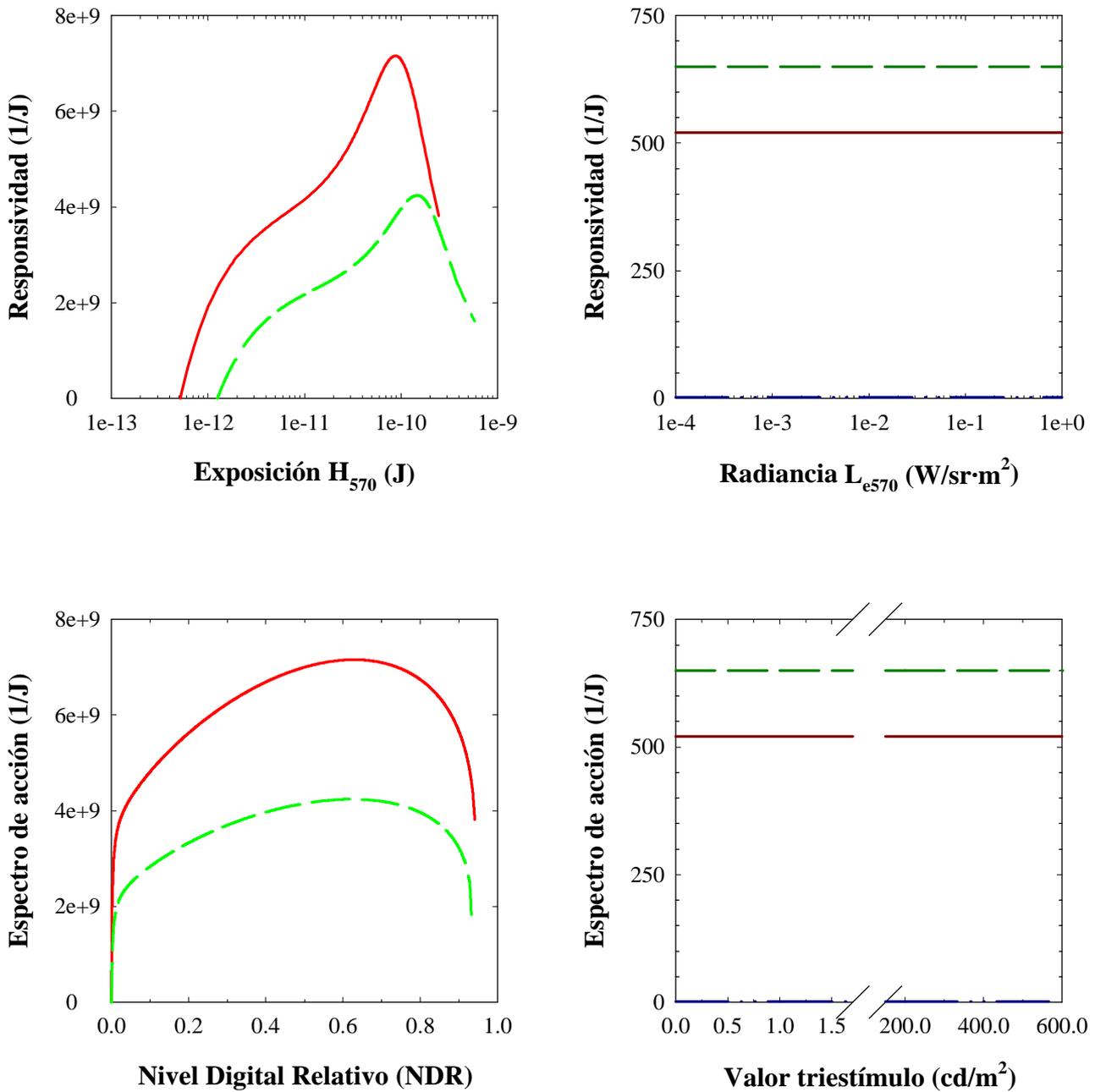


Figura 4.29: Ejemplos de responsabilidades espectrales (arriba) y de espectros de acción (abajo) para dos dispositivos de captura para $\lambda = 570$ nm: izquierda, nuestro caso real (respuesta no lineal); derecha, observador patrón CIE-1931 XYZ (respuesta completamente lineal). Línea continua: canal R o X; línea discontinua: canal G o Y; línea discontinua y doblemente punteada: canal Z (el dispositivo ejemplo de captura no es sensible a esta longitud de onda).

Determinación de las sensibilidades espectrales completas

Como ya avanzamos antes, el fotosensor lineal CIE presenta valores constantes de responsividad y espectro de acción. En cambio, nuestro dispositivo real de captura muestra siempre una variación, ora brusca, ora suave, de la responsividad y el espectro de acción con la exposición H y el nivel digital relativo NDR , respectivamente, la cual podemos extrapolar a todo el conjunto de longitudes de onda y canales de color:

- En los valores cercanos a cada exposición espectral equivalente de ruido ($EEER_{\lambda k}$), la variación de $r_k(\lambda = cte, H)$ y $a_k(\lambda = cte, NDR)$ es muy brusca y creciente, significando claramente que se ha pasado el nivel umbral de respuesta y que se intenta establecer un ritmo constante de captura optoelectrónica.
- En el rango intermedio de exposición espectral, la variación de ambas funciones radiométricas es suave y creciente, pero nunca constante, indicando claramente que tal ritmo de captura optoelectrónica no alcanza un valor estable sino que siempre intenta rentabilizarse al máximo posible.
- En los valores cercanos a cada exposición espectral equivalente de saturación ($EEES_{\lambda k}$), la variación de $r_k(\lambda = cte, H)$ y $a_k(\lambda = cte, NDR)$ es brusca y decreciente, significando claramente que el sensor optoelectrónico va perdiendo paulatinamente ritmo de captura optoelectrónica debido a limitaciones físico-tecnológicas, es decir, que está alcanzándose el nivel de saturación.

Como resulta, por tanto, que las responsividades espectrales $r_k(\lambda, H)$ y los espectros de acción $a_k(\lambda, NDR)$ son funciones tridimensionales (Fig. 4.30-32), es necesario comprobar, como paso previo para obtener las sensibilidades espectrales relativas, si los perfiles espectrales relativos $r_k(\lambda, H = cte)$ y $a_k(\lambda, NDR = cte)$ son los mismos. En principio, ya sabemos que las unidades absolutas de $r_k(\lambda = cte, H)$ o $a_k(\lambda = cte, NDR)$ difieren según el valor de la exposición H o del nivel digital relativo NDR , respectivamente. Sin embargo, a la vista de las figuras siguientes el paso clave es, si seleccionando varios perfiles espectrales $r_k(\lambda, H = cte)$ o $a_k(\lambda, NDR = cte)$, la normalización conjunta de ellos trae consigo un perfil espectral único o común (Fig. 4.33-35), el que denominamos habitualmente como sensibilidad espectral relativa (Fig. 4.36).

Aunque es común entre los fabricantes utilizar la última representación como dato técnico sobre las sensibilidades espectrales de un dispositivo de captura, esto no debe interpretarse como que las responsividades espectrales (espectros de acción) de los canales-color están en la misma escala absoluta. En nuestro caso, esto resulta evidente al comparar las formas tridimensionales (Fig. 4.30-32), todas ellas con la misma escala absoluta de sensibilidad. Destaca, por ejemplo, como dato revelador que el canal G es el menos sensible de los tres, mientras que no parece claro cuál de los dos restantes es el más sensible. Por tanto, parece razonable incluir este tipo de información en el escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas.

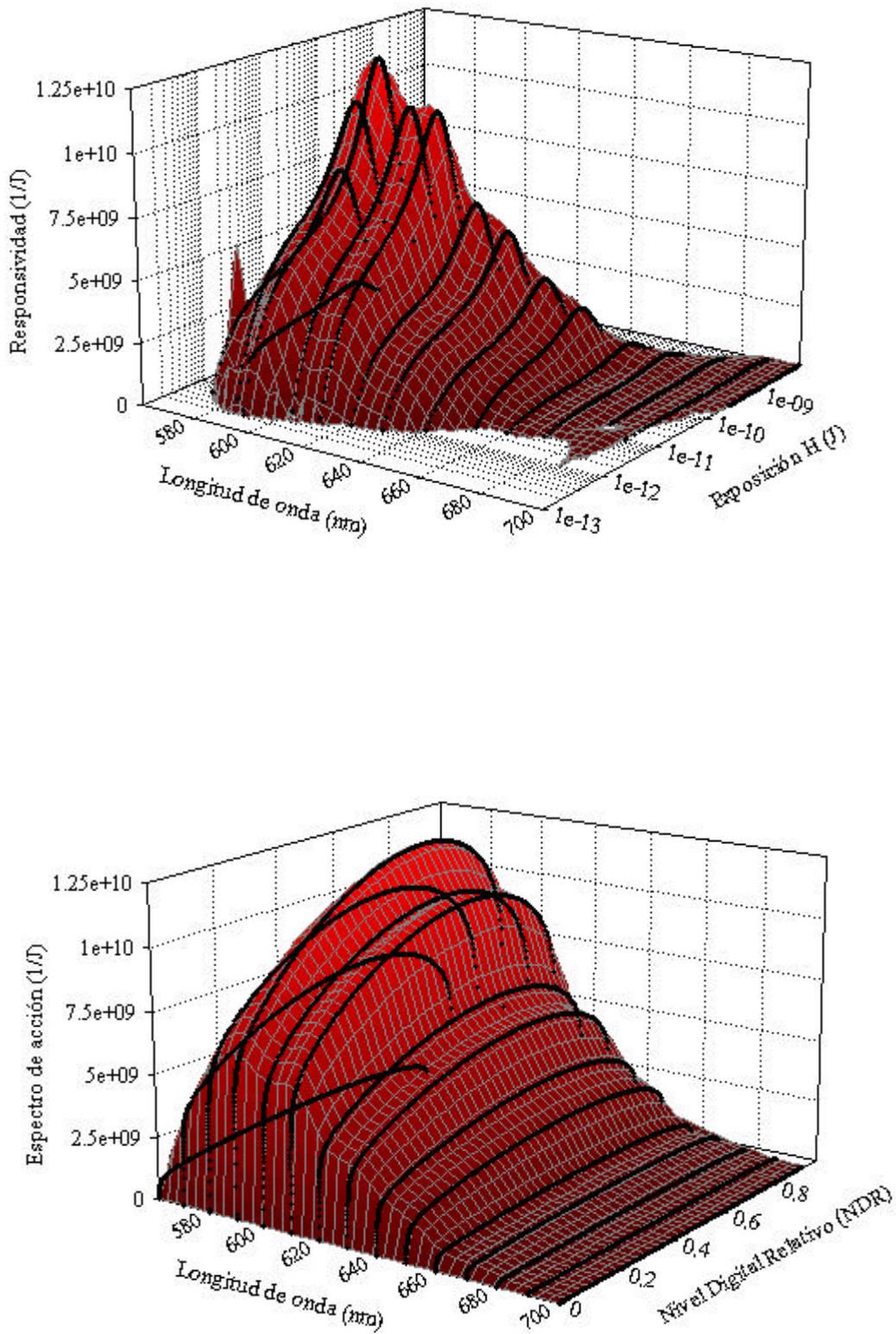


Figura 4.30: Representación 3-D de la responsividad espectral (arriba) y el espectro de acción (abajo) del canal R. Las curvas punteadas representan los perfiles de responsividad o espectro de acción con longitud de onda constante y exposición o nivel digital relativo variable, respectivamente.

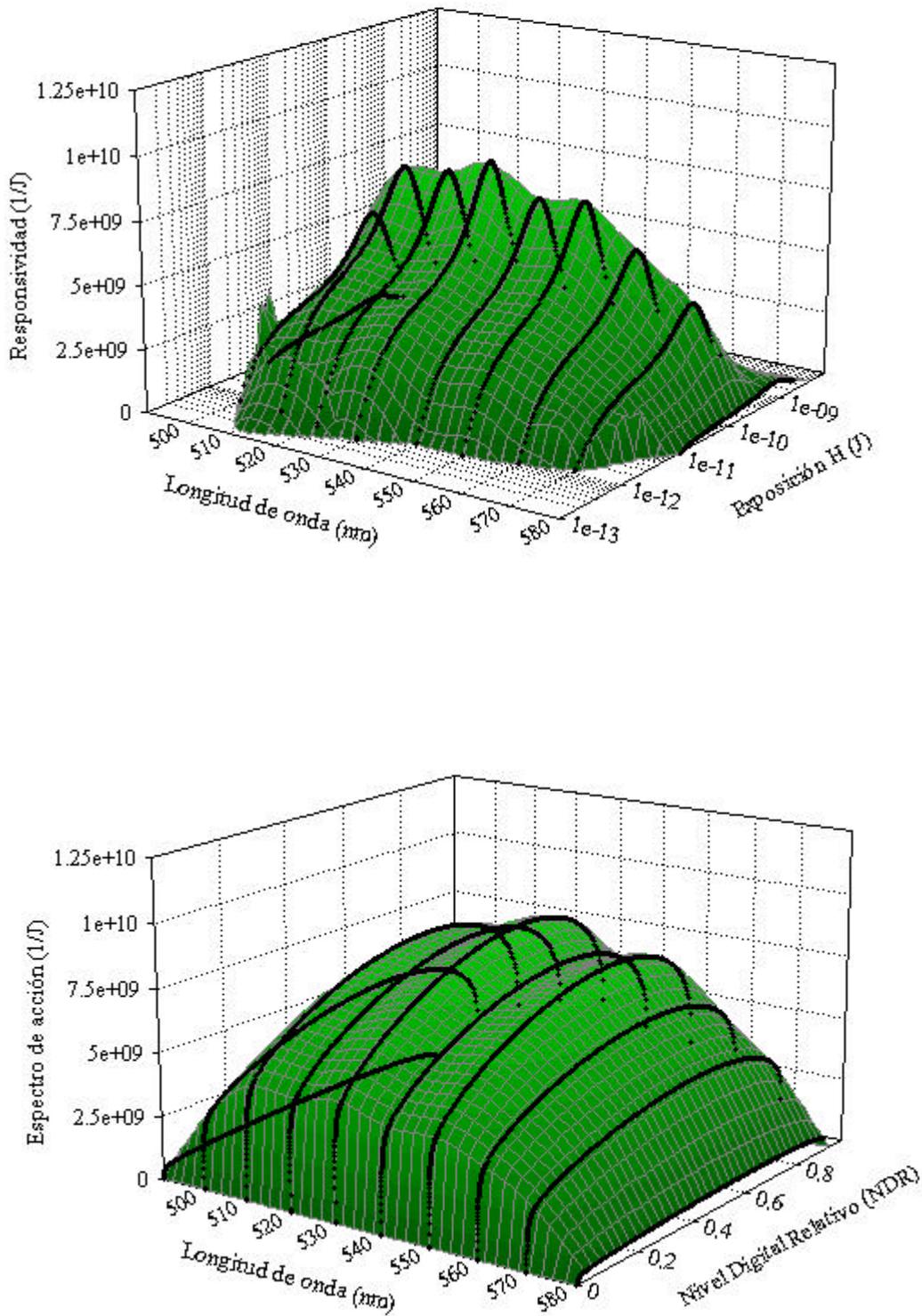


Figura 4.31: Representación 3-D de la responsividad espectral (arriba) y el espectro de acción (abajo) del canal G. Las curvas punteadas representan los perfiles de responsividad o espectro de acción con longitud de onda constante y exposición o nivel digital relativo variable, respectivamente.

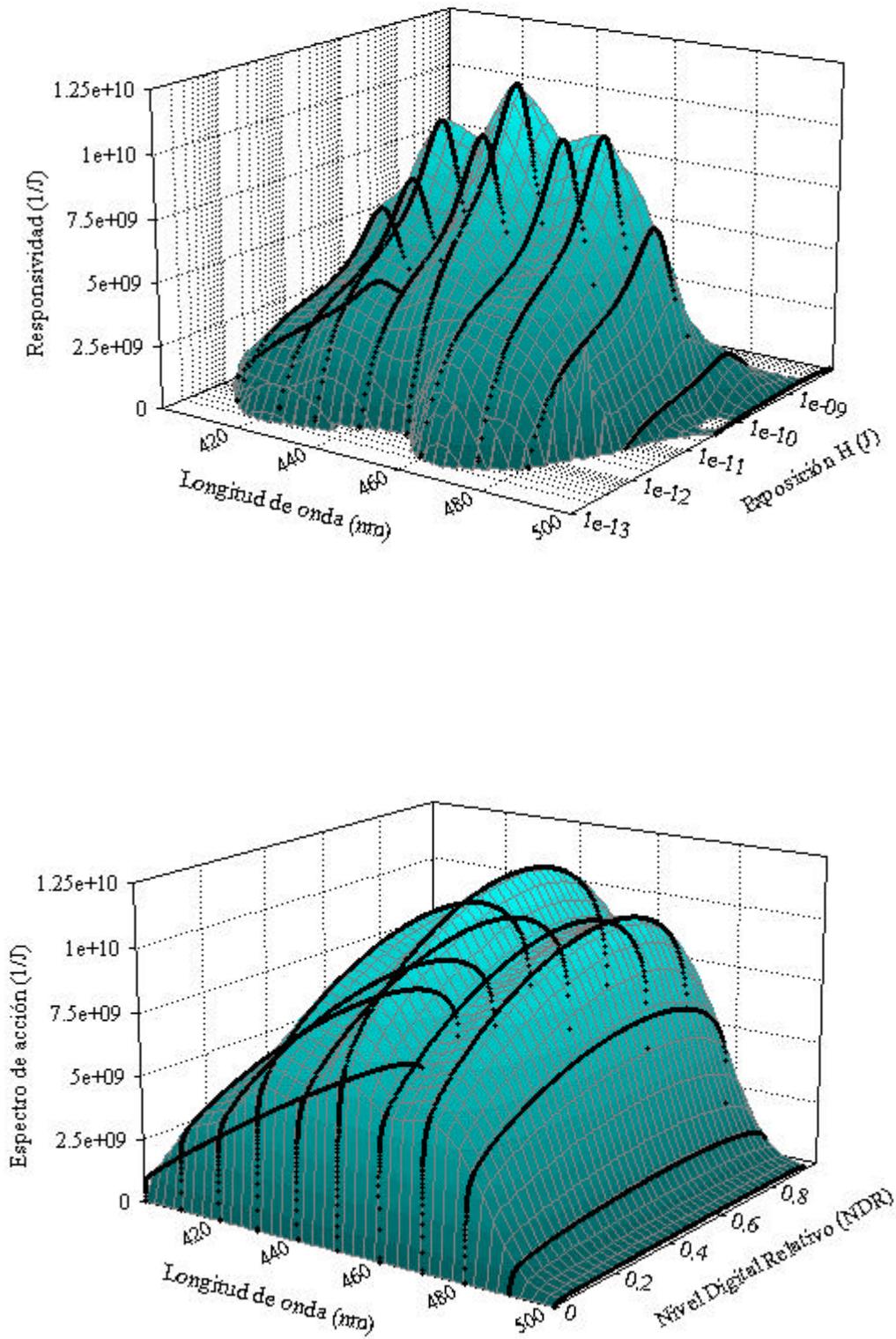


Figura 4.32: Representación 3-D de la responsividad espectral (arriba) y el espectro de acción (abajo) del canal B. Las curvas punteadas representan los perfiles de responsividad o espectro de acción con longitud de onda constante y exposición o nivel digital relativo variable, respectivamente.

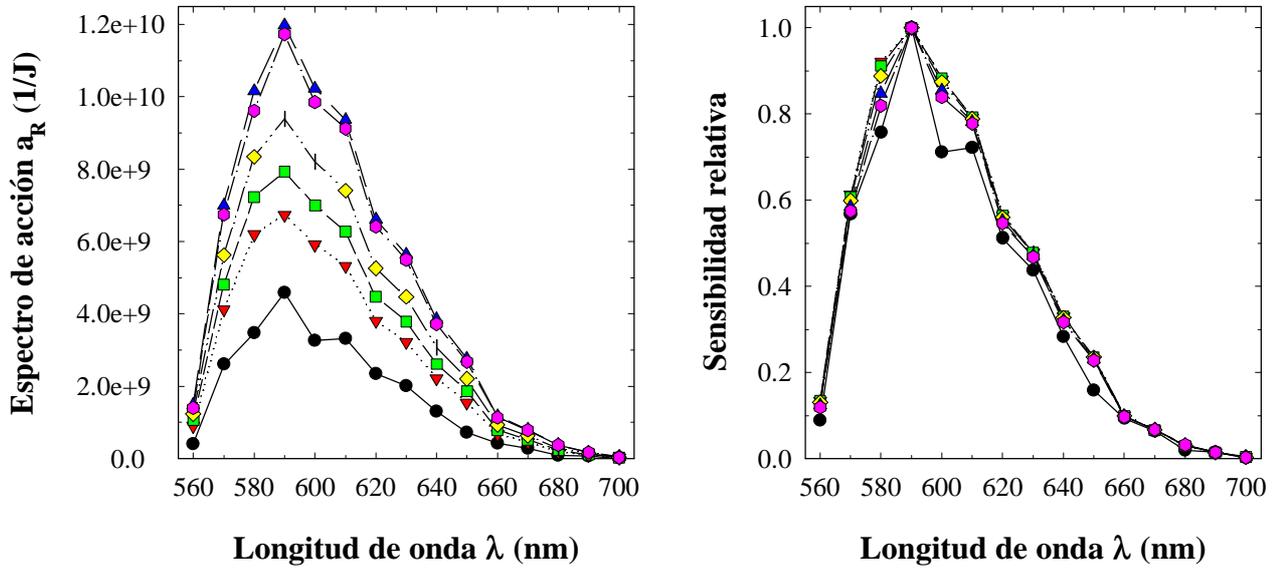


Figura 4.33: Representación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) de perfiles espectrales del espectro de acción del canal R. Los valores seleccionados de nivel digital relativo (NDR) son 1/255 (●), 10/255 (▼), 0.1(■), 0.2 (◆), 0.5 (▲), 0.8 (●).

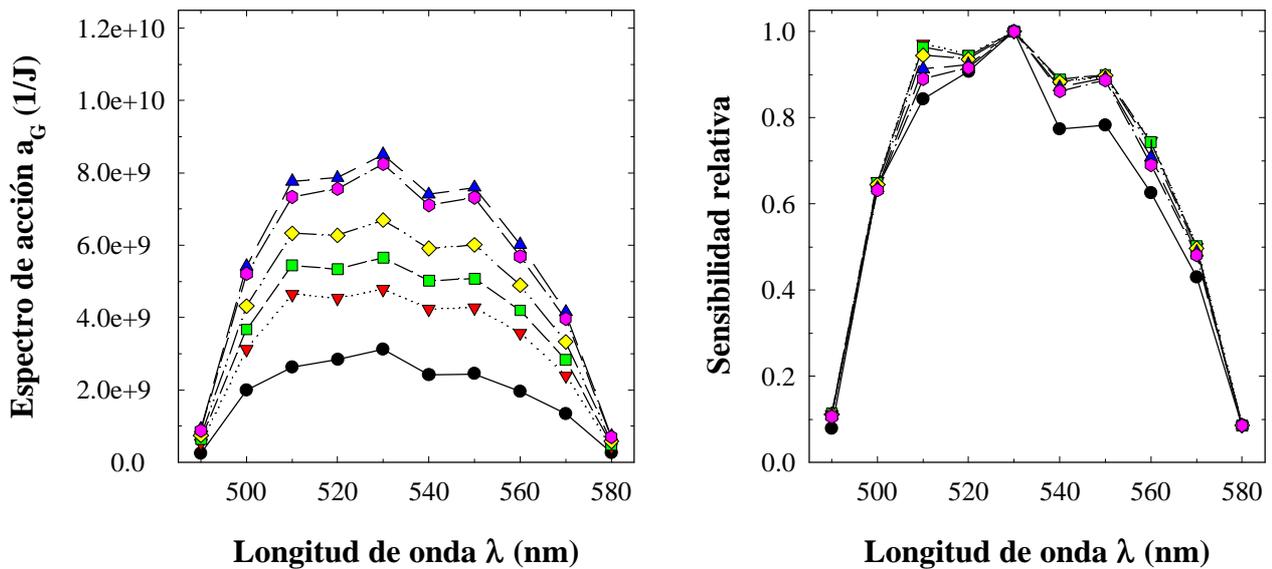


Figura 4.34: Representación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) de perfiles espectrales del espectro de acción del canal G. Los valores seleccionados de nivel digital relativo (NDR) son 1/255 (●), 10/255 (▼), 0.1(■), 0.2 (◆), 0.5 (▲), 0.8 (●).

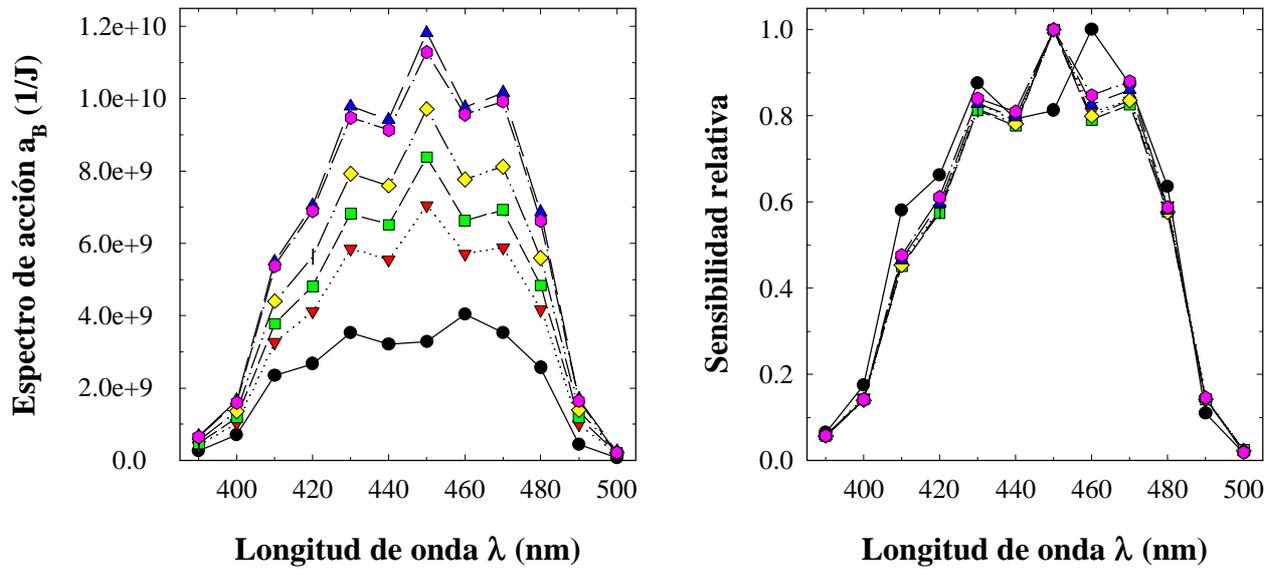


Figura 4.35: Representación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) de perfiles espectrales del espectro de acción del canal B. Los valores seleccionados de nivel digital relativo (NDR) son 1/255 (●), 10/255 (▼), 0.1(■), 0.2 (◆), 0.5 (▲), 0.8 (●).

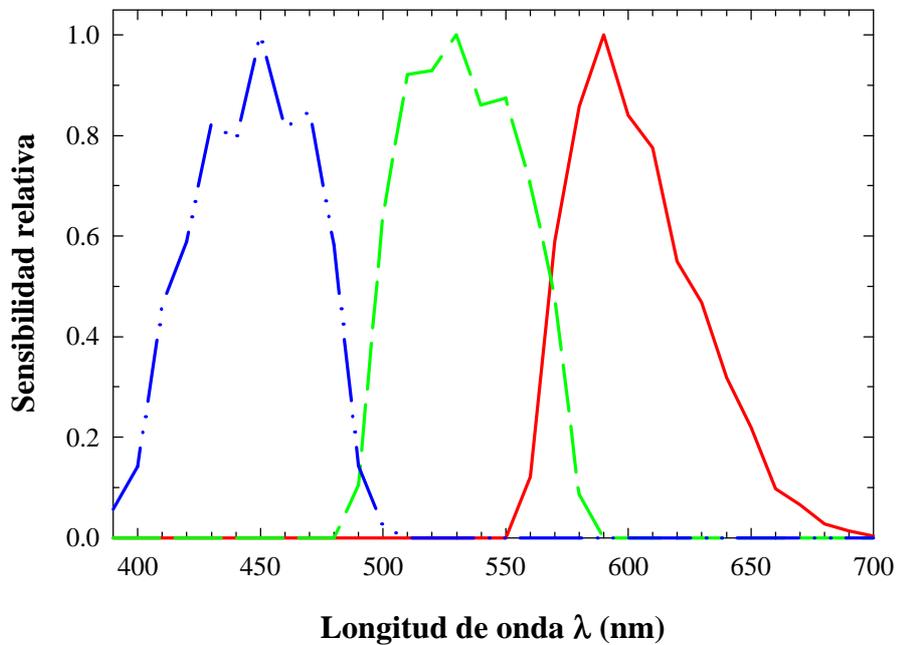


Figura 4.36: Sensibilidades espectrales relativas de nuestro dispositivo de captura. Línea continua: canal R; línea discontinua: canal G; línea discontinua y doblemente punteada: canal B.

Determinación de las sensibilidades espectrales completas

Para obtener el escalado conjunto entre las sensibilidades espectrales relativas de los tres canales de color tendremos que averiguar primero cuáles son las longitudes de onda λ_R , λ_G , λ_B donde se alcanzan los valores máximos de responsividad (espectro de acción). Para CIE-1931 XYZ, $\lambda_R = 600$ nm, $\lambda_G = 555$ nm, $\lambda_B = 450$ nm; para nuestro dispositivo real de captura, $\lambda_R = 590$ nm, $\lambda_G = 530$ nm, $\lambda_B = 450$ nm. Ahora bien, esto no significa que las sensibilidades (espectros de acción) de estos picos deban ser las mismas (Fig. 4.37). Para el observador patrón CIE-1931 XYZ, tenemos 1.0622 : 1 : 1.7721 a partir de las tablas colorimétricas con $\Delta\lambda = 10$ nm (Fig. 2.25). Sin embargo, al trabajar con un sistema fotosensor no lineal, las relaciones de proporcionalidad tipo $r_R(590,H) : r_G(530,H) : r_B(450,H)$ para cada valor de exposición H ., o de modo análogo, entre $a_R(590,NDR) : a_G(530,NDR) : a_B(450,NDR)$ para cada nivel digital relativo NDR , no son constantes como puede deducirse claramente de la Figura 4.37.

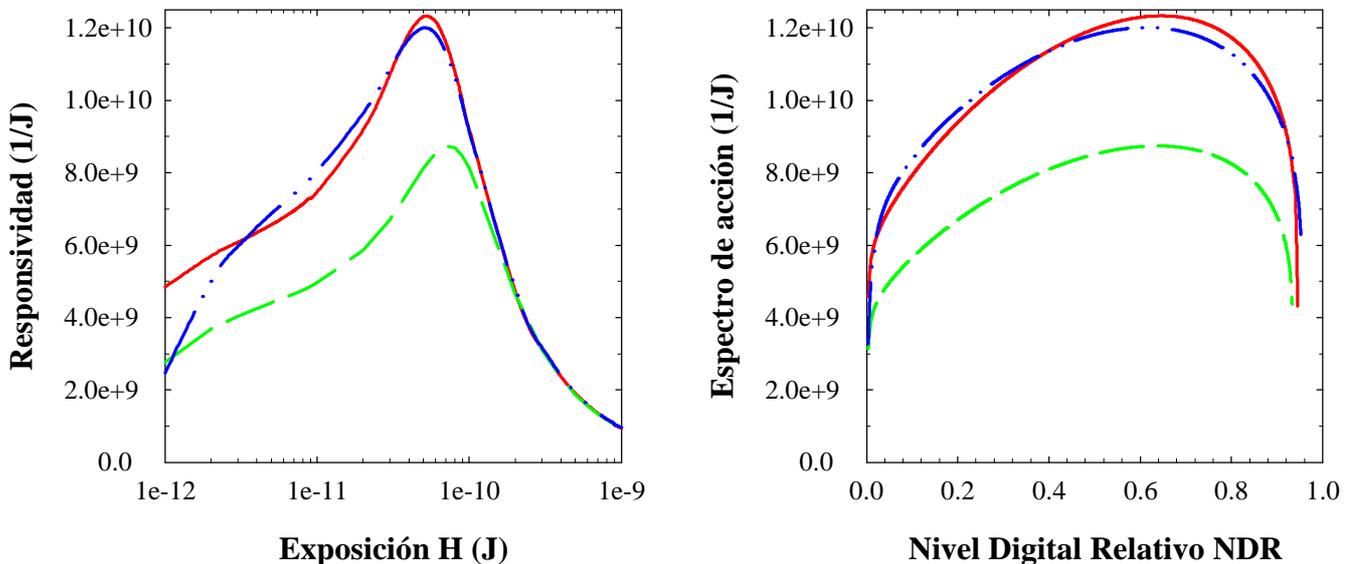


Figura 4.37: Representación conjunta de las sensibilidades (izquierda) y espectros de acción (derecha) correspondientes a los máximos de sensibilidad de cada canal-color. Línea continua: canal R; línea discontinua: canal G; línea discontinua y doblemente punteada: canal B.

Si las tres curvas se hubieran superpuesto completamente, las sensibilidades espectrales relativas serían correctas. Si las tres curvas fueran al menos paralelas entre sí en un amplio rango, la proporcionalidad conjunta sería sencilla. Sin embargo, aparecen cruces entre las curvas y, además, existe un desplazamiento entre los máximos respectivos de responsividad (espectro de acción) de cada canal-color. Por otra parte, dado que el rango "lineal" de respuesta se reduce a la parte central de cada sub-figura, deberemos descartar los valores de exposición (nivel digital relativo) más allá del máximo local de cada curva puesto que nos revela que el sistema fotosensor ya ha saturado. Aún así, no podemos aplicar el mismo criterio al otro extremo de la escala horizontal porque no queda claro el efecto (como punto de

inflexión) del paso del umbral de respuesta sobre las curvas. Dada la dificultad inherente de este problema, aparcaremos la resolución del mismo para más adelante puesto que conectará con la comprobación del balance de blanco colorimétrico de nuestro dispositivo de captura (§ 4.6.2). Aún así, sea cual sea el criterio de normalización que se elija, si denotamos el escalado absoluto de las responsabilidades (espectros de acción) como $p_R : p_G : p_B$, las sensibilidades espectrales relativas, ponderadas conjuntamente, quedarían finalmente como:

Ecuación 4.22

$$\mathbf{r}'_R(\lambda) = \frac{p_R}{r_{\lambda_R}} \mathbf{r}_R(\lambda) \quad ; \quad \mathbf{r}'_G(\lambda) = \frac{p_G}{r_{\lambda_G}} \mathbf{r}_G(\lambda) \quad ; \quad \mathbf{r}'_B(\lambda) = \frac{p_B}{r_{\lambda_B}} \mathbf{r}_B(\lambda)$$

siendo $\mathbf{r}_k(\lambda)/r_{\lambda_k}$ las sensibilidades espectrales relativas representadas en la Figura 4.36, tal como se obtuvieron a lo largo de esta sección.

4.5 Determinación del comportamiento de transferencia fotónica

A pesar de que los objetivos principales de esta Tesis son claramente colorimétricos, vimos en el Capítulo 2 que se pueden utilizar las medidas espectralradiométricas de captación de cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara) para estimar varias funciones optoelectrónicas como la función espectral de ganancia incremental *IGSF*, la eficiencia cuántica *QE*, la eficiencia cuántica de detección *DQE* y la relación señal-ruido *SNR* (Fig. 4.38). Si bien parece que esta sección queda un poco desajustada del argumento general colorimétrico de este trabajo, hemos creído oportuno incluir algunas estimaciones del comportamiento optoelectrónico de nuestro dispositivo de captura porque están basadas en funciones empíricas anteriores como la función espectral de conversión optoelectrónica *OECSF* y la responsividad espectral (espectro de acción).

El punto de partida de este análisis es el conjunto de series de exposición de las imágenes monocromáticas captadas para obtener las OECSFs. Aunque la exposición sobre el plano focal fotosensible se considere uniforme, vimos en el Capítulo 2 que a nivel cuántico la irradiancia fotónica está regida por las leyes estadísticas de Poisson. Con lo cual, aunque parte de la inhomogeneidad espacial de respuesta del plano CCD sea debida a factores tecnológicos, parte de esta inhomogeneidad espacial es debida a la naturaleza probabilística de la luz incidente. Siguiendo los trabajos originales de Janesick y colaboradores, la constante de conversión optoelectrónica K [e⁻/ND] se puede calcular gráficamente a partir de representaciones del tipo incertidumbre s_{ND} vs. señal ND (Ec. 2.33, Fig. 2.27). Si representamos los datos sobre ejes logarítmicos, los puntos intermedios se alinean bastante bien con una pendiente de valor 0.5, de forma que si prolongamos estos puntos hasta el corte con el eje vertical (s_{ND}) con valor 1, el punto del eje x (ND) representa directamente el valor de K que estamos buscando.

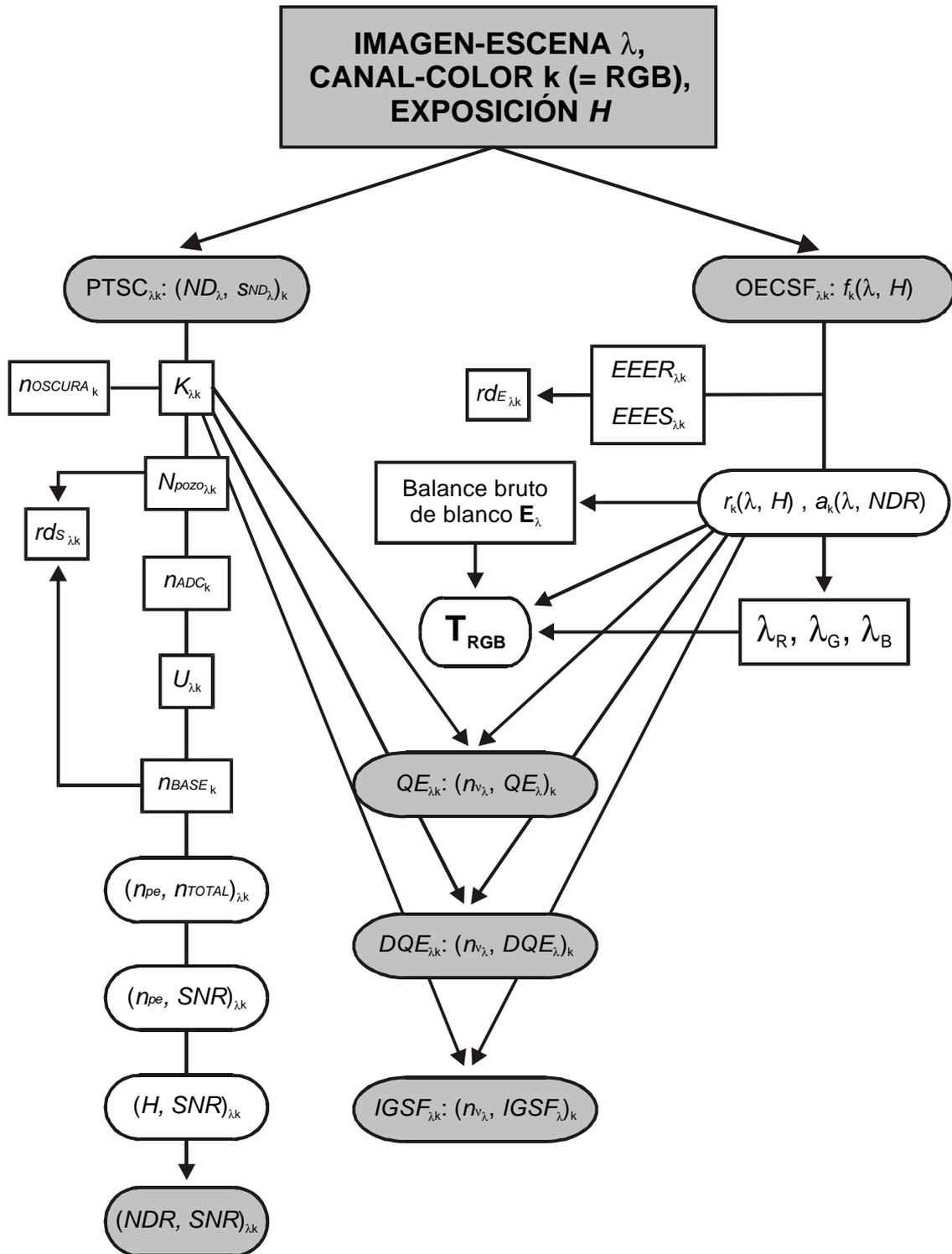


Figura 4.38: Esquema algorítmico de caracterización espectralradiométrico-colorimétrica y optoelectrónica de un dispositivo de captura marcando con fondo gris las relaciones funcionales que van mostrarse en esta sección.

Como alternativa a la propuesta gráfica de Janesick, hemos optado por un ajuste funcional de los datos experimentales del que podemos estimar también el valor K . Así, con las imágenes monocromáticas asociadas a las series de exposición, hemos extraído con el software ANCOL el valor medio ND y la

desviación estándar s_{ND} de regiones superiores a 100 pixels descubriendo que los datos experimentales (ND, s_{ND}) se ajustan bastante bien a la función $y = a \cdot x^b$, de forma que al hacer $s_{ND} = 1$ y $ND \equiv K$, éste se obtiene de los parámetros de ajuste (a, b) como:

Ecuación 4.23

$$\text{método gráfico (Janesick): } \log s_{PSN} = -\frac{1}{2} \log K + \frac{1}{2} \log ND \Rightarrow \text{ si } s_{PSN} = 1 \Rightarrow ND = K$$

$$\text{método analítico propuesto: } s_{ND} = a ND^b \Rightarrow \text{ si } s_{ND} = 1 \Rightarrow ND = K = \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$$

De las mismas curvas experimentales de transferencia fotónica (PTSC) podemos extraer la capacidad de pozo lleno $N_{pozo} = K \cdot ND_{pozo}$, siendo ND_{pozo} el valor correspondiente a la desviación estándar máxima $s_{m\acute{a}x}$ y que siempre se encuentra cercano al valor 200. Dado que estas relaciones son dependientes de la longitud de onda y del canal-color, la exposición espectral correspondiente al pozo lleno H_{pozo} se obtendría de invertir la función sigmoide de ajuste de cada OECSF. Del mismo modo, ya que la incertidumbre optoelectrónica se descompone en varios factores (ruido de fotones, corriente oscura, ruido base, etc), cambiando el grupo de datos experimentales de (ND, s_{ND}) a (n_{pe}, s_{TOTAL}^2) , podemos estimar el ruido optoelectrónico base n_{BASE} y el ruido de patrón U (Ec. 2.35), con lo que podemos comparar los rangos dinámicos de entrada rd_E y de salida rd_S de nuestro dispositivo de captura recordando que

Ecuación 4.24

$\forall \lambda, canal - color k :$

$$rd_E = 20 \log \left(\frac{EEES}{EEER} \right) = 20 \log \left(\frac{c - d \ln \left(\frac{b}{2^{bits} - 2} - 1 \right)}{c - d \ln \left(\frac{b}{2^{bits} - 1} - 1 \right)} \right) [\text{dB}]$$

$$rd_S = 20 \log \left(\frac{N_{pozo}}{n_{BASE}} \right) [\text{dB}]$$

siendo $\{a, b, c, d\}$ los parámetros de ajuste de la función sigmoide que ajustaba las OECSFs.

De las Tablas 4.19-21 sobre resultados numéricos referentes a la transferencia optoelectrónica de nuestro dispositivo de captura se deducen varias conclusiones generales:

Determinación del comportamiento de transferencia fotónica

Tabla 4.19: Parámetros sobre el funcionamiento optoelectrónico en el canal R de la cámara Sony DXC-930P acoplada a la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

λ (nm)	K (e ⁻ /ND)	NDR _{pozo}	N _{pozo} (e ⁻)	H _{pozo} (J)	n _{BASE} (e ⁻)	U (%)	rd _E (dB)	rd _S (dB)
560	3.13	200/255	625.08	5.55 e-10	41.93	7.21	42.69	23.47
570	3.94	0.784	787.41	1.15 e-10	41.92	10.58	43.24	25.48
580	4.62	0.784	924.99	8.05 e-11	41.92	11.25	43.03	26.88
590	5.78	0.784	1156.26	6.61 e-11	41.90	10.05	42.45	28.82
600	5.16	0.784	1032.48	7.86 e-11	41.91	9.59	41.87	27.83
610	4.59	0.784	918.08	8.50 e-11	41.92	9.49	43.13	26.81
620	5.32	0.784	1064.66	1.21 e-10	41.91	8.19	42.64	28.10
630	6.08	0.784	1216.33	1.41 e-10	41.90	8.60	43.07	29.26
640	6.57	0.784	1314.48	2.08 e-10	41.89	7.87	42.21	29.93
650	4.58	0.784	915.66	2.90 e-10	41.92	9.17	40.13	26.79
660	9.55	0.784	1909.76	6.82 e-10	41.85	4.05	43.40	33.19
670	12.82	0.784	2564.68	9.89 e-10	41.79	4.47	42.92	35.76
680	10.08	0.784	2016.96	2.09 e-9	41.84	4.12	41.58	33.66
690	11.13	0.784	2226.09	4.52 e-9	41.82	3.87	44.03	34.52
700	9.03	0.784	1806.64	2.27 e-8	41.86	3.00	40.05	32.70

Tabla 4.20: Parámetros sobre el funcionamiento optoelectrónico en el canal G de la cámara Sony DXC-930P acoplada a la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

λ (nm)	K (e ⁻ /ND)	NDR _{pozo}	N _{pozo} (e ⁻)	H _{pozo} (J)	n _{BASE} (e ⁻)	U (%)	rd _E (dB)	rd _S (dB)
490	21.55	200/255	4310.19	8.83 e-10	41.58	2.45	40.65	40.31
500	6.41	0.784	1281.37	1.49 e-10	41.90	5.66	43.13	29.71
510	8.02	0.784	1603.64	1.05 e-10	41.88	5.10	42.98	31.66
520	7.36	0.784	1471.90	1.02 e-10	41.89	6.48	43.09	30.92
530	8.16	0.784	1632.33	9.39 e-11	41.88	6.40	43.11	31.82
540	4.97	0.784	993.92	1.09 e-10	41.92	8.25	42.35	27.50
550	2.58	185/255	478.10	9.47 e-11	41.94	11.53	40.76	21.14
560	3.71	200/255	741.52	1.36 e-10	41.93	9.17	41.96	24.95
570	2.37	170/255	403.08	1.58 e-10	41.94	9.59	42.52	19.66
580	5.03	190/255	954.83	1.02 e-9	41.92	12.00	42.88	27.15

Tabla 4.21: Parámetros sobre el funcionamiento optoelectrónico en el canal B de la cámara Sony DXC-930P acoplada a la tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

λ (nm)	K (e ⁻ /ND)	NDR _{pozo}	N _{pozo} (e ⁻)	H _{pozo} (J)	n _{BASE} (e ⁻)	U (%)	rd _E (dB)	rd _S (dB)
390	40.99	200/255	8197.93	1.19 e-9	40.73	2.00	43.67	46.08
400	9.97	0.784	1994.50	4.85 e-10	41.85	1.83	44.62	33.56
410	15.23	0.784	3046.92	1.44 e-10	41.74	2.83	44.91	37.27
420	11.99	0.784	2397.63	1.13 e-10	41.81	4.58	43.85	35.17
430	12.10	0.784	2419.66	8.18 e-11	41.81	6.40	43.02	35.25
440	6.27	0.784	1253.27	8.50 e-11	41.90	6.93	43.22	29.52
450	3.37	0.784	674.17	6.87 e-11	41.93	5.66	41.17	24.12
460	7.06	0.784	1411.24	8.12 e-11	41.89	7.21	44.80	30.55
470	9.09	0.784	1818.39	7.82 e-11	41.86	4.58	42.59	32.76
480	7.32	0.784	1464.23	1.17 e-10	41.89	4.36	44.20	30.87
490	18.41	0.784	3682.20	4.72 e-10	41.66	2.45	40.44	38.93

- La constante de conversión optoelectrónica K varía con la longitud de onda λ , lo cual justifica que se denotara esta variable como K_λ en el Capítulo 2;

- La constante de conversión optoelectrónica K_λ es inversamente proporcional a la sensibilidad espectral;
- El ruido de lectura base (rlb) o n_{BASE} es constante dado que es un parámetro ligado a la arquitectura electrónica de control y transmisión de las señales optoelectrónicas generadas;
- El ruido de patrón $U(\%)$ es constante dado que es un parámetro ligado a los aspectos tecnológicos de diseño y construcción de los mosaicos fotosensibles. Dado que estamos trabajando con un cámara 3-CCDs, parecía lógico suponer, y así se ha verificado, que no deberían existir diferencias significativas entre los valores U en cada canal-color.
- Existe una compresión de respuesta, puesto que siempre se verifica que $rd_E > rd_S$.

Con estos resultados numéricos podemos representar gráficamente como ejemplo las funciones optoelectrónicas $OECSF$ (n_{pe} vs. n_v), $IGSF$ (vs. n_v), $PTSC$ (s_{ND} vs. ND), SNR (vs. NDR), QE (vs. n_v) y DQE (vs. n_v) para las longitudes de onda 450 nm, para el canal B, 530 nm, para el canal G, y 590 nm, para el canal R, las correspondientes a los máximos de responsividad aunque podrían ser indistintamente otras. De Ec. 2.42 podemos extraer a partir de la expresión analítica de la función sigmoide ligada a las OECSFs que la función espectral de ganancia incremental $IGSF$ queda como:

Ecuación 4.25

$\forall \lambda$, canal – color k :

$$IGSF_{\lambda,k} = \frac{\partial n_{pe}}{\partial n_v} = (2^{bits} - 1) K_{\lambda,k} \cdot f'_k \left(\frac{hc}{\lambda} n_v \right) \quad \text{y} \quad f_k \left(\lambda, \frac{hc}{\lambda} n_v \right) = a_{\lambda,k} + \frac{b_{\lambda,k}}{1 + \exp \left(- \frac{\frac{hc}{\lambda} n_v - c_{\lambda,k}}{d_{\lambda,k}} \right)}$$

$$\Rightarrow IGSF_{\lambda,k} = (2^{bits} - 1) K_{\lambda,k} \frac{hc}{\lambda} \frac{b_{\lambda,k}}{d_{\lambda,k}} \frac{\exp \left(- \frac{\frac{hc}{\lambda} n_v - c_{\lambda,k}}{d_{\lambda,k}} \right)}{\left[1 + \exp \left(- \frac{\frac{hc}{\lambda} n_v - c_{\lambda,k}}{d_{\lambda,k}} \right) \right]^2}$$

Tras obtener la constante de conversión optoelectrónica K y estimar los tipos diferentes de ruido optoelectrónico, podemos expresar la relación señal-ruido SNR (en dB) con la Ec. 2.24 y relacionarla directamente, punto a punto, con el nivel digital relativo NDR correspondiente puesto que $n_{pe} = (2^{bits} - 1) \cdot K \cdot NDR$.

Determinación del comportamiento de transferencia fotónica

Por otra parte, la eficiencia cuántica espectral QE quedaría directamente proporcional a la responsividad espectral (espectro de acción) y la eficiencia cuántica de detección DQE como

Ecuación 4.26

$$\forall \lambda, \text{ canal - color } k :$$
$$QE_{\lambda k} = 100 \frac{hc}{\lambda} (2^{bits} - 1) K_{\lambda k} \cdot r_{\lambda k} \quad [\%]$$
$$DQE_{\lambda k} = 100 \frac{n_v}{n_{TOTAL}} (IGSF_{\lambda k})^2 \quad [\%]$$

De las figuras siguientes (Fig. 4.39-41) se pueden extraer las conclusiones generales siguientes:

- Sea en versión macroscópica (NDR vs. H) o microscópica (n_{pe} vs. n_n), la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF) mantiene la forma sigmoideal.
- La función espectral de ganancia incremental (IGSF), como derivada de una OECSF sigmoideal, presenta un comportamiento no lineal, con un máximo absoluto cercano a la posición de la capacidad de pozo lleno N_{pozo} y un descenso brusco posterior hacia el valor nulo como consecuencia de la saturación del sistema.
- Sin tener en cuenta el ruido optoelectrónico asociado a la zona de saturación, la relación señal vs. ruido (SNR) aumenta progresivamente con el nivel de respuesta hasta llegar a un punto en que se estabiliza. Nunca supera los 30 dB, tal como tampoco lo hacen los casos presentados de fotodetección ideal (Fig. 2.9).
- La eficiencia cuántica espectral (QE) toma la forma característica de la responsividad espectral, con lo que nota claramente la progresión creciente de esta función desde valores cercanos al umbral hasta el valor máximo de capacidad optoelectrónica, así como el descenso brusco posterior como consecuencia de la saturación del sistema. La escala absoluta de QE es tan baja que parece necesario pasar de la escala porcentual (%) a una escala más representativa ($^0/_{000000}$), lo cual puede entenderse como un gran aspecto diferenciador con respecto de la fotodetección ideal (Fig. 2.8).
- La eficiencia espectral de detección (DQE) presenta una forma bastante abrupta, con un máximo centrado sobre la capacidad de pozo lleno. Al igual que arriba, nuestro dispositivo de captura presenta una escala absoluta muy alejada del comportamiento ideal de la fotodetección (Fig. 2.12).

En conclusión, en aspectos estrictamente optoelectrónicos, nuestro dispositivo de captura dista mucho de ser un sistema ideal. No obstante, creemos firmemente que la metodología desarrollada puede servir para realizar análisis comparativos entre grupos de dispositivos de captura (escáneres, cámaras) con prestaciones aparentemente idénticas.

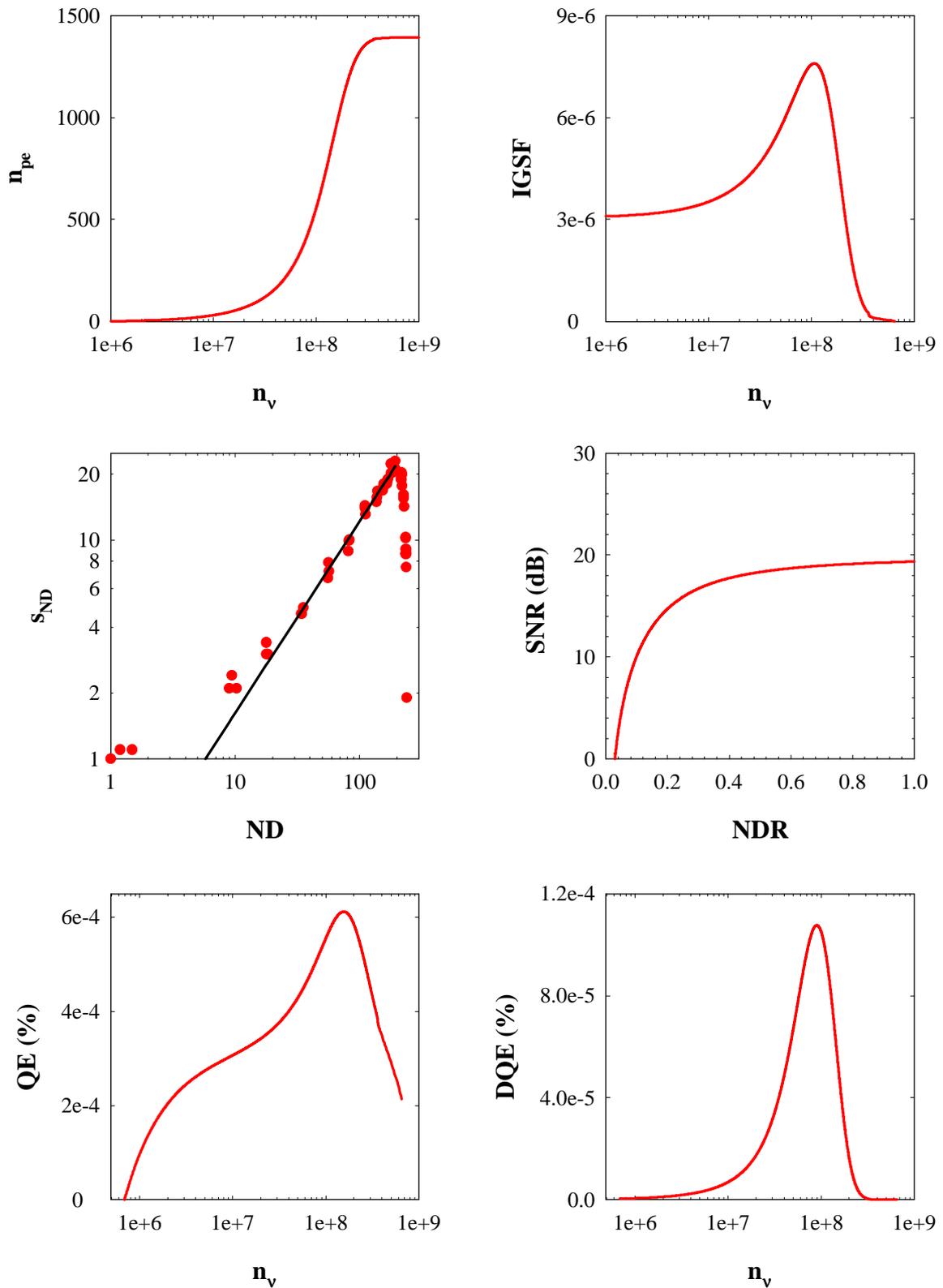


Figura 4.39: Resultados optoelectrónicos para $\lambda = 590$ nm en el canal R: arriba-izquierda, OECSF; arriba, derecha, IGSF; centro-izquierda, PTSC; centro-derecha, SNR; abajo, izquierda, QE; abajo-derecha, DQE.

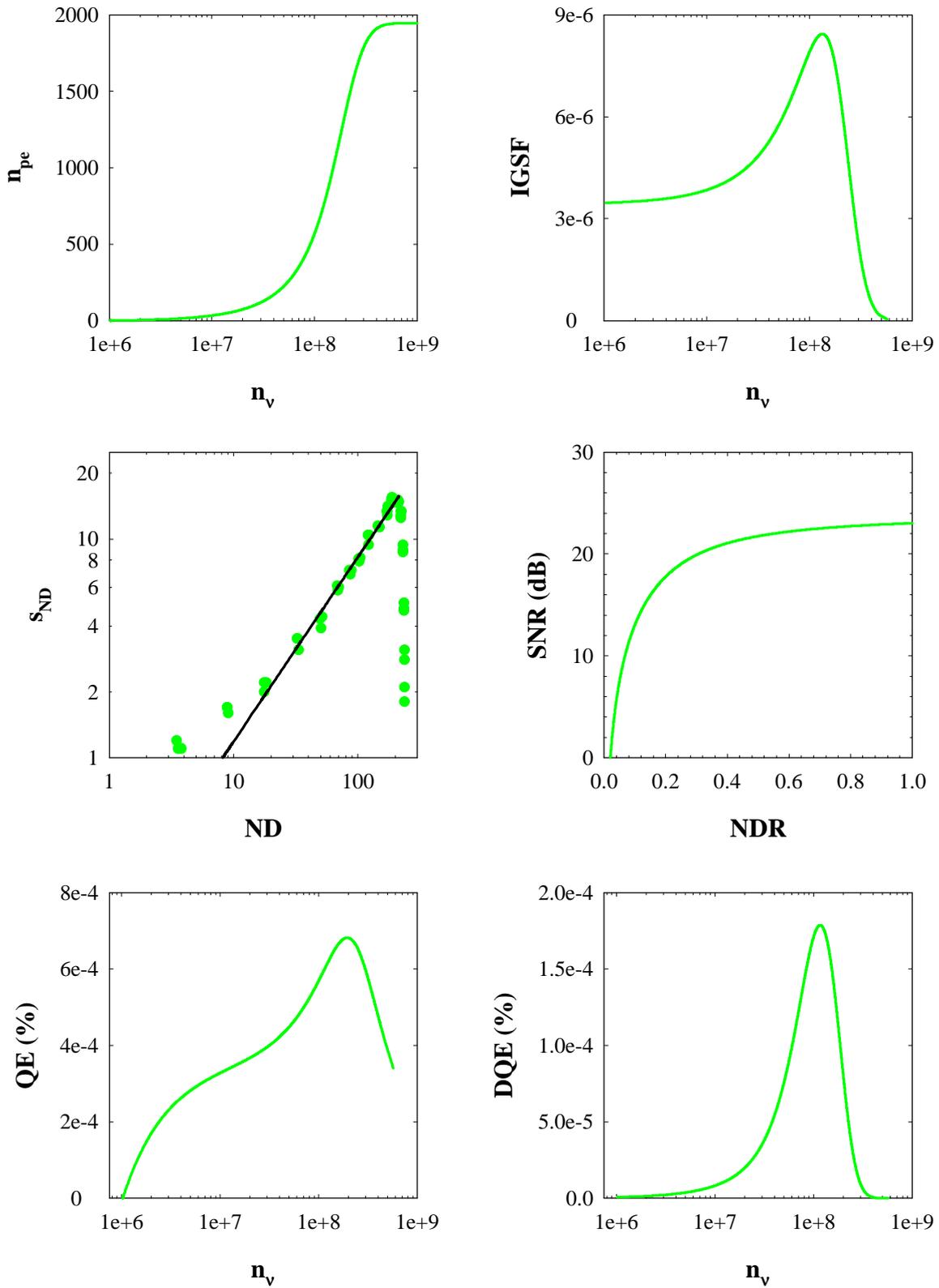


Figura 4.40: Resultados optoelectrónicos para $\lambda = 530$ nm en el canal G: arriba-izquierda, OECSF; arriba, derecha, IGSF; centro-izquierda, PTSC; centro-derecha, SNR; abajo, izquierda, QE; abajo-derecha, DQE.

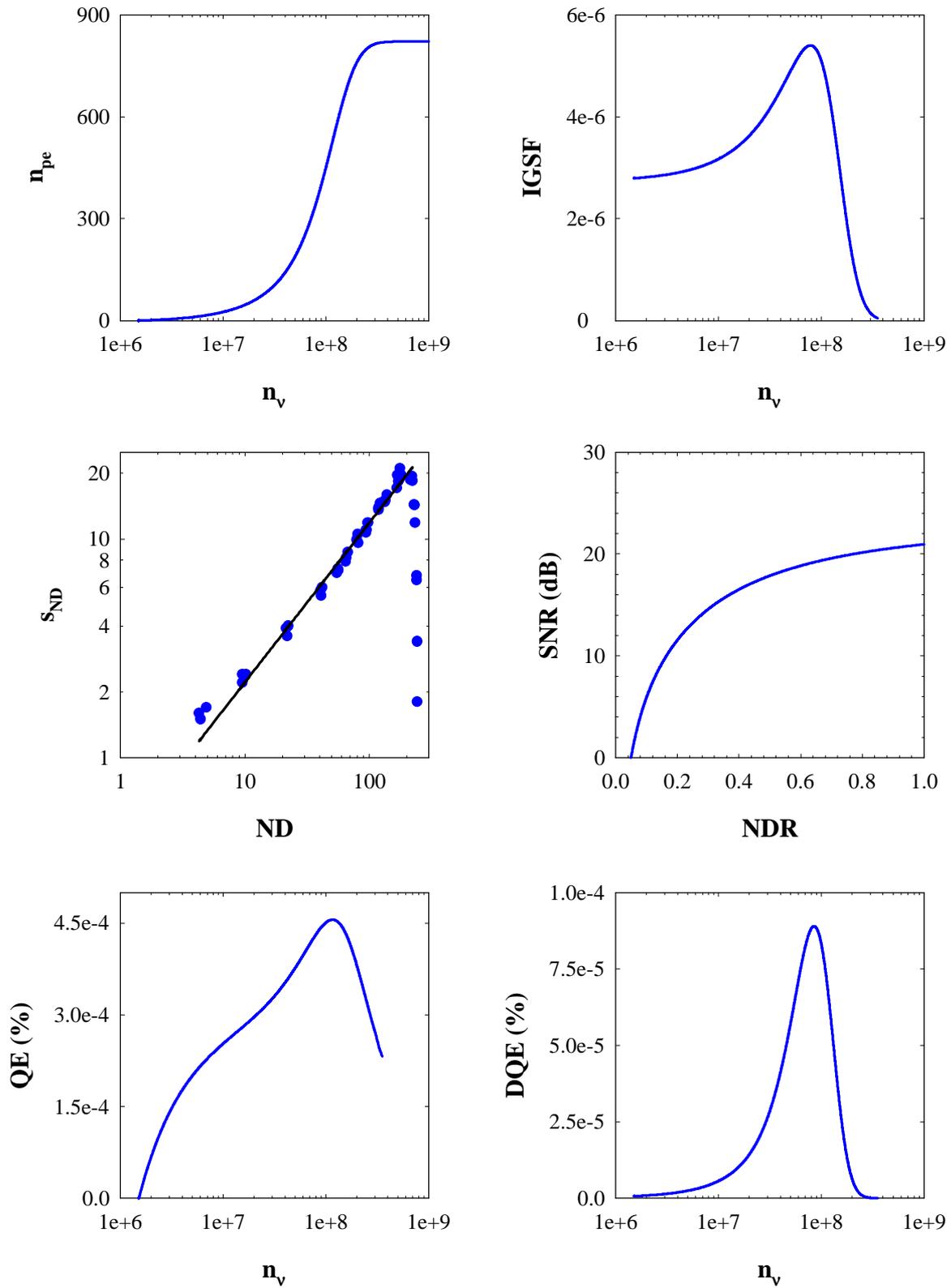


Figura 4.41: Resultados optoelectrónicos para $\lambda = 450$ nm en el canal B: arriba-izquierda, OECSF; arriba, derecha, IGSF; centro-izquierda, PTSC; centro-derecha, SNR; abajo, izquierda, QE; abajo-derecha, DQE.

4.6 Modelo de codificación del color

Cualquier modelo de codificación del color en un dispositivo de captura debe basarse inicialmente en el principio de univariancia (Ec. 2.9, 13, 16), y, del mismo modo se basa la especificación triestímulo en cualquier sistema de representación del color. De esta forma, separamos entre la energía radiante incidente y la función sensibilidad del sistema a la hora de analizar cómo se genera la respuesta de un sistema. Recapitulando lo visto hasta ahora, aprovechando conceptos como el ruido de fondo, la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF) y la responsividad espectral $r_k(\lambda, H)$, podemos transformar el principio de univariancia en versión optoelectrónica del modo siguiente:

Ecuación 4.27

$$ND_k \cong \left(2^{bits} - 1\right) \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} NDR_{\lambda k} \Delta\lambda = \left(2^{bits} - 1\right) \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} H(\lambda) r_k(\lambda, H) \Delta\lambda$$

$$ND_k \cong \left(2^{bits} - 1\right) \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} OECSF_{\lambda k} \Delta\lambda = \left(2^{bits} - 1\right) \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \left[a_{\lambda k} + \frac{b_{\lambda k}}{1 + \exp\left(-\frac{H_{\lambda} - c_{\lambda k}}{d_{\lambda k}}\right)} \right] \Delta\lambda$$

Denotaremos a partir de ahora esta expresión como la ecuación pseudo-triestímulo de nuestro dispositivo de captura. Basándonos, pues, en esta última expresión, veremos a lo largo de esta sección cómo se comprueba el balance de blanco y se normalizan de forma conjunta las sensibilidades espectrales relativas que obtuvimos anteriormente. De esta forma, solamente nos restará en el apartado siguiente aplicar estos resultados para obtener las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} , que es el objetivo principal de toda caracterización espectral aplicada a un dispositivo de captura.

4.6.1 Comprobación del balance de blanco

El balance de blanco (o de gris) debe comprobar que un estímulo acromático generará respuestas idénticas en los tres canales-color. Habitualmente, este proceso se ejecuta de forma electrónica ajustando de forma interna los valores brutos de captura a una cromaticidad específica de la fuente luminosa. En el caso de la cámara Sony DXC-930P, se selecciona automáticamente vía menú la temperatura de color T_c de la fuente luminosa, a 3200 K o a 5600 K; o bien, de forma manual, se ajustan por separado las ganancias (en dB) de los canales R y B. Tal como se comentó en el Capítulo 2, optamos por configurar el balance de blanco en modo manual y por defecto, o sea, a 5600 K y sin cambios en las ganancias de los canales R y B. Esta selección pretendía acercar lo máximo posible las cromaticidades de los blancos de referencia de nuestro dispositivo de captura y el tele-espectrocolorímetro Photo Research PR-650, instrumento en el que pretendemos basar el análisis de nuestra caracterización espectral y colorimétrica. Ahora bien, debido al metamerismo del dispositivo como consecuencia de que \mathbf{T}_{RGB} no va a ser

combinación lineal exacta de \mathbf{T}_{XYZ} , existen multitud de fuentes luminosas que pueden tener la misma cromaticidad o temperatura correlacionada de color desde el punto de vista del observador patrón CIE-1931 XYZ, pero que generen respuestas digitales diferentes aún con el balance de blanco fijado. Por tanto, aunque los fabricantes optaron por algún tipo de fuente luminosa para calibrar su función electrónica de balance de blanco, esto no nos asegura que si pudiéramos presentar delante de una cámara el estímulo equi-energético $\mathbf{E} = [1, 1, \dots, 1]^t$, con $T_C \cong 5600$ K, ésta va a responder de forma similar en los tres canales.

Por otro lado, aparte del escalado conjunto, el algoritmo del balance de blanco consiste en aplicar otro escalado a las sensibilidades relativas según la respuesta cromática que generen frente a un estímulo equi-energético \mathbf{E} del nivel radiante que sea. Para entender tal proceso, es mejor fijarnos en el caso de CIE-1931 XYZ. Con la ecuación triestímulo (Ec. 1.9, 2.29) podemos comprobar que, si el estímulo-color $\mathbf{b} = \mathbf{E} = [1, 1, \dots, 1]^t$, las tres ecuaciones representan realmente el cálculo de las áreas que cubren espectralmente cada una de las funciones de igualación. Así, con $\Delta\lambda = 5$ nm, tenemos que $\bar{\mathbf{x}}^t \cdot \mathbf{E}$, $\bar{\mathbf{y}}^t \cdot \mathbf{E}$, $\bar{\mathbf{z}}^t \cdot \mathbf{E} = 21.3714$ (Wyszecki, Stiles 1982, 737), lo cual equivale a un balance 1 : 1 : 1, o sea, que el fotosensor lineal CIE-1931 XYZ está balanceado al estímulo equi-energético. En cambio, aunque según el fabricante, el balance electrónico de blanco se haya configurado aparentemente a 1 : 1 : 1, no tenemos una certeza absoluta de que tal balance sea realmente correcto desde el punto de vista colorimétrico, aunque se hubiera ajustado electrónicamente según la fuente luminosa de calibración. Por tanto, no nos queda más remedio que comprobarlo, y compensarlo en el caso de que no sea correcto.

El test de comprobación del balance de blanco consistirá, por tanto, en imponer de forma teórica un estímulo equienergético $\mathbf{E} = [1, 1, \dots, 1]^t$ en la ecuación pseudo-triestímulo del dispositivo de captura, pero variando libremente el nivel absoluto de energía radiante, o sea, calcular los niveles digitales relativos NDR_k frente a un estímulo-color del tipo $\mathbf{E} = H_E [1, 1, \dots, 1]^t$, siendo H_E un número real que marca el nivel absoluto de exposición.

Ecuación 4.28

$$NDR_k = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} H_E r_k(\lambda, H) \Delta\lambda = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \left[a_{\lambda k} + \frac{b_{\lambda k}}{1 + \exp\left(-\frac{H_E - c_{\lambda k}}{d_{\lambda k}}\right)} \right] \Delta\lambda$$

Si el balance electrónico de blanco estuviera ajustado al estímulo equi-energético, las respuestas relativas de los tres canales-color deberían superponerse independientemente de H_E . Sin embargo, a la vista de la Figura 4.42, parece que esto no se está cumpliendo, con lo cual podemos asegurar que nuestro dispositivo de captura no está balanceado al estímulo equi-energético, que es lo deseable si queremos convertirlo en un instrumento colorimétrico. El mismo análisis se desprende si representamos conjuntamente en 3-D las respuestas relativas de la figura anterior. Sobre un diagrama-cubo (Fig. 4.43 arriba), hemos representado los valores NDR_k calculados, observándose que el desajuste del balance de blanco equi-energético porque los puntos representados no se alinean con la diagonal principal, la que iría desde el punto (0,0,0) al punto

(1,1,1). En ambos tipos de representación se puede observar que el canal B es el más sensible, el que primero se saturará, le sigue después el canal R, y, por último, el canal G. Una vez detectado el problema, la cuestión siguiente es cómo compensar o neutralizar este desajuste colorimétrico.

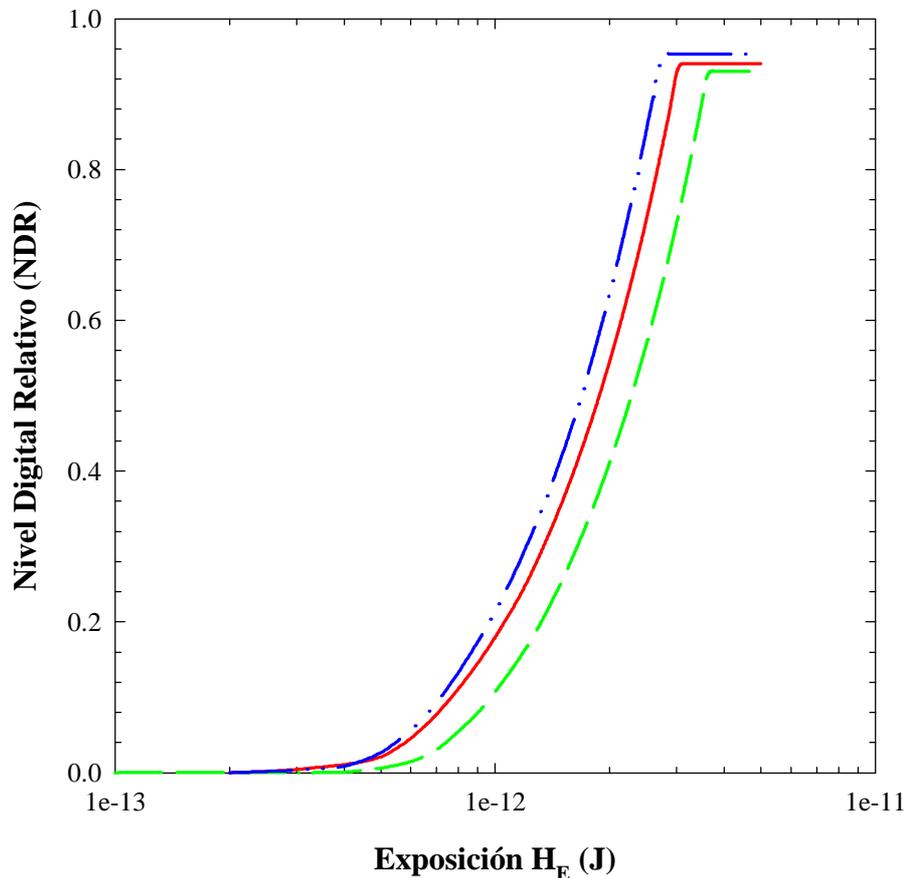


Figura 4.42: Respuestas relativas de nuestro dispositivo de captura frente a estímulos equi-energéticos de nivel radiante H_E variable.

Si proyectamos los puntos de la figura 3-D sobre los planos B vs. G y B vs. R, podremos observar que las respuestas equi-energéticas quedan alineadas. Dicho de otro modo, si representamos por separado las parejas NDR_G vs. NDR_B y NDR_R vs. NDR_B (Fig. 4.43 abajo), los datos quedarán la mayor parte alineados, si descartamos las respuestas saturadas. En consecuencia, aplicando simplemente una regresión lineal del tipo $y = mx + b$ a cada grupo de datos, la pendiente correspondiente m , nos servirá de balance particular entre dos canales de color. Como las comparaciones del balance de blanco se realizan respecto el canal B, denotaremos $bal_B = 1$. En cambio, como la pendiente $m_{GB} = 0.6990$, denotaremos a partir de ahora $bal_G = 0.6990$; y, en el caso del canal R, como $m_{RB} = 0.8648$, $bal_R = 0.8648$. En resumen, el balance de blanco equi-energético de nuestro dispositivo de captura no es 1 : 1 : 1, sino 0.8648 : 0.6990 : 1.

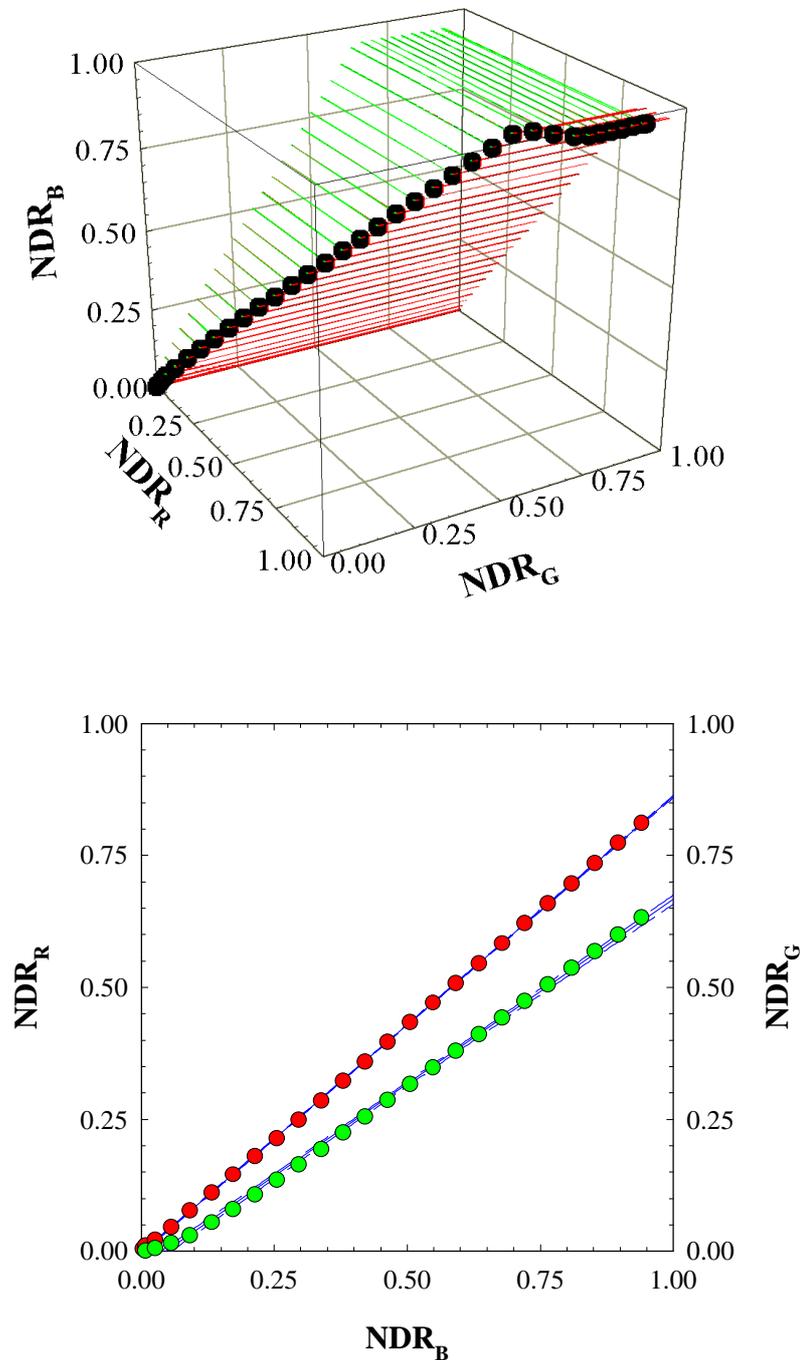


Figura 4.43: Representación conjunta 3-D (arriba) y 2-D (abajo) de las respuestas digitales relativas de nuestro dispositivo de captura frente a estímulos equi-energéticos de nivel radiante absoluto variable. Las inversas de las pendientes de las rectas proyectadas en la figura de arriba son los valores 0.6990 (a la izquierda) y 0.8648 (a la derecha), justa y respectivamente los valores de las pendientes de las rectas de la figura de abajo. (Las rectas de abajo son los ajustes lineales con los intervalos de confianza al 95 %.)

Con este formalismo, creemos que hemos propuesto de forma novedosa un método espectralradiométrico de ajuste/control del balance de blanco de cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara). En principio, con nuestros valores de balance de blanco equi-energético, podríamos ajustar manualmente el nuevo balance de blanco cambiando las ganancias de los canales R y B a -1.85 y -3.11 dB, respectivamente. No obstante, no lo hicimos. Aún así, sería interesante comprobar a posteriori si, con la nueva configuración, el test del balance de blanco ejecutado sobre los nuevos resultados espectralradiométricos (nuevas OECSFs) proporcionaría un balance de blanco 1 : 1 : 1, o más equilibrado que el anterior. Por tanto, imponiendo como estímulo-color cualquier iluminante tipo P (de Planck o radiador absoluto, con $T_C \leq 5000$ K) o de tipo D (luz diurna, con $T_C > 5000$ K), podríamos tabular las ganancias electrónicas de los canales R y B que deberíamos ajustar manualmente y en función del balance bruto según la cromaticidad de estos iluminantes. Al final, sería también interesante comprobar cuáles son las desviaciones de balance de blanco al trabajar directamente con fuentes luminosas reales y no con iluminantes, como por ejemplo, con las fuentes fluorescentes (iluminantes tipo F, Fig. 1.30).

4.6.2 Criterio de normalización conjunta de las sensibilidades espectrales relativas

Anteriormente se dejó pendiente el criterio de escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas (Fig. 4.36). Se aplazó tal cálculo porque estaba relacionado con el test de balance de blanco equi-energético que acabamos de desarrollar. El problema que subyace en establecer un criterio de escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas es que las responsabilidades espectrales (espectros de acción) de los máximos de cada canal se entrecruzan a lo largo del rango de exposición (niveles digitales relativo) (Fig. 4.37). Con lo cual, quedaba bastante complicado elegir de partida qué rango de exposición (nivel digital relativo) era el adecuado, porque según la zona, ponderaría más el canal R que el canal B, o viceversa.

El test del blanco equi-energético nos servirá de nuevo para aclarar este dilema. El criterio que usaremos se basa en la proporción de las respuestas individuales de los máximos respectivos de cada canal-color frente a un estímulo equi-energético. Si en vez de tomar la suma de las respuestas individuales de cada longitud de onda (Fig. 4.44), seleccionamos de los datos anteriores la respuesta individual de cada máximo, observaremos que ninguna contribución individual de cada máximo alcanza el nivel digital $ND = 40$, que representa un nivel digital relativo $NDR = 0.157$. Por lo tanto, si tenemos en cuenta la Figura 4.37, el rango de NDR que nos interesa está entre 0 y 0.2. No tendría entonces sentido escoger otro rango mayor porque el sistema ya estaría saturado debido a las contribuciones del resto de las longitudes de onda. En consecuencia, el escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas puede obtenerse aplicando un algoritmo similar al del balance de blanco equi-energético, pero en un rango reducido de exposiciones H_E para que los niveles digitales relativos NDR para $\lambda = 450$ (canal B), 530 (canal G), 590 (canal R) nm oscilen entre 0 y 0.2.

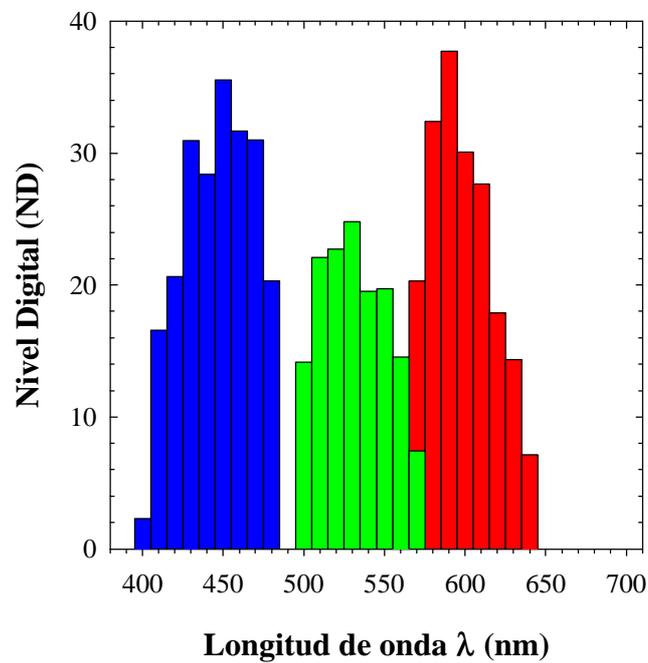
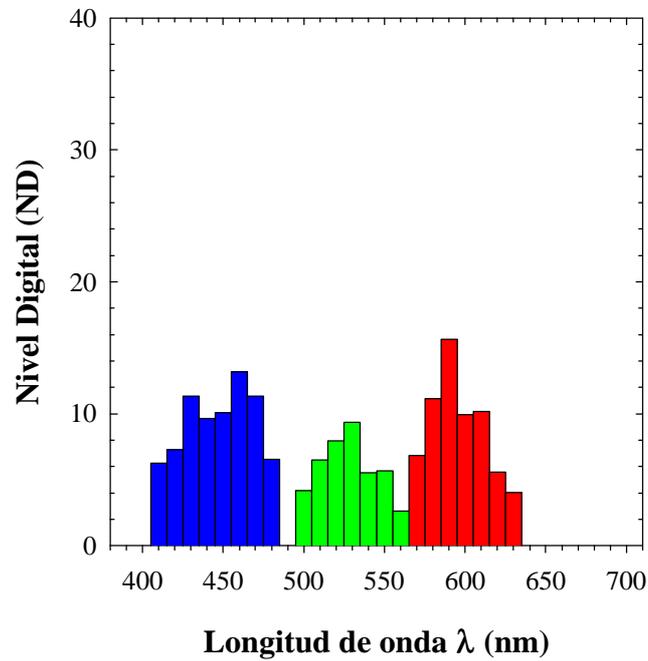


Figura 4.44: Respuestas individuales de los canales de color frente a un estímulo equi-energético variable: arriba, $H_E = 1.2 \times 10^{-12}$ J, resultando que $ND_R = 63$, $ND_G = 42$ y $ND_B = 76$; abajo, $H_E = 2.5 \times 10^{-12}$ J, resultando que $ND_R = 187$, $ND_G = 145$ y $ND_B = 217$. Nótese como la respuesta del máximo-rojo es siempre superior que la del máximo-azul.

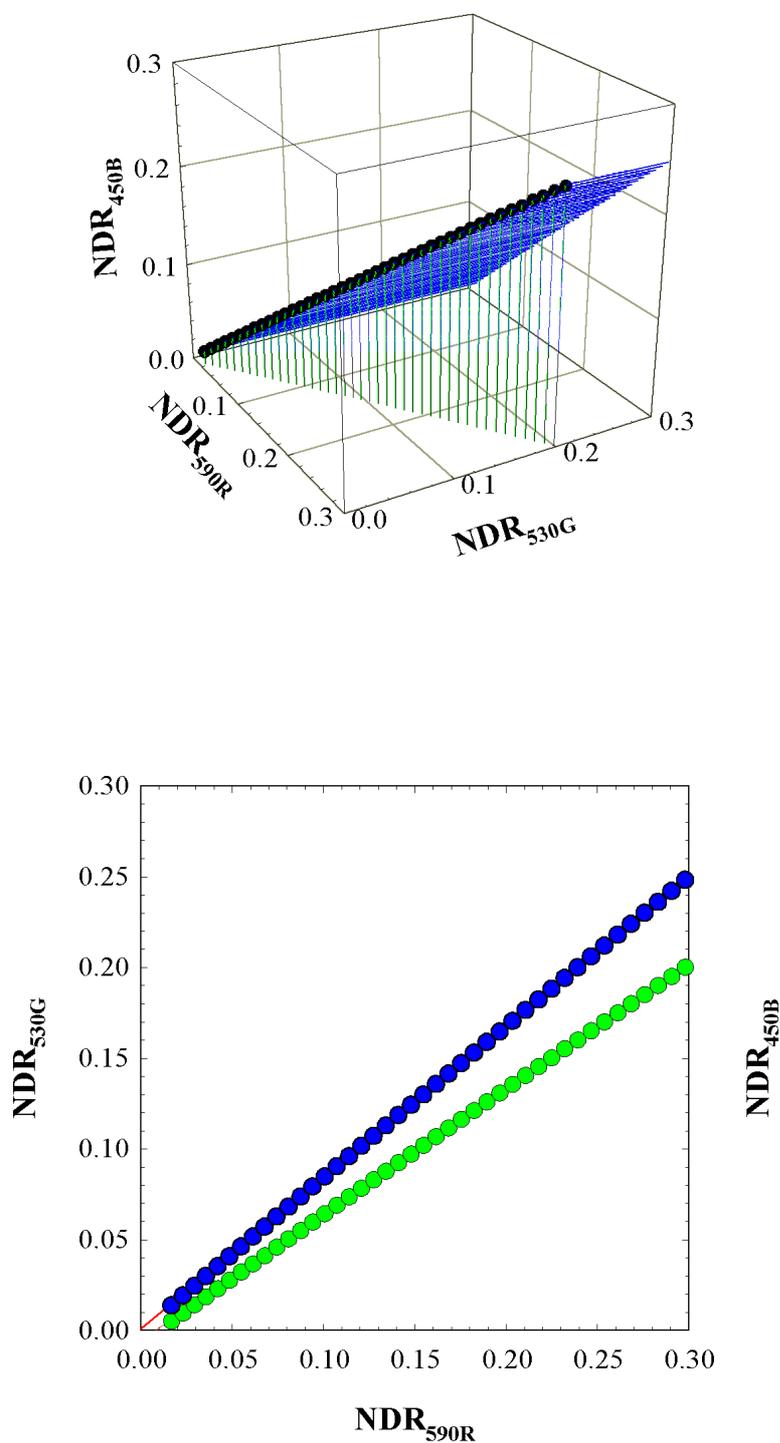


Figura 4.45: Representación conjunta 3-D (arriba) y 2-D (abajo) de las respuestas digitales relativas de los máximos de sensibilidad de cada canal-color frente a estímulos equi-energéticos de nivel radiante absoluto variable. Las pendientes de las rectas proyectadas en la figura de arriba son los valores 0.6915 (a la izquierda) y 0.8318 (a la derecha), justa y respectivamente los valores de las pendientes de las rectas de la figura de abajo. (Las rectas de abajo son los ajustes lineales con los intervalos de confianza al 95 %.)

Al representar conjuntamente de forma tridimensional las respuestas de los tres máximos volvemos a observar que aparecen proyecciones lineales sobre varios planos (Fig. 4.45 arriba). En este caso, como el canal R parece el más sensible de los tres, representaremos por separado las parejas NDR_G vs. NDR_R y NDR_B vs. NDR_R (Fig. 4.45 abajo). En consecuencia, aplicando simplemente una regresión lineal del tipo $y = mx+b$ a cada grupo de datos, la pendiente correspondiente m , nos servirá de balance particular entre dos canales de color. Como las comparaciones del escalado conjunto se realizan respecto el canal R, denotaremos $p_R = 1$. En cambio, como la pendiente $m_{GR} = 0.6915$, denotaremos a partir de ahora $p_G = 0.6915$; y, en el caso del canal B, como $m_{BR} = 0.8318$, $p_B = 0.8318$. En resumen, la normalización conjunta de las sensibilidades espectrales relativas de nuestro dispositivo de captura no es $1 : 1 : 1$, sino $1 : 0.6915 : 0.8318$.

Un aspecto curioso de los resultados del balance de blanco equi-energético y el criterio de normalización conjunta de las sensibilidades espectrales relativas es que, mientras en el primer caso se ponderaba respecto el canal B, en el segundo caso, se pondera respecto el canal R. Esto, en principio, no debe tomarse como una incongruencia; al contrario, puede ser un resultado bastante común entre otros dispositivos de captura. Por ejemplo, supongamos que el canal R solamente fuera sensible exclusivamente para $\lambda = 600$ nm, mientras que el canal B fuera diez veces menos sensible pero en un intervalo que comprendiera desde 400 hasta 500 nm. Si suponemos perfiles espectralmente planos, el canal R sería el que ponderase en el escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas; pero, el canal B sería el que lo haría en el balance de blanco equi-energético, porque sería el que más contribuiría en respuesta total o integrada de los tres canales, por encima del canal R, aunque éste fuera diez veces más sensible.

4.7 Obtención de las pseudo-funciones de igualación

Ahora ya estamos en disposición de obtener las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} de nuestro dispositivo de captura considerando el des-balance de blanco equi-energético y el escalado conjunto de las sensibilidades espectrales relativas, las cuales se obtuvieron del escalado relativo de los perfiles espectrales de las responsabilidades espectrales (espectros de acción). Al partir de las sensibilidades espectrales relativas (Fig. 4.36; Ec. 4.22) debemos encontrar un proceso de normalización que nos lleve a las pseudo-funciones de igualación. Tal proceso debe imponer el des-balance de blanco equi-energético que hemos descubierto. Es decir, que la proporción de las áreas que comprenden estos perfiles espectrales sea el des-balance de blanco:

Ecuación 4.29

$$\text{si } \mathbf{T}_{\text{RGB}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{r}} & \bar{\mathbf{g}} & \bar{\mathbf{b}} \end{bmatrix}_{32 \times 3} \Rightarrow \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{E} = \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{32 \times 1} \propto \begin{bmatrix} \text{bal}_R \\ \text{bal}_G \\ \text{bal}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8648 \\ 0.6990 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Obtención de las pseudo-funciones de igualación

Si $\mathbf{r}'_R \equiv \mathbf{r}'_R(\lambda), \mathbf{r}'_G \equiv \mathbf{r}'_G(\lambda), \mathbf{r}'_B \equiv \mathbf{r}'_B(\lambda)$ son nuestras sensibilidades espectrales relativas, el paso final hacia las pseudo-funciones de igualación (Fig. 4.46) es el siguiente:

Ecuación 4.30

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{r}} &= \alpha_R \mathbf{r}'_R = \left(\begin{array}{c} bal_R \frac{\mathbf{r}'_B \cdot \mathbf{E}}{\mathbf{r}'_B \cdot \mathbf{E}} \\ \mathbf{r}'_R \cdot \mathbf{E} \end{array} \right) \mathbf{r}'_R \\ \bar{\mathbf{g}} &= \alpha_G \mathbf{r}'_G = \left(\begin{array}{c} bal_G \frac{\mathbf{r}'_B \cdot \mathbf{E}}{\mathbf{r}'_G \cdot \mathbf{E}} \\ \mathbf{r}'_G \cdot \mathbf{E} \end{array} \right) \mathbf{r}'_G, \quad \text{para que } \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{E} \propto \begin{bmatrix} bal_R \\ bal_G \\ bal_B \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{b}} &= \alpha_B \mathbf{r}'_B = (bal_B) \mathbf{r}'_B \end{aligned}$$

Podemos ahora, por tanto, representar conjuntamente (Fig. 4.47) las sensibilidades espectrales (funciones de igualación) del sistema fotosensor "ideal" CIE-1931 XYZ y las de nuestro dispositivo real de captura. Las áreas de los perfiles espectrales XYZ sabemos que valen 21.3714 en los tres casos; en cambio, las áreas de los perfiles espectrales RGB valen respectivamente 4.5145, 3.6490 y 5.2203, pero están en la proporción 0.8648 : 0.6990 : 1. Aún así, todavía queda por buscar cuál es el nivel de escalado real del canal B, y del resto, puesto que se ha tomado $bal_B = 1$. Sin embargo, con el procedimiento desarrollado hasta ahora no podemos obtener este dato. Hallaremos tal valor en el capítulo siguiente.

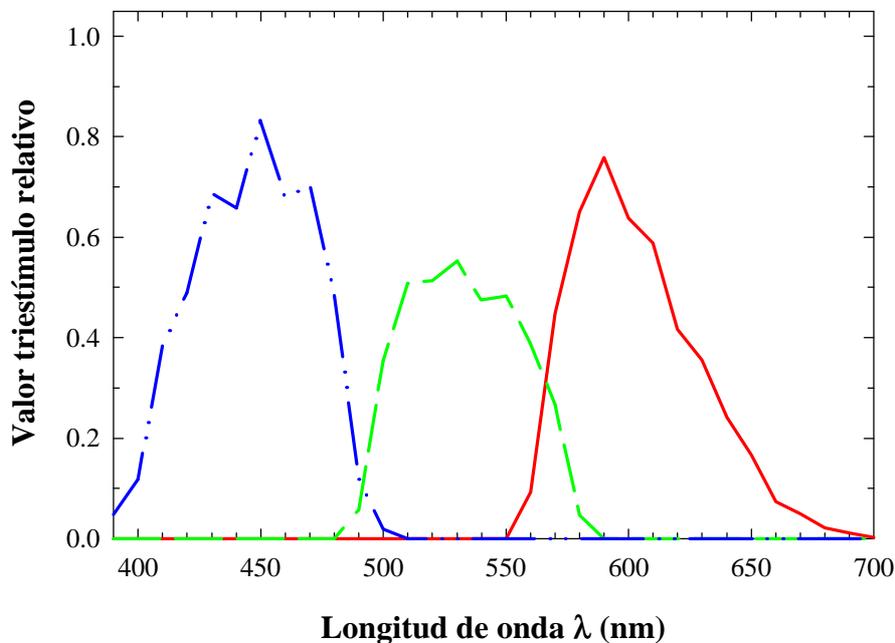


Figura 4.46: Pseudo-funciones de igualación de nuestro dispositivo de captura. Línea continua: canal R; línea discontinua: canal G; línea discontinua y doblemente punteada: canal B.

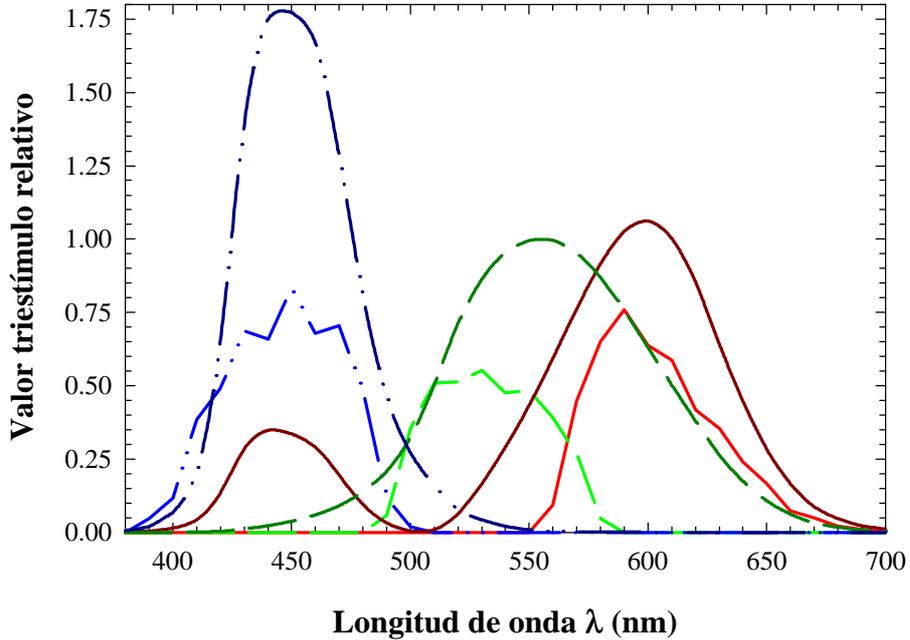


Figura 4.47: Funciones de igualación CIE-XYZ y las pseudo-funciones de igualación de nuestro dispositivo de captura. Línea continua: canal X/R; línea discontinua: canal Y/G; línea discontinua y doblemente punteada: canal Z/B.

Resta solamente sustituir la ecuación pseudo-triestímulo anterior (Ec. 4.27) por otra que incorpore explícitamente las recién calculadas \mathbf{T}_{RGB} . Si consideramos el ruido optoelectrónico de fondo (f_R, f_G, f_B) y el efecto de la saturación, llegamos a:

Ecuación 4.31

$$\begin{bmatrix} ND'_R \\ ND'_G \\ ND'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2^{\text{bits}} - 1) - f_R & 0 & 0 \\ 0 & (2^{\text{bits}} - 1) - f_G & 0 \\ 0 & 0 & (2^{\text{bits}} - 1) - f_B \end{bmatrix} \left(\Delta\lambda \begin{bmatrix} k_R & 0 & 0 \\ 0 & k_G & 0 \\ 0 & 0 & k_B \end{bmatrix} \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{b} + \begin{bmatrix} e_R \\ e_G \\ e_B \end{bmatrix} \right)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} ND_R \\ ND_G \\ ND_B \end{bmatrix} = \begin{cases} \text{si } ND'_R, ND'_G, ND'_B \leq 0 \Rightarrow f_{i=R,G,B} \\ \text{si } 0 < ND'_R, ND'_G, ND'_B < (2^{\text{bits}} - 1) - f_{i=R,G,B} \Rightarrow \begin{bmatrix} ND'_R \\ ND'_G \\ ND'_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{bmatrix} \\ \text{si } ND'_R, ND'_G, ND'_B \geq (2^{\text{bits}} - 1) - f_{i=R,G,B} \Rightarrow (2^{\text{bits}} - 1) \end{cases}$$

siendo $\mathbf{b} = \text{diag}(\mathbf{L})\mathbf{p}$ el vector estímulo-color, tal como se definió en el primer capítulo, las constantes k_R , k_G , k_B los parámetros finales de escalado en formato diagonal que, en principio, deben ser bastante similares entre ellos, y e_R , e_G , e_B los errores sistemáticos del escalado lineal que se pretende.

4.7.1 Codificación cromática para estímulos multi-espectrales

El montaje experimental B se presentó en las primeras secciones de este capítulo. Consistía básicamente en diseñar una escena real bajo condiciones controladas de iluminación y captarla directamente con nuestro dispositivo de captura (Fig. 4.6). Simultáneamente, se registraron con la ayuda del tele-espectroradiómetro PR-650 las distribuciones espectrales de potencia radiante \mathbf{b} (en W/sr·m²) de las 24 muestras Munsell de la carta ColorChecker bajo las tres fuentes luminosas de la cabina (Tabla 4.2): incandescente (INC, $N = 4$), luz día (DAY, $N = 5.6$) y de descarga (HWL, $N = 5.6$). Por tanto, con la ayuda del modelo triestímulo anterior del dispositivo, vamos a averiguar hasta qué punto podemos recuperar los niveles digitales \mathbf{ND}_{RGB} de los colores de la escena a partir del conocimiento de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} y las correspondientes distribuciones espectrales absolutas de potencia radiante \mathbf{b} (Fig. 4.12-14).

Aparte de la comparación gráfica entre los niveles digitales estimados (simulados) y medidos (reales), utilizaremos varios tests matemáticos para valorar la bondad de la recuperación. El primero, y más directo, será el logaritmo del promedio de las desviaciones o errores absolutos RGB:

Ecuación 4.32

$$\log \left\{ \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \left[\sum_{k=1}^3 [ND_k(i)_s - ND_k(i)_r]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad k = R, G, B, \quad s \equiv \text{simulado}, r \equiv \text{real}$$

El segundo test será el logaritmo del promedio (%) de las desviaciones relativas o errores relativos RGB, muy parecido al anterior pero ponderando en cada caso por la distancia RGB del color verdadero o real:

Ecuación 4.33

$$\log \left\{ \frac{100 \sum_{i=1}^{24} \left[\sum_{k=1}^3 [ND_k(i)_s - ND_k(i)_r]^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\sum_{k=1}^3 [ND_k(i)_r]^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}, \quad k = R, G, B, \quad s \equiv \text{simulado}, r \equiv \text{real}$$

El tercer test partirá de que los niveles digitales RGB se visualizan "correctamente" en un monitor CRT estándar tipo sRGB, por lo que podremos transformar los niveles digitales RGB (= sRGB) a valores cromáticos CIE-XYZ (Ec. 2.48 invertida), y, posteriormente, a valores CIE-L*a*b* (Ec. 1.13). En

consecuencia, el tercer test será el promedio de las desviaciones de color ΔE en el espacio CIELAB (Ec. 1.15), o sea, como un test pseudo-perceptual de las diferencias de color entre la imagen simulada y la real.

Ecuación 4.34

$$ENLF_k = \begin{cases} \frac{ND_k}{12.92 \cdot \frac{2^{bits} - 1}{2^{bits} - 1}}, & \text{si } \frac{ND_k}{2^{bits} - 1} \leq 0.04045 \\ \left[\frac{ND_k}{2^{bits} - 1} + 0.055 \right]^{2.4} / 1.055, & \text{si } \frac{ND_k}{2^{bits} - 1} > 0.04045 \end{cases}, \quad k = R, G, B$$

$$\Rightarrow \mathbf{t}'_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ENLF_R \\ ENLF_G \\ ENLF_B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{D65} \mathbf{t}'_{sRGB}$$

$$\Rightarrow \mathbf{t}'_{XYZ} \rightarrow \text{CIE} - L^* a^* b^*$$

$$\Rightarrow \Delta E = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \left[(L^*(i)_s - L^*(i)_r)^2 + (a^*(i)_s - a^*(i)_r)^2 + (b^*(i)_s - b^*(i)_r)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Los parámetros del ajuste lineal k_R, k_G, k_B y e_R, e_G, e_B (Ec. 4.31) son necesarios por varias razones. El primer conjunto es una justificación de las leyes de Grassmann, concretamente, de la ley de la proporcionalidad. Por tanto, si la escena se ha capturado con una apertura relativa N constante y las \mathbf{T}_{RGB} son supuestamente correctas, los valores del primer conjunto deben ser iguales. El segundo conjunto es para justificar cualquier desviación sistemática en la derivación de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} . Si se calcularan de forma perfecta, los valores del segundo conjunto deberían ser cero y los valores del primer conjunto iguales. Los datos de las Tablas 4.22-24 muestran que la bondad de nuestro método es muy alta, al juzgar la similitud de los valores k_R, k_G, k_B y la pequeñez de los valores e_R, e_G, e_B en los tres grupos de datos cromáticos.

La observación detenida de estos datos descubre dos aspectos muy interesantes respecto a la codificación cromática de los dispositivos de captura. Primero, los valores k_R, k_G, k_B están correlacionados de modo inverso con la apertura relativa N : los datos INC son aproximadamente el doble que los restantes DAY y HWL, justo cuando la exposición de la carta de colores bajo luz INC es el doble ($N = 4$) que bajo las otras dos fuentes luminosas ($N = 5.6$). Segundo, la forma de la distribución espectral de potencia radiante de la fuente luminosa es una variable sistemática a tener muy en cuenta. Los estímulos-color INC son los perfiles espectrales más suaves de los tres grupos porque que la fuente halógena es espectralmente suave

Obtención de las pseudo-funciones de igualación

(y las reflectancias espectrales lo son de partida). A pesar de que el balance de blanco de la cámara no está verdaderamente ajustado a ninguna de las cromaticidades de las tres fuentes luminosas (pero sí al blanco equi-energético **E**), quizás más cercano a la fuente DAY, todos los resultados son cualitativa y cuantitativamente excelentes. La mayor desviación se encuentra en los datos HWL, un aspecto que hay que atribuírselo al hecho de que los perfiles espectrales de los estímulos-color HWL son los más abruptos por lo que al barrer espectralmente con $\Delta\lambda = 10$ nm, las estimaciones son siempre más inexactas (Fig. 4.48). Consecuentemente, tan importante es balancear adecuadamente el blanco como utilizar luz espectralmente suave.

Tabla 4.22: Resultados del modelo de codificación del color en nuestro dispositivo de captura para la escena ColorChecker bajo luz INC.

	Canal R	Canal G	Canal B
Parámetro k	12.5049	13.2125	11.6706
Parámetro e	-0.0222	-0.0411	-0.0248
Coefficiente de regresión r^2	0.9907	0.9959	0.9897

	Promedio	Máximo	Mínimo
Log (error RGB absoluto)	0.6060	1.1904	-0.2711
Log (error RGB relativo)	0.8386	2.8107	-0.6796
$\Delta E (L^*a^*b^*)$	2.13	6.20	0.16

Tabla 4.23: Resultados del modelo de codificación del color en nuestro dispositivo de captura para la escena ColorChecker bajo luz DAY.

	Canal R	Canal G	Canal B
Parámetro k	6.4890	6.7651	6.2957
Parámetro e	-0.0408	-0.0421	-0.0334
Coefficiente de regresión r^2	0.9990	0.9982	0.9985

	Promedio	Máximo	Mínimo
Log (error RGB absoluto)	0.3217	0.7050	-0.0833
Log (error RGB relativo)	0.3566	1.2847	-0.1406
$\Delta E (L^*a^*b^*)$	0.91	1.87	0.00

Tabla 4.24: Resultados del modelo de codificación del color en nuestro dispositivo de captura para la escena ColorChecker bajo luz HWL.

	Canal R	Canal G	Canal B
Parámetro k	6.0517	6.8215	5.8299
Parámetro e	-0.0554	-0.0514	-0.0334
Coefficiente de regresión r^2	0.9791	0.9777	0.9806

	Promedio	Máximo	Mínimo
Log (error RGB absoluto)	0.7450	1.7382	0.1879
Log (error RGB relativo)	0.6693	2.4397	-0.0151
$\Delta E (L^*a^*b^*)$	2.86	13.61	0.37

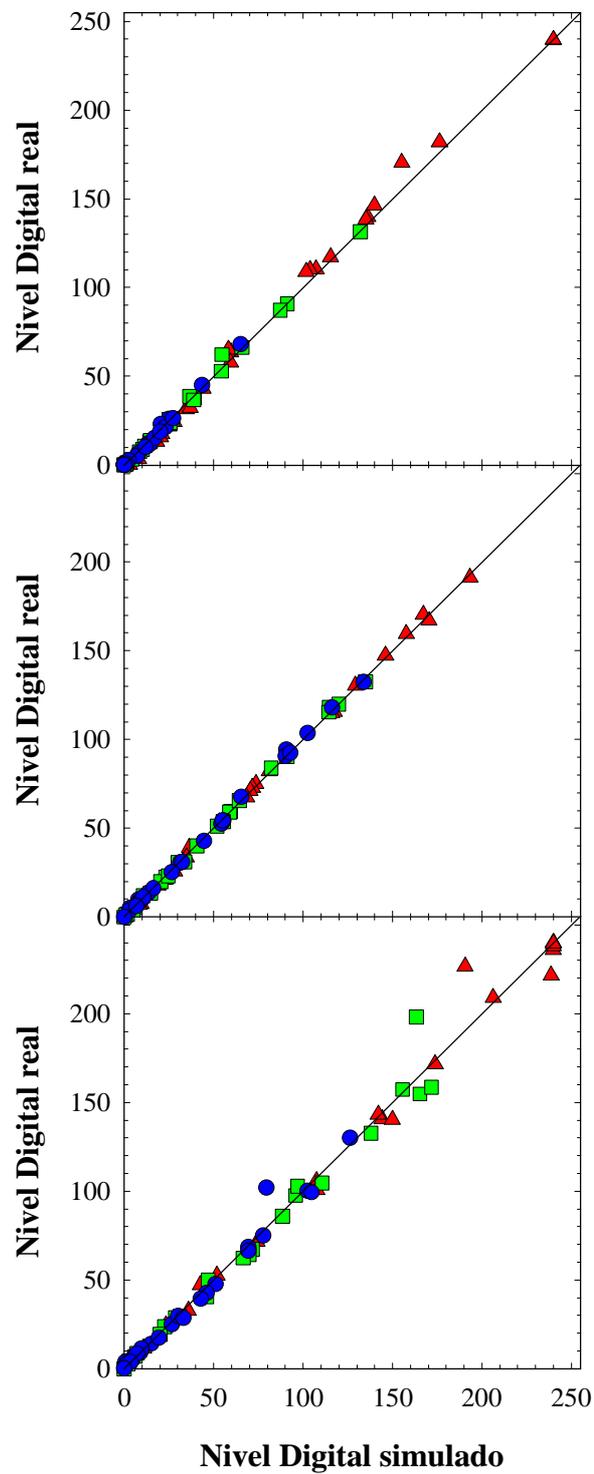


Figura 4.48: Predicción de los niveles digitales de la carta ColorChecker bajo tres fuentes luminosas: arriba, lámpara INC; centro, lámpara DAY; abajo, lámpara HWL. (Círculos: canal B; cuadrados: canal G; triángulos: canal R)

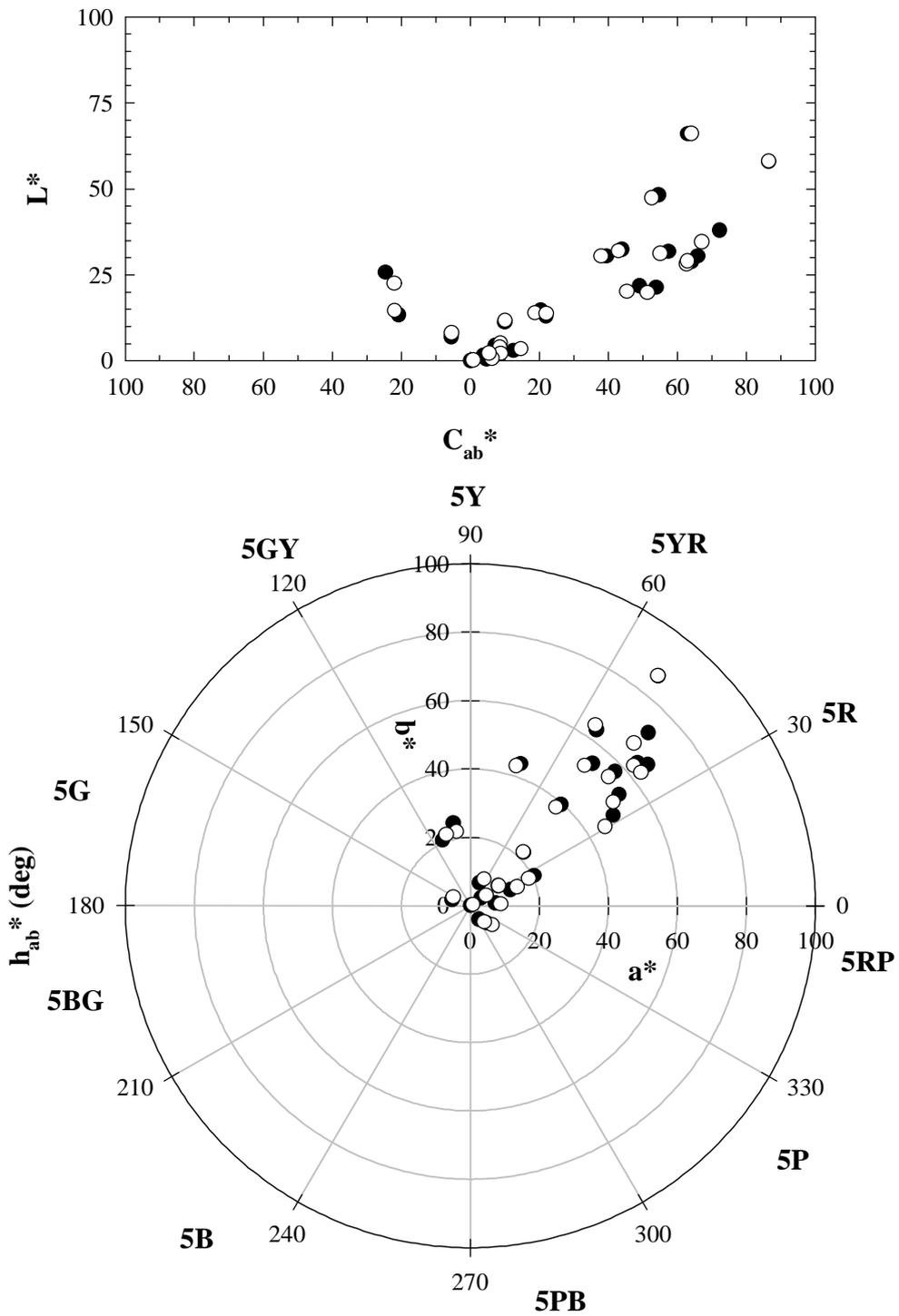


Figura 4.49: Resultados en el espacio CIE-L*a*b* de la predicción del modelo de codificación del color de nuestro dispositivo de captura de la carta ColorChecker bajo la fuente luminosa INC (símbolos oscuros: datos reales; símbolos claros: datos simulados).

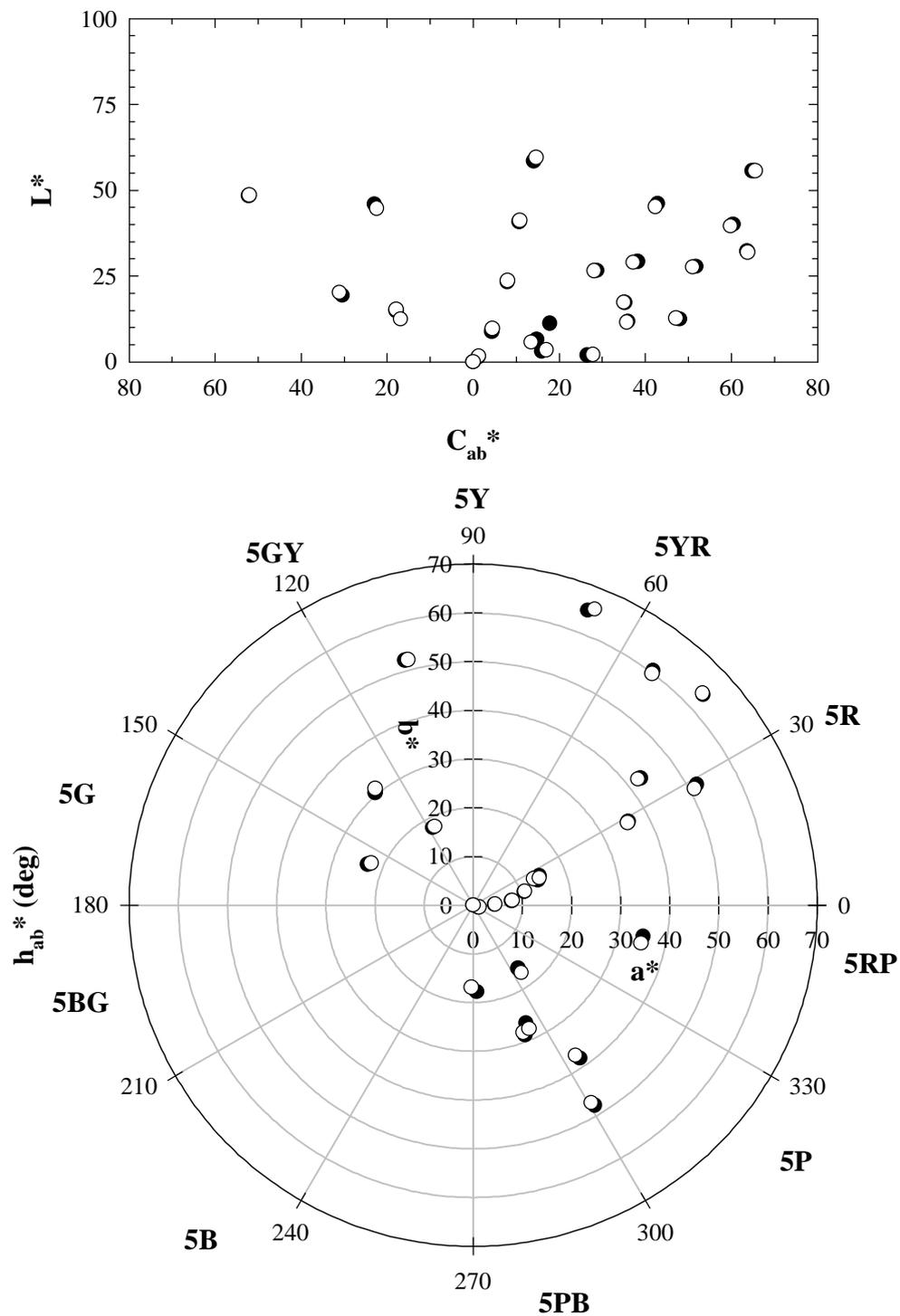


Figura 4.50: Resultados en el espacio CIE-L*a*b* de la predicción del modelo de codificación del color de nuestro dispositivo de captura de la carta ColorChecker bajo la fuente luminosa DAY (símbolos oscuros: datos reales; símbolos claros: datos simulados).

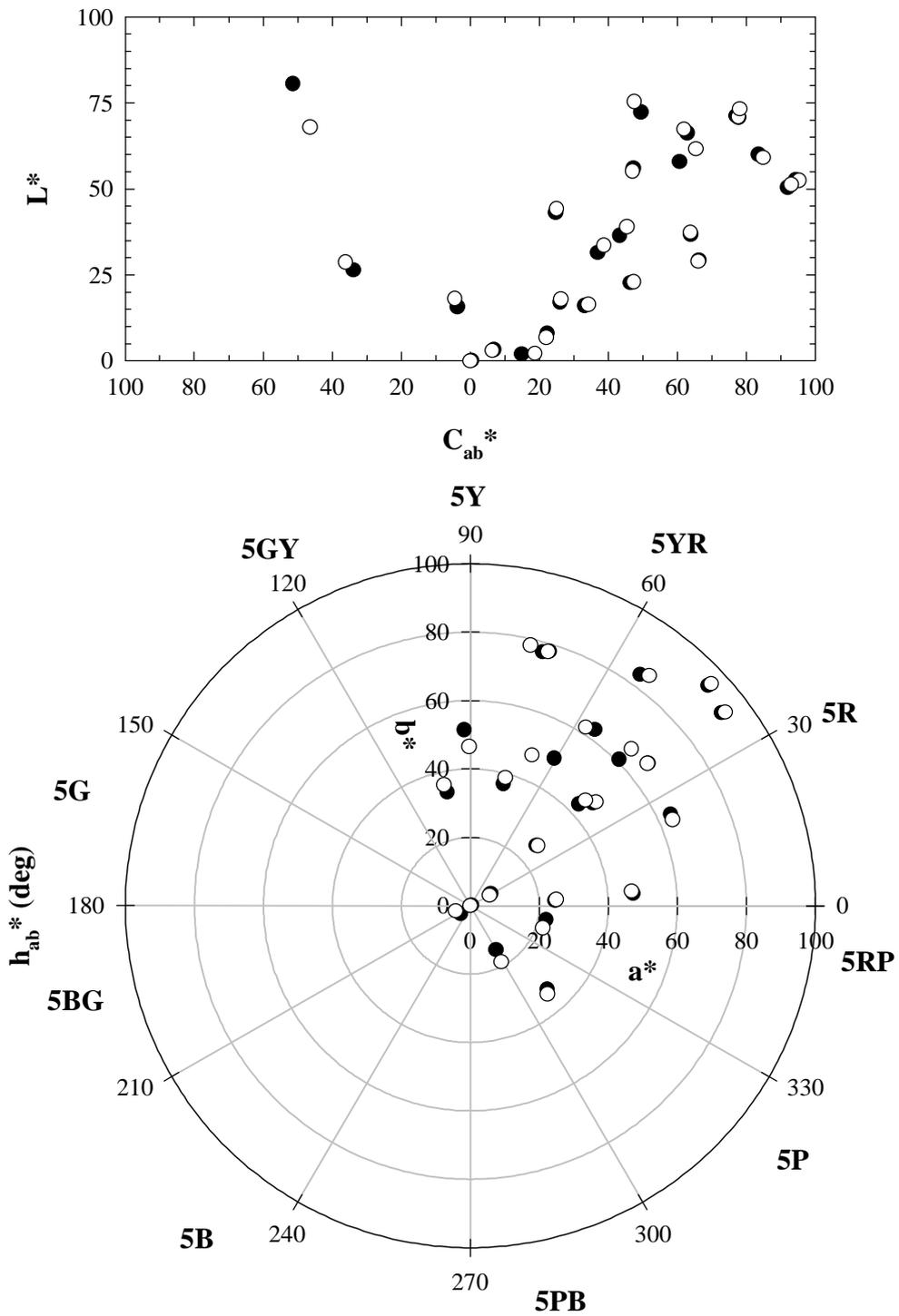


Figura 4.51: Resultados en el espacio CIE-L*a*b* de la predicción del modelo de codificación del color de nuestro dispositivo de captura de la carta ColorChecker bajo la fuente luminosa HWL (símbolos oscuros: datos reales; símbolos claros: datos simulados).

Al comparar gráficamente en diagramas cromáticos CIE-(a^*,b^*), CIE-(C_{ab}^*,L^*) los resultados obtenidos (Fig.4.49-51) se pueden corroborar parte las conclusiones anteriores. En primer lugar, si tenemos en cuenta la disposición de los 10 tonos principales del Atlas Munsell en el diagrama CIE-(a^*,b^*), podemos observar que, ya que nuestro dispositivo de captura posee un balance electrónico de blanco cercano a $T_c = 5600$ K, los datos cromáticos bajo las fuentes luminosas INC y HWL quedan principalmente en el primer cuadrante de tonos (5R - 5Y), lo cual prueba que, a pesar de que el balance electrónico de blanco es una pseudo-algoritmo de adaptación cromática (tipo von Kries), siempre es preferible aplicarlo para evitar graves errores de reproducción correspondiente de color en un monitor CRT convencional ajustado a la cromaticidad D65 (en el caso de la TV) o a $T_c = 9300$ K. Si hubiésemos optado por cambiar el balance electrónico de blanco, no cabe duda que, los resultados cromáticos obtenidos se habrían dispuesto sobre las mismas regiones cromáticas pero, siempre a expensas de haber calculado desde el principio las nuevas pseudo-funciones de igualación, con el coste que ello representa. A nivel de reproducción correspondiente del color, sería preferible encontrar alguna relación empírica entre el balance electrónico de blanco y las pseudo-funciones de igualación. En cambio, a nivel metrológico y a niveles de reproducción exacta y colorimétrica del color, solamente nos basta con conocer el balance de blanco-equienérgico y las pseudo-funciones de igualación asociadas. Si el objetivo principal de esta Tesis es diseñar un instrumento tele-colorimétrico, debemos partir de un dispositivo de captura balanceado al blanco equi-energético, y no de cualquier otro. Logrado este primer objetivo, el paso de niveles digitales \mathbf{ND}_{RGB} a valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} (cd/m^2) puede llegar finalmente a un buen puerto (ver capítulo siguiente).

En segundo lugar, se puede observar el efecto de des-balance de color al comparar la dispersión de los datos cromáticos en los tres grupos. A pesar de que la apertura relativa N se ajustó conscientemente para evitar al máximo recortes (por ruido o por saturación en los canales-color) en la codificación del color, como las temperaturas de color de las fuentes INC y HWL son las más dispares respecto a la ajustada, los datos cromáticos se agrupan principalmente en el primer cuadrante, pero alcanzando valores de croma o de colorido mucho más grandes que los pertenecientes a la captura cromáticamente más balanceada del grupo DAY. Sin embargo, a pesar de esto, los datos cromáticos simulados (símbolos claros) están bastante próximos a los reales (símbolos oscuros) en los tres grupos, pero cualitativamente más separados en el grupo perteneciente a la fuente HWL, debido a los perfiles espectrales abruptos de los estímulos-color.

4.7.2 Obtención de metámeros

Una vez calculadas las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} y demostrado hasta qué punto son las funciones espectrales adecuadas para predecir la captura digital RGB de una escena cualquiera, podemos utilizar de nuevo las \mathbf{T}_{RGB} para mostrar algunas propiedades algebraicas de la codificación triestímulo, en concreto, la búsqueda de metámeros fundamentales.

Como ya se vio en el primer capítulo (§ 1.2.3.2), cualquier tipo de especificación triestímulo conlleva una variedad de propiedades vectoriales: si $\mathbf{t}_{\text{RGB}} = \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t \cdot \mathbf{b}$, el sistema fotosensor trivariante es únicamente

Obtención de las pseudo-funciones de igualación

dependiente de la parte de la distribución espectral de potencia radiante que se encuentra dentro su sub-espacio vectorial. En consecuencia (§ Ec. 1.39), debido al principio de univariancia, podemos generar infinitos colores metámeros \mathbf{m}_b asociados a una especificación triestímulo determinada, donde el "peso" de la codificación triestímulo se encuentra en el metámero fundamental \mathbf{b}_f . Si partimos del estímulo equi-energético \mathbf{E} , vamos a averiguar rápidamente cuál es el metámero fundamental correspondiente en los espacios de color \mathbf{T}_{XYZ} y \mathbf{T}_{RGB} . Simplemente, tenemos que calcular:

Ecuación 4.35

$$\mathbf{b}_{f_{RGB}} = \mathbf{T}_{RGB} (\mathbf{T}_{RGB}^t \mathbf{T}_{RGB})^{-1} \mathbf{T}_{RGB}^t \mathbf{E}$$

$$\mathbf{b}_{f_{XYZ}} = \mathbf{T}_{XYZ} (\mathbf{T}_{XYZ}^t \mathbf{T}_{XYZ})^{-1} \mathbf{T}_{XYZ}^t \mathbf{E}$$

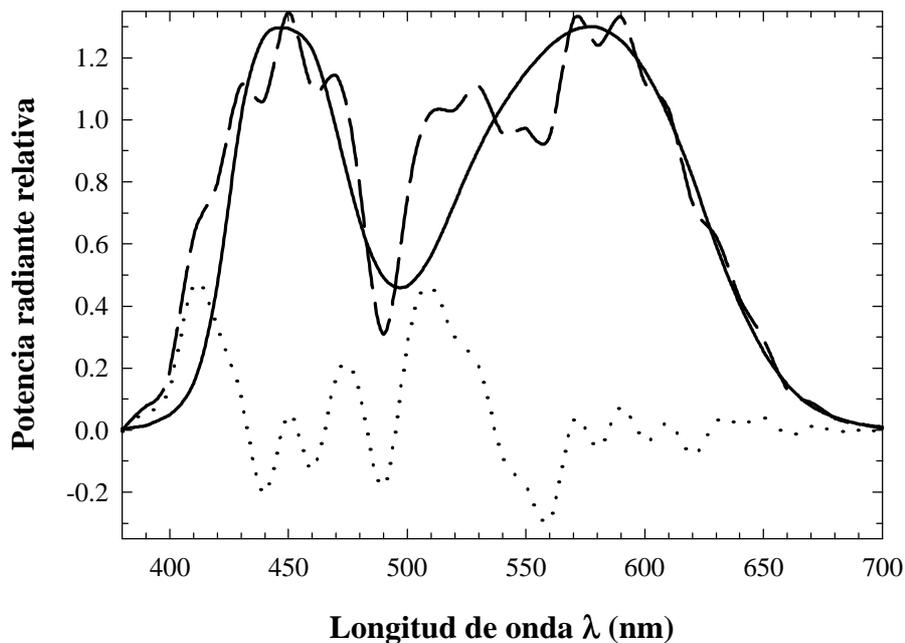


Figura 4.52: Metámeros fundamentales del estímulo equi-energético en los espacios de color CIE-XYZ (línea continua) y CCD-RGB (línea discontinua), mostrando así mismo las diferencias espectrales individuales (línea punteada) entre ambos perfiles espectrales.

A la vista de la figura superior, podemos observar que ambos "blancos" fundamentales no son espectralmente iguales, lo cual prueba que las \mathbf{T}_{RGB} son verdaderamente pseudo-funciones de igualación, es decir, que no son una combinación lineal exacta de \mathbf{T}_{XYZ} . Por otro lado, si utilizamos el "blanco" fundamental RGB como estímulo color en CIE-XYZ, observamos que su cromaticidad $(x, y) = (0.3240, 0.3345)$ se acerca bastante a la ideal $(0.3333, 0.3333)$, lo cual muestra hasta qué punto hemos conseguido que las \mathbf{T}_{RGB} estén balanceadas al blanco equi-energético. Pero, no ocurre lo mismo con el "blanco"

fundamental XYZ como estímulo color en \mathbf{T}_{RGB} , ya que obtenemos $(r, g) = (0.3585, 0.2609)$. En conclusión, como los "blancos" fundamentales no son iguales, esto significa que los espacios de color XYZ y CCD-RGB no tienen el mismo blanco de referencia. Aunque las pseudo-funciones de igualación del espacio CCD-RGB estén balanceadas al estímulo equi-energético, al igual que las del espacio CIE-XYZ, los niveles digitales \mathbf{ND}_{RGB} de una captura de una escena no son valores cromáticos adecuados para transformarlos directamente a valores triestímulo XYZ, ya sea en formato absoluto o relativo, porque, entre otras razones, no están balanceados adecuadamente al blanco de referencia del espacio de color de salida, es decir, al blanco equi-energético. Éste será, pues, el punto de arranque del capítulo siguiente, del que partirá la caracterización colorimétrica de nuestro dispositivo de captura, que conlleva el objetivo final de este trabajo: convertir nuestro dispositivo de captura en un instrumento tele-colorimétrico, marcando el grado de exactitud y precisión con respecto al tele-colorímetro Photo Research PR-650.

Capítulo 5. Caracterización colorimétrica

El proceso de conversión de un dispositivo de captura en un instrumento de medida del color debe pasar necesariamente por dos fases: la caracterización espectral y la caracterización colorimétrica. En el capítulo anterior, hemos presentado de forma novedosa un algoritmo espectral radiométrico de obtención de las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} de nuestro dispositivo de captura, una cámara Sony DXC-930P acoplada con una tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850, de forma que el espacio de color de trabajo está mínimamente alterado (§ 2.2.3.4), lo cual lo denotaremos como espacio bruto de color. Este capítulo se centrará en la segunda fase, la de la caracterización colorimétrica, la cual consistirá esencialmente en la transformación de los niveles digitales \mathbf{ND}_{RGB} de la cámara digital en valores triestímulo absolutos \mathbf{t}_{XYZ} (en cd/m^2) frente a condiciones espectral radiométricas variables y desconocidas a priori, incluyendo además un estudio comparativo en cuanto a grado de exactitud y precisión (repetibilidad) con respecto a un tele-colorímetro convencional como el Photo Research PR-650.

5.1 Preparación de los datos RGB: balance de adaptación luminosa

El *perfil colorimétrico* de un dispositivo de captura, o sea, su caracterización colorimétrica, consiste básicamente en la búsqueda de la transformación matricial \mathbf{M} que permite pasar de la codificación RGB, dependiente del dispositivo, a la codificación CIE-XYZ, independiente del dispositivo. Es, por tanto, una transformación de cambio de base (§ 1.2.3):

Ecuación 5.1

$$\hat{\mathbf{t}}'_{\text{XYZ}} = \mathbf{M} \mathbf{t}'_{\text{RGB}} \quad \text{con} \quad \mathbf{T}_{\text{XYZ}}^t = \mathbf{M} \mathbf{T}_{\text{RGB}}^t$$

siendo \mathbf{t}'_{α} las especificaciones triestímulo relativas respecto el blanco equi-energético (§ Ec. 1.10) y \mathbf{T}_{α} las funciones de igualación.

Como el caso colorimétrico que nos ocupa es entre dos dispositivos de captura, uno estrictamente lineal (CIE-1931 XYZ) y otro pseudo-lineal (nuestra cámara digital), los métodos matemáticos de obtención del perfil colorimétrico se basan principalmente en métodos de regresión. Ahora bien, antes de presentar las opciones posibles y evaluar consecuentemente el grado de exactitud o nivel de reproducción del color obtenido con cada perfil colorimétrico, es importante considerar qué tipo de codificación colorimétrica RGB del dispositivo de captura va ligada a la transformación matricial $\text{RGB} \leftrightarrow \text{XYZ}$, y, por supuesto, qué tipo de codificación XYZ se obtiene. Esto tiene que ver con que no podemos utilizar directamente valores RGB en escala digital para obtener valores XYZ escalados coloriméricamente. Por tanto, de alguna manera, hemos de preparar los niveles digitales ND_R , ND_G , ND_B , que será siempre la codificación RGB de entrada, para introducirlos en la transformación matricial \mathbf{M} . Considerando el balance de blanco y el error digital de fondo de nuestro dispositivo de captura obtenidos en el capítulo anterior, los valores colorimétricos \mathbf{t}'_{RGB} necesarios para aplicar el perfil colorimétrico son:

Ecuación 5.2

$$\mathbf{t}'_{\text{RGB}} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{Bal} \cdot \begin{bmatrix} ND_R - f_R \\ ND_G - f_G \\ ND_B - f_B \end{bmatrix},$$

siendo $\mathbf{Bal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{bal_R [(2^{bits} - 1) - f_R]} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{bal_G [(2^{bits} - 1) - f_G]} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{bal_B [(2^{bits} - 1) - f_B]} \end{bmatrix}$

En esencia, sin introducir notación nueva, este proceso de normalización deshace la ecuación pseudo-triestímulo RGB del dispositivo de captura (Ec. 4.31), pero resulta imprescindible a la hora de comparar escalas colorimétricas entre los espacios de color RGB y XYZ. La razón estriba en que al aplicar esta normalización conseguimos comparar al mismo nivel la escala relativa de los grises bajo el iluminante equienergético, por lo que podríamos denotar esta normalización previa como *balance de grises*. De esta forma, si $\mathbf{t}'_{\text{RGB}} = [0.75, 0.75, 0.75]^t$ o $[0.25, 0.25, 0.25]^t$ estaremos seguros que ambos se corresponden visualmente con grises, uno más claro que el otro. Como punto de partida, podemos suponer que los niveles digitales no están corregidos previamente de fondo, de ahí que el vector de entrada considere esta posibilidad. En nuestro caso, $f_R = 15.2, f_G = 17.7, f_B = 11.9$; mientras que $bal_R = 0.8648, bal_G = 0.6990, bal_B = 1$.

Una vez normalizados los valores digitales RGB del dispositivo de captura, los valores triestímulo XYZ estimados mediante el perfil colorimétrico \mathbf{M} serán directamente valores relativos al blanco ideal, esté o no presente en la escena. Es decir, si tomamos los valores triestímulo absolutos (en cd/m^2) de los estímulos-color de la escena y los dividimos por la luminancia L_E (cd/m^2) que emitiría un blanco ideal (como, por ejemplo, el material Halon), obtenida a partir del nivel de iluminación E (lx) incidente en la escena utilizando $E = \pi L_E$, los valores triestímulo resultantes \mathbf{t}'_{XYZ} serían comparables directamente con los estimados $\hat{\mathbf{t}}'_{\text{XYZ}}$ a través del perfil colorimétrico \mathbf{M} aplicado a la terna RGB del dispositivo de captura.

Ahora bien, si consideramos el rango dinámico de luminancias en una escena real bajo luz diurna (10000:1), el dispositivo de captura no será capaz de registrar de forma útil y simultánea todos los colores de la escena, desde el más oscuro (codificado como ruido de fondo) hasta el más claro (codificado como saturado), debido a las limitaciones de rango dinámico espectral de sus OECSFs. Por tanto, si deseamos que el blanco (el más claro) de la escena no se sature, deberíamos disminuir la exposición H (lux·s), lo cual puede hacerse directamente aumentando un paso de la apertura relativa N (1/2 veces respecto a la inicial). Sin embargo, lo más seguro es que los colores más oscuros –grises, marrones, azules– se codificarán como ruido de fondo, por lo que no serán útiles desde el punto de vista colorimétrico: no podremos utilizar sus niveles digitales (= ruido) para estimar los valores triestímulo XYZ que poseen. Aún así, podríamos ejecutar el mismo proceso de forma inversa para estimar la terna triestímulo XYZ de

los colores oscuros, pero a costa de perder la ocasión de estimar la de los colores más claros (blancos, amarillos, etc). Esto se lograría disminuyendo uno o varios pasos de apertura relativa N (2 veces por cada paso). Esta versatilidad en la captura RGB de cualquier tipo de escena, que denotaremos como *balance de adaptación luminosa*, conlleva, no obstante, un paso previo más antes de aplicar directamente el perfil colorimétrico \mathbf{M} entre los espacios de color RGB y CIE-1931 XYZ. La razón está en la cuestión siguiente: en los ejemplos anteriores, con un paso N hacia arriba o hacia abajo (o equivalentemente con el tiempo de exposición t), habría un número extenso de colores con claridad intermedia que se codificarían con ternas RGB diferentes según N entre los valores extremos de ruido y saturación, por tanto, si aplicáramos directamente el perfil colorimétrico \mathbf{M} obtendríamos paradójicamente que ambas ternas RGB diferentes, asociadas al mismo estímulo-color, darían consecuentemente dos estimaciones XYZ diferentes del mismo estímulo-color, cuando su terna triestímulo XYZ real es única. En consecuencia, habrá que aplicar a los valores relativos $\mathbf{t}'_{\text{RGB}} = [R, G, B]^t$ una función matemática que tenga en cuenta el balance de adaptación luminosa. Esta función de ajuste, denotada según ISO 14524 e ISO 17321 como *función de conversión optoelectrónica* (OECF), es la relación matemática que se establece entre las respuestas RGB del dispositivo de captura frente a diferentes niveles de iluminación (o luminancias, pero no irradiancias ni radiancias al desear establecer un diccionario o perfil colorimétrico entre nuestro dispositivo de captura y el observador patrón CIE-XYZ):

Ecuación 5.3

$$\forall \text{ configuración } (N, t): \begin{cases} R = \text{OECF}_R(L) \\ G = \text{OECF}_G(L) \\ B = \text{OECF}_B(L) \end{cases}$$

Existirían dos métodos de obtención de estas funciones OECFs, uno estrictamente empírico, y otro teórico. El primero consistiría en utilizar una cuña de grises, o un mosaico de grises (Fig. 5.1), como escena donde el nivel de iluminación de variara desde valores bajos ($E \approx 1 \text{ lx}$) hasta valores altos ($E \approx 10^5 \text{ lx}$), cambiando al mismo tiempo la apertura relativa N (o el tiempo de exposición t , pero con menor rango dinámico al actuar de forma lineal) para conseguir captar de forma útil la mayoría de los colores. Preferiblemente, la cromaticidad de la iluminación debería ser constante y lo más ajustada posible al balance de blanco que posea el dispositivo de captura. Para cada serie de exposición (E, N, t) se registrarían con un fotómetro las luminancias L (cd/m^2) de cada color y los niveles digitales $[ND_R, ND_G, ND_B]^t$ correspondientes. Posteriormente, estos niveles digitales se transformarían a \mathbf{t}'_{RGB} para a continuación relacionar de forma gráfica y analítica L vs. \mathbf{t}'_{RGB} (Fig. 5.2). Del mismo modo, estas representaciones gráficas pueden obtenerse vía simulación teórica a través de las OECSFs, puesto que $H_\lambda \propto L_{e\lambda} \cdot t / N^2$, aplicando la ecuación pseudo-triestímulo (Ec. 4.28) para estímulos espectralmente planos:

Ecuación 5.4

$$NDR_k = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{L_E}{N^2} r_k \left(\lambda, \frac{L_E}{N^2} \right) \Delta\lambda$$

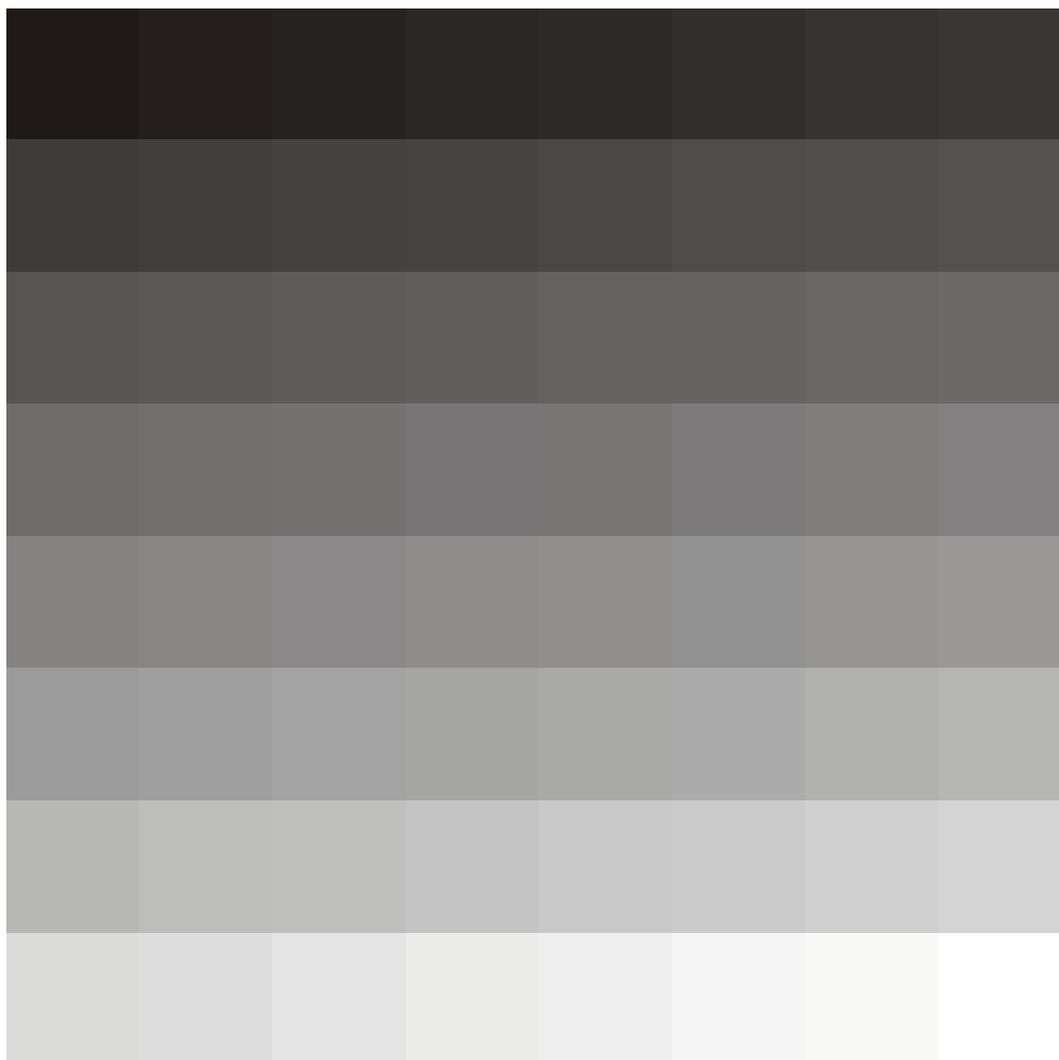


Figura 5.1: Test o carta de grises para medir las funciones de conversión optoelectrónica (OECF), necesarias para obtener el balance de adaptación luminosa de un dispositivo de captura.

La incorporación del balance de adaptación luminosa en el perfil colorimétrico \mathbf{M} se realiza a través de las inversiones matemáticas de las $OECF_k$. Si L_E es la luminancia del blanco ideal \mathbf{E} para cada estímulo-color de una escena, el perfil colorimétrico bruto quedaría como:

Ecuación 5.5

$$\hat{\mathbf{t}}'_{XYZ} = \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot OECF^{-1}(\mathbf{t}'_{RGB}) = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \frac{OECF_R^{-1}(R)}{L_E} \\ \frac{OECF_G^{-1}(G)}{L_E} \\ \frac{OECF_B^{-1}(B)}{L_E} \end{bmatrix}$$

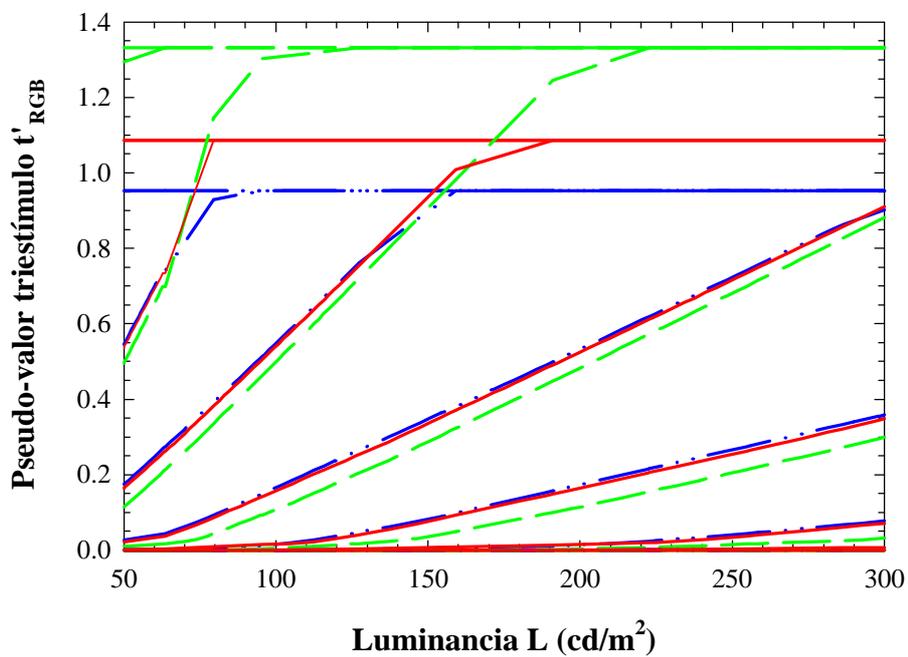
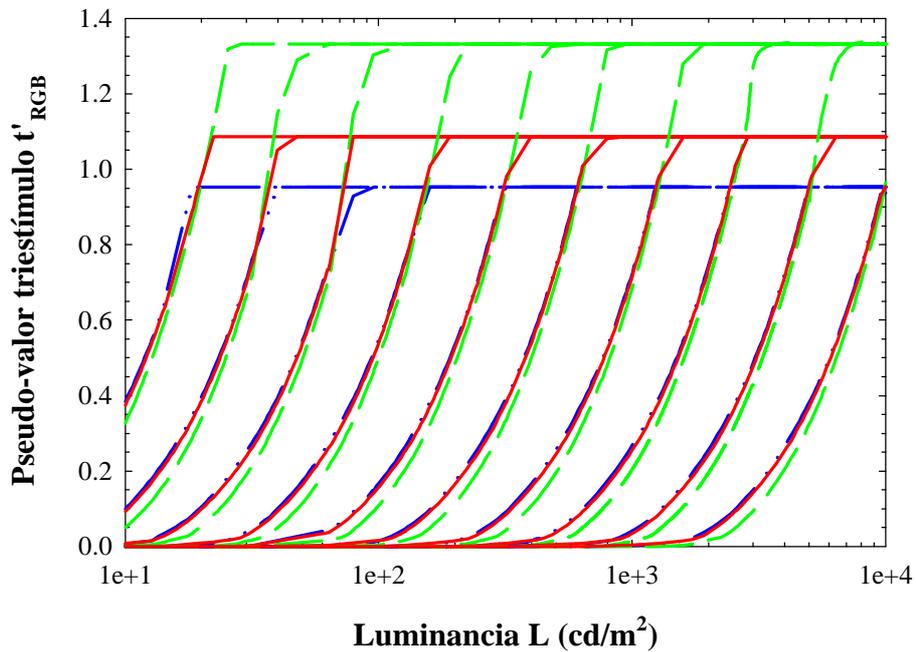


Figura 5.2: Balance de adaptación luminosa nuestro dispositivo de captura. Arriba: cada terna de curvas OECF pertenece a una configuración $(N, t = \text{cte})$: de izquierda a derecha, $N = \{1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, 22.4\}$. Abajo: Ampliación de la figura superior, abarcando desde $N = 2$ hasta 8, con un escalado lineal de la luminancia, correspondiente entre 50 y 300 cd/m^2 . Línea continua: canal R; línea discontinua: canal G; línea discontinua y doblemente punteada: canal B.

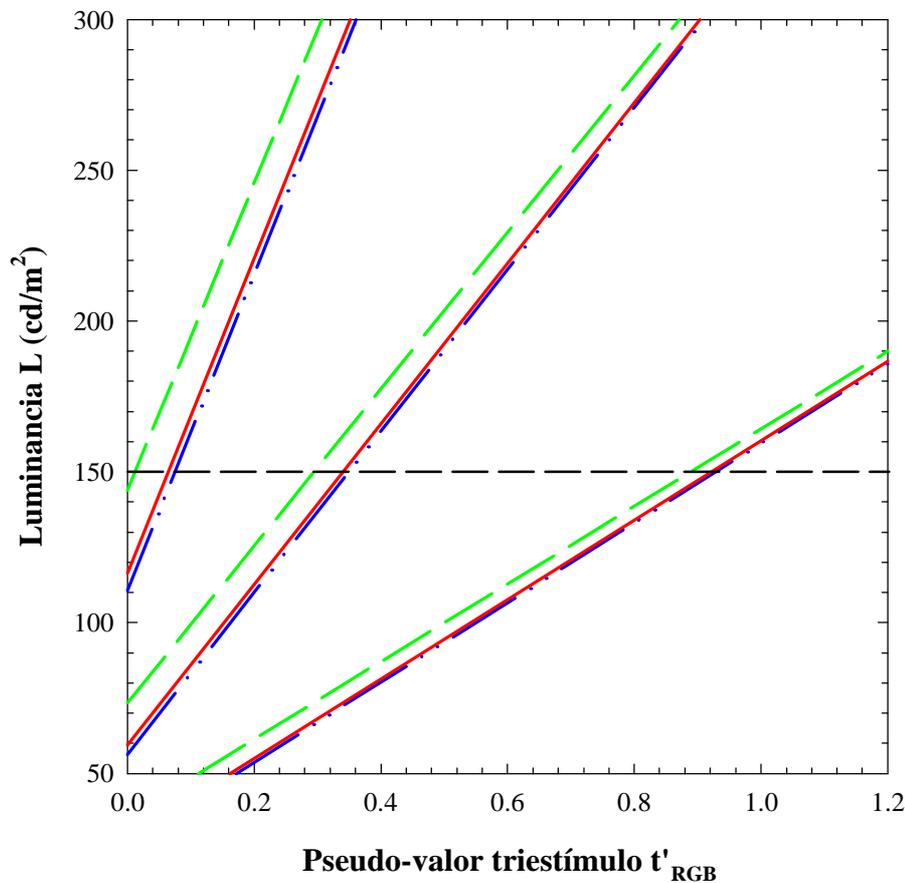


Figura 5.3: Representación lineal de las funciones inversas de las curvas OECF de la figura anterior para los valores $N = 5.6, 4$ y 2.8 . Línea continua: canal R; línea discontinua: canal G; línea discontinua y doblemente punteada: canal B.

Desde una perspectiva gráfica, la inversión de las $OECF_k$ supone seleccionar los valores intermedios lineales, sin tener en cuenta los extremos de saturación (sobreexposición) y ruido (infraexposición), e intercambiar los ejes (Fig. 5.3). Apoyándonos en esta figura, podemos analizar de nuevo el concepto de balance de adaptación luminosa. Supongamos una escena compuesta por grises espectralmente planos, de forma que la luminancia fluctúa entre 50 y 300 cd/m^2 , o sea, el rango de la variable dependiente de la figura. Esta escena es captada por nuestro dispositivo de captura utilizando tres aperturas relativas: $N = 5.6$ para la terna superior de rectas, $N = 4$ para la terna central, $N = 2.8$ para la terna inferior. Si hubiésemos optado solamente por captar la escena con $N = 5.6$, algunos grises, los más oscuros se hubieran infraexpuestos, es decir, se hubieran codificado como ruido. De forma análoga, si se hubiese captado solamente con $N = 2.8$, los grises más claros ($L > 200 \text{ cd/m}^2$) estarían todos sobreexpuestos o saturados, con lo cual no se pueden aprovechar. En cambio, para este rango dinámico de luminancias, si captamos con $N = 4$ logramos codificar óptimamente la mayoría de los colores de la escena. Si seleccionamos el estímulo de gris de luminancia $L = 150 \text{ cd/m}^2$, podemos ver que se codifica de forma

óptima en las tres capturas con N diferente, con niveles bajos para $N = 5.6$, intermedios para $N = 4$ y altos para $N = 2.8$. Pero, desde el punto de vista colorimétrico, este estímulo-color tiene una especificación triestímulo CIE-1931 XYZ única: $X = 150 \text{ cd/m}^2$, $Y = 150 \text{ cd/m}^2$ y $Z = 150 \text{ cd/m}^2$. ¿Cómo reajustar entonces cada terna \mathbf{t}'_{RGB} correspondiente a N diferentes para que nos dé la misma terna XYZ? Ésta es la cuestión que encierra el concepto de balance de adaptación luminosa, puesto que al variar acertadamente la apertura relativa N del dispositivo de captura estamos readaptando simplemente su rango dinámico de sensibilidad (a partir de sus OECSF's) al rango dinámico de emisión (de luminancias) de la escena.

Tal como se indica en la última ecuación, debemos utilizar la inversa de las OECSFs para compensar el efecto de adaptación luminosa que ejercemos al variar la apertura relativa N . Una opción aproximada, puesto que las $OECSF_k$ son curvas no lineales del tipo "S", pero práctica para las $OECSF_k^{-1}$ es una recta (Fig. 5.3) del tipo:

Ecuación 5.6

$$OECSF_R^{-1} \equiv L_R = m_R(N, t) \cdot R + h_R(N, t)$$

$$OECSF_G^{-1} \equiv L_G = m_G(N, t) \cdot G + h_G(N, t)$$

$$OECSF_B^{-1} \equiv L_B = m_B(N, t) \cdot B + h_B(N, t)$$

Si mantenemos constante el tiempo de exposición, las pendientes $m_k(N, t = \text{cte})$ y las ordenadas en el origen $h_k(N, t = \text{cte})$ pueden aproximarse con gran exactitud a polinomios de segundo orden con N (Fig. 5.4; Tabla 5.1):

Ecuación 5.7

$$m_k(N) = m_{0k} + m_{1k}N + m_{2k}N^2, \text{ con } m_{0k}, m_{2k} > 0 \text{ y } m_{1k} < 0$$

$$h_k(N) = h_{0k} + h_{1k}N + h_{2k}N^2, \text{ con } h_{1k}, h_{2k} > 0 \text{ y } h_{0k} < 0$$

Tabla 5.1: Valores del ajuste del polinomio de segundo orden de las rectas $OECSF^{-1}$ para cada canal variando N como {1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, 22.4}.

CANAL	pendiente "m"			ordenada en el origen "h"		
	m_0	m_1	m_2	h_0	h_1	h_2
R	2.9328	-1.1753	16.6933	-1.8589	0.7488	3.6676
G	4.2475	-1.7476	16.3244	-2.5022	1.0540	4.5253
B	2.1729	-0.7980	16.7543	-1.3288	0.4843	3.5035

La similitud de los parámetros del ajuste polinómico en los tres canales-color, sobretudo los de la pendiente "m", justifica que el concepto en sí de adaptación luminosa es una propiedad inherente al tipo de sensor optoelectrónicos, en este caso el sensor CCD. La variación ligera en los parámetros de ajuste polinómico ligados al parámetro "h" justifica la separación de color RGB de nuestro dispositivo de captura.

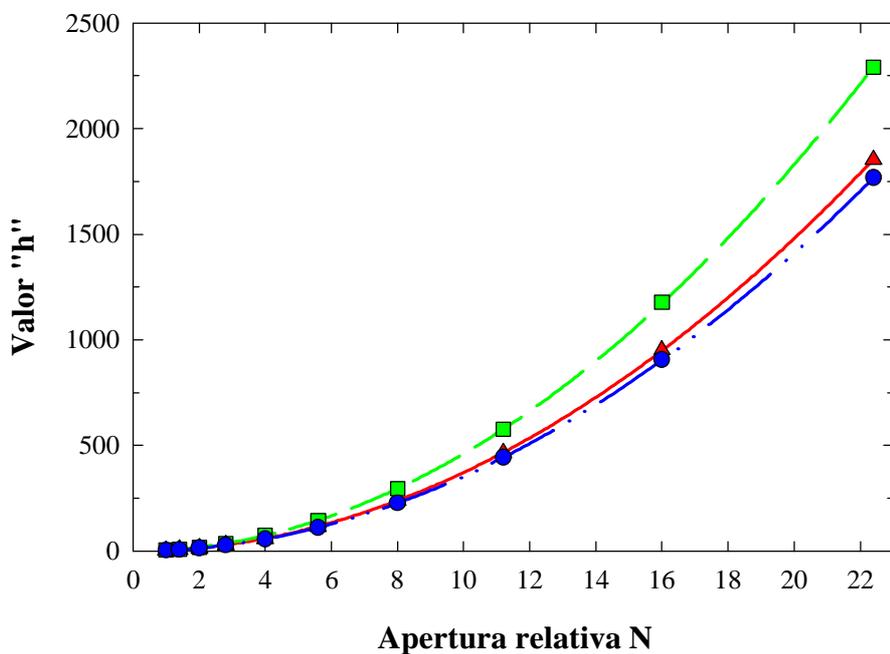
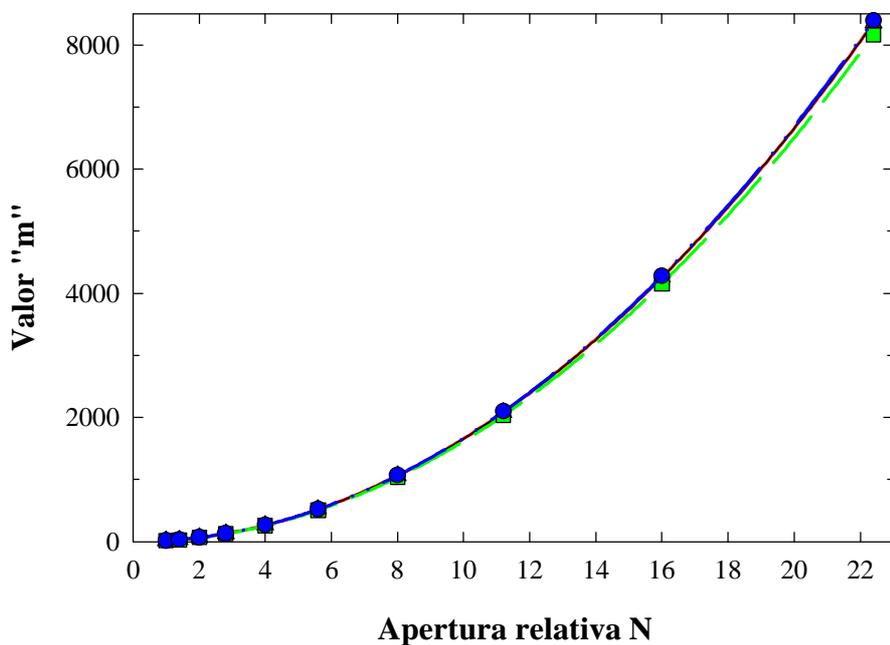


Figura 5.4: Ajuste polinómico de segundo orden de los parámetros de las rectas OECF-1 para cada canal variando N como $\{1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, 22.4\}$. Arriba: representación de la pendiente "m"; abajo: representación de la ordenada en el origen "h". (Círculos y línea discontinua y doblemente punteada: canal B; cuadrados y línea discontinua: canal G; triángulos y línea continua: canal R)

Así pues, con estas condiciones de contorno, el perfil colorimétrico bruto con balance incluido de adaptación luminosa quedaría como del modo siguiente. Si \mathbf{t}_{XYZ} es la terna triestímulo absoluta (en cd/m^2) de cualquier estímulo-color de la escena, L_E es la luminancia que emitiría el blanco ideal \mathbf{E} en la misma posición, y, $\mathbf{t}'_{\text{RGB}} = [R,G,B]^t$ son los valores cromáticos balanceados y relativos de la captura a partir de los niveles digitales correspondientes $\mathbf{ND}_{\text{RGB}} = [ND_R, ND_G, ND_B]^t$, la especificación triestímulo relativa $\mathbf{t}'_{XYZ} = [X,Y,Z]^t$ de la escena se puede estimar a partir de la caracterización espectral y colorimétrica del dispositivo de captura como:

Ecuación 5.8

$$\mathbf{t}'_{XYZ} = \frac{1}{L_E} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \text{datos colorimétricos según CIE - 1931 XYZ}$$

$$\hat{\mathbf{t}}'_{XYZ} = \left(\frac{1}{L_E} \right) \mathbf{M} \{ \mathbf{D}(N) \mathbf{t}'_{\text{RGB}} + \mathbf{H}(N) \}, \quad \text{datos colorimétricos estimados}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_E} \right) \mathbf{M} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} m_R(N) & 0 & 0 \\ 0 & m_G(N) & 0 \\ 0 & 0 & m_B(N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_R(N) \\ h_G(N) \\ h_B(N) \end{bmatrix} \right\}$$

siendo \mathbf{M} la matriz de cambio de base o perfil colorimétrico entre los espacios de color CCD-RGB y CIE-1931 XYZ, que es justo lo que vamos a calcular en la sección siguiente.

5.2 Obtención de perfiles colorimétricos al espacio CIE-1931 XYZ

Básicamente, la primera clasificación clave que se vio en el Capítulo 1 (§ 1.2.3.2) entre los perfiles posibles (Tabla 1.8) era distinguirlos entre si el método matemático de optimización era mediante mínimos cuadrados (etiqueta LS - *Least-Squares*) (Finlayson, Drew 1997) o por componentes principales (etiqueta PC - *Principal Components*) (Vrhel, Trussell 1992). La segunda clasificación clave era si se necesitaba o no información espectral previa sobre el contenido de la imagen. Así, se distinguía entre *perfiles colorimétricos de máxima ignorancia* (etiqueta MaxIg - *Maximum Ignorance*) o de *no-máxima ignorancia* (etiqueta NoMaxIg), para indicar que un cierto conjunto de estímulos-color podía servir de "entrenamiento" para aplicar después el perfil colorimétrico a escenas con contenidos espectrales desconocidos. Otro tipo posible era aquel que imponía una ligadura o condición para que se preservara la especificación del blanco W (etiqueta WPPLS - *White Point Preservation Least Squares*) u otro color entre ambos espacios de representación. De las nueve alternativas de perfiles colorimétricos, no tenemos más remedio que utilizar solamente cuatro porque las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} que obtuvimos en el capítulo anterior no se cruzan entre ellas, o sea, que tienen solapamiento espectral casi nulo, con lo cual restringimos el grupo inicial de nueve a siete. Si, además, nos encontramos

Obtención de perfiles colorimétricos al espacio CIE-1931 XYZ

condicionados exclusivamente por una codificación trivariante RGB, y no de seis canales RGBUVW (que se podría conseguir anteponiendo un filtro de color delante del dispositivo de captura y captar la escena con y sin filtro), el número de perfiles colorimétricos que podemos aplicar se reduce definitivamente de siete a cuatro (Tabla 5.2). Con estos cuatro perfiles colorimétricos \mathbf{M} averigüaremos más adelante si alguno de ellos resulta ser el más adecuado para estimar mejor la colorimetría de la escena, es decir, presenta los mejores resultados de reproducción del color.

Tabla 5.2: Tipos de perfiles colorimétricos que podemos aplicar entre el espacio de color RGB de nuestro dispositivo de captura y CIE-1931 XYZ.

PERFILES	ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
\mathbf{M}_1	MaxIgLS	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados
\mathbf{M}_2	MaxIgWPPLS	Máxima ignorancia por mínimos cuadrados preservando el punto blanco
\mathbf{M}_3	No-MaxIgLS	Ajuste por mínimos cuadrados con información espectral previa de un conjunto estadísticamente representativo de estímulos-color
\mathbf{M}_4	PC	Método por componentes principales, el cual usa un conjunto estadísticamente representativo de estímulos-color

1. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_1 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados.* Dado que se verifica $\mathbf{T}_{XYZ} = \mathbf{T}_{RGB} \mathbf{M}^t$, entonces podemos utilizar la matriz inversa generalizada $(\mathbf{T}_{RGB}^t)^+$:

Ecuación 5.9

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t)^+ = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{T}_{RGB})^{-1} = \begin{bmatrix} 1.5798 & 0.4016 & 0.3643 \\ 1.0086 & 1.6157 & 0.0742 \\ -0.0107 & 0.1573 & 2.0189 \end{bmatrix}$$

Ahora podemos evaluar de forma gráfica el ajuste comparando las funciones de igualación estimadas $(\mathbf{T}_{RGB} \mathbf{M}^t)$ con las verdaderas \mathbf{T}_{XYZ} (Fig. 5.5). De una simple observación de esta comparación gráfica parece del todo evidente que las \mathbf{T}_{RGB} no son estrictamente funciones de igualación, como de igual modo puede comprobarse si comparamos también gráficamente \mathbf{T}_{RGB} con el conjunto más optimizado posible de verdaderas combinaciones lineales de \mathbf{T}_{XYZ} (Fig. 5.6). Para llegar a esta última comparación se invierten los "papeles" de entrada y salida entre ambos espacios de color de forma que la matriz \mathbf{M} resultante (\mathbf{M}_{1a}^{-1}) según Ec. 1.45) queda como:

$$\mathbf{M}_{1a}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.6842 & 0.3731 & 0.3771 \\ 1.0377 & 1.7356 & 0.0546 \\ -0.0253 & 0.1254 & 2.1586 \end{bmatrix}$$

Ambas matrices son bastante similares pero la última se diferencia crucialmente de la primera por informar sobre una combinación lineal exacta de las \mathbf{T}_{XYZ} , con lo cual, como veremos más adelante, acarreará consecuencias importantes a la hora de evaluar el nivel conseguido de reproducción del color.

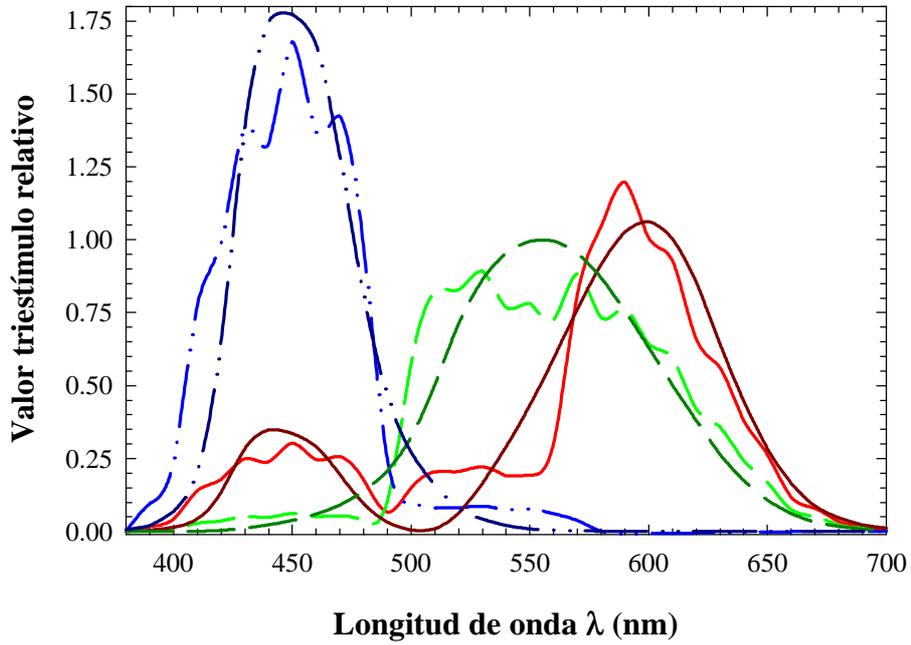


Figura 5.5: Estimación de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ a partir del perfil colorimétrico M_1 .

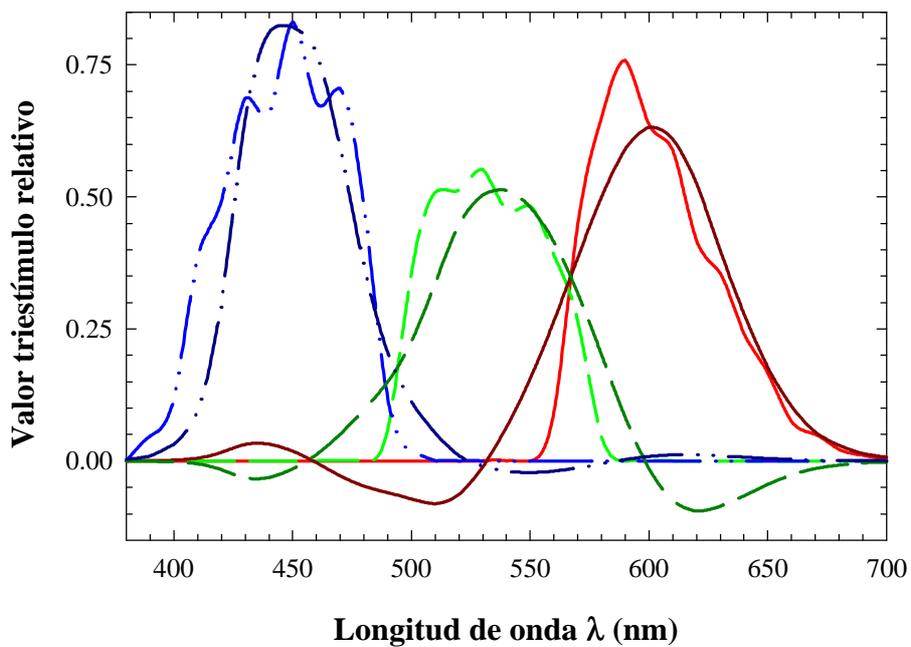


Figura 5.6: Estimación de las pseudo-funciones de igualación a partir del perfil colorimétrico M_{1a}^{-1} .

2. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 , máxima ignorancia por mínimos cuadrados preservando el punto blanco.* El perfil colorimétrico anterior no asegura el balance de blanco equienergético de la transformación de color, es decir, $\mathbf{M}_1 \cdot [bal_R, bal_G, bal_B]^t \neq [1,1,1]^t$, lo cual puede suponer un serio revés a la reproducción de la escala acromática o de grises. Dado que, antes de ejecutar cualquier perfil colorimétrico, los niveles digitales RGB están balanceados, es necesario comprobar si $\mathbf{M}_1 \cdot [1, 1, 1]^t = [1,1,1]^t$. Como resulta que no se verifica, el nuevo perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 se obtiene a partir de Ec. 1.46:

Ecuación 5.10

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} -0.8165 & 0 \\ 0.4082 & -0.7071 \\ 0.4082 & 0.7071 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} -0.2105 & -0.6047 & 0.4459 \\ 0.1666 & -0.1394 & 0.7763 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_2 = (\mathbf{Z}_2 \cdot \mathbf{N}_2)^t = \begin{bmatrix} 0.1719 & -0.2037 & 0.0319 \\ 0.4937 & -0.1483 & -0.3454 \\ -0.3640 & -0.3669 & 0.7309 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_2 + \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 1.1719 & -0.2037 & 0.0319 \\ 0.4937 & 0.8517 & -0.3454 \\ -0.3640 & -0.3669 & 1.7309 \end{bmatrix}$$

Por tanto, el perfil colorimétrico \mathbf{M}_2 se presenta ahora para que $\mathbf{M}_2 [1,1,1]^t = [1,1,1]^t$, con supuesto desbalance de blanco equienergético del dispositivo de captura que se aplica antes. Por supuesto, ahora toda la escala acromática o estímulos grises se transformarían con menor error colorimétrico, pero, puede que a expensas de aumentar el error de reproducción en otras regiones de color dado que las \mathbf{T}_{RGB} no son estrictamente funciones de igualación del color.

Si, por otro lado, optáramos por un perfil colorimétrico \mathbf{M}'_2 tal que partiera de ningún tipo de balance de blanco equienergético, es decir, que verificara directamente $\mathbf{M}'_2 \cdot [bal_R, bal_G, bal_B]^t = [1,1,1]^t$, se aplicaría de igual forma el algoritmo WPPLS (Ec. 5.11). Creemos que esto merece la pena porque revelará si la operación de balance equienergético (Ec. 5.2) es necesaria o no para estimar la colorimetría de una escena.

Ecuación 5.11

$$\mathbf{D}'_2 = \begin{bmatrix} 1.1563 & 0 & 0 \\ 0 & 1.4306 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Z}'_2 = \begin{bmatrix} -0.8158 & 0 \\ 0.3313 & -0.8196 \\ 0.4740 & 0.5729 \end{bmatrix}, \mathbf{N}'_2 = \begin{bmatrix} -0.0399 & -0.7265 & 0.5437 \\ 0.0397 & 0.0612 & 0.6320 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}'_2 = (\mathbf{Z}'_2 \cdot \mathbf{N}'_2)^t = \begin{bmatrix} 0.0326 & -0.0458 & 0.0039 \\ 0.5927 & -0.2908 & -0.3093 \\ -0.4436 & -0.3379 & 0.6198 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{M}'_2 = \mathbf{D}'_2 + \mathbf{E}'_2 = \begin{bmatrix} 1.1889 & -0.0458 & 0.0039 \\ 0.5927 & 1.1398 & -0.3093 \\ -0.4436 & -0.3379 & 1.6198 \end{bmatrix}$$

3. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_3 , ajuste por mínimos cuadrados con información espectral previa de un conjunto estadísticamente representativo de estímulos-color.* Si \mathbf{S} es la matriz que contiene en

columnas las reflectancias espectrales $\rho(\lambda)$ de las muestras Munsell de la carta ColorChecker, se calcula la matriz autocorrelación $\mathbf{K} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^t$, y, se inserta en el perfil colorimétrico del modo siguiente:

Ecuación 5.12

$$\mathbf{M}_3 = \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{RGB} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}_{RGB})^{-1} = \begin{bmatrix} 1.7478 & 0.3040 & 0.3273 \\ 0.9347 & 1.7830 & -0.0171 \\ -0.0384 & 0.1903 & 1.9888 \end{bmatrix}$$

Si bien el mismo conjunto de color va aparentemente a ser el conjunto-entrenamiento y el conjunto-test, esto no es del todo cierto. Al construir la matriz \mathbf{S} con reflectancias espectrales y no con estímulos-color, compuestos por el producto de reflectancias e iluminantes, estamos presuponiendo que el iluminante ligado a este perfil colorimétrico es el equienergético \mathbf{E} , y no cualquiera de los presentes (INC, DAY, HWL) de la escena real. En teoría, por insertar información espectral previa de la escena, los resultados colorimétricos deberían ser mejores que todos los anteriores, pero hasta qué punto esta mejora es significativa respecto a las restantes lo averiguaremos más adelante.

4. *Perfil colorimétrico \mathbf{M}_4 , método por componentes principales, el cual usa un conjunto estadísticamente representativo de estímulos-color.* Partiendo de nuevo de la matriz \mathbf{S} asociada a los colores de la carta ColorChecker, se diagonaliza la matriz covarianza $\mathbf{K}_S = [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}] \cdot [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}]^t$ y se construye una matriz \mathbf{B} compuesta por los tres autovectores asociados a los tres autovalores más grandes (Ec. 1.55). Si $\bar{\rho}$ es la reflectancia espectral media de los colores de la carta ColorChecker, con la que se forma la matriz $\bar{\mathbf{S}}$, el perfil colorimétrico resultante queda como:

Ecuación 5.13

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{t}}'_{XYZ} &= \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \mathbf{B} \cdot (\mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot (\mathbf{t}'_{RGB} - \mathbf{T}_{RGB}^t \cdot \bar{\rho}) + \mathbf{T}_{XYZ}^t \cdot \bar{\rho} = \\ &= \mathbf{M}_4 \left(\mathbf{t}'_{RGB} - \begin{bmatrix} 1.3806 \\ 0.9578 \\ 1.2404 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 3.1144 \\ 2.9731 \\ 2.5840 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.7487 & 0.2954 & 0.3264 \\ 0.9187 & 1.8215 & -0.0282 \\ -0.0230 & 0.1843 & 2.0002 \end{bmatrix} \mathbf{t}'_{RGB} + \begin{bmatrix} -0.0123 \\ 0.0050 \\ 0.0419 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Comparando elemento a elemento, el primero, el tercero y el cuarto de los perfiles colorimétricos son los que más se asemejan a priori. Queda, pues, averiguar cuál de los cuatro, con el mismo balance de adaptación luminosa, consigue reproducir lo más óptimamente posible los colores de cualquier escena. Con la estimación gráfica de las funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} (Fig. 5.5) en función de la matriz \mathbf{M}_1 y las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} tenemos un primer indicio sobre cómo se resuelve esto pero nada más, porque las estimaciones gráficas del mismo tipo para las otras tres matrices no muestran significativamente nada nuevo. Por tanto, habrá que aplicar otros recursos algorítmicos para dilucidar cuál de las cuatro matrices es la mejor, colorimétricamente hablando.

5.3 Evaluación del nivel de reproducción del color

De entre las opciones algorítmicas para evaluar el nivel de reproducción del color, ejecutaremos varias, pero siempre agrupadas en dos clases. La primera, de carácter físico-matemático, se fundamenta en las aplicaciones del Álgebra matricial a la Colorimetría, y ya se presentó a finales del primer capítulo. La segunda, de carácter psicofísico o empírico y totalmente novedosa, consistirá en aplicar un modelo de apariencia de colores aislados (§ Apéndice A) para los valores XYZ estimados por el dispositivo de captura y los verdaderos valores CIE-1931 XYZ, aplicando a continuación el algoritmo de índice de reproducción del color (Ec. 1.33).

5.3.1 Estimaciones teóricas

El fundamento matemático básico de estos los parámetros de calidad de la reproducción del color (Sharma, Trussell 1997; Vora, Trussell 1993; Vora, Trussell 1997; Wolski et al. 1996) es cuantificar la distancia entre los sub-espacios vectoriales asociados a las funciones de igualación \mathbf{T}_{XYZ} y \mathbf{T}_{RGB} , o, en su caso, cuantificar cuál es el "volumen común" entre ambos sub-espacios vectoriales. Todas las opciones posibles presentadas en el primer capítulo tienen como valor máximo la unidad, lo que significaría que \mathbf{T}_{RGB} serían verdaderamente funciones de igualación. Remitiéndonos directamente lo explicado (Ec. 1.57-59) sobre este tema, tenemos, por tanto, que los factores de calidad de reproducción del color son:

Tabla 5.3: Estimaciones teóricas I del grado de reproducción del color.

Factor de Neugebauer	$q_R = 0.9342$ $q_G = 0.9140 \Rightarrow q_N = 0.9227$ $q_B = 0.9348$
Factor de Vora	$q_V = 0.9258$
Factor de Calidad del Color	$q_X = 0.9465$ $q_Y = 0.9465 \Rightarrow CQF = 0.9361$ $q_Z = 0.9361$

Los tres algoritmos dan resultados similares, pero ninguno de ellos nos sirve para predecir cuál de los perfiles colorimétricos \mathbf{M} va a ser el que mejor estime colorimétricamente una escena. Sí que nos advierte, como ya sabíamos a partir de fuentes como la comparación de los metámeros fundamentales asociados al blanco (§ 4.7.2), que nuestro dispositivo de captura no posee unas verdaderas funciones de igualación, pero ¿cuál es el grado de desviación sistemática de reproducción del color que está generando?

Otro resultado interesante referente al efecto de considerar o no previamente información espectral sobre la escena es el cálculo matemático de la relación señal-ruido SNR (Ec. 1.63). Con la condición de máxima ignorancia (sin información previa), $SNR = 25.73$ dB, un valor bastante cercano a los que obteníamos en

el análisis optoelectrónico de la caracterización espectral de nuestro dispositivo de captura (§ 4.5). Mientras que, con la condición de mínima ignorancia (con información previa), utilizando la matriz **K** que contiene las reflectancias espectrales de la carta ColorChecker, $SNR = 59.66$ dB, un valor que nunca se ha alcanzado en nuestro análisis pero que es el valor típico que se encuentra en las especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes (Tabla 2.4). Desconocemos, de momento, si estos resultados deben guardar alguna correlación o si ha sido mera casualidad.

Ya que el objetivo primordial de estos algoritmos es avanzar hasta qué punto se puede estimar colorimétricamente una escena, se vio también a finales del primer capítulo una serie de parámetros de calidad asociados al cálculo del error cuadrático medio entre los valores triestímulo espectrales estimados \hat{t}'_{XYZ} y los reales t'_{XYZ} , pero enmarcados en varios espacios de representación del color con uniformidades espaciales diferentes (Ec. 1.60-2). A diferencia de los factores de Neugebauer, Vora y *QCF*, estos nuevos parámetros sí están condicionados por el perfil colorimétrico aplicado, por lo que podemos hacer una clasificación previa sobre cuál de los perfiles es el mejor, antes de comprobarlo con las estimaciones empíricas de reproducción del color. Además, a diferencia de los parámetros anteriores, la calidad se juzgará ahora por su cercanía a cero, ya que se estima un tipo de error o desviación. Aunque las características del perfil n° 4 son ligeramente diferentes a las del resto, creemos conveniente presentar los cálculos siguientes para los cuatro perfiles en los tres espacios de representación del color que se explicaron:

Tabla 5.4: Estimaciones teóricas II del grado de reproducción del color.

Espacio de color	Perfil M ₁	Perfil M ₂	Perfil M ₃	Perfil M ₄
CIE-1931 XYZ	$q_I = 2.0772$	$q_I = 1.4524$	$q_I = 2.1205$	$q_I = 2.3339$
Ortogonal a CIE-1931 XYZ	$q_O = 0.9258$	$q_O = 0.7334$	$q_O = 0.9995$	$q_O = 0.9989$
CIE-L*a*b*	$q_{ap} = 1.4369$	$q_{ap} = 1.3640$	$q_{ap} = 2.0931$	$q_{ap} = 1.9340$

El perfil colorimétrico n° 2 es, a priori, cualitativamente el mejor, pero no sabemos a ciencia cierta hasta qué punto las diferencias numéricas observadas entre los cuatro perfiles son realmente significativas si tuviéramos que juzgarlas como diferencias psicocuantitativas de color. De ahí que sea necesario poner a prueba estos perfiles colorimétricos con varias escenas, como por ejemplo, la carta ColorChecker bajo iluminaciones espectralmente diferentes.

5.3.2 Estimaciones empíricas

Vamos a comparar a continuación de forma cuantitativa y cualitativa los grados de exactitud y precisión de nuestra cámara digital perfilada, con y sin compensación, con respecto al tele-colorímetro PR-650 según el algoritmo *CRI* aplicando diferencias de color según el modelo de Hunt'91 para colores aislados.

Ya tenemos un modelo de perfilado colorimétrico, que incluye además adaptación luminosa:

Ecuación 5.14

$$\mathbf{t}'_{XYZ} = \frac{1}{L_E} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \text{datos colorimétricos según CIE - 1931 XYZ}$$

$$\hat{\mathbf{t}}'_{XYZ} = \left(\frac{1}{L_E} \right) \mathbf{M} \{ \mathbf{D}(N) \mathbf{t}'_{\text{RGB}} + \mathbf{H}(N) \}, \quad \text{datos colorimétricos estimados}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_E} \right) \mathbf{M} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} m_R(N) & 0 & 0 \\ 0 & m_G(N) & 0 \\ 0 & 0 & m_B(N) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Bal} \cdot \begin{bmatrix} ND_R - f_R \\ ND_G - f_G \\ ND_B - f_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_R(N) \\ h_G(N) \\ h_B(N) \end{bmatrix} \right\}$$

Tenemos también un conjunto de 53 estímulos-color, de luminosidad y cromaticidad variable, que se preseleccionaron a partir de las Tablas 4.3-5 de codificación RGB y XYZ de la carta ColorChecker bajo tres lámparas diferentes (Tabla 4.2): INC (incandescente), DAY (fluorescente), HWL (descarga). Los datos cromáticos iniciales de nuestro dispositivo de captura son los valores medios en cada canal, y sus respectivas varianzas, de los estímulos-color preseleccionados. Con el tele-colorímetro PR-650, tenemos también los valores medios y las varianzas correspondientes a cada canal de los estímulos-color anteriores, pero, además, el nivel absoluto de luminancia L_E (con su varianza) correspondiente a la posición de cada estímulo-color dentro de la escena inhomogéneamente iluminada (Fig. 4.8-10).

Datos cromáticos iniciales para cada estímulo – color: (valor medio, varianza)

$$\text{tele – colorímetro (PR – 650): } (X, s_X^2), (Y, s_Y^2), (Z, s_Z^2), (L_E, s_E^2)$$

$$\text{cámara digital (Sony DXC – 930P): } (ND_R - f_R, s_R^2), (ND_G - f_G, s_G^2), (ND_B - f_B, s_B^2)$$

Dado que el factor L_E se aplica de igual forma para la colorimetría real y la que se estima, parece ahora evidente que no es del todo necesario. Esto significa que el perfilado colorimétrico propuesto conlleva al mismo tiempo un perfilado fotométrico, lo cual no debería sorprendernos. Por tanto, podemos descartarla para comparar la exactitud del modelo con unidades fotométricas (cd/m^2), aún cuando el grado de exactitud que se conseguirá sea el mismo con unidades normalizadas, pero no, por ejemplo, en cualquier representación colorimétrica basada en la colorimetría "relativa-absoluta" (CIE-L*a*b* con iluminante equienergético de luminancia absoluta variable).

Una vez aplicado nuestro modelo de perfil colorimétrico, es importante recordar que el grado de exactitud o nivel de reproducción del color que consigamos se refiere al estado bruto de codificación cromática de nuestro dispositivo de captura. Tal como ya se advirtió en el Capítulo 2, los parámetros de control que se preconfiguraron en la cámara y en la tarjeta digitalizadora antes de iniciar la caracterización espectral condicionan un nivel específico, bruto, de reproducción del color, en el cual, dado que \mathbf{T}_{RGB} no son

verdaderamente funciones de igualación (no se verifica la condición de Luther), aparecerán inevitablemente desviaciones sistemáticas de color, de las que desconocemos el grado y la dispersión. Por ejemplo, cuando se calcularon las \mathbf{T}_{RGB} , se advirtió que quedaba inevitablemente un parámetro libre: $bal_B = 1$. Quizás, a la hora de proponer un modelo de predicción de los valores digitales RGB capturados (Ec. 4.31) de una escena no sea importante, pero sí que lo es cuando nuestro propósito es convertir nuestro dispositivo de captura en un instrumento tele-colorimétrico absoluto, que pueda competir con prestaciones similares con los que existen en el mercado. Por tanto, aparte de evaluar el grado de exactitud del perfil colorimétrico bruto, parece evidente y necesario incorporar a continuación un modelo de corrección de color, más o menos sencillo computacionalmente según los resultados obtenidos, y evaluar su bondad de igual forma que el perfil colorimétrico bruto.

Antes de centrarnos un poco más en esta presentación en la evaluación del nivel de exactitud de los perfiles colorimétricos bruto y compensado, nos parece apropiado ofrecer las líneas principales del cálculo del nivel de precisión de ambos perfiles colorimétricos. Como tal, pretendemos seguir la propagación de los errores aleatorios desde los niveles digitales RGB hasta los valores XYZ obtenidos tras la compensación del perfil colorimétrico. En principio, el perfil colorimétrico bruto consiste básicamente en una transformación multivariante lineal (sin tener en cuenta la aleatoriedad de la apertura relativa N), de forma que, según Ec. 1.21 la matriz covarianza de los valores triestímulo relativos XYZ estimados nos queda como:

Ecuación 5.14

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{XYZ}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{D}(N) \cdot \mathbf{Bal} \cdot \mathbf{S}_{\text{ND}} \cdot \mathbf{Bal}^t \cdot \mathbf{D}(N)^t \cdot \mathbf{M}^t \quad , \quad \text{siendo } \mathbf{S}_{\text{ND}} = \begin{bmatrix} s_R^2 & 0 & 0 \\ 0 & s_G^2 & 0 \\ 0 & 0 & s_B^2 \end{bmatrix}$$

Si el algoritmo de corrección del color $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ que se aplique es de carácter multivariante no lineal (Ec. 1.22), se debería tener en cuenta su jacobiano $\mathbf{J}_{\mathbf{f}(\mathbf{x})}$ para la obtención de las incertidumbres asociadas a los valores triestímulo relativos XYZ compensados. En cualquier caso, si a la hora de estimar el grado de exactitud utilizamos el espacio psicométrico CIE-L*a*b*, no tendremos más remedio que aplicar los jacobianos asociados (Ec. 1.26-29) a esta transformación colorimétrica no lineal para obtener las incertidumbres correspondientes.

El grado de exactitud de nuestro dispositivo de captura, caracterizado espectral y coloriméricamente, sin y con corrección de color, consistirá en calcular las desviaciones de color en el espacio psicométrico CIE-L*a*b* como primera aproximación, y, en el espacio psicocuantitativo que se deriva de aplicar un modelo de apariencia para colores aislados (Hunt'91, Apéndice A) junto con el algoritmo de cálculo del índice de reproducción del color CRI (Ec. 1.33; Fig. 1.18).

En principio, si lo que pretendemos es estimar la colorimetría de la escena, alcanzar el grado de reproducción exacta del color, no podemos estimar el grado de bondad calculando simplemente las diferencias colorimétricas en el espacio CIE-1931 XYZ, sino que es preciso hacerlo en algún espacio de color al menos psicométrico, como CIE-L*a*b*. Desafortunadamente, CIE-L*a*b* es un espacio

psicométrico asociado para estimar de forma muy simple la apariencia de colores relacionados y está optimizado para funcionar con magnitudes pequeñas de diferencias de color. Sin embargo, debemos ser conscientes que nuestro dispositivo de captura, como cualquier otro, codifica el color de forma aislada, nunca de manera relacionada, sin adaptaciones cromática, luminosa, sin algoritmos de interacción espacial (centro-periferia), y, sin ofrecer una salida cromática perceptualmente uniforme. Aunque habitualmente se capturan escenas complejas, con multitud de estímulos-color, todos ellos se codifican realmente como estímulos-color aislados, siempre y cuando los efectos de difusión luminosa se consideren despreciables. Por tanto, aunque nosotros percibimos de forma relacionada la carta ColorChecker bajo tres lámparas diferentes, nuestro dispositivo de captura no lo hace de la misma forma. Del mismo modo actúa el tele-colorímetro PR-650: apuntamos a cada estímulo-color de la escena y obtenemos sus valores cromáticos XYZ en cd/m^2 , sin que, en principio, estos valores estén claramente influenciados por los colores del entorno. Si quisiéramos obtener valores $L^*a^*b^*$ vía PR-650 no tendríamos más remedio que situar el blanco ideal (Halón) en cada posición-color para recoger sus correspondientes valores triestímulo absolutos XYZ para que el microprocesador realizara la transformación $XYZ \rightarrow L^*a^*b^*$. En este caso, el tele-colorímetro aplica parcialmente correcto CIE- $L^*a^*b^*$ porque el blanco (como periferia) nunca está presente simultáneamente en la escena con el estímulo-color, y, en situaciones de campos no uniformes de iluminación, sería todavía más problemático y paradójico aplicar esta transformación de color. Aún así, como primera aproximación, aplicaremos diferencias de color CIE- $L^*a^*b^*$ a los dos grupos de datos cromáticos, los que proporciona indirectamente PR-650 y los que estimamos vía la cámara gracias a su caracterización espectrocolorimétrica. Es importante recordar ahora que aplicaremos colorimetría "relativa-absoluta", y no "completamente-relativa" (Ec. 1.10-11): nuestro de blanco de referencia será siempre el ideal o espectralmente plano E , aunque tenga L_E diferentes (si obtuviéramos directamente $L^*a^*b^*$ de PR-650 para la escena ColorChecker bajo las tres lámparas INC, DAY, HWL, estaríamos aplicando colorimetría "completamente relativa"). En conclusión, cuando apliquemos CIE- $L^*a^*b^*$, supondremos que un observador estándar juzga la apariencia de los colores real y estimado (y también compensado) sobre un fondo blanco espectralmente plano de luminancia L_E , pero que tal luminancia L_E será variable dado que los campos reales de iluminación sobre la carta ColorChecker no son uniformes (Fig. 4.8-10).

Las diferencias numéricas de color obtenidas en CIE- $L^*a^*b^*$ nos servirán para estimar en primera aproximación el grado de exactitud de nuestro perfil colorimétrico bruto, a pesar de que estas diferencias numéricas sean significativamente grandes. Después, evidentemente, sea el tipo funcional que sea la corrección de color, estas diferencias se reducirán drásticamente. Sin embargo, en ninguno de los dos casos podremos estimar las desviaciones absolutas y relativas según regiones tonales de color (rojos, amarillos, verdes y azules). Si conociéramos estas desviaciones podríamos analizar exhaustivamente los defectos de reproducción del color de nuestro dispositivo de captura, sobretudo a nivel de codificación bruta, con lo cual esta fase de análisis nos serviría para comparar modelos de dispositivos de captura con prestaciones aparentemente similares de marcas diferentes. El algoritmo *CRI* es uno de los primeros en permitirnos analizar estos problemas de reproducción del color. Como ya se explicó en el primer capítulo, el algoritmo *CRI* tiene el propósito de extrapolar, a partir de una muestra estadística de estímulos-color, las desviaciones absolutas y relativas en reproducción del color de las variables perceptuales de luminosidad (Q), tono (H) y colorido (M) de todos los estímulos-color que pueden reproducirse, y que

habrá que considerar de forma aislada, no relacionada. Por tanto, los índices combinados IcQ , IcH , IcM no son más que los valores medios de las desviaciones absolutas de las respectivas diferencias perceptuales parciales en las cuatro regiones tonales principales (Fig. 5.7). Del mismo modo, las respectivas diferencias perceptuales relativas anteriores dan también información sobre las desviaciones relativas: por ejemplo, que si los colores rojos se desvían hacia el amarillo, que si los colores azules se reproducen ligeramente más claros, que si los colores verdes se reproducen bastante desaturados, etc. Si todas las diferencias absolutas y relativas parciales fueran cero, entonces por una sencilla normalización los índices combinados IcQ , IcH , IcM y el índice total CRI valdrían todos 100, como cota superior que indicaría reproducción perfecta del color en todos los sentidos. Generalmente, para correlacionar mejor el criterio de aceptabilidad con el de perceptibilidad, se aplica un factor de peso mayor al nivel de reproducción del tono (o sea, una tolerancia más rigurosa), por lo que el índice total CRI queda como:

Ecuación 5.15

$$CRI = \frac{IcQ + k \cdot IcH + IcM}{k + 2} \quad , \quad \text{con } k = 2$$

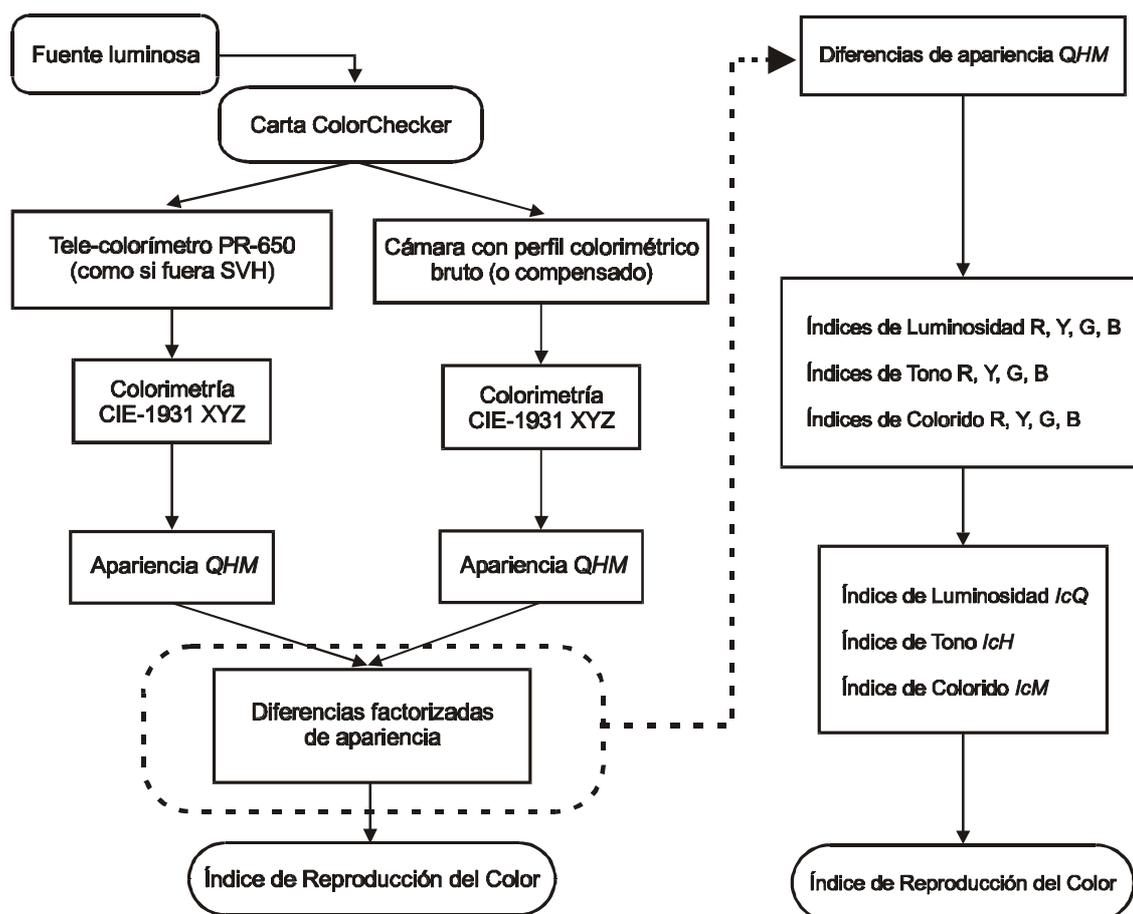


Figura 5.7: Diagrama sobre el cálculo del índice de reproducción del color (CRI) para comparar el grado de exactitud entre el tele-colorímetro PR-650 y nuestro dispositivo de captura, caracterizado espectrocolorimétricamente a nivel bruto o compensado de color.

Los resultados de este algoritmo son útiles desde el punto de vista cualitativo, no desde el punto de vista cuantitativo (como un índice general de error de medida/reproducción), debido a su carácter estadístico. Aunque es un algoritmo numérico que calcula tanto desviaciones absolutas y relativas, quizás las desviaciones absolutas deberían estar mejor pesadas para ofrecer varias escalas de aceptabilidad en la reproducción del color, pero muy poca investigación se ha realizado al respecto con este algoritmo. Por tanto, utilizaremos también las diferencias numéricas en CIE-L*a*b* como complemento para analizar las desviaciones absolutas de color. En cambio, las desviaciones relativas de luminosidad, tono y colorido en las cuatro regiones tonales principales serán parámetros estadísticos excelentes para marcar las tendencias de error en la reproducción del color de nuestro dispositivo de captura. (En el Apéndice B se presenta un ejemplo numérico completo sobre el cálculo del índice de reproducción del color.)

Dado el carácter "aislado" de la codificación cromática de cualquier dispositivo de captura, parece necesario que, a la hora de aplicar el algoritmo *CRI*, utilicemos algún modelo de apariencia para colores aislados. El espacio CIE-L*a*b* puede adaptarse a un modo de visualización "aislada", pero como primera aproximación (el blanco de referencia debe cumplir que $X_w = Y_w = Z_w$). Hemos escogido el modelo de Hunt'91 sobre colores aislados como el único representante conocido de esta clase de modelos de apariencia. Básicamente, tal como se podrá ver extensamente en el Apéndice A, consta de una etapa fotorreptoral (fotópica y escotópica), con adaptación luminosa y cromática, dos de carácter oponente y una perceptual. A diferencia de las condiciones de visualización que se consideran al aplicar CIE-L*a*b*, el observador estándar juzga ahora cada estímulo-color sobre un fondo completamente negro, y, la comparación la realiza de forma que ninguno de los dos colores presentes, referencia (PR-650) y muestra (Sony DXC-930P), influye en la apariencia del otro.

En la sección siguiente presentaremos, por tanto, los resultados obtenidos de aplicar el perfil colorimétrico bruto propuesto en cada una de sus variantes debido a la matriz **M** de cambio de base. En todas ellas se aplicará, no obstante, el mismo balance de adaptación luminosa. Por tanto, conociendo los resultados bajo CIE-L*a*b* y Hunt'91 aplicando el algoritmo *CRI*, podremos ordenar cuantitativa y cualitativamente el grado de bondad (exactitud) de las variantes. Veremos también cuál es la influencia colorimétrica de haber partido del factor de escala $bal_B = 1$, que, recordemos, no podíamos hacer otra cosa que dejarlo libre en la caracterización espectral. Luego, más adelante, averiguaremos cuál es el algoritmo matemático más apropiado para compensar las desviaciones de color del perfil bruto, sea en la variante que sea, y, analizaremos vía CIE-L*a*b* y *CRI* el grado de optimización que hemos alcanzado y si es suficiente para considerar finalmente nuestro dispositivo de captura como un nuevo instrumento de medida del color, tanto a nivel de exactitud como de precisión.

5.3.2.1 Resultados con el perfil colorimétrico bruto

Siguiendo el mismo orden que en la presentación de las estimaciones teóricas sobre el nivel de reproducción del color, vamos a empezar con el perfil colorimétrico **M₁**. La figura siguiente muestra la estimación colorimétrica directa o bruta en CIE-L*a*b* de los 53 estímulos-color de la carta

ColorChecker. Se observa claramente que existe un desajuste inaceptable, coloriméricamente hablando, en la escala de L^* , cuyo valor máximo teórico es 100.

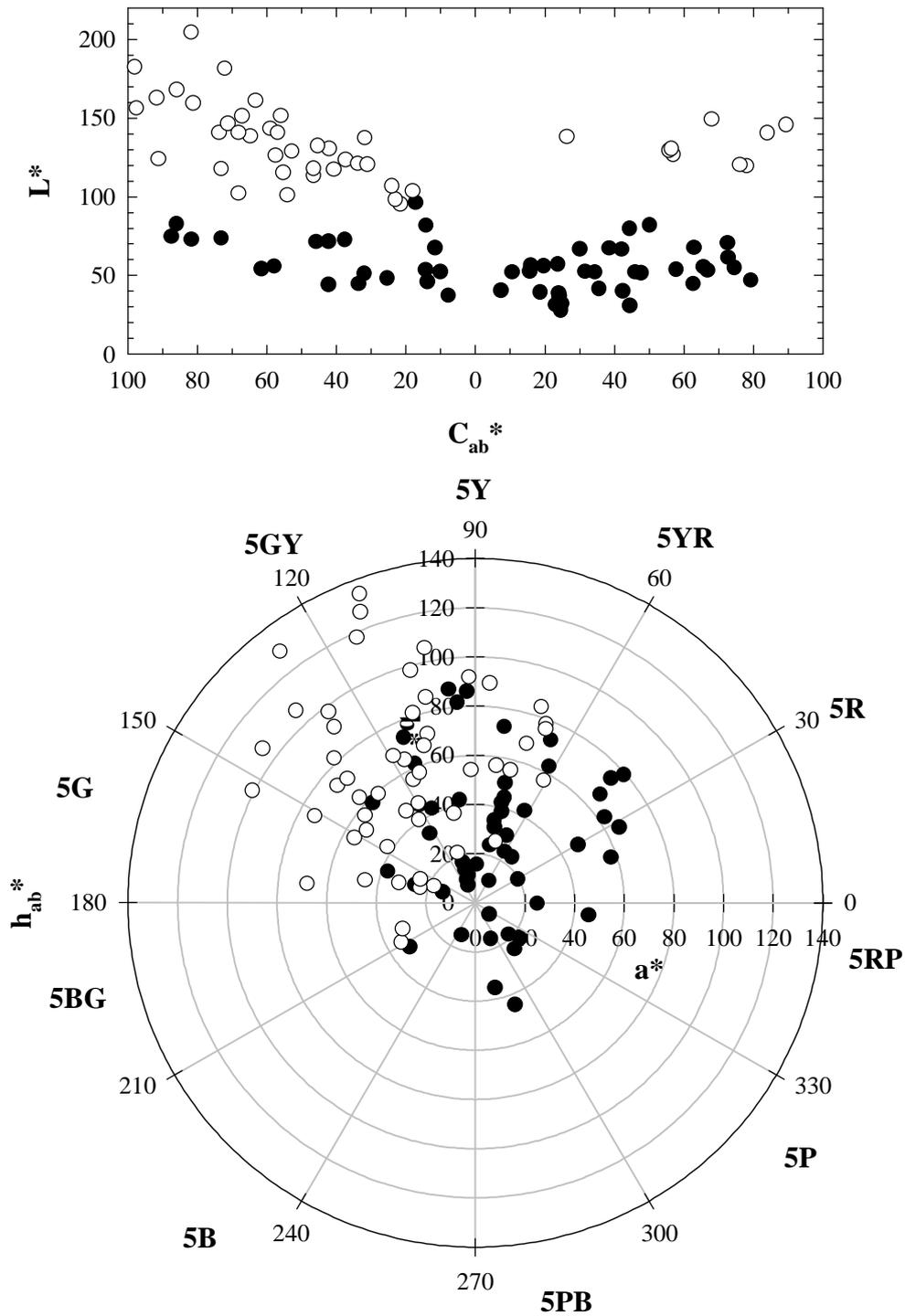


Figura 5.8: Resultados en CIE- $L^*a^*b^*$ del perfil colorimétrico bruto nº 1. Símbolos oscuros: medidas con PR-650; símbolos claros: estimaciones con nuestro dispositivo de captura.

Evaluación del nivel de reproducción del color

La causa de este desajuste exagerado e inaceptable de L^* solamente puede achacarse a un desbarajuste de la escala real del valor triestímulo estimado \hat{Y} , ya que esta variable colorimétrica depende sólo de valores triestímulo Y . Pero, también interviene en la obtención de los valores colorimétricos a^* y b^* , por lo que este desajuste afecta inclusive a la estimación del tono h_{ab}^* y el croma C_{ab}^* . Esto se observa claramente si comparamos gráficamente (Fig. 5.9-11) los valores triestímulo medidos t_{XYZ} con PR-650 y los estimados directamente \hat{t}_{XYZ} con el perfil nº 1. Es más, tal desajuste de escala se observa también en los otros tres perfiles colorimétricos, con lo cual, el procedimiento que apliquemos como compensación a este perfil se aplicará de igual modo en los tres restantes.

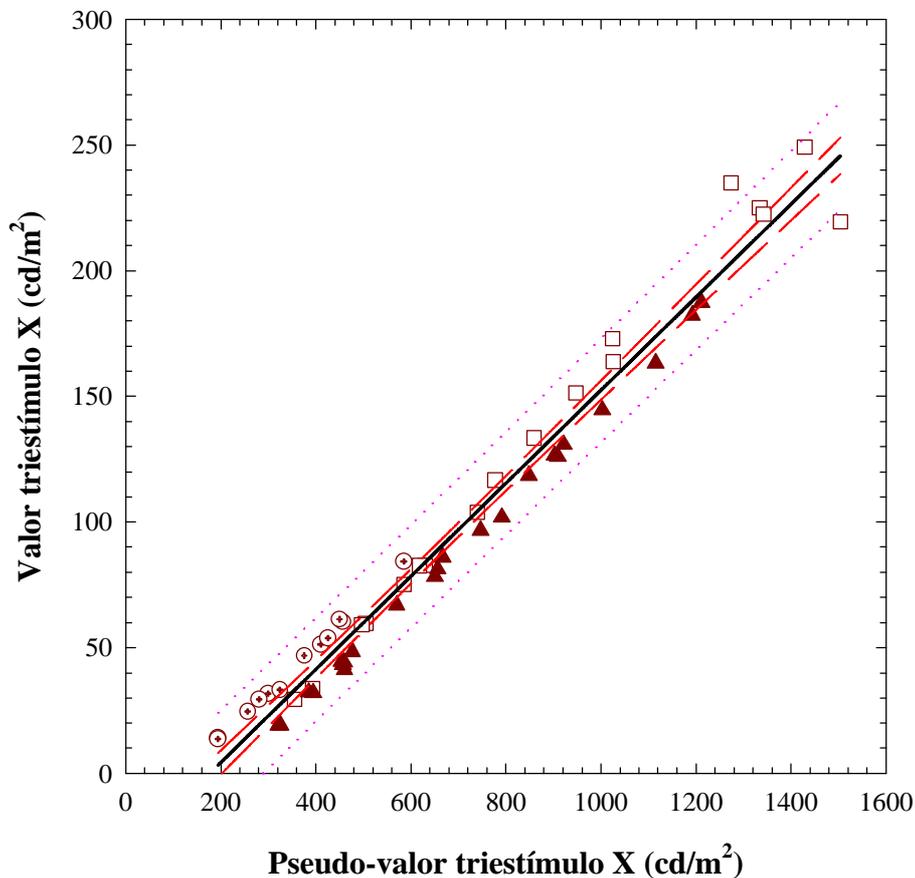


Figura 5.9: Compensación del valor triestímulo X con el perfil colorimétrico nº 1. Símbolos: \ominus , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95%; punteada, intervalos de predicción al 95%.

A la vista de estos resultados, el modelo matemático de corrección del color puede reducirse simplemente a una relación lineal. Así para el canal X:

Ecuación 5.16

$$X = a_x + b_x \hat{X} \equiv \tilde{X} \Rightarrow X = -32.65 + 0.1851 \hat{X}$$

siendo X el valor triestímulo medido con PR-650, \hat{X} el pseudo-valor triestímulo obtenido con el perfil colorimétrico bruto, y, \tilde{X} el nuevo valor triestímulo compensado, o correctamente escalado.

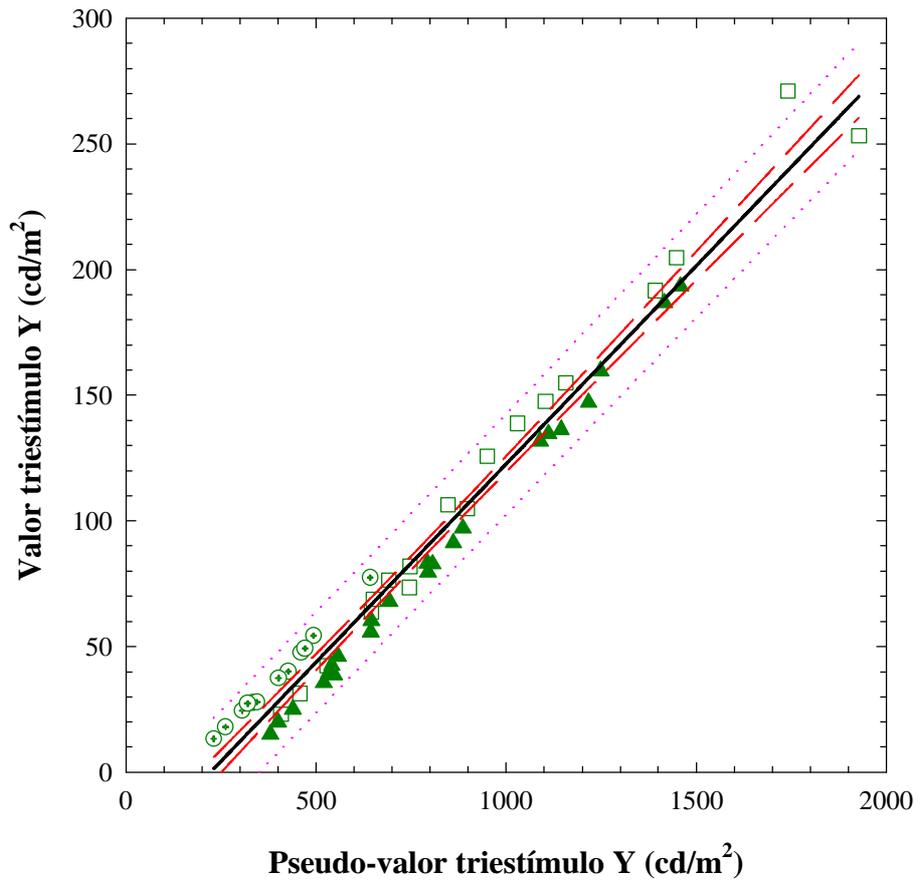


Figura 5.10: Compensación del valor triestímulo Y con el perfil colorimétrico nº 1. Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95 %; punteada, intervalos de predicción al 95 %.

De forma análoga para el canal Y:

Ecuación 5.17

$$Y = a_y + b_y \hat{Y} \equiv \tilde{Y} \Rightarrow Y = -35.02 + 0.1577 \hat{Y}$$

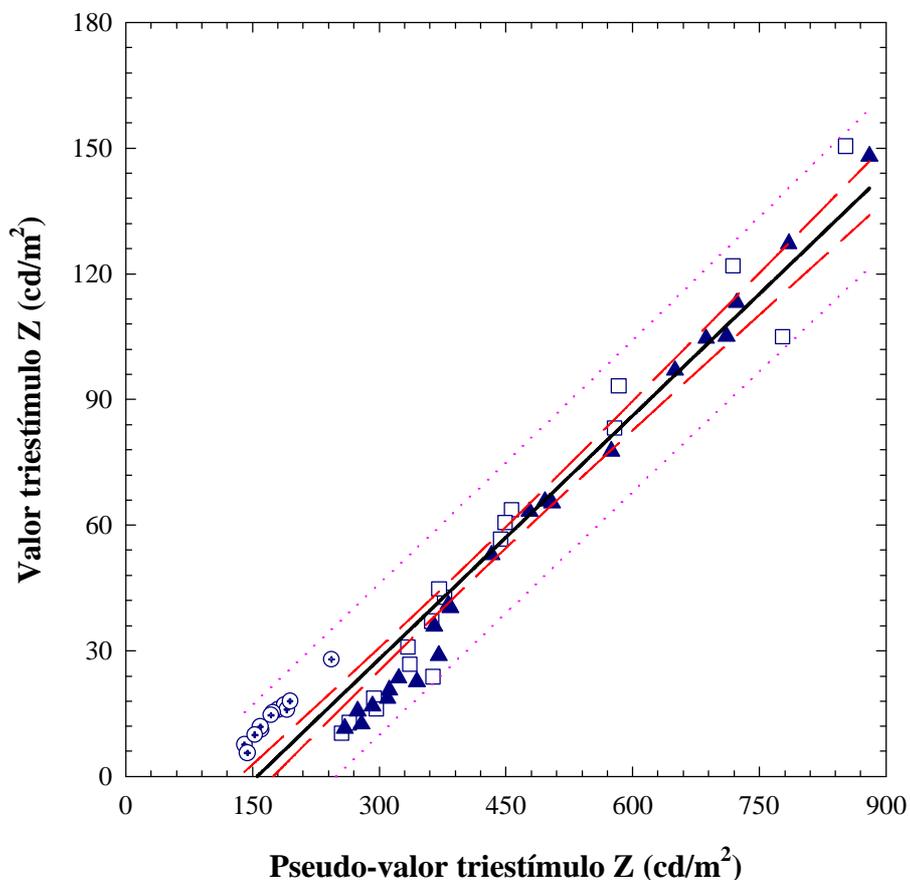


Figura 5.11: Compensación del valor triestímulo Z con el perfil colorimétrico nº 1. Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95 %; punteada, intervalos de predicción al 95 %.

Y, para el canal Z:

Ecuación 5.18

$$Z = a_z + b_z \hat{Z} \equiv \tilde{Z} \Rightarrow Z = -30.10 + 0.1937 \tilde{Z}$$

En definitiva, tenemos un modelo de compensación de color caracterizado como sigue:

Ecuación 5.19

$$\mathbf{t}_{XYZ} = \mathbf{A}_C + \mathbf{B}_C \cdot \hat{\mathbf{t}}_{XYZ} \equiv \tilde{\mathbf{t}}_{XYZ} \quad , \text{ con } \mathbf{A}_C = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{B}_C = \begin{bmatrix} b_x & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 \\ 0 & 0 & b_z \end{bmatrix}$$

A pesar de la dispersión estadística de los datos (coeficientes de regresión $r_X^2 = 0.9761$, $r_Y^2 = 0.9761$, $r_Z^2 = 0.9512$), debido quizás principalmente a la disparidad de cromaticidad en las lámparas que iluminaron la carta ColorChecker, los datos se ajustan razonablemente bien a una recta. Desconocemos todavía si esta mediocre correlación es suficiente o no en términos de perceptibilidad, es decir, si aplicando diferencias de color en CIE-L*a*b* los resultados compensados son perceptualmente indistinguibles, o hasta qué punto los podemos considerar aceptables. Aún así, resulta alentador descubrir que los datos, con orígenes espectrales diferentes (Fig. 4.12-14), se alinean bastante bien, lo cual justifica que el ajuste lineal sea válido en el sentido colorimétrico, pero no tanto desde el punto de vista matemático. Por lo pronto, hemos conseguido obtener el factor de escala general (\mathbf{B}_C) que nos faltaba incorporar en el modelo de perfilado colorimétrico de nuestro dispositivo de captura, puesto que estaba condicionado por el valor $bal_B = 1$. De esta forma, ya nos aseguramos que el modelo de caracterización espectrocolorimétrica que estamos proponiendo puede aproximarse con garantías al nivel exacto de reproducción del color, que es al máximo que podríamos aspirar.

Este último resultado nos obliga consentidamente a reinterpretar la caracterización espectral y colorimétrica que habíamos propuesto hasta ahora. Los pasos que debemos reconfigurar son:

1. Escalar definitivamente las pseudo-funciones de igualación con los factores b , es decir, cambiar donde proceda \mathbf{T}_{RGB} por $\mathbf{T}_{RGB}\mathbf{B}_C$. Esto representa que, a nivel general, la escala de sensibilidad real de las \mathbf{T}_{RGB} respecto a las \mathbf{T}_{XYZ} se ha reducido aproximadamente un 85 %, es decir, nuestro dispositivo de captura necesita más cantidad de luz (casi el doble) que el observador patrón CIE para ofrecer cualitativamente los mismos resultados cromáticos.
2. Escalar el perfil colorimétrico bruto completo con la matriz diagonal \mathbf{B}_C :

Ecuación 5.20

$$\hat{\mathbf{t}}_{XYZ} = \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_C \cdot \mathbf{M} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} m_R(N) & 0 & 0 \\ 0 & m_G(N) & 0 \\ 0 & 0 & m_B(N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_R(N) \\ h_G(N) \\ h_B(N) \end{bmatrix} \right\}$$

El nuevo modelo de perfilado lo denominaremos *perfil colorimétrico bruto escalado*, con lo que podremos evaluar su bondad utilizando el algoritmo *CRI* en comparación con el perfil bruto y la corrección final de color que aplicaremos. Esta reconfiguración se aplicará, por tanto, indistintamente del tipo de matriz \mathbf{M} de cambio de base.

3. El término \mathbf{A}_C del modelo de corrección de color, que no se ajustaría a las leyes Grassmann (proporcionalidad y aditividad) sería, por tanto, el error sistemático de desplazamiento asociado a la caracterización colorimétrica de nuestro dispositivo de captura. Podríamos conjeturar que la matriz diagonal \mathbf{B}_C forma parte también del modelo de corrección, pero, como la podemos justificar dentro de las propiedades de las leyes de Grassmann, podemos recortar cualitativamente el modelo de corrección a \mathbf{A}_C , y, dejar \mathbf{B}_C como el último paso de la caracterización espectrocolorimétrica. Así,

Evaluación del nivel de reproducción del color

podemos interpretar al vector \mathbf{A}_C como el error sistemático (valor medido - valor verdadero) de nuestro nuevo instrumento tele-colorimétrico.

Volviendo de nuevo al análisis de los resultados del perfil colorimétrico nº1, presentamos a continuación las desviaciones absolutas y relativas en CIE-L*a*b* de los perfiles bruto escalado y compensado respecto el estándar PR-650 (Tabla 5.5). A la vista de estos resultados numéricos, complementados con los gráficos (Fig. 5.12-13), nuestro dispositivo de captura presenta cualitativamente en estado bruto (pero escalado) mayor desviación de croma C_{ab}^* , que de claridad L^* y de tono H_{ab}^* , revelándonos, por tanto, que la cámara se comporta en general como si desaturara ligeramente los colores, aclarándolos al mismo tiempo. En cambio, al ejecutar la corrección de color, la cámara reduce esta desviación colorimétrica pero no tanto en la reproducción del tono de los colores, más bien empeora ligeramente.

Tabla 5.5: Resultados en el espacio CIE-L*a*b* del nivel de reproducción del color de los perfiles colorimétricos bruto escalado y compensado.

Nº 1 (M ₁)	Perfil bruto escalado			Nº 1 (M ₁)	Perfil compensado		
	Promedio	Máximo	Mínimo		Promedio	Máximo	Mínimo
$|\Delta L^*|$	11.75	26.98	0.40	$|\Delta L^*|$	4.32	29.99	0.22
ΔL^*	11.75	26.98	0.40	ΔL^*	-1.14	8.23	-29.99
$|\Delta a^*|$	7.80	28.53	0.02	$|\Delta a^*|$	6.00	32.79	0.09
Δa^*	-4.58	12.46	-28.53	Δa^*	1.00	32.79	-16.79
$|\Delta b^*|$	10.24	31.27	0.32	$|\Delta b^*|$	8.80	41.48	0.64
Δb^*	-4.57	26.28	-31.27	Δb^*	2.55	41.48	-19.61
$|\Delta C_{ab}^*|$	13.32	32.96	0.44	$|\Delta C_{ab}^*|$	10.37	39.98	0.22
ΔC_{ab}^*	-12.89	2.70	-32.96	ΔC_{ab}^*	-0.65	39.98	-20.15
$|\Delta H_{ab}^*|$	3.41	10.27	0.09	$|\Delta H_{ab}^*|$	3.87	27.62	0.02
ΔH_{ab}^*	0.27	10.05	-10.17	ΔH_{ab}^*	0.11	27.62	-10.53
ΔE_{ab}	19.70	40.62	4.39	ΔE_{ab}	12.71	46.24	2.24
ΔE_{94}	13.48	30.26	4.22	ΔE_{94}	6.59	34.40	1.81

Habitualmente, en el campo de la Colorimetría diferencial se necesita delimitar qué criterio de aceptabilidad se establece frente el criterio de perceptibilidad. El último, marcado por el valor numérico de la diferencia de color ΔE , nos señala que, salvo que $\Delta E < 3$, la diferencia de color siempre se percibirá. En cambio, es bastante común usar un intervalo más amplio, entre 5 y 8 unidades, para delimitar la región de tolerancia o nivel de aceptabilidad. En principio, dadas las dificultades inherentes del problema colorimétrico (variación libre de la cromaticidad e intensidad de la fuente luminosa, máxima ignorancia espectral, adaptación luminosa, etc) que hemos abordado, nos sentimos bastante satisfechos por haber alcanzado con el perfil colorimétrico compensado los niveles habituales de tolerancia industrial de color, aún con un modelo tan sencillo de corrección de color.

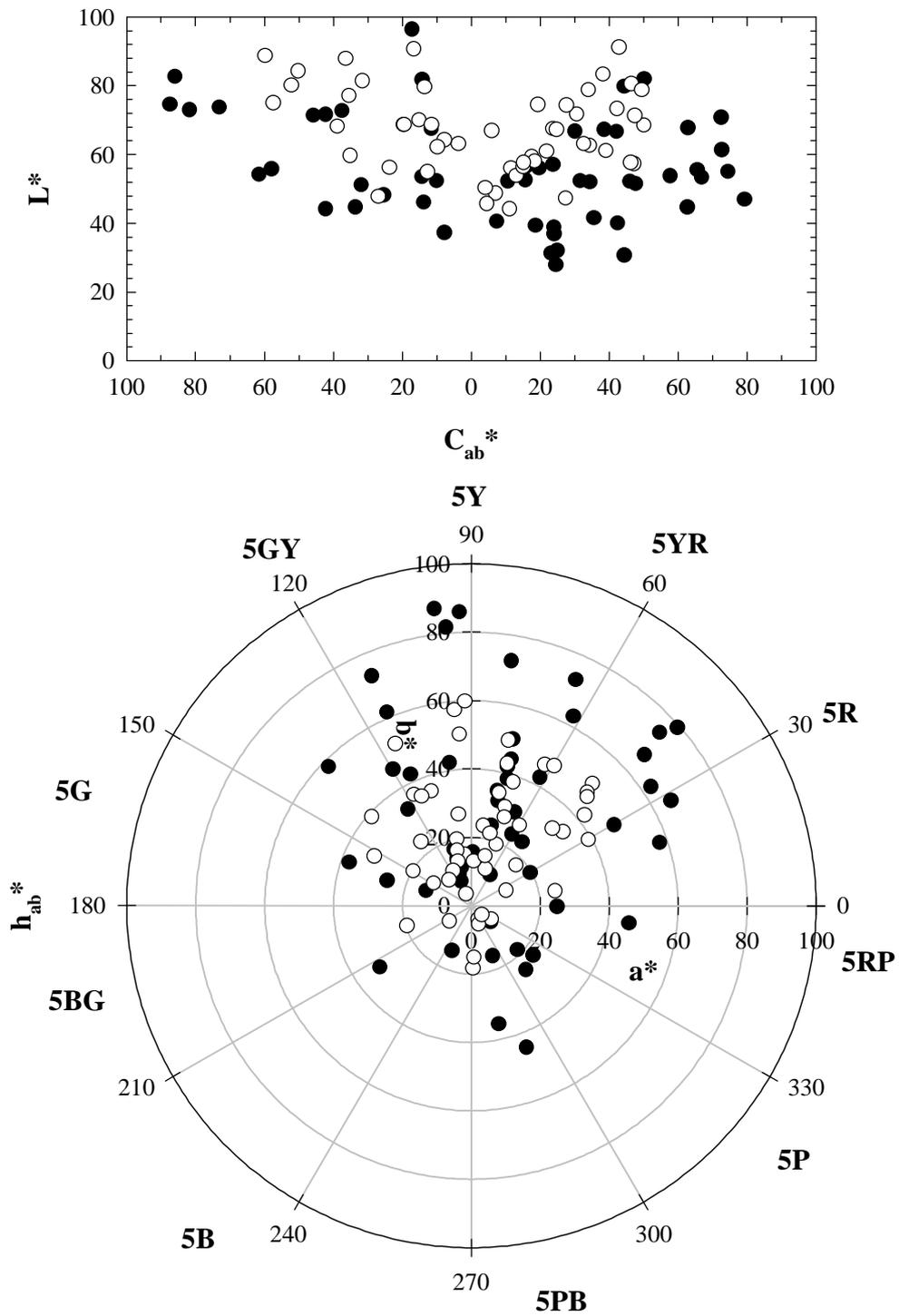


Figura 5.12: Comparación del grado de reproducción del color en el espacio CIE-L*a*b* entre el perfil colorimétrico bruto y escalado nº 1 de nuestro dispositivo de captura y el tele-colorímetro PR-650. Símbolos oscuros: datos reales; símbolos claros: datos estimados.

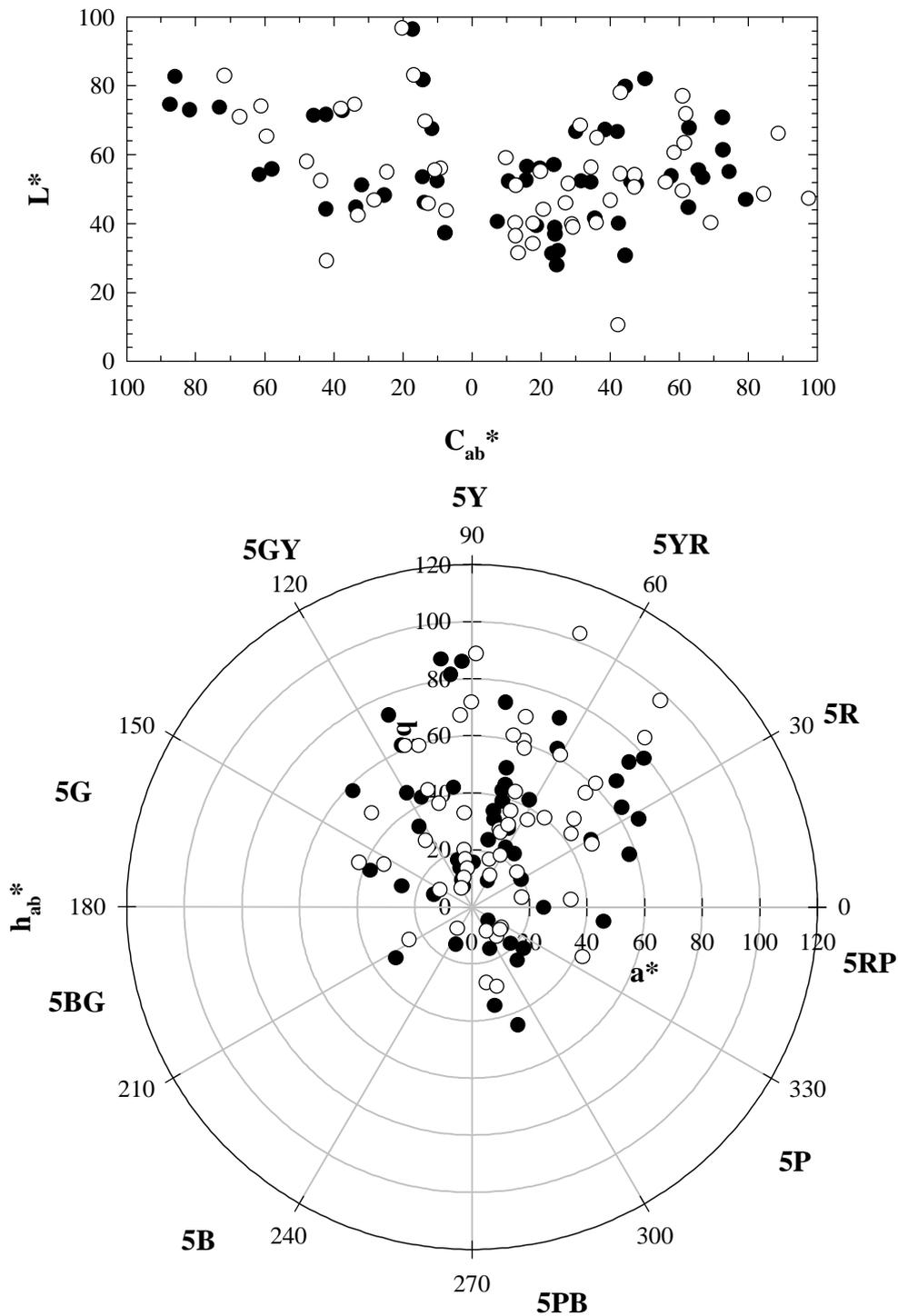


Figura 5.13: Comparación del grado de reproducción del color en el espacio CIE-L*a*b* entre el perfil colorimétrico compensado nº 1 de nuestro dispositivo de captura y el tele-colorímetro PR-650. Símbolos oscuros: datos reales; símbolos claros: datos estimados.

Estas últimas aseveraciones pueden complementarse con el análisis del nivel de reproducción del color al aplicar el algoritmo *CRI* con el modelo de Hunt'91 para colores aislados (Tabla 5.6) y una impresión simulada (Fig. 5.14) de los 53 estímulos-color en cada una de las fases de reproducción – a nivel bruto y escalado, compensado – con respecto a la visualización directa según el tele-colorímetro PR-650. Para mejorar la comprensión de los resultados obtenidos, hemos considerado oportuno para este primer ejemplo de perfil colorimétrico incluir los resultados parciales del algoritmo *CRI*.

Tabla 5.6: Resultados del algoritmo de índice de reproducción del color al perfil colorimétrico nº 1.

PERFIL COLORIMÉTRICO BRUTO Y ESCALADO					PERFIL COLORIMÉTRICO COMPENSADO				
ABSOLUTO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	ABSOLUTO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
ΔQ	3.01	7.59	2.21	4.36	ΔQ	1.02	6.21	0.52	1.69
ΔM	10.77	9.35	4.19	4.86	ΔM	5.58	7.61	2.46	2.39
ΔH	7.78	9.82	3.47	9.30	ΔH	3.95	10.56	3.20	2.35
RELATIVO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	RELATIVO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
ΔQ	3.00	2.07	2.21	4.36	ΔQ	0.18	-0.13	0.25	0.20
ΔM	-10.77	-3.61	-3.93	-4.86	ΔM	-4.36	-1.09	-2.43	-1.89
ΔH	5.75	0.51	-1.63	3.25	ΔH	1.65	-4.23	-2.65	1.29
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcQ	96.99	92.41	97.79	95.64	IcQ	98.98	93.79	99.48	98.3
juicio relativo	claro	claro	claro	claro	juicio relativo	igual	igual	igual	igual
$IcQ = 95.71$					$IcQ = 97.64$				
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcM	89.23	90.65	95.81	95.14	IcM	94.42	92.39	97.54	97.61
juicio relativo	débil.	débil.	débil.	débil.	juicio relativo	débil.	débil.	débil.	débil.
$IcM = 92.71$					$IcM = 95.49$				
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcH	92.22	90.18	96.53	90.70	IcH	96.05	89.44	96.80	97.65
juicio relativo	R → Y	igual	G → Y	B → R	juicio relativo	R → Y	Y → R	G → Y	B → R
$IcH = 92.41$					$IcH = 94.99$				
$CRI = 93.31$					$CRI = 95.78$				

Así, destaca sobremanera la proximidad de la reproducción a nivel bruto y escalado: se nota claramente el efecto de desaturación y un ligero aumento de la luminosidad, pero la reproducción del tono parece excelente. A pesar de que nuestro dispositivo de captura presenta un balance de blanco cercano a 5600 K, los estímulos-color capturados con fuentes más amarillentas se siguen reproduciendo bastante bien. Aún aplicando la compensación de color, los colores se reproducen todavía con una ligera desaturación, pero no cabe otro remedio, desde el punto de vista estadístico, si queremos mantener los otros niveles

Evaluación del nivel de reproducción del color

perceptuales de reproducción. En consecuencia, hemos alcanzado una cota superior de nivel de reproducción exacta del color, la cual está condicionada por el tipo de diseño colorimétrico de nuestro dispositivo de captura, el cual no podemos alterar sin volver a empezar de nuevo toda la caracterización espectrocolorimétrica.

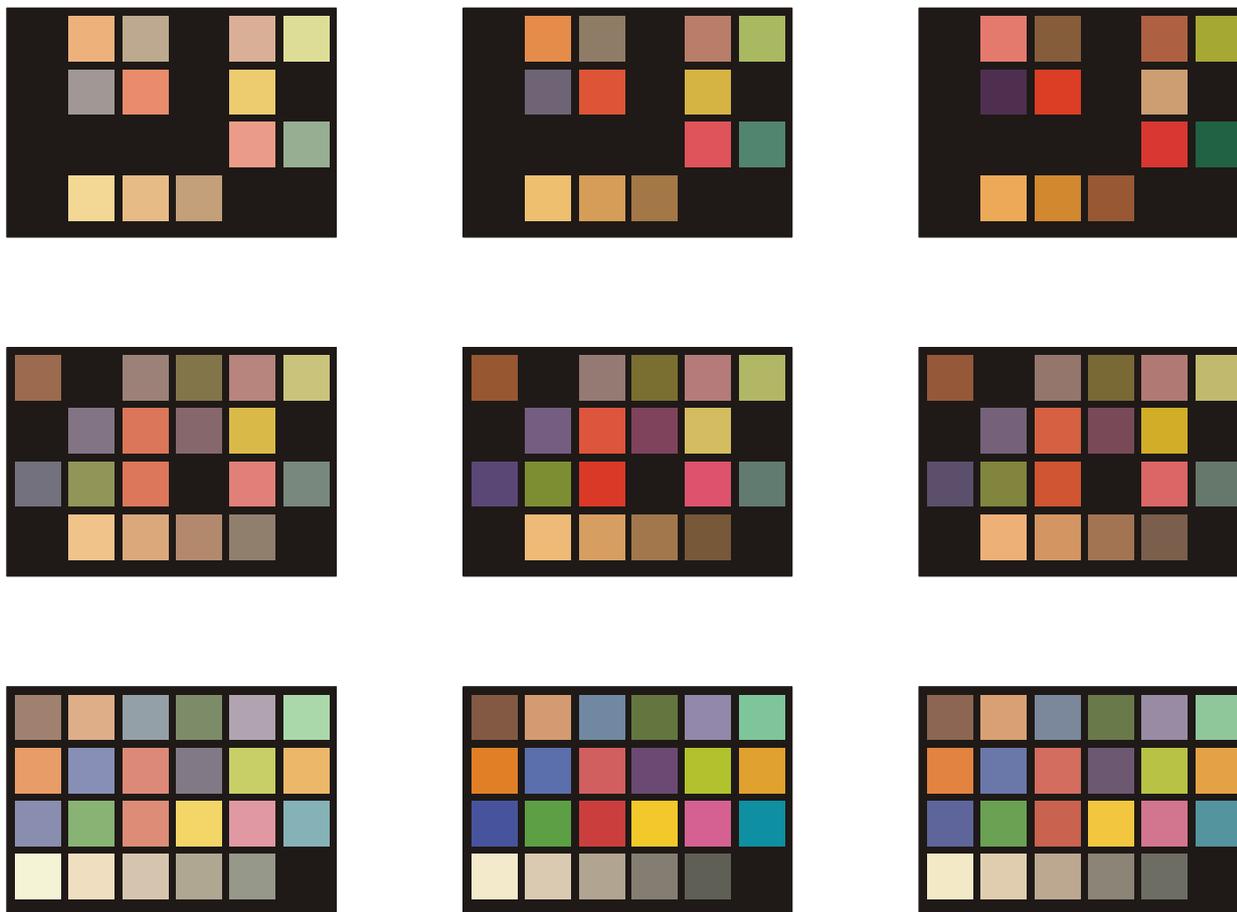


Figura 5.14: Impresión simulada de los estímulos-color capturados por nuestro dispositivo de captura con respecto a la medida directa con el tele-colorímetro PR-650. De arriba abajo: estímulos-color bajo luz INC, HWL y DAY. De izquierda a derecha: perfil colorimétrico bruto y escalado, medidas directas con PR-650, perfil colorimétrico compensado.

Hasta aquí hemos presentado todo lo referente al perfil colorimétrico n° 1, el de máxima ignorancia, pero todavía nos quedan varios perfiles más. En principio, lo que pretendíamos era averiguar cuál de los perfiles propuestos era el que conseguía mayor grado de bondad o nivel de reproducción del color. Habíamos obtenido anteriormente una primera clasificación basada en cálculos teóricos, pero nos queda ahora corroborarla. Con el mismo procedimiento que hemos aplicado extensamente al perfil colorimétrico n° 1, hemos descubierto que el tipo de corrección de color se aplicaría por igual, sea el perfil que sea (Tabla 5.7). Aparte de los perfiles de trabajo M_1 , M_2 , M_3 y M_4 , hemos considerado oportuno presentar también los resultados siguientes para los perfiles M_{1a} (combinaciones lineales exactas de T_{XYZ} que intentan ajustarse a las T_{RGB}) y M_2' (sin balance previo de blanco).

Tabla 5.7: Escalado y compensación de color de los perfiles colorimétricos brutos.

	b_x	b_y	b_z	a_x	a_y	a_z
M_1	0.1851	0.1577	0.1937	-32.65	-35.02	-30.10
M_{1a}	0.1773	0.1499	0.1864	-32.35	-34.71	-29.35
M_2	0.3314	0.3384	0.2748	-15.40	-23.77	12.81
M_2'	0.3496	0.3319	0.3039	-24.79	-38.37	12.21
M_3	0.1773	0.1549	0.1952	-31.15	-33.65	-29.63
M_4	0.1785	0.1538	0.1893	-30.79	-33.54	-31.11

A la vista de estos primeros resultados generales se puede advertir que no existen diferencias significativas entre todos los perfiles, salvo el par nº 2, el cual proporciona un escalado general de sensibilidad inferior (casi el doble) que el resto.

A partir de los resultados de las desviaciones de color en CIE-L*a*b* y según el algoritmo CRI (Tablas 5.8, 5.9, Figuras 5.15, 5.16) podemos deducir que:

Tabla 5.8: Promedios de las desviaciones de color en CIE-L*a*b* de los perfiles colorimétricos brutos escalados y compensados (c.)

	$|\Delta L^*|$	ΔL^*$	|\Delta a^*|$	Δa^*$	|\Delta b^*|$	Δb^*$	|\Delta C_{ab}^*|$	ΔC_{ab}^*$	|\Delta H_{ab}^*|$	ΔH_{ab}^*	ΔE_{ab}	ΔE_{94}
Nº 1	11.75	11.75	7.80	-4.58	10.24	-4.57	13.32	-12.89	3.41	0.27	19.70	13.14
Nº 1 c.	4.32	-1.14	6.00	1.00	8.80	2.55	10.37	-0.65	3.87	0.11	12.71	6.73
Nº 1a	11.68	11.68	7.14	-4.68	9.73	-4.21	12.36	-11.84	3.35	0.09	18.90	12.94
Nº 1a c.	4.26	-1.07	5.53	0.63	8.37	2.59	9.77	0.42	3.38	-0.12	12.02	6.44
Nº 2	8.66	8.65	12.44	-12.35	27.99	26.55	27.37	22.36	12.93	6.19	34.25	17.88
Nº 2 c.	2.72	-0.25	11.73	1.25	15.81	-5.47	16.16	10.22	10.48	-0.75	22.12	11.21
Nº 2'	12.74	12.74	18.17	-18.17	34.30	33.07	29.67	25.43	20.47	1.84	42.68	24.38
Nº 2' c.	4.59	-1.16	10.73	3.05	17.16	-6.70	15.90	8.07	10.92	-1.96	22.81	12.55
Nº 3	11.41	11.41	6.10	-4.99	10.16	-4.88	11.75	-10.92	4.25	-0.66	18.52	12.78
Nº 3 c.	4.11	-0.91	6.06	0.07	8.91	3.06	10.05	1.92	3.88	-0.71	12.56	6.58
Nº 4	11.39	11.39	6.13	-5.22	10.81	-5.73	12.19	-11.24	4.73	-1.25	19.03	12.93
Nº 4 c.	4.12	-0.88	6.40	0.23	10.01	3.74	10.97	2.39	4.69	-0.83	13.72	7.04

Tabla 5.9: Resultados del algoritmo CRI.

	IcQ	IcM	IcH	CRI
Nº 1	95.71	92.71	92.41	93.31
Nº 1 c.	97.64	95.49	94.99	95.78
Nº 1a	95.72	93.23	92.18	93.33
Nº 1a c.	97.66	95.85	95.42	96.09
Nº 2	96.28	90.40	83.85	88.59
Nº 2 c.	97.88	92.22	90.50	92.77
Nº 2'	95.21	88.65	70.70	81.32
Nº 2' c.	97.59	93.46	90.44	92.98
Nº 3	95.78	94.12	91.30	93.12
Nº 3 c.	97.67	95.74	95.11	95.91
Nº 4	95.80	94.19	90.76	92.88
Nº 4 c.	97.69	95.54	94.81	95.71

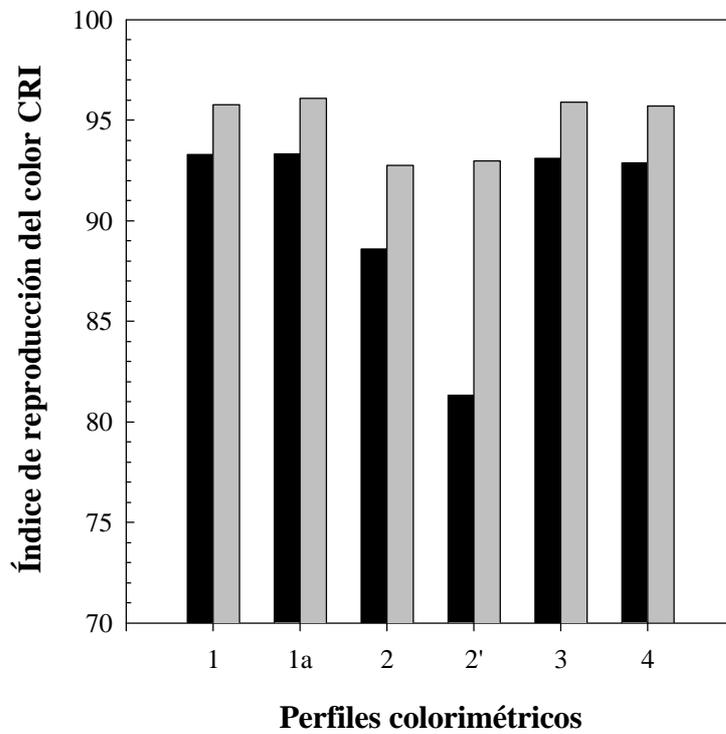
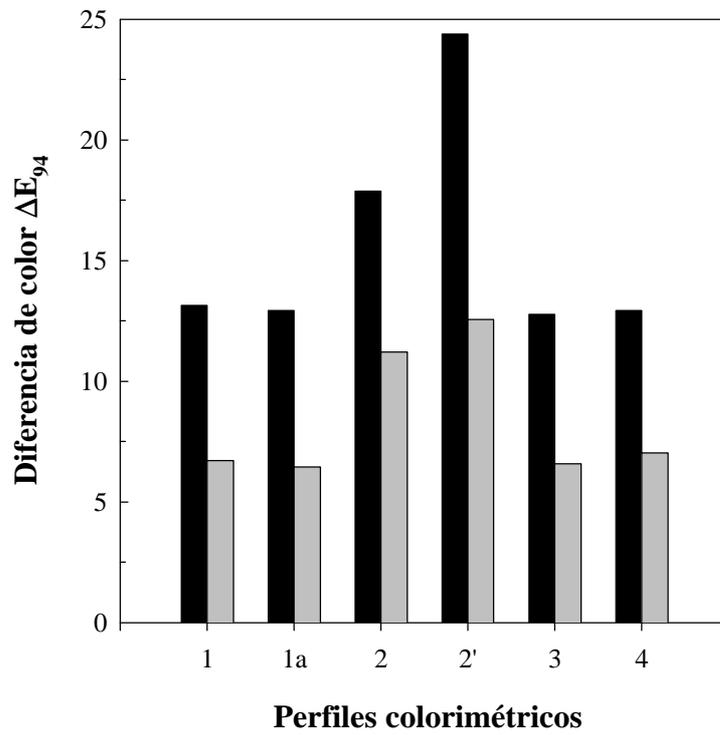


Figura 5.15: Resultados generales de los perfiles colorimétricos escalado bruto (negro) y compensado (gris).

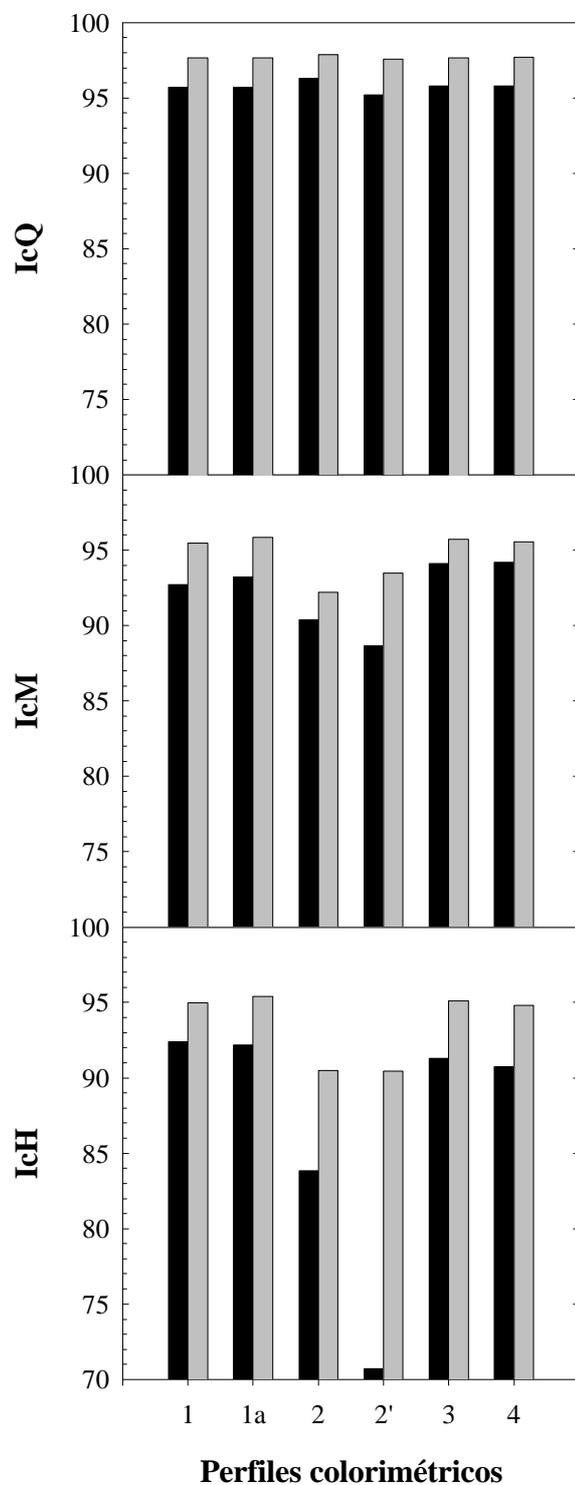


Figura 5.16: Resultados parciales de los perfiles colorimétricos bruto escalado (negro) y compensado (gris).

Evaluación del nivel de reproducción del color

- El vector \mathbf{A}_C o corrección de color reduce significativamente las desviaciones de color ΔE .
- En todos los perfiles brutos escalados, excepto en el par nº 2, se verifica que $|\Delta H_{ab}^*| < |\Delta L^*| < |\Delta C_{ab}^*|$, pero no de la misma manera con el algoritmo *CRI*, puesto que se verifica siempre que $IcH < IcM < IcQ$.
- Las desviaciones relativas de color en CIE-L*a*b* muestran que:
 - $\Delta C_{ab}^* < 0$ (colores desaturados o débiles) en los perfiles brutos escalados 1,3 y 4, pero $\Delta C_{ab}^* > 0$ (colores saturados o fuertes) en el perfil bruto escalado 2;
 - $\Delta L^* > 0$ (colores claros) en todos los perfiles brutos escalados;
 - $\Delta H_{ab}^* \approx 0$ (sin desviación apreciable de tono) en los perfiles brutos escalados 1, 3 y 4, pero $\Delta H_{ab}^* > 0$ (desviación significativa de tono y en sentido antihorario) en el perfil bruto escalado 2;
 - $\Delta a^* < 0$ (colores verdosos) en todos los perfiles brutos escalados;
 - $\Delta b^* < 0$ (colores azulados) en los perfiles brutos escalados 1, 3 y 4, pero $\Delta b^* > 0$ (colores amarillentos) en el perfil bruto escalado 2.
- *IcQ* alcanza valores similares y altos en todos los perfiles brutos escalados y compensados.
- *IcM* alcanza valores más altos y similares en los perfiles brutos escalados y compensados 1, 3 y 4, notándose significativamente el efecto de la corrección de color.
- *IcH* alcanza valores más altos y similares en los perfiles brutos escalados y compensados 1, 3 y 4, notándose significativamente el efecto de la corrección de color, mucho más que en los resultados parciales anteriores.
- Utilizando información previa de la escena (perfiles 3 y 4) se consigue alcanzar el máximo nivel de bondad, pero no muy separado del resto de los perfiles. Por otra parte, como ya era previsible por imponer una ligadura, al aplicar el perfil nº 2 la escala acromática o los niveles de luminosidad se estiman de manera óptima, pero a costa de aumentar los errores de colorido y tono. Consecuentemente, el par de perfiles nº 2 siempre es el peor. En cambio, el perfil colorimétrico nº 1, a pesar de partir de ninguna información espectrocolorimétrica previa de la escena, consigue alcanzar los mismos niveles de bondad que el mejor perfil en cada comparación general o parcial.

Hemos descubierto previamente, por tanto, que una transformación afín (vector \mathbf{A}_C) logra compensar el perfil colorimétrico bruto escalado con bastante acierto hasta los límites de aceptabilidad de discriminación cromática. Sin embargo, esta conclusión debe matizarse un poco más. El vector \mathbf{A}_C se ha aplicado a la terna de valores triestímulo absolutos XYZ y, después, se ha evaluado el grado de bondad en el espacio CIE-L*a*b*. Por tanto, los valores cromáticos compensados CIE-L*a*b* son realmente indirectos. En consecuencia, si con la transformación afín \mathbf{A}_C logramos alcanzar un nivel alto de exactitud de reproducción del color compensando los valores triestímulo XYZ, ¿no podríamos mejorar mucho más el grado de exactitud compensado directamente los valores CIE-L*a*b* brutos y escalados con respecto

los medidos? ¿Sería suficiente de nuevo una transformación afín para compensar directamente los valores CIE-L*a*b*?

Si comparamos directamente los valores L* del perfil bruto escalado (nº 1) con los medidos con el PR-650 (Fig. 5.17) obtenemos de nuevo un modelo sencillo de compensación:

Ecuación 5.21

$$L^* = -17.45 + 1.08\hat{L}^* \equiv \tilde{L}^*$$

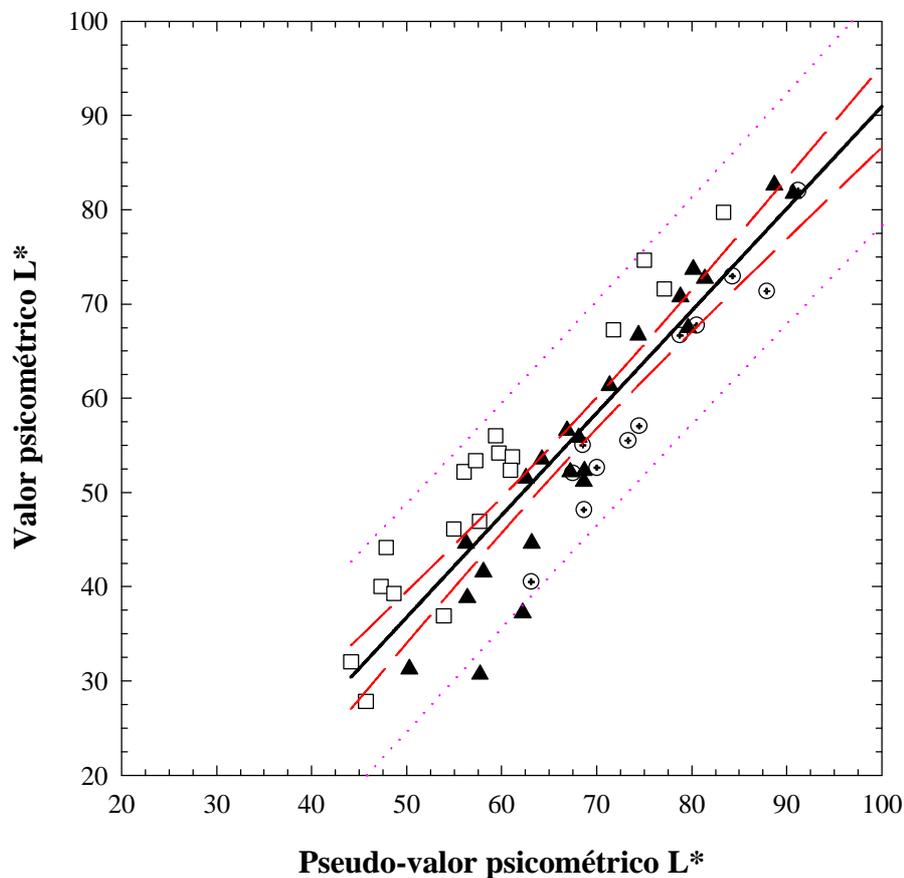


Figura 5.17: Compensación del valor psicométrico L* con el perfil colorimétrico bruto escalado nº 1. Símbolos: ⊙, estímulos bajo luz INC; □, estímulos bajo luz HWL; ▲, estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95 %; punteada, intervalos de predicción al 95 %.

Del mismo modo, si hacemos el resto de variables (a*, b*, C*, h*), obtenemos también unos modelos sencillos de compensación (Fig. 5.18-19):

Ecuación 5.22

$$a^* = 2.68 + 1.51\hat{a}^* \equiv \tilde{a}^*$$

$$b^* = -8.22 + 1.63\hat{b}^* \equiv \tilde{b}^*$$

$$C^* = \sqrt{(2.68 + 1.51\hat{a}^*)^2 + (-8.22 + 1.63\hat{b}^*)^2} = 2.43 + 1.38\hat{C}^* \equiv \tilde{C}^*$$

$$h^* = \arctg\left(\frac{-8.22 + 1.63\hat{b}^*}{2.68 + 1.51\hat{a}^*}\right) = -7.06 + 1.06\hat{h}^* \equiv \tilde{h}^* \quad [\text{deg}]$$

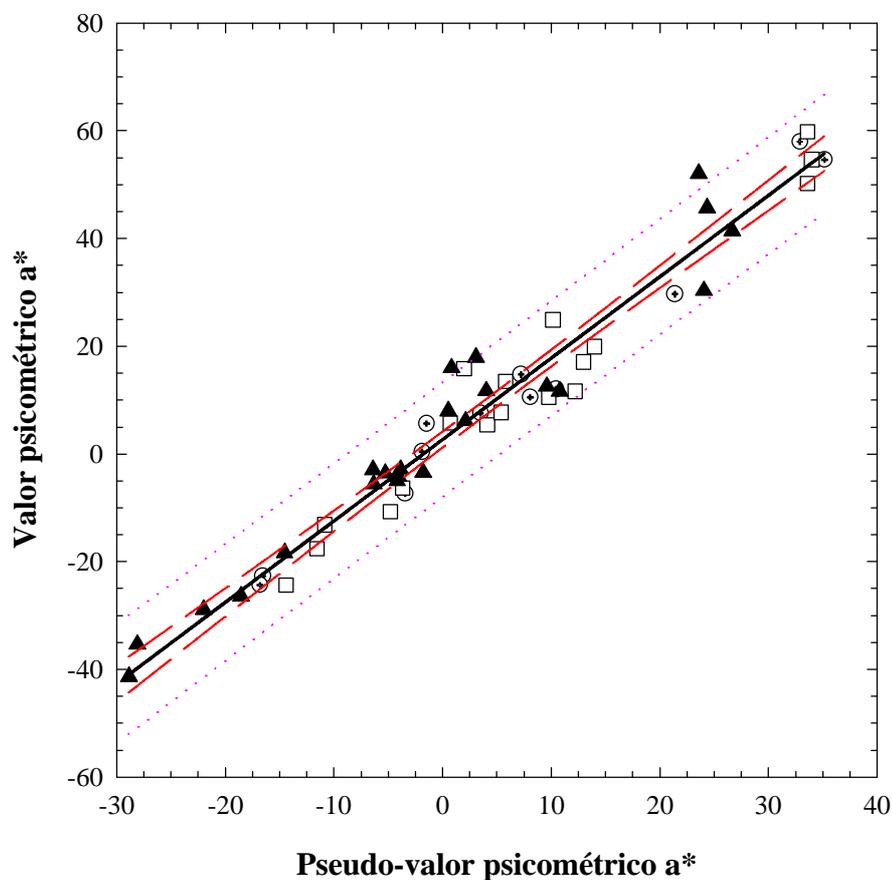


Figura 5.18: Compensación del valor psicométrico a^* con el perfil colorimétrico bruto escalado nº 1. Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95 %; punteada, intervalos de predicción al 95 %.

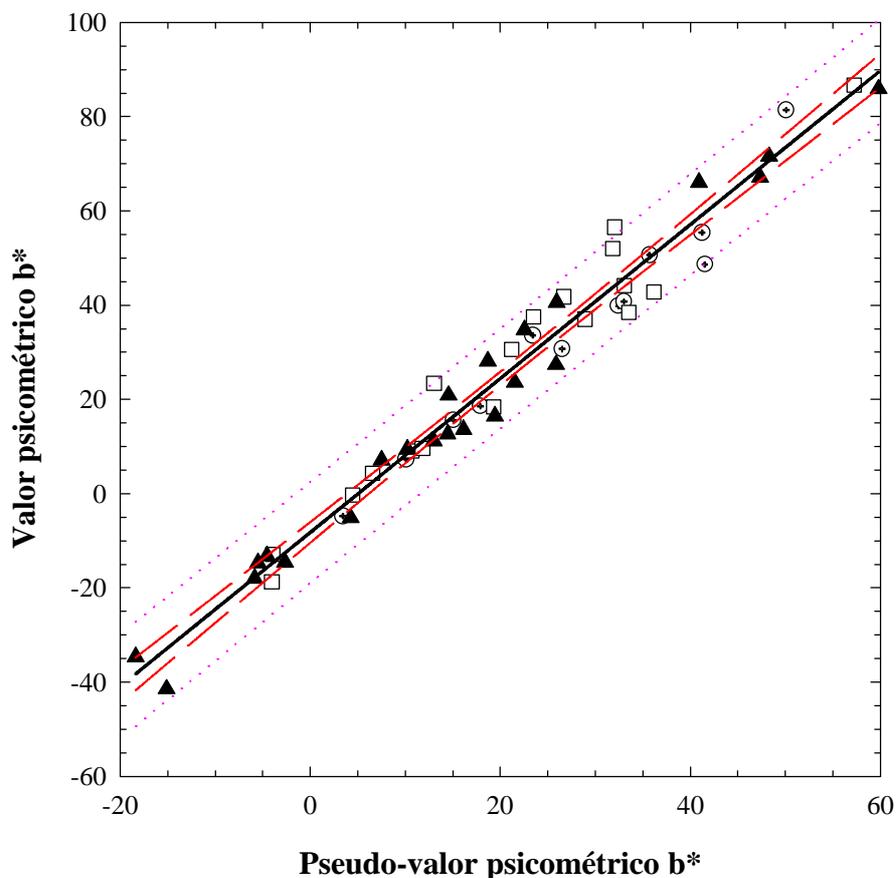


Figura 5.19: Compensación del valor psicométrico b^* con el perfil colorimétrico bruto escalado nº 1. Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY. Líneas: continua, la del ajuste lineal; discontinua, intervalos de confianza al 95%; punteada, intervalos de predicción al 95%.

Como ya sabíamos antes, nuestro dispositivo de captura aclara y desatura ligeramente los colores, de ahí la aparición de los términos de compensación $a_{L^*} = -17.45$, y $a_{C^*} = 2.43$ y $b_{C^*} = 1.38$. Lo que nos queda por comprobar es si, calculando como antes las desviaciones absolutas y relativas en CIE- $L^*a^*b^*$ de los perfiles compensado vía XYZ o $L^*a^*b^*$, vamos a mejorar bastante el grado de exactitud. Estos resultados numéricos, presentados en la Tabla 5.10, muestran claramente que compensar directamente los valores CIE- $L^*a^*b^*$ es mejor que a través de los valores triestímulo XYZ. Con los datos sobre el promedio no se puede notar quizás esta mejoría, pero sí que resalta claramente con los datos sobre las desviaciones máximas y mínimas: el segundo modelo de compensación reduce significativamente la dispersión de los datos colorimétricos.

Evaluación del nivel de reproducción del color

Tabla 5.10: Comparativa de los dos modelos de compensación de color: a la izquierda, basándonos en los valores triestímulo XYZ; a la derecha, basándonos directamente en los valores psicométricos CIE-L*a*b* obtenidos del perfil colorimétrico bruto y escalado.

Nº 1 (M ₁)	Perfil bruto escalado y compensado (A _C)			Nº 1 (M ₁)	Compensación directa de CIE-L*a*b*		
	Promedio	Máximo	Mínimo		Promedio	Máximo	Mínimo
|\Delta L^*|	4.32	29.99	0.22	|\Delta L^*|	4.77	14.38	0.59
\Delta L^*	-1.14	8.23	-29.99	\Delta L^*	0.00	14.38	-10.74
|\Delta a^*|	6.00	32.79	0.09	|\Delta a^*|	4.00	13.83	0.31
\Delta a^*	1.00	32.79	-16.79	\Delta a^*	-0.01	9.44	-13.83
|\Delta b^*|	8.80	41.48	0.64	|\Delta b^*|	4.21	12.58	0.17
\Delta b^*	2.55	41.48	-19.61	\Delta b^*	-0.07	10.81	-12.58
|\Delta C_{ab}^*|	10.37	39.98	0.22	|\Delta C_{ab}^*|	4.77	14.92	0.03
\Delta C_{ab}^*	-0.65	39.98	-20.15	\Delta C_{ab}^*	-0.75	12.14	-14.92
|\Delta H_{ab}^*|	3.87	27.62	0.02	|\Delta H_{ab}^*|	3.24	11.24	0.05
\Delta H_{ab}^*	0.11	27.62	-10.53	\Delta H_{ab}^*	-1.68	6.56	-11.24
\Delta E_{ab}	12.71	46.24	2.24	\Delta E_{ab}	8.49	20.65	2.27
\Delta E_{94}	6.59	34.40	1.81	\Delta E_{94}	5.93	15.95	1.82

Por tanto, un modelo completo de compensación de color debería incluir un vector desplazamiento \mathbf{A}_C , para la terna triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} , y, una transformación afín similar para los valores psicométricos CIE-L*a*b*.

Ecuación 5.23

$$\mathbf{t}_{XYZ} = \mathbf{A}_C + \hat{\mathbf{t}}_{XYZ} \quad , \quad \text{con} \quad \hat{\mathbf{t}}_{XYZ} = \mathbf{B}_C \cdot \mathbf{M} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} m_R(N) & 0 & 0 \\ 0 & m_G(N) & 0 \\ 0 & 0 & m_B(N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_R(N) \\ h_G(N) \\ h_B(N) \end{bmatrix} \end{array} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \\ C_{ab}^* \\ h_{ab}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{L^*} \\ a_{a^*} \\ a_{b^*} \\ a_{C^*} \\ a_{h^*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{L^*} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{a^*} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{b^*} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{C^*} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{h^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{L}^* \\ \hat{a}^* \\ \hat{b}^* \\ \hat{C}_{ab}^* \\ \hat{h}_{ab}^* \end{bmatrix}$$

5.3.2.2 Cálculo del grado de precisión

Una vez que ya hemos analizado el nivel bruto y compensado de exactitud de nuestro sistema, nos queda averiguar su grado de precisión con respecto también el tele-colorímetro PR-650. En principio, la precisión se divide en repetibilidad (a corto plazo) y reproducibilidad (repetibilidad a largo plazo). Nosotros hemos analizado solamente la repetibilidad, dando por sentado que el grado de reproducibilidad es excelente dadas las garantías que supone trabajar con marcas tan consolidadas como Sony y Matrox dentro de las tecnologías multimedia. Los datos de partida se encuentran en las Tablas 4.3-5 y el

procedimiento básico de propagación de errores aleatorios se explicó en el primer capítulo (§ 1.1.2). De los datos cromáticos iniciales cabe apuntar los aspectos siguientes:

- La matriz covarianza \mathbf{S}_{XYZ} de los datos XYZ medidos no es diagonal, es decir, s_{XY} , s_{XZ} y $s_{YZ} \neq 0$. En cambio, la matriz covarianza \mathbf{S}_{ND} de los datos digitales RGB capturados sí es diagonal.
- La matriz covarianza \mathbf{S}_{ND} se formó a partir del muestreo estadístico "espacial" sobre el área-color correspondiente de la escena, la cual se utilizó posteriormente en el análisis optoelectrónico o comportamiento de transferencia fotónica de nuestro dispositivo de captura (§ 4.5). En principio, estos datos estadísticos no deberían utilizarse para la propagación de errores aleatorios, más bien, deberían ser las fluctuaciones aleatorias de los valores medios del área-color. Sin embargo, al ejecutar el procedimiento correcto, se comprobó que los valores correctos de dispersión no se alejan significativamente de los que ya se utilizaron. Al contrario, las mismas tendencias de reducción de las varianzas, cuando el valor medio correspondiente se acerca a los extremos del rango dinámico de respuesta, se obtienen de un modo o de otro. Por tanto, sin ninguna pérdida de generalidad, hemos supuesto que la anterior matriz covarianza representa sin problemas la aleatoriedad de nuestro dispositivo de captura.

Antes de proseguir y presentar los resultados obtenidos, creemos que es importante analizar en conjunto la cadena de procesos que sufren los datos cromáticos, desde RGB hasta $L^*a^*b^*$, pasando por XYZ. Los datos colorimétricos del perfil bruto dependen exclusivamente de un modelo de caracterización, más o menos acertado, pero en ningún momento, nos parecería acertado incluir la influencia de la aleatoriedad de parámetros como la apertura relativa N , los valores de balance de blanco bal_k o los parámetros de ajuste m_k y h_k de la adaptación luminosa, que la tienen, al obtenerlos mediante modelos estadísticos de regresión (salvo N). De igual modo, al escalar adecuadamente con la matriz diagonal \mathbf{B}_C el perfil colorimétrico bruto, tampoco nos parecería acertado incluir la aleatoriedad los valores b_k , que la tienen. Y, de forma análoga, si aplicáramos el vector de compensación \mathbf{A}_C . Sabemos que en la teoría de propagación de errores aleatorios, cualquier variable nueva monodimensional que intervenga en el algoritmo de cálculo, multiplicando o sumando, interviene con un efecto inevitablemente aditivo en el cálculo del error final. Consecuentemente, si consideráramos las varianzas de todas las variables que intervienen en el proceso de caracterización colorimétrica, desde el balance de blanco hasta la corrección de color pasando por el balance de adaptación luminosa y el escalado final, la varianza final resultante sería bastante grande, mucho más que si partiéramos solamente de aspectos puramente colorimétricos, es decir, utilizando las nuevas variables, pero sin su incertidumbre. Esto es así porque todas las variables de la caracterización intervienen de forma unidimensional, es decir, con el canal-color correspondiente, sin la intervención de términos cruzados, salvo la matriz de cambio de base \mathbf{M} . Por tanto, el nivel máximo (error mínimo) de precisión de nuestro sistema está íntimamente correlacionado con el proceso colorimétrico que tiene lugar: este error es el mismo si los datos son brutos, si están escalados, o si están compensados, ya sean en XYZ o en $L^*a^*b^*$. Por eso, pensamos que resultaría más acertado analizar el grado de precisión de nuestro sistema con respecto al PR-650 a este nivel, porque el primer sistema debe sufrir varios procesos algorítmicos para acercarse al funcionamiento del último, y, en cambio, éste último

Evaluación del nivel de reproducción del color

permanece inalterado. Por tanto, el análisis de precisión de nuestro sistema se realizará al nivel máximo posible de bondad, dando por sentado que, de manera más realista, o quizás más matemática que no colorimétrica, es inferior e inevitable.

Con estos preliminares, solamente nos resta aplicar con el perfil colorimétrico \mathbf{M}_1 :

Ecuación 5.24

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{XYZ}} = \mathbf{B}_C \mathbf{M}_1 \mathbf{D}(N) \mathbf{B}_a \mathbf{S}_{\text{ND}} \mathbf{B}_a^t \mathbf{D}(N)^t \mathbf{M}_1^t \mathbf{B}_C^t, \quad \text{siendo } \mathbf{S}_{\text{ND}} = \begin{bmatrix} s_R^2 & 0 & 0 \\ 0 & s_G^2 & 0 \\ 0 & 0 & s_B^2 \end{bmatrix}$$

Y, para los valores psicométricos CIE-L*a*b*:

Ecuación 5.25

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{Lab}} = \mathbf{J}_{\text{Lab}} \hat{\mathbf{S}}_{\text{XYZ}} \mathbf{J}_{\text{Lab}}^t, \quad \text{con } \mathbf{J}_{\text{Lab}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{-2/3} L_E^{-1/3} & 0 & 0 \\ 0 & Y^{-2/3} L_E^{-1/3} & 0 \\ 0 & 0 & Z^{-2/3} L_E^{-1/3} \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{LCh}} = \mathbf{J}_{\text{LCh}} \hat{\mathbf{S}}_{\text{Lab}} \mathbf{J}_{\text{LCh}}^t, \quad \text{con } \mathbf{J}_{\text{LCh}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a^*}{C_{ab}^*} & \frac{b^*}{C_{ab}^*} \\ 0 & -\frac{b^*}{(C_{ab}^*)^2} & \frac{a^*}{(C_{ab}^*)^2} \end{bmatrix}$$

Si comparamos la magnitud de la desviación estadística s entre nuestro dispositivo de captura y el telecolorímetro (Fig. 5.20-27) para las variables cromáticas XYZ y L*a*b*C*h*, se encuentran las tendencias generales siguientes:

- Los perfiles de desviación estadística, más o menos abruptos según el valor cromático correspondiente, son casi paralelos en XYZ, pero ya no tanto en L*a*b*C*h*. O sea, que si $X(i-1) < X(i) > X(i+1)$, o cualquier otra combinación, es bastante probable en los datos XYZ que $s_X(i-1) < s_X(i) > s_X(i+1)$ para ambos sistemas de medida.
- En los datos XYZ la diferencia $s(\text{estimado}) - s(\text{medido})$ es variable, habiendo ejemplos evidentes donde $s(\text{estimado}) < s(\text{medido})$.

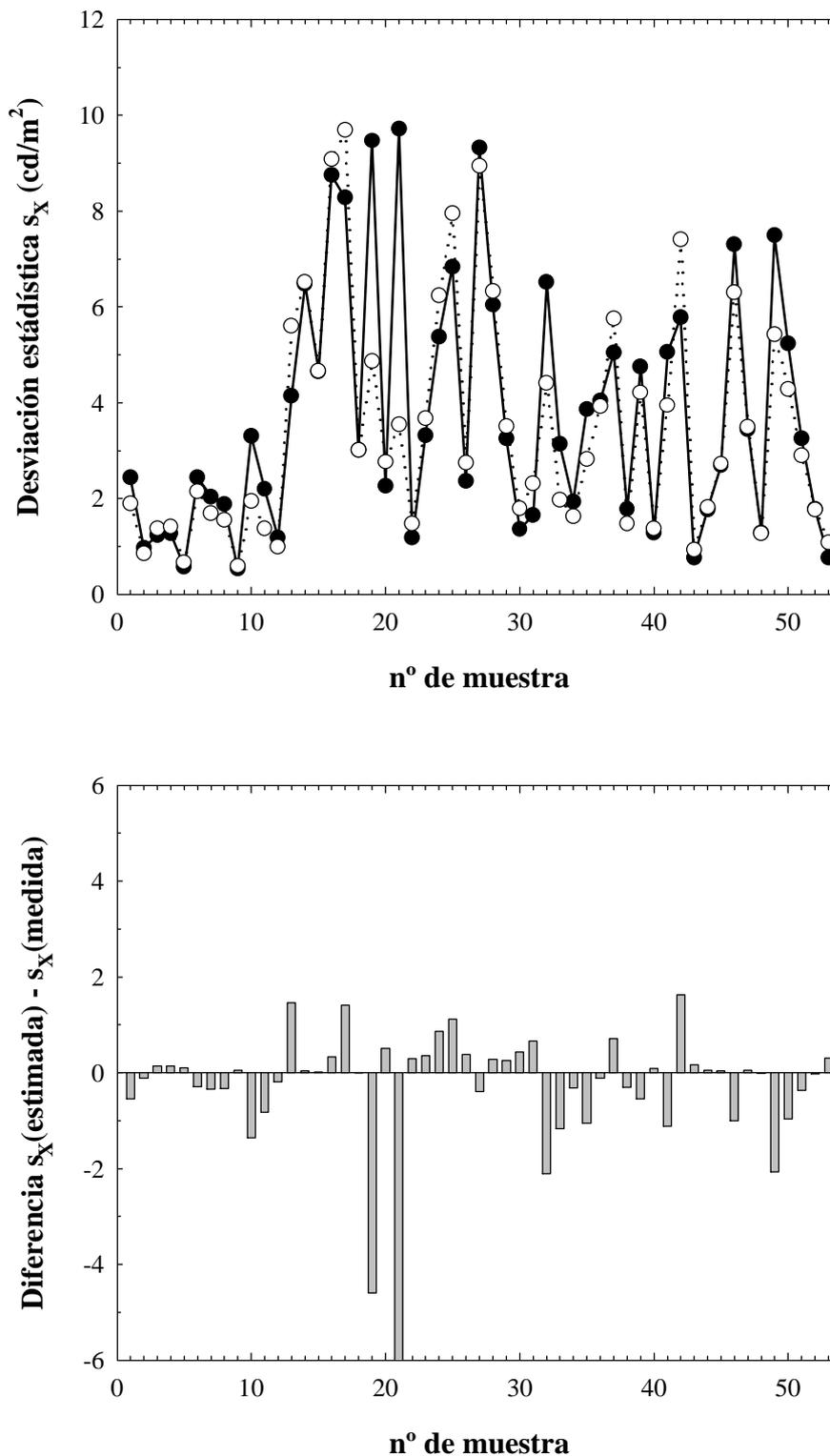


Figura 5.20: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor triestímulo X (cd/m^2) de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

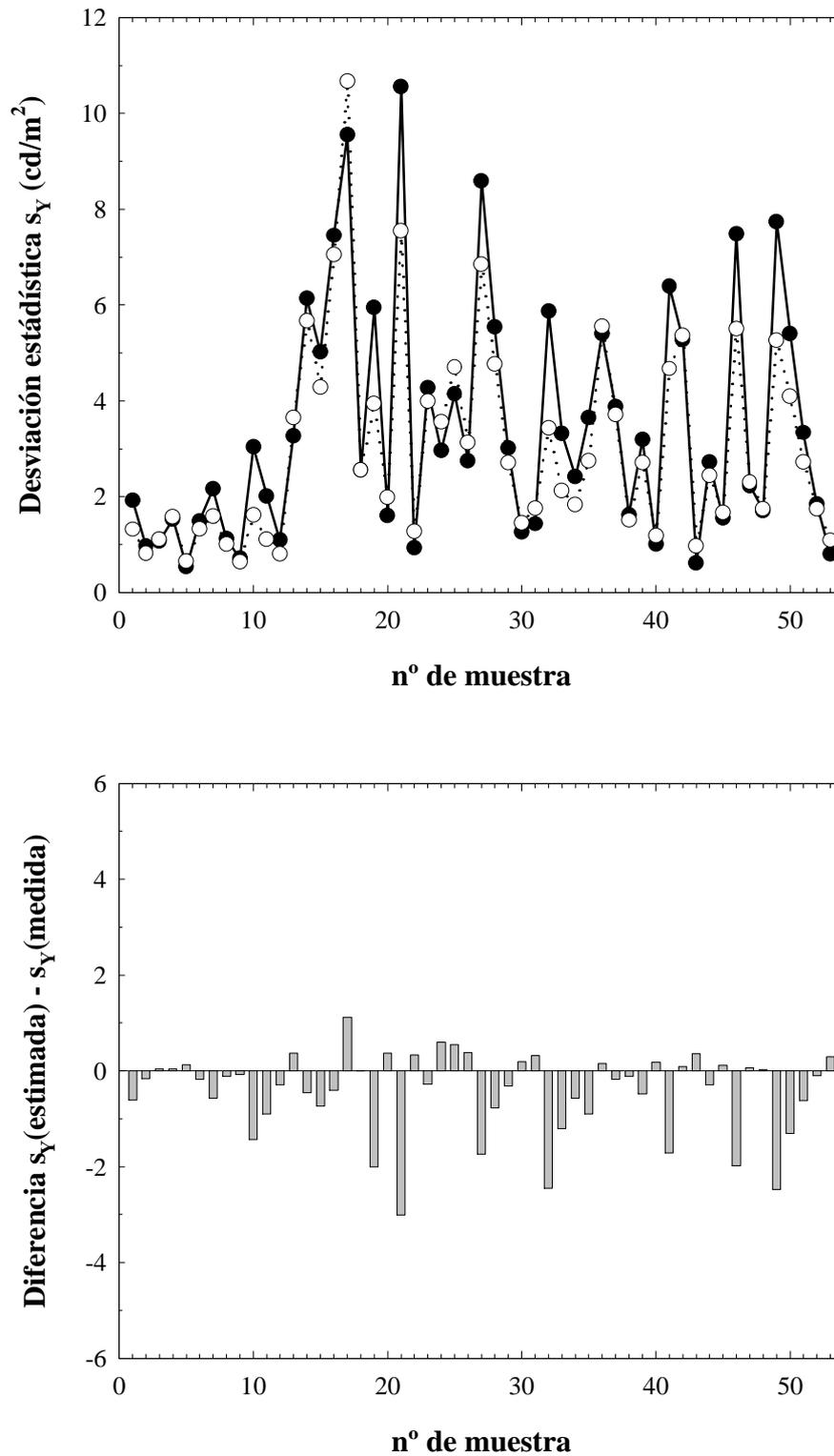


Figura 5.21: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor triestímulo Y (cd/m²) de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

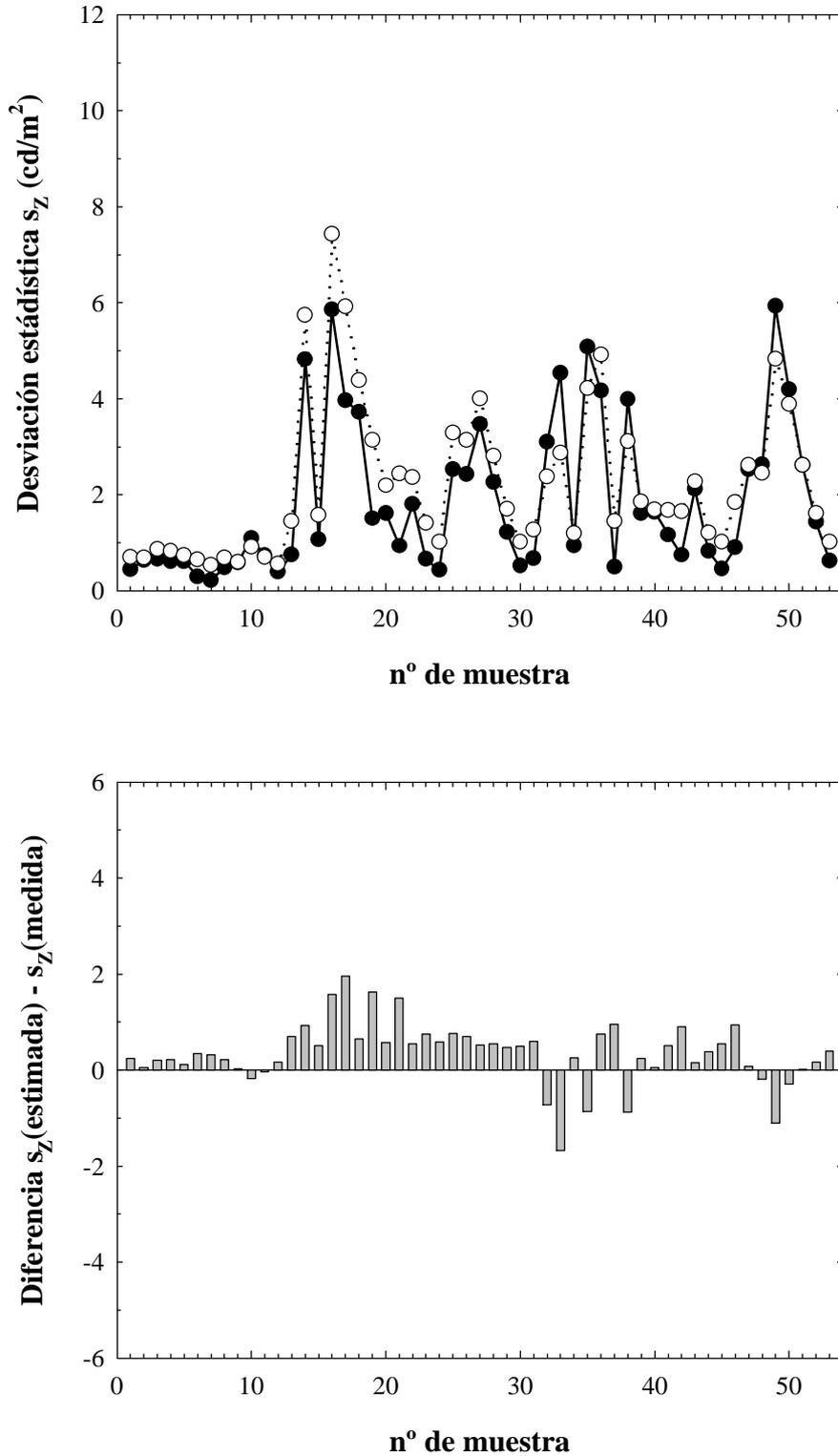


Figura 5.22: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor triestímulo Z (cd/m^2) de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

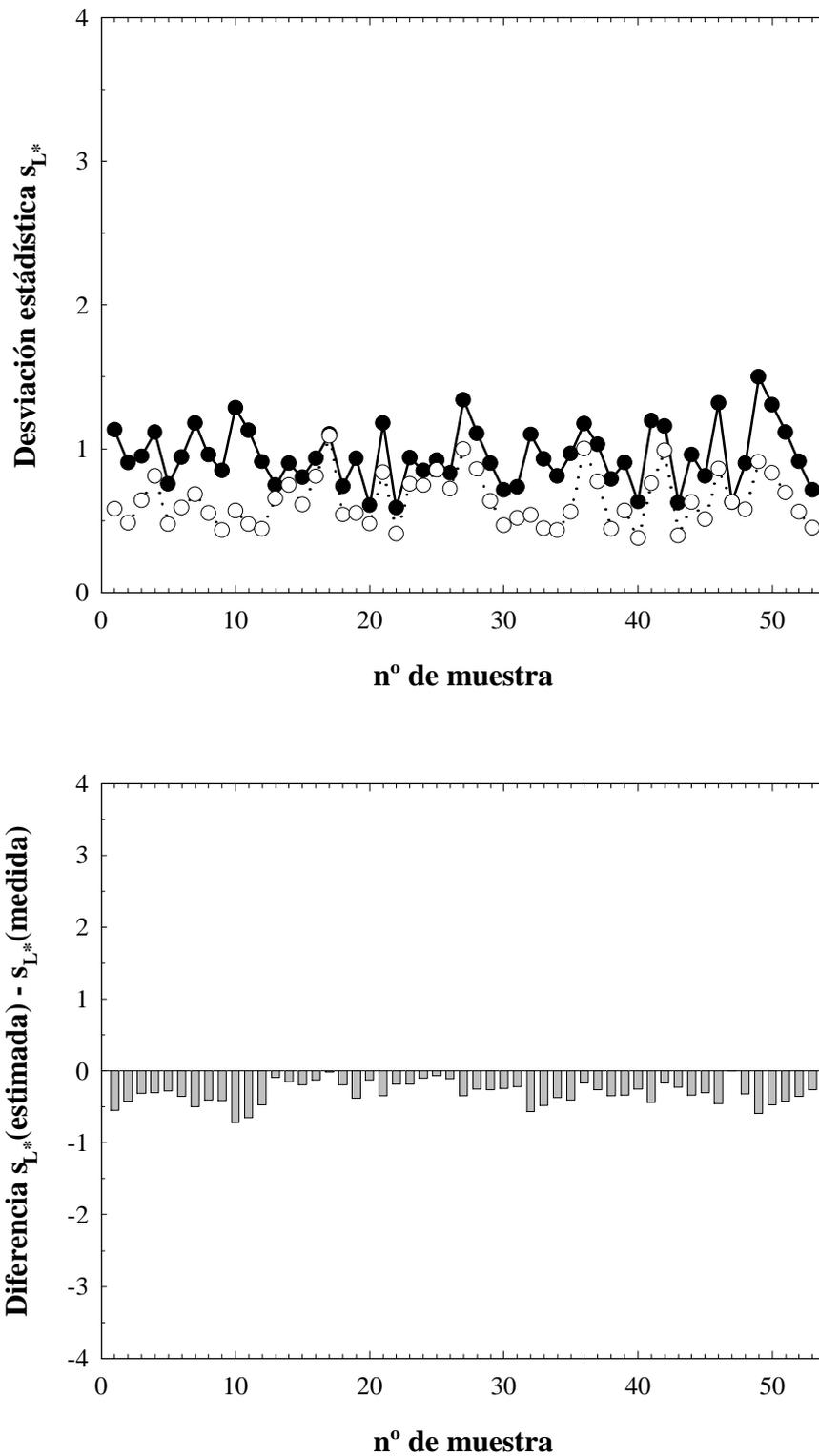


Figura 5.23: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor psicométrico L^* de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

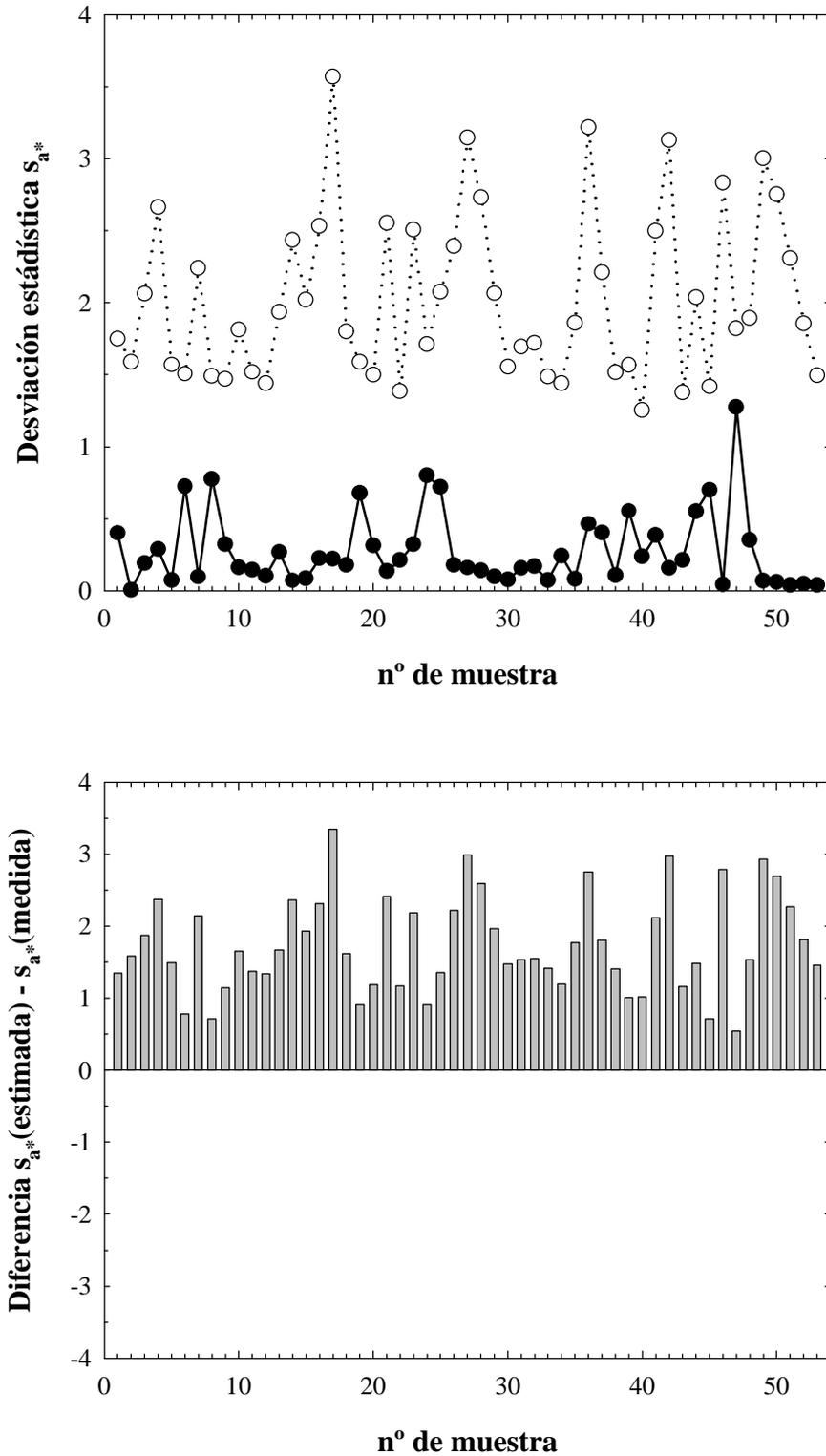


Figura 5.24: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor psicométrico a^* de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

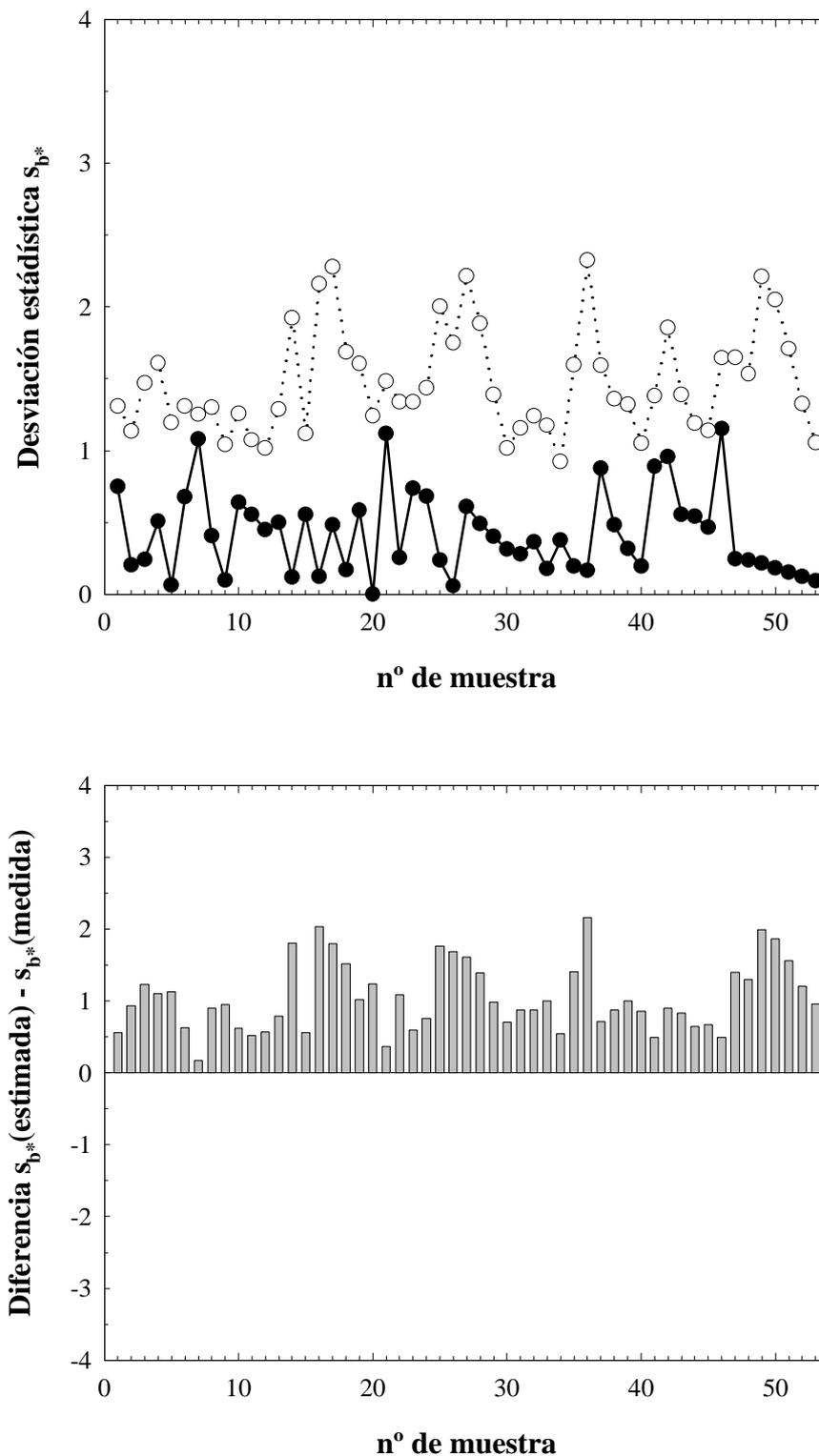


Figura 5.25: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor psicométrico b^* de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

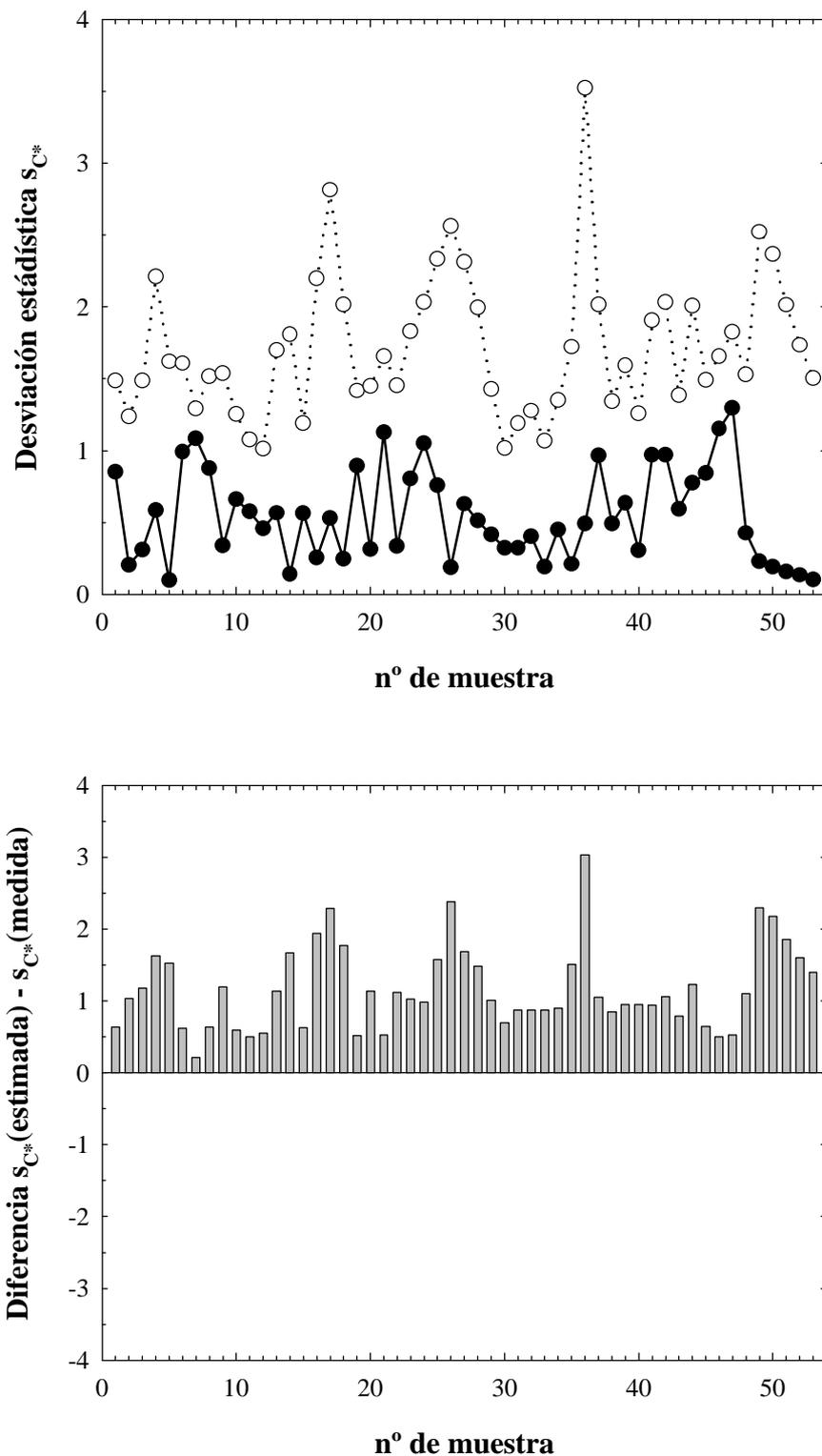


Figura 5.26: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor psicométrico C^* de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

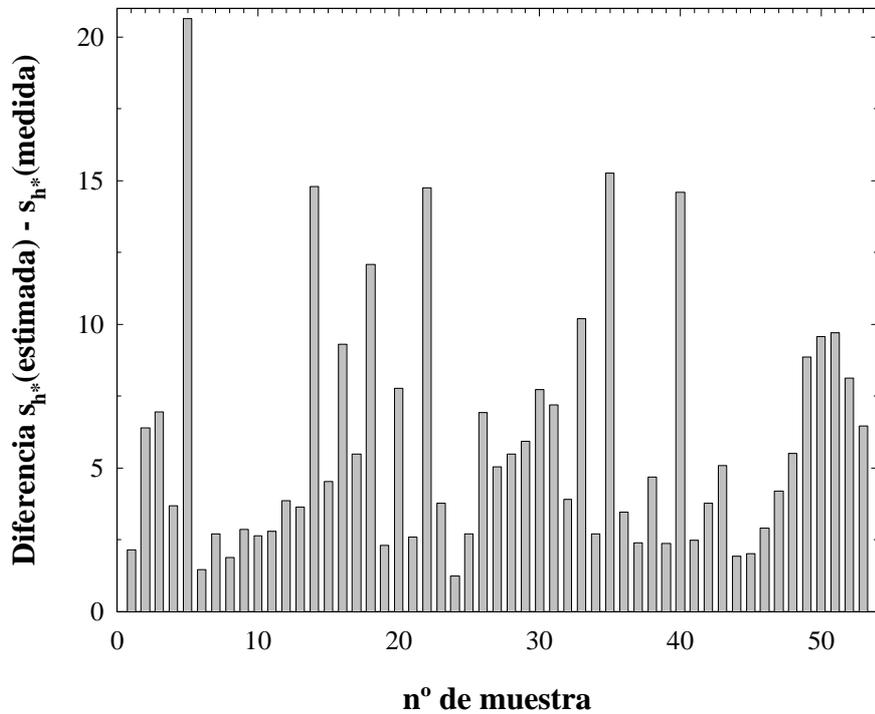
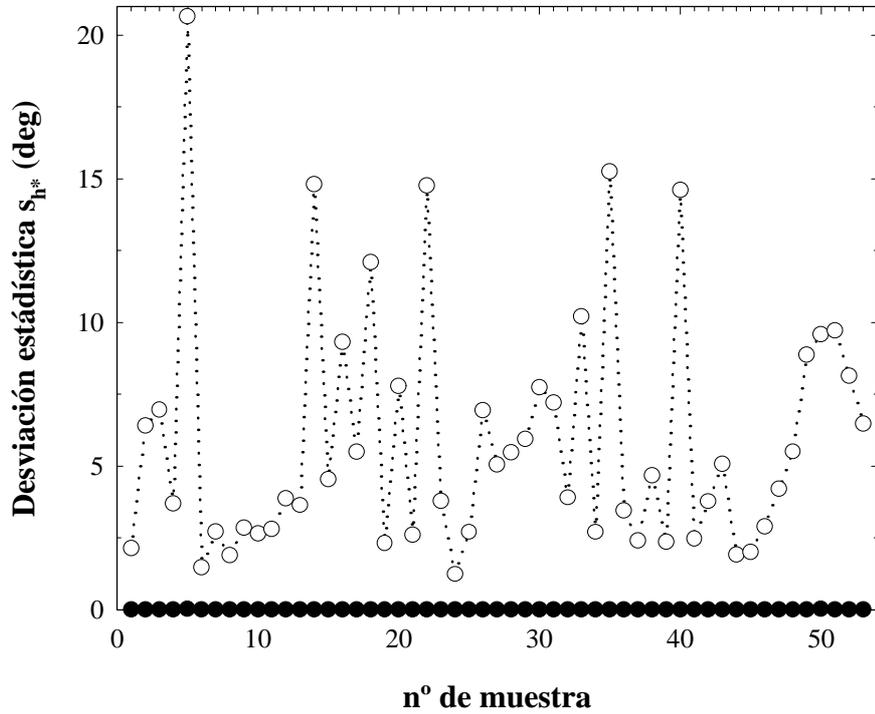


Figura 5.27: Comparación de los errores (desviación estadística) del valor psicométrico h^* (deg) de los 53 estímulos-color entre el tele-colorímetro (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

- En los datos L^* , siempre se observa que $s(\text{estimado}) < s(\text{medido})$, pero la diferencia es bastante menor que en el resto de variables psicométricas.
- En los datos $a^*b^*C^*h^*$, siempre se observa que $s(\text{estimado}) > s(\text{medido})$.

Por tanto, como conclusión final, si nos atenemos a datos cromáticos XYZ, nuestro dispositivo de captura presenta un nivel similar de precisión que el tele-colorímetro. Este grado de bondad puede cuantificarse mejor comparando la incertidumbre relativa o precisión relativa $v = s/m$ entre ambos sistemas. Para ello, utilizaremos como valor medio los valores cromáticos ya compensados. A la vista, por tanto, de las figuras siguientes (Fig. 5.28-31) y de la tabla siguiente (Tabla 5.11) podemos concluir que:

Tabla 5.11: Incertidumbres relativas (valor medio y error estándar) de nuestro dispositivo de captura, con perfil colorimétrico compensado (c), y el tele-colorímetro PR-650 (m).

	X		Y		Z		L*		a*		b*		C*		h*	
	c	m	c	m	c	m	c	m	c	m	c	m	c	m	c	m
v	4.43	3.99	4.65	3.99	6.63	3.99	1.24	1.73	17.77	1.34	8.16	1.37	9.20	1.36	7.90	0.01
s_v	0.43	0.01	0.84	0.01	0.71	0.01	0.07	0.02	2.42	0.03	1.05	0.07	1.03	0.03	1.96	0.00

- Nuestro dispositivo de captura, salvo para el valor psicométrico L^* , presenta siempre un coeficiente de dispersión (incertidumbre relativa) superior a la del PR-650.
- Para los datos XYZ compensados, los coeficientes de dispersión, aún siendo superiores a los del PR-650, son ligeramente mayores ($< 7\%$), por lo que podemos concluir que el grado de precisión relativa entre ambos sistemas es bastante similar.
- Para los datos $L^*a^*b^*C^*h^*$, salvo el primero, los coeficientes de dispersión son, en general, elevados, sobretodo el asociado al valor psicométrico a^* . Por tanto, podemos concluir que el grado de precisión relativa en CIE- $L^*a^*b^*$ es inferior que en CIE-XYZ para nuestro dispositivo de captura.
- En consecuencia, creemos que es necesario realizar para acciones futuras lo siguiente:
 - Tomar un conjunto-entrenamiento de estímulos-color mucho más numeroso, por lo menos 500 colores, y otros tantos como conjunto-test, de variada cromaticidad y factor de luminancia. Podemos mantener la carta ColorChecker como escena-entrenamiento pero ampliar el rango de fuentes luminosas, tanto en cromaticidad como en intensidad, y seleccionar como conjunto-test colores asociados a objetos reales. Esta ampliación repercutirá positivamente tanto en el grado de exactitud como en el de precisión de nuestro dispositivo de captura perfilado y compensado.
 - Encontrar algún algoritmo que nos permita averiguar cuál es el número óptimo de muestreo estadístico (k óptimo) para acercar el grado de precisión relativa a la del tele-colorímetro.

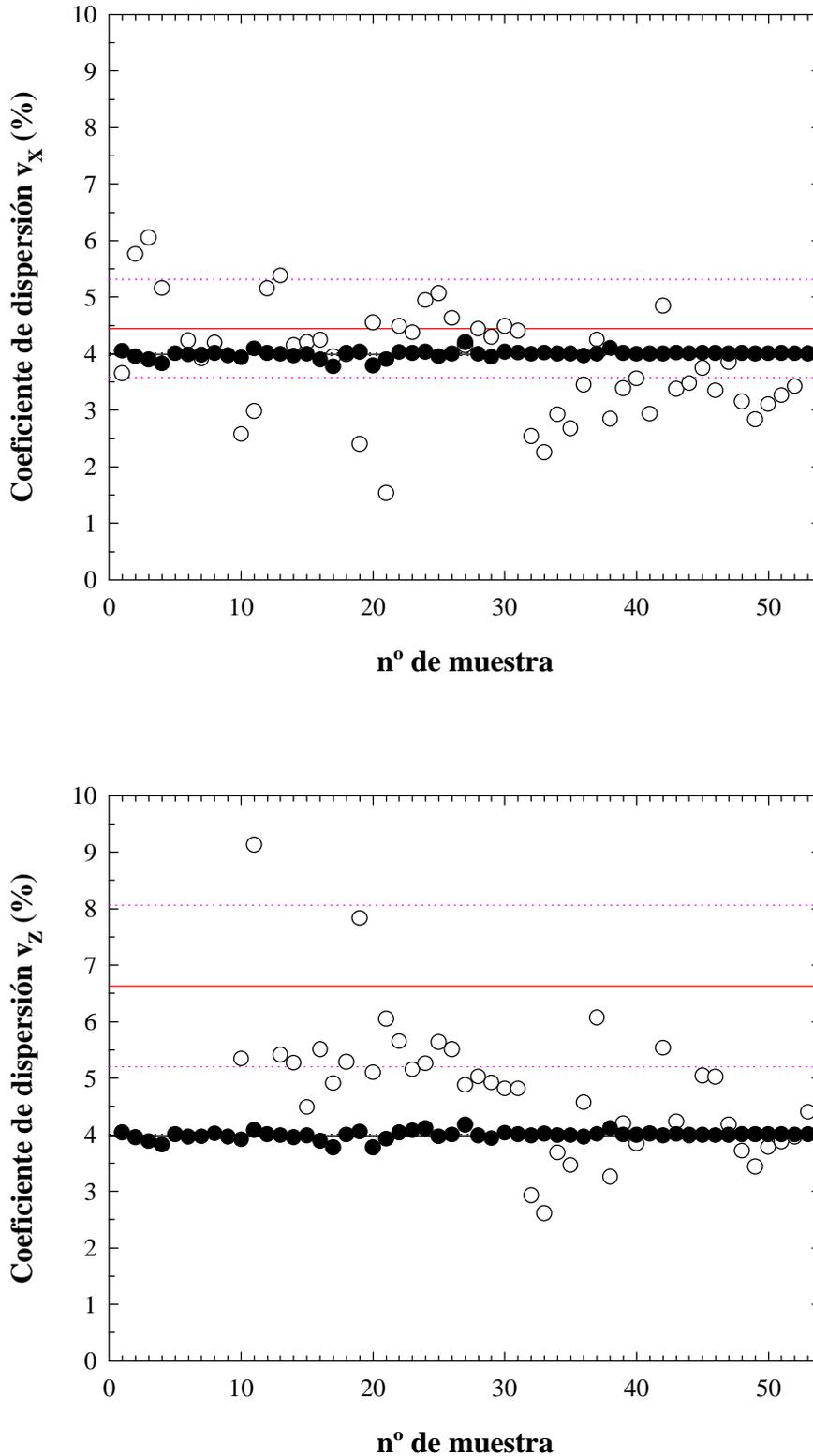


Figura 5.28: Incertidumbre relativa de las 53 muestras-color para los valores triestímulo X (arriba) y Z (abajo) del telecolorímetro PR-650 (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

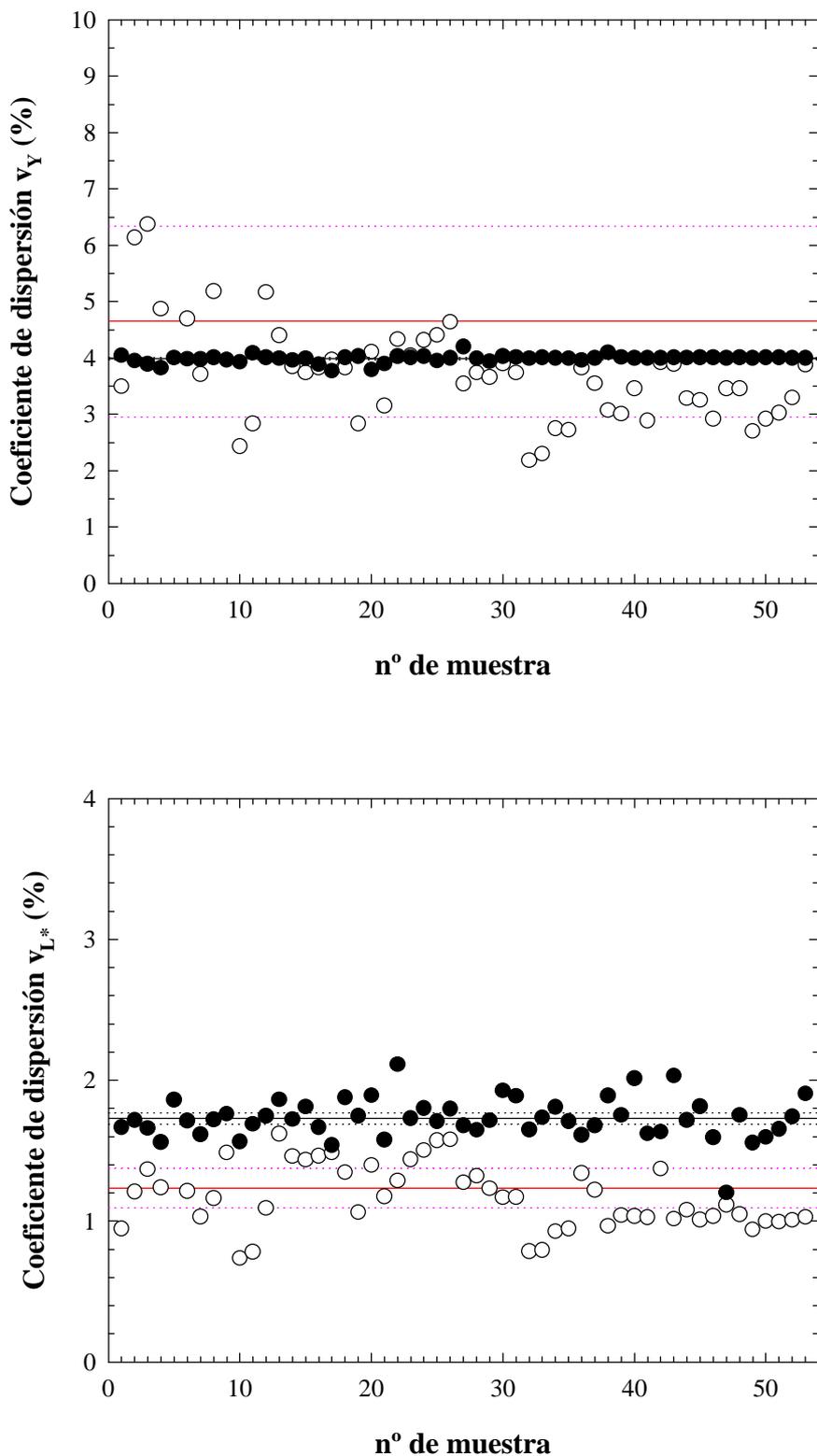


Figura 5.29: Incertidumbre relativa de las 53 muestras-color para los valores triestímulo Y (arriba) y el valor psicométrico L^* (abajo) del telecolorímetro PR-650 (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

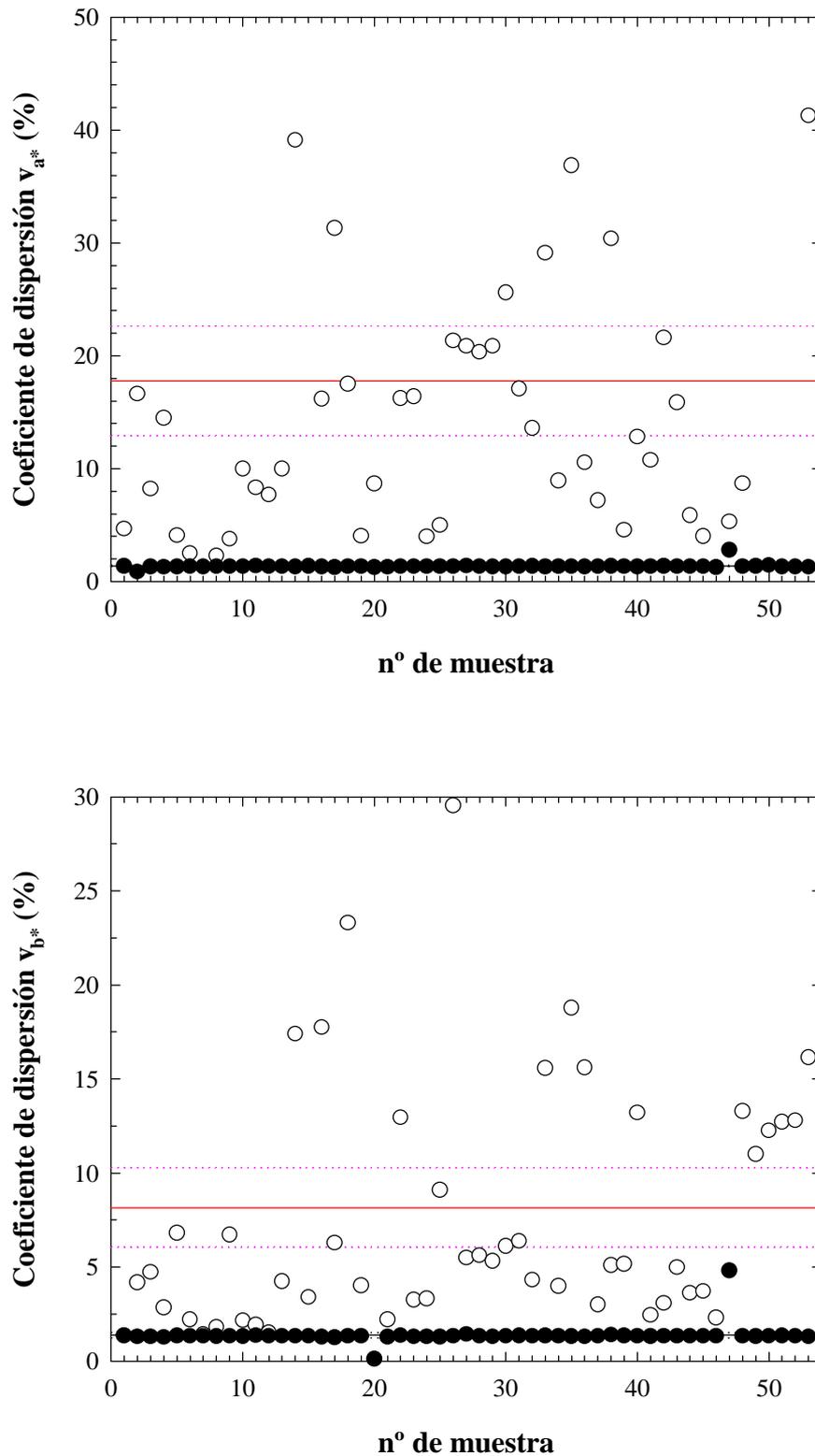


Figura 5.30: Incertidumbre relativa de las 53 muestras-color para los valores psicométricos a^* (arriba) y b^* (abajo) del telecolorímetro PR-650 (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

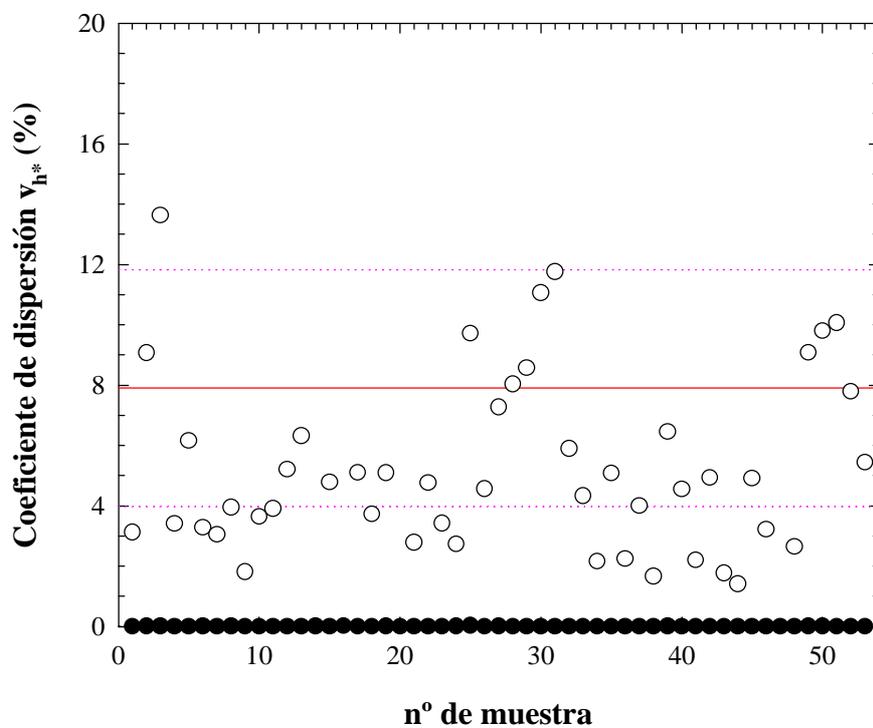
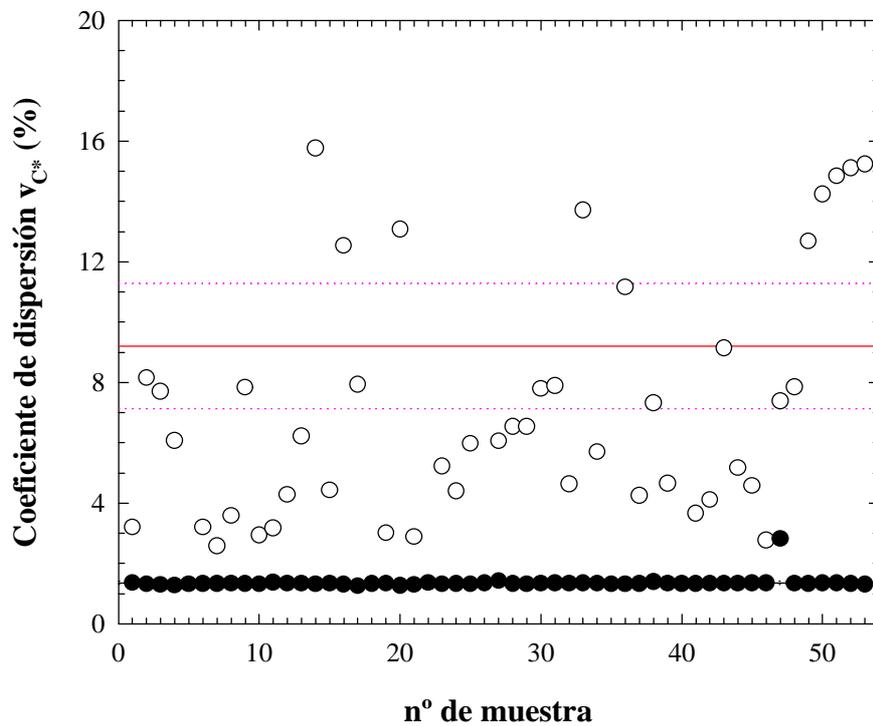


Figura 5.31: Incertidumbre relativa de las 53 muestras-color para los valores psicométricos C^* (arriba) y h^* (abajo) del telecolorímetro PR-650 (símbolos oscuros) y nuestro dispositivo de captura (símbolos claros).

5.4 Sobre la determinación de la gama de colores reproducibles

A pesar de que el objetivo principal de la caracterización colorimétrica de nuestro dispositivo de captura se ha alcanzado ya, creemos, por otra parte, que resulta muy interesante y complementario realizar un análisis de su gama de colores reproducibles comparándola con la del observador patrón CIE-1931 XYZ. La razón subyacente es bastante simple: si nuestro dispositivo de captura presenta siempre a nivel bruto (y escalado) errores sistemáticos de reproducción, ¿se reparten tales errores de forma homogénea por el espacio de color, o, por el contrario, se agrupan según regiones bien definidas según la claridad, el tono y/o el croma?

5.4.1 Consideraciones iniciales

A diferencia de otros dispositivos multimedia como las pantallas de visualización y las impresoras, la obtención de la gama de colores reproducibles de un dispositivo de captura no es tan simple y directa como podría parecer. En el caso de los otros dispositivos mencionados, la existencia de una relación biunívoca entre los valores cromáticos dependientes \mathbf{ND} y los valores triestímulo \mathbf{t}_{XYZ} en la caracterización colorimétrica delimita matemática y físicamente el conjunto de colores reproducibles (§ Fig. 1.10). Es decir, dado un color "digital" RGB de una pantalla de visualización o CMYK de una impresora, le corresponde una y sólo una especificación XYZ. En cambio, en los dispositivos de captura, debido al metamerismo del dispositivo, existen infinitos estímulos-color \mathbf{b} que pueden captarse con la misma codificación RGB, aún cuando algunos de ellos pueden codificarse con ternas XYZ diferentes. La disparidad entre estos grupos de dispositivos se debe básicamente a la interacción iluminante-objeto-observador. En el caso de una captura luminosa, el efecto del metamerismo del dispositivo queda bastante claro, como así ocurre en el observador patrón CIE-1931 XYZ. Sin embargo, en modo visualización, ya sea un estímulo-color en pantalla o sobre papel impreso, la generación de tal estímulo se debe exclusivamente a una codificación dependiente del dispositivo en cuestión: ninguna especificación RGB o CMYK puede generar aleatoriamente estímulos-color puesto que la tecnología implícita de generación del color en estos dispositivos limita tal variabilidad.

Este problema puede también abordarse con la cuestión siguiente: ¿cuántos colores puede distinguir un dispositivo de captura? En el caso de pantallas de visualización e impresoras, la pregunta podría contestarse parcialmente del modo siguiente: si la profundidad por canal RGB (CMYK) es de 8 bits (256 niveles), la pantalla de visualización (impresora) podría generar 16.8 (4295) millones de estímulos-color, pero serían muchísimos menos los que podríamos discernir sin problemas debido a las limitaciones de discriminación cromática de nuestro sistema visual. En un dispositivo de captura, un conjunto infinito de estímulos-color se reduce a un conjunto finito de ternas triestímulo debido al principio de univariancia. Se trata de averiguar cuáles de estas ternas triestímulo son simultáneamente discriminables por el sistema visual humano.

Podríamos plantear tres estrategias de trabajo para analizar este problema colorimétrico:

1. Representación del triángulo de reproducción a partir de la obtención de los primarios asociados. Dado que cualquier dispositivo de captura es un sistema aditivo de reproducción del color, podríamos representar gráficamente el triángulo de primarios asociados. Por tanto, determinadas las pseudo-funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} y el perfil colorimétrico \mathbf{M} , podemos obtener la especificación triestímulo XYZ de los primarios asociados $\mathbf{P}_{\text{RGB}_t}$ a partir de las columnas de la matriz \mathbf{M} y comparar así con otras ternas de primarios, como las opciones teóricas de MacAdam y de Ives-Abney-Yule (§ 1.2.31).
2. Obtención de la gama de colores óptimos. Los colores óptimos son un conjunto finito de reflectancias/transmitancias espectrales que valen 0 ó 1 y que se utilizan en Colorimetría para delimitar la gama de objetos reales (Berns 2000; Hunt 1995; Wyszecki, Stiles 1982). Si seleccionáramos una configuración de captura $(L_e(\lambda), N, t)$, podríamos aplicar directamente la ecuación pseudo-triestímulo con las OECSFs, el balance de blanco y el perfil colorimétrico bruto escalado completo para obtener una estimación $\hat{\mathbf{t}}_{\text{XYZ}}$ de tales colores teóricos. Esta estimación no debe coincidir con la verdadera \mathbf{t}_{XYZ} si \mathbf{T}_{RGB} son pseudo-funciones de igualación, tal como ocurrirá la mayoría de las veces. Por tanto, las gamas de colores óptimos no coincidirán de forma exacta al representarlas gráficamente según el factor de luminancia Y en cualquier diagrama cromático CIE.
3. Obtención de la gama de colores a partir de la captura del Atlas Munsell. Diseñando un ambiente luminoso, podríamos captar todas las muestras Munsell y aplicar a continuación el balance de blanco y el perfil colorimétrico bruto escalado para estimar $\hat{\mathbf{t}}_{\text{XYZ}}$. De esta manera, podríamos ya comparar gráficamente en diagramas cromáticos CIE los locus de igual tono, croma y claridad según la codificación bruta y escalada RGB del dispositivo de captura y CIE-1931 XYZ. Sin cambiar el nivel de iluminación presente en la escena de trabajo, podríamos variar sin problemas la configuración (N, t) del dispositivo de captura, ya que al aplicar posteriormente $OECF_i^{-1}$ al perfil colorimétrico tal efecto de adaptación luminosa quedaría compensado. De esta forma, podríamos también averiguar si la codificación RGB del dispositivo mantiene, por ejemplo, el escalado perceptual del croma en cada región de tono constante (las filas en cada página del Atlas Munsell).

5.4.2 Pseudo-primarios RGB

Dado que la primera propuesta es la más directa y simple, vamos a comparar el triángulo de reproducción de nuestro dispositivo de captura con los de los dispositivos teóricos de MacAdam y de Ives-Abney-Yule. En primer lugar, como ya conocemos \mathbf{T}_{RGB} , podemos calcular los primarios asociados $\mathbf{P}_{\text{RGB}_t}$ mediante:

Ecuación 5.26

$$\mathbf{P}_{\text{RGB}_t} = \mathbf{P}_{\text{XYZ}_t} \cdot \mathbf{M}_1 = \mathbf{T}_{\text{XYZ}} \cdot \left(\mathbf{T}_{\text{XYZ}}^t \cdot \mathbf{T}_{\text{XYZ}} \right)^{-1} \cdot \mathbf{M}_1$$

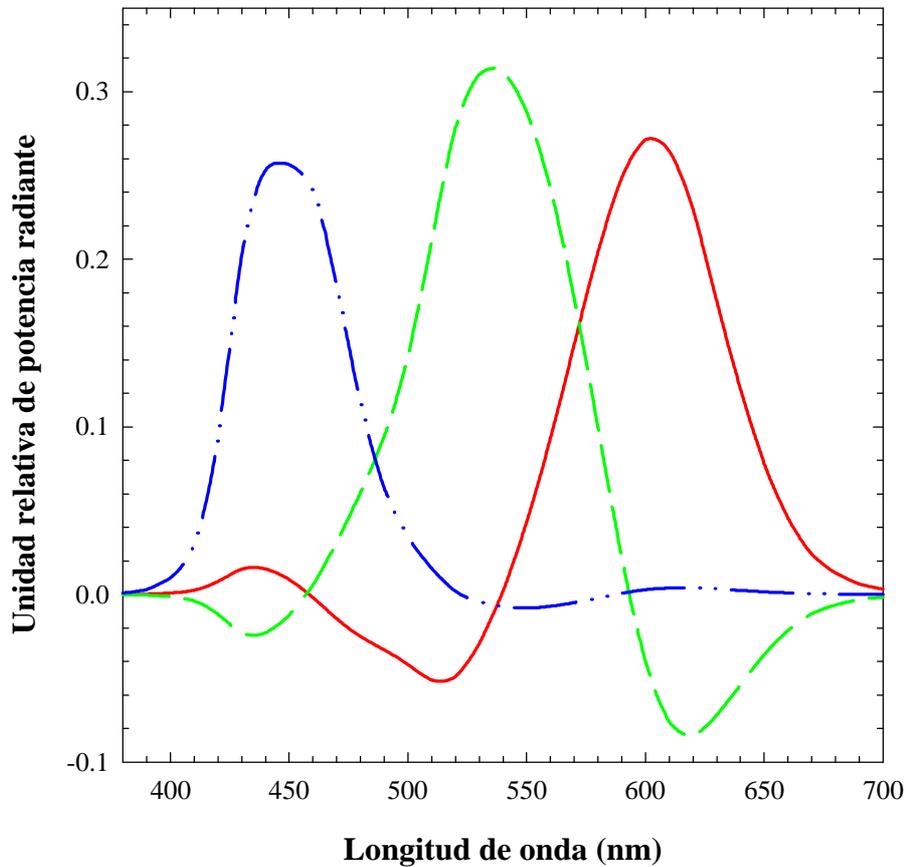


Figura 5.32: Primarios fundamentales asociados a nuestro dispositivo de captura.

Aunque estos primarios tengan componentes espectrales negativas (Fig. 5.32), podemos comprobar que sus valores triestímulo XYZ son las columnas de la matriz M_1 . Por tanto, podemos transformar estos valores al espacio uniforme CIE-1976 (u',v') (Ec. 5.27) y comparar así con los primarios de MacAdam e Ives-Abney-Yule (Fig. 5.33). El área reducida del triángulo RGB del dispositivo, en comparación con los triángulos de MacAdam e Ives-Abney-Yule, muestra el nivel reducido de reproducción bruta del color de este dispositivo. Si bien, carece de sentido aplicar dentro de este triángulo RGB la ley del centro de gravedad, no cabe duda que esta representación muestra una vez más las limitaciones de nuestro dispositivo de captura. En este sentido, parece que la elección en el diseño de los primarios B y G es acertada, pero no tanto para el primario R, al ser un rojo anaranjado.

Ecuación 5.27

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad , \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

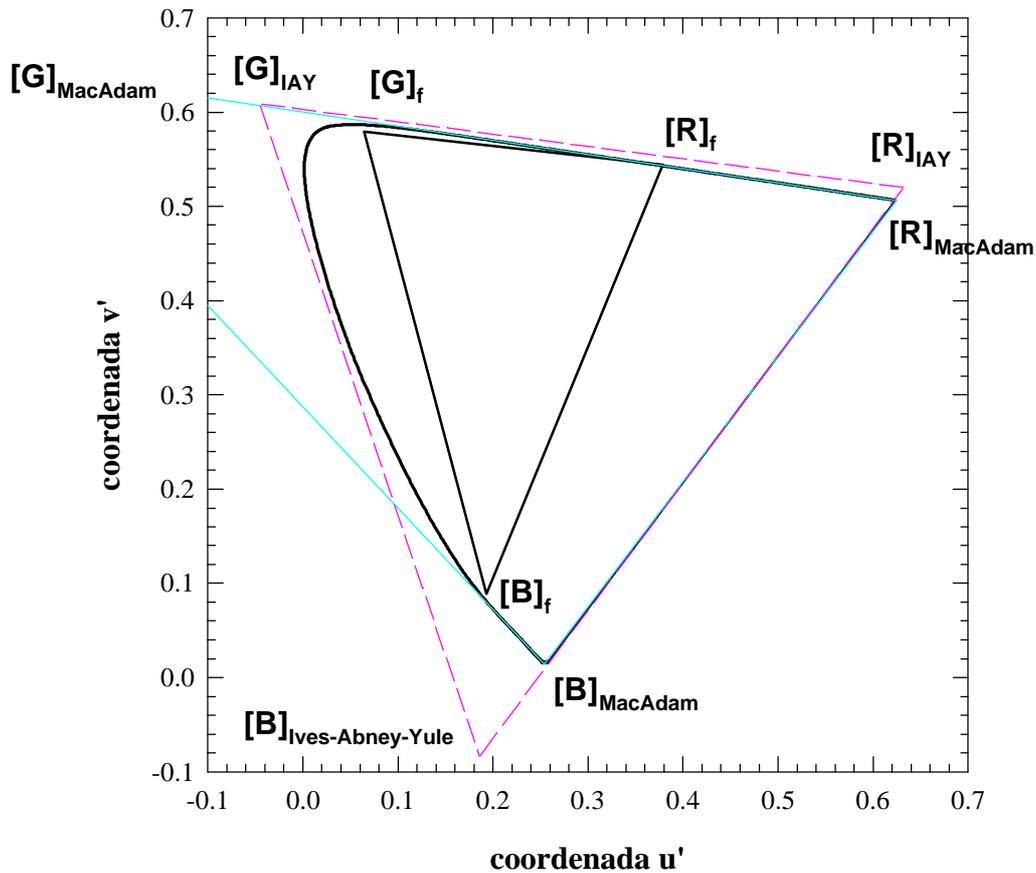


Figura 5.33: Triángulos de reproducción aditiva en el espacio CIE-1976 (u',v') de los primarios fundamentales asociados a tres dispositivos de captura: nuestro dispositivo de captura y las opciones de MacAdam y de Ives-Abney-Yule.

Quizás hubo alguna intencionalidad real en el diseño de las sensibilidades espectrales de nuestro dispositivo de captura al centrar los máximos de los canales cerca de las opciones de MacAdam y de Ives-Abney-Yule (§ Fig. 1.22 y 1.24). Pero, como el nivel de sensibilidad máxima del canal R y el escalado conjunto no son los mismos que en las opciones teóricas, el diseño final consigue parcialmente su objetivo inicial.

5.4.3 A partir del conjunto de colores óptimos

Los *colores óptimos* se definen mediante perfiles espectrales que valen exclusivamente 0 ó 1. Existen dos opciones espectralmente posibles (Fig. 5.34): tipo 1, $\rho(\lambda) = 1$ para $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ nm, y, tipo 2, $\rho(\lambda) = 1$ para $\lambda \notin]\lambda_1, \lambda_2]$ nm.

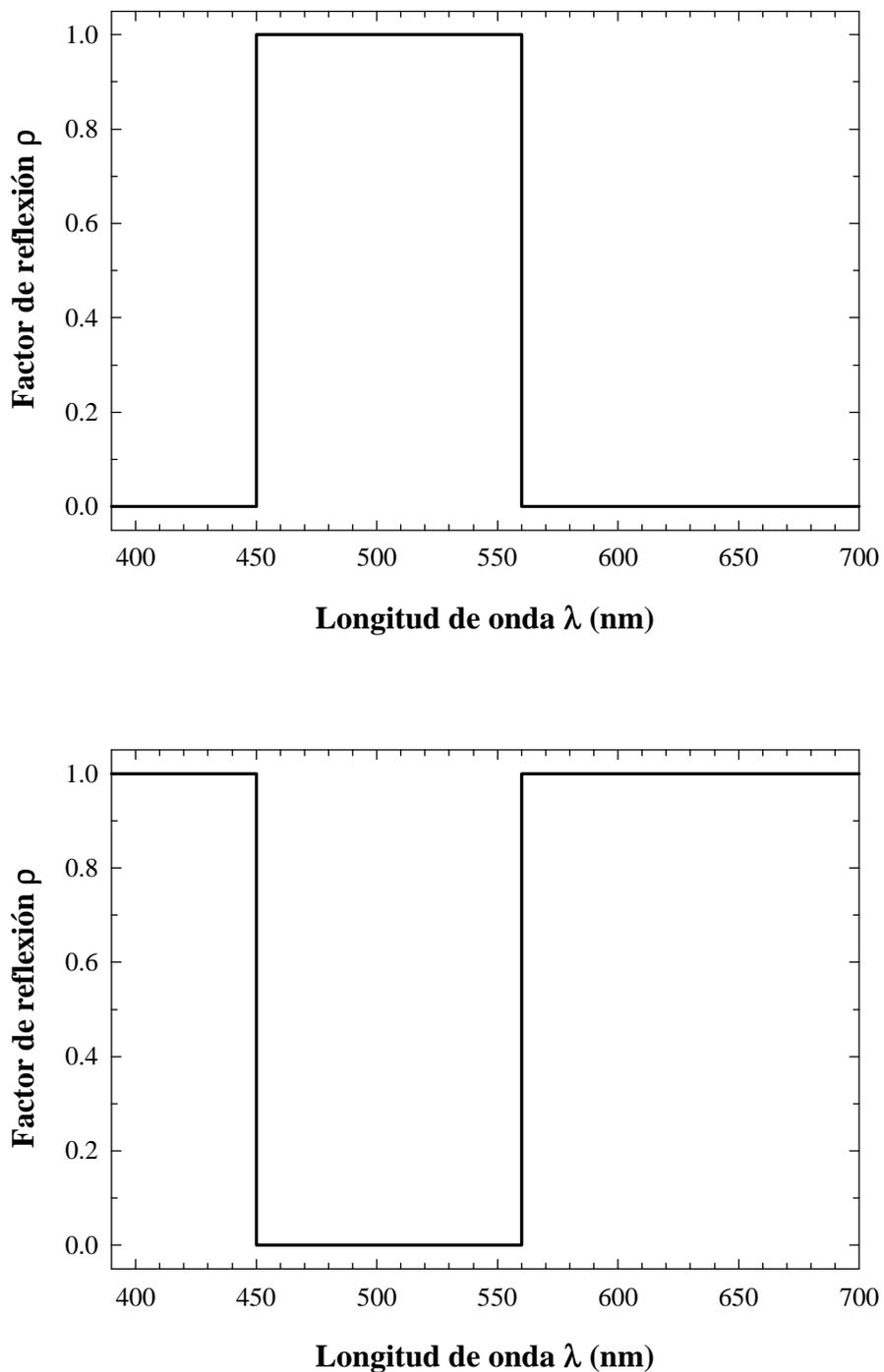


Figura 5.34: Perfiles-ejemplo de dos colores óptimos ($Y = 50$): tipo 1 (arriba), tipo 2 (abajo).

Según el factor de luminancia Y y la cromaticidad del iluminante, estos colores no fluorescentes se disponen de forma escalonada sobre un espacio de representación del color (Fig. 5.35-7), ya sea CIE-1931 (x,y), CIE-1976 (u',v') o CIE-1976 (a^*,b^*). Dado el carácter ideal de estos estímulos, cada región o

locus a Y cte marca un límite teórico de gama de colores que puede juzgar el sistema visual humano⁴. Como D.L. MacAdam (1935) fue el primero en proponer y calcular estos estímulos-color, es habitual denominar también a estos locus como *límites de MacAdam*.

El algoritmo de obtención de los límites de MacAdam para el iluminante equienergético **E** es:

Ecuación 5.28

$$\lambda \in [360, 830] \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$$

$$N = \frac{830 - 360}{\Delta\lambda} + 1 = 471 \quad ; \quad \text{longitud del vector estímulo - color}$$

$$\mathbf{E} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^t \quad ; \quad \text{estímulo equienergético}$$

$$\mathbf{T}_{XYZ} = [\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z}] \quad ; \quad \text{funciones de igualación CIE}$$

; COLORES ÓPTIMOS TIPO 1

```
for Y = 1 to {10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95} do
  for i = 1 to N do
    for j = 1 to N do
      if i < j and  $\frac{100}{(\bar{y}^t \cdot \mathbf{E})} \sum_{k=i}^j \bar{y}(\lambda_k) \in [Y - 0.05, Y + 0.05]$ 
        then graba (i ≡ λ1, j ≡ λ2)
      end for
    end for
  end for
```

; COLORES ÓPTIMOS TIPO 2

```
for Y = 1 to {10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95} do
  for i = 1 to N do
    for j = 1 to N do
      if i < j and  $\frac{100}{(\bar{y}^t \cdot \mathbf{E})} \left[ \sum_{k=1}^i \bar{y}(\lambda_k) + \sum_{k=j}^N \bar{y}(\lambda_k) \right] \in [Y - 0.05, Y + 0.05]$ 
        then graba (i ≡ λ1, j ≡ λ2)
      end for
    end for
  end for
```

Para calcular los límites de MacAdam con otro iluminante **L**, basta con cambiar **T_{XYZ}** por **T_{XYZ}·diag(L)** y **E** por **L** en el producto escalar (Hunt 1995; Wyszecki, Stiles 1982).

⁴ Los colorantes/pigmentos actuales no alcanzan todavía los bordes de estos locus (Berns 2000), por lo que todavía existen grandes posibilidades en la Tecnología del Color para crear colores nuevos.

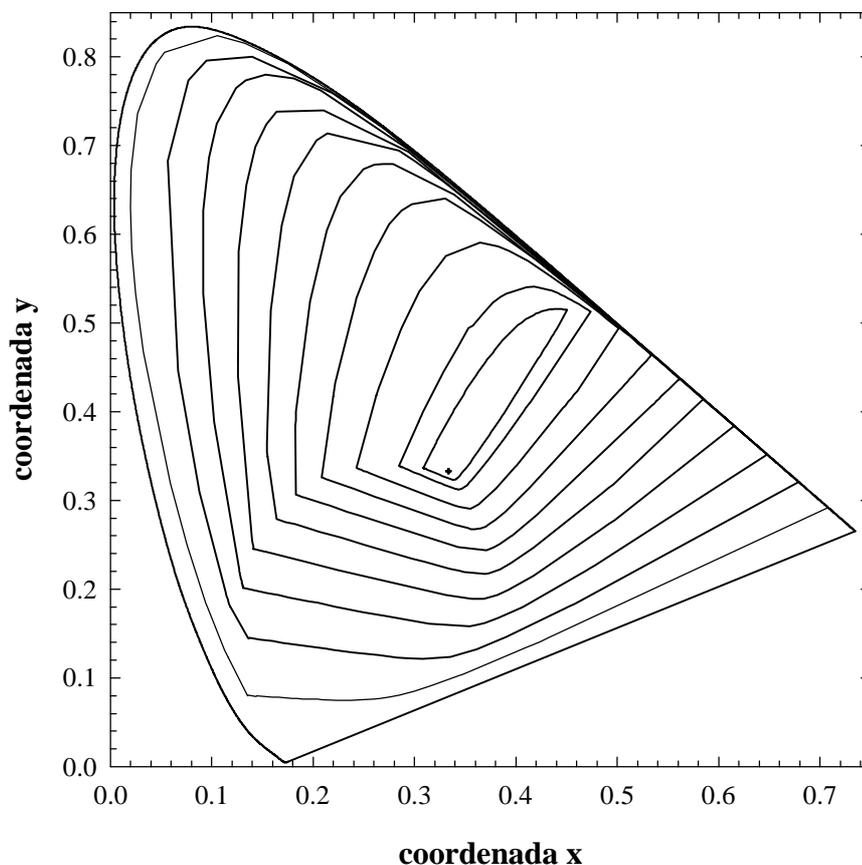


Figura 5.35: Límites de MacAdam en el diagrama cromático CIE-1931 (x,y). Se observa claramente la pseudoestructura piramidal desde $Y = 10$ hasta $Y = 95$ (locus más interno). El símbolo oscuro representa el iluminante E.

De este primer diagrama cromático se pueden extraer varias conclusiones:

- No todas las regiones de tono (rojo, amarillo, verde, azul) pueden alcanzar cualquier valor factor de luminancia Y . Así, los amarillos pueden llegar a ser bastante más claros que los azules.
- No todas las regiones de igual saturación pueden alcanzar cualquier valor de Y . Así, se pueden conseguir amarillos claros de alta saturación; sin embargo, un azul igualmente saturado es necesariamente oscuro..
- Por tanto, una especificación como $(x,y,Y) = (0.2, 0.2, 70)$ o $(0.6, 0.3, 70)$, asociada a un estímulo-color relacionado, no es una sensación cromática real.

En el segundo diagrama cromático, CIE-1976 (u',v'), perceptualmente más uniforme que el anterior, las conclusiones anteriores se acentúan más, pero aparecen otras nuevas como:

- Con Y constante, los rojos y púrpuras oscuros ($Y < 30$) son bastante más puros que los verdes azulados.

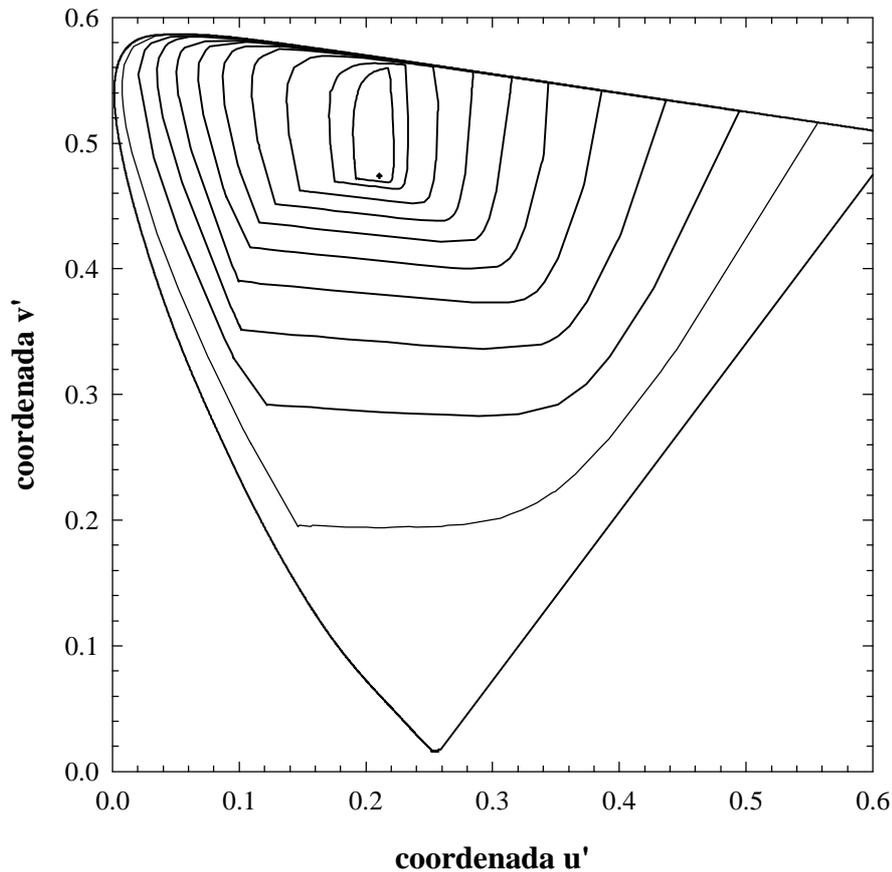


Figura 5.36: Límites de MacAdam en el diagrama cromático CIE-1976 (u', v'). Se observa claramente la pseudo-estructura piramidal desde $Y = 10$ hasta $Y = 95$ (locus más interno). El símbolo oscuro representa el iluminante E.

Por último, al transformar estos datos al espacio psicométrico CIE- $L^*a^*b^*$, se puede observar que:

- La distribución de colores óptimos no es homogénea en cada cuadrante o región tonal:
 - en el primer cuadrante (rojo-púrpura \rightarrow amarillo), los naranjas pueden alcanzar cromas bastante altos con claridad media;
 - en el segundo cuadrante (amarillo \rightarrow verde), la gama en general puede alcanzar cromas bastante altos para claridades bajas (en los verdes) y media-altas (en los verde-amarillos);
 - en el tercer cuadrante (azul-verde \rightarrow azul-púrpura), la gama se reduce bastante en general;

- en el cuarto cuadrante (azul-púrpura → rojo-púrpura), la gama se extiende casi de forma simétrica.
- Un escalado psicométrico más eficaz demuestra que los amarillos pueden combinar sin problemas claridades altas con cromas altos. En cambio, los azules-púrpura sólo alcanzan el mismo croma que los amarillos cuando son bastante oscuros.

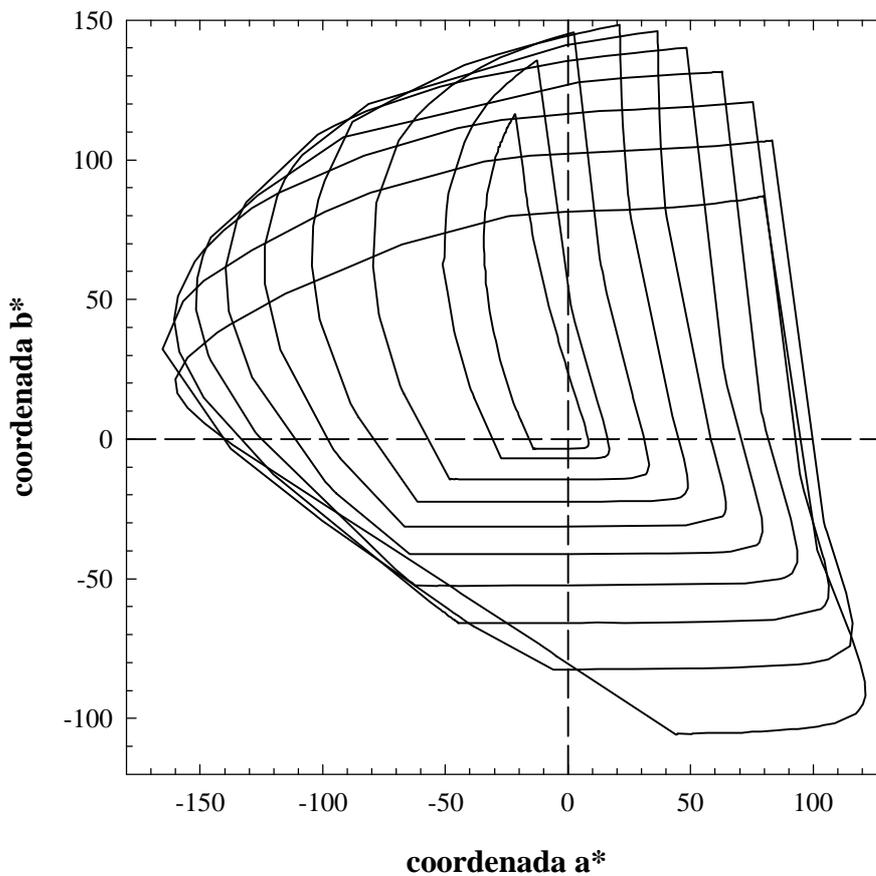


Figura 5.37: Límites de MacAdam en el diagrama cromático CIE-1976 (a^* , b^*). Se observa claramente una deformación en la pseudo-estructura piramidal anterior desde $Y = 10$ hasta $Y = 95$ (locus más interno).

Con estos preliminares podemos ahora abordar el problema de cómo nuestro dispositivo de captura estima los colores óptimos a nivel bruto (y escalado). Básicamente se trata de calcular los valores triestímulo XYZ a través del perfil colorimétrico sobre una hipotética escena compuesta por los colores óptimos e iluminados homogéneamente por el iluminante equienergético. En vez de utilizar la ecuación pseudotriestímulo con las T_{RGB} , tal como se hizo al recuperar los datos digitales RGB de colores reales (§ 4.7.1), partiremos directamente de la ecuación pseudotriestímulo original (Ec. 4.27), tal como se aplicó

para obtener el balance de blanco (Ec. 4.28). La razón de este cambio se debe a que en el modelo de recuperación RGB el escalado \mathbf{K} cambia según la cromaticidad de la lámpara y la apertura relativa. Para evitar tal variabilidad, hemos optado por el modelo original. Ahora bien, la diferencia está, con respecto al cálculo anterior, en que el valor de exposición espectral no va asociado a un estímulo espectralmente plano, sino a los colores óptimos hallados anteriormente. El nivel de iluminación se ajusta a 1000 lx de forma que la exposición total del iluminante equienergético es aproximadamente $H_E = 2.81e-12$ J con la apertura relativa $N = 4$ para que el blanco ideal (Halon) provoque la máxima captura digital efectiva, es decir, casi alcanzando los niveles de saturación: $ND_R = 220$, $ND_G = 176$, $ND_B = 252$, sin restar fondo.

Ecuación 5.29

$$\begin{aligned} & \rho_{MacAdam}(\lambda) \text{ , estímulo - color óptimo} \\ L_e &= \frac{1000}{\pi(683 \cdot 21.3714 \cdot 5)} = 4.36 \frac{\text{mW}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} \text{ , radiancia espectral del estímulo - color óptimo} \\ H_{MacAdam}(\lambda) &= 514.9823e-9 \frac{1}{50} \frac{L_e \rho_{MacAdam}(\lambda)}{4^2} = 2.8076e-12 \rho_{MacAdam}(\lambda) \text{ J} \\ NDR_k &= \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} H_{MacAdam}(\lambda) r_k(\lambda, H) \Delta\lambda = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \left[a_k(\lambda) + \frac{b_k(\lambda)}{1 + \exp\left(-\frac{H_{MacAdam}(\lambda) - c_k(\lambda)}{d_k(\lambda)}\right)} \right] \Delta\lambda \end{aligned}$$

Así, del mismo modo que antes, se procede a todos los pasos del perfil colorimétrico bruto escalado: balances de blanco y adaptación luminosa, matriz \mathbf{M}_1 y reescalado final (nueva matriz diagonal \mathbf{B}_C) con todos los colores. El nivel anterior de iluminación se ha elegido intencionadamente para que el blanco ideal se capturara de la forma más eficiente, pero, no cabe duda que, los resultados siguientes pueden verse alterados en gran medida por la variación de la apertura relativa N , o sea, del estado de adaptación luminosa del dispositivo de captura.

De los resultados expuestos en las figuras siguientes se deriva el análisis siguiente:

- Existe un efecto evidente de reducción del croma en la codificación cromática de nuestro dispositivo de captura, es decir, la cámara siempre desatura los colores.
- La reducción de croma es más patente para colores oscuros: los locus según nuestro dispositivo de captura son más semejantes en área a los de UCS-1976 a medida que el factor de luminancia Y aumenta.
- El desajuste o desviación del tono codificado no es tan evidente como el del croma porque las posiciones relativas de los vértices de los dos locus coinciden bastante bien.
- El desajuste o desviación de la claridad codificada, que no se ha presentado, siempre es positivo, en el sentido de que la cámara siempre codifica los colores más claros, un comportamiento que ya descubrimos anteriormente con las muestras reales.

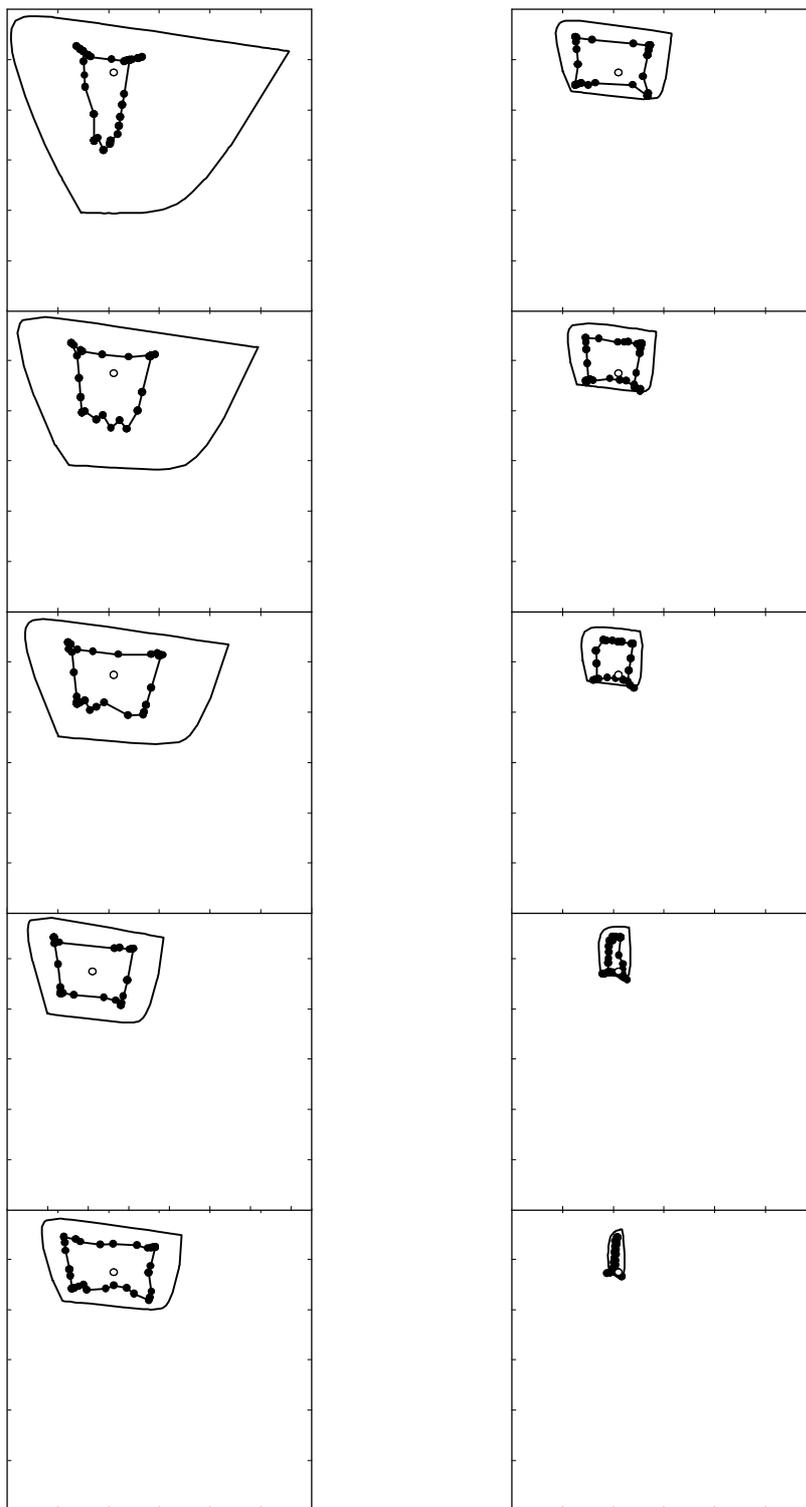


Figura 5.38: Límites de MacAdam en el diagrama cromático CIE-1976 (u',v') según el observador patrón CIE (línea continua) y tal como los codifica nuestro dispositivo de captura (línea con símbolos) con apertura relativa fija ($N = 4$). Primera columna: $Y = \{10, 20, 30, 40, 50\}$; segunda columna: $Y = \{60, 70, 80, 90, 95\}$.

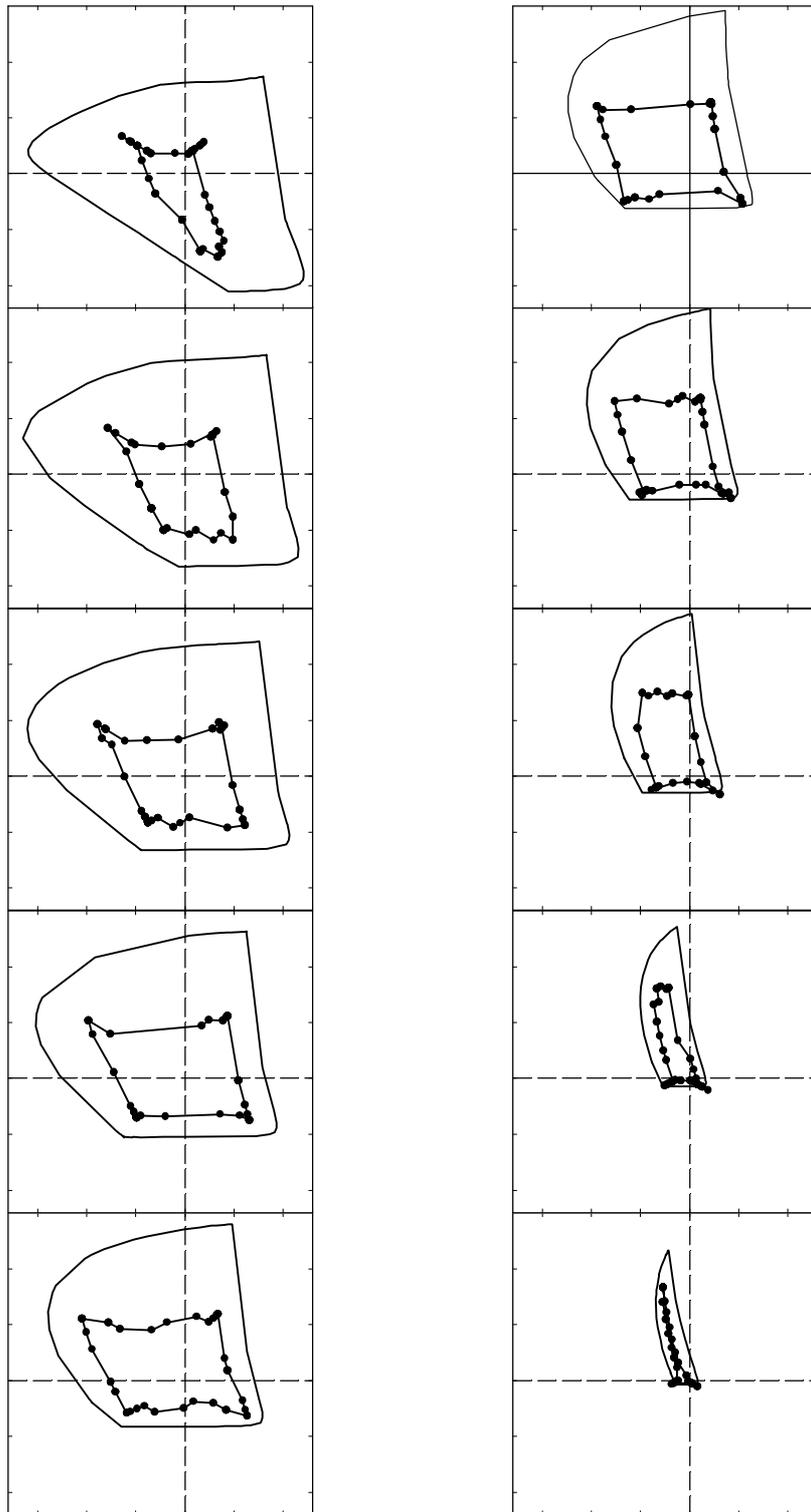


Figura 5.39: Límites de MacAdam en el diagrama cromático CIE-1976 (a^* , b^*) según el observador patrón CIE (línea continua) y tal como los codifica nuestro dispositivo de captura (línea con símbolos) con apertura relativa fija ($N = 4$). Primera columna: $Y = \{10, 20, 30, 40, 50\}$; segunda columna: $Y = \{60, 70, 80, 90, 95\}$.

- Dado que el número total de colores reproducibles o completamente discernibles va asociado al área de los locus de MacAdam, tenemos una evidencia clara que nuestro dispositivo de captura, y en general cualquier otro dispositivo equivalente, posee una gama de colores discernibles mucho más reducida que la humana. El problema que se presenta ahora, por tanto, es cómo cuantificar ambos conjuntos.

En resumen, el nivel de reproducción del color de nuestro dispositivo de captura es bastante aceptable, pero proporciona mayores desviaciones para colores oscuros y saturados. Creemos que la razón que subyace en este comportamiento son los rangos dinámicos de entrada (radiométrico) y salida (respuesta) tan cortos de nuestro sistema. Si las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF) se extendieran mucho más sobre la escala de exposición y la profundidad de bits fuera superior o igual 10 bits, el nivel de reproducción del nuevo dispositivo de captura sería probablemente mucho mejor que el que hemos utilizado de prueba.

5.4.4 A partir del Atlas Munsell

Otro método alternativo de valorar la gama de colores reproducibles de nuestro dispositivo de captura es que capte directamente escenas compuestas por páginas de tono constante del Atlas Munsell bajo una fuente luminosa ajustada espectralmente al iluminante C. A diferencia de los colores óptimos o de MacAdam, estos colores sí que son reales, o sea, que van asociados a subconjuntos de fichas coloreadas ordenadas perceptualmente (§ 1.1.1). Sin embargo, antes de acometer en un futuro cercano este experimento real que se enmarca paralelo a los objetivos centrales de esta Tesis, hemos considerado oportuno simularlo teóricamente con las mismas herramientas que hemos utilizado con los colores óptimos. Como las reflectancias espectrales asociadas a los códigos Munsell se adquieren fácilmente vía Internet, hemos aplicado el algoritmo de la Ec. 5.29 incluyendo la contribución espectral del iluminante C del modo siguiente:

Ecuación 5.30

$$\rho_{Munsell}(\lambda) \text{ , estímulo - color Munsell}$$

$$L_e(\lambda) = \frac{1000}{\pi(683 \cdot 21.3714 \cdot 5)} S_C(\lambda) = 4.36 S_C(\lambda) \frac{\text{mW}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} \text{ , radiancia espectral del iluminante C}$$

$$H_{Munsell}(\lambda) = 514.9823 e^{-9 \frac{1}{50} \frac{L_e(\lambda) \rho_{Munsell}(\lambda)}{4^2}} = 2.8076 e^{-12 S_C(\lambda) \rho_{Munsell}(\lambda)} \text{ J}$$

$$NDR_k = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} H_{Munsell}(\lambda) r_k(\lambda, H) \Delta\lambda = \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \left[a_k(\lambda) + \frac{b_k(\lambda)}{1 + \exp\left(-\frac{H_{Munsell}(\lambda) - c_k(\lambda)}{d_k(\lambda)}\right)} \right] \Delta\lambda$$

siendo $S_C(\lambda)$ la distribución espectral de potencia relativa del iluminante C.

Este procedimiento lo hemos aplicado sobre los subgrupos de fichas asociados a los 10 tonos principales del Atlas Munsell (5R, 5YR, 5Y, 5GY, 5G, 5BG, 5B, 5PB, 5P y 5RP), agrupándolos convenientemente en parejas de tonos opuestos o complementarios (5R y 5BG, etc) llegando a analizar en total 360 colores.

Tras aplicar el perfil colorimétrico bruto y escalado nº 1 se reescalán, al igual que antes con los colores óptimos, los valores triestímulo estimados \hat{t}_{XYZ} , pero sin incluir por supuesto la desviación de color tipo A_C , que no es predicha por las leyes de Grassmann. Como de forma paralela hemos calculado los valores triestímulo XYZ bajo el iluminante C, hemos comparado directamente los dos sistemas, nuestro dispositivo de captura y el observador patrón CIE, interpretando el problema como que los datos cromáticos reales son la entrada que recibe nuestro dispositivo, por lo que la salida cromática final es el resultado de los mecanismos internos o brutos de captura radiante del sistema, es decir, del estado bruto de reproducción del color de nuestro dispositivo de captura. De la figura siguiente, en la que se muestran estos resultados como salida estimada XYZ vs. entrada real XYZ, se aprecian las observaciones siguientes:

- Nuestro dispositivo de captura, en estado bruto, siempre sobre codifica la colorimetría XYZ original: $\hat{X} > X, \hat{Y} > Y, \hat{Z} > Z$. La causa es el vector A_C de desviación de color, con componentes negativas: todos los valores muestran claramente la tendencia de escalado progresivo, pero siempre ligeramente por encima del valor correcto o codificación ideal (la línea recta central).
- Por otra parte, como resultado del rango dinámico reducido de las OECFs de nuestro dispositivo de captura, y, por ende, de la aproximación lineal de las mismas (§ 5.1, Fig. 5.3, Ec. 5.6) con apertura relativa constante ($N = 4$), se observa claramente un recorte o compresión de la codificación para valores XYZ bajos, o sea, colores oscuros con claridad o Value < 5 ($Y < 0.20$), lo cual es bastante significativo (Fig. 5.40). Si hubiésemos optado por disminuir N , los colores oscuros se codificarían mejor, pero a expensas de una codificación peor de los colores más claros, que es como se muestra en la figura siguiente con $N = 2$, o sea, cuatriplicando el nivel de exposición.

Como el balance de blanco de nuestro dispositivo de captura no se desajusta de su valor original (al blanco ideal), a pesar del cambio de cromaticidad de la iluminación, los valores triestímulo XYZ estimados se pueden transformar directamente al espacio CIE- $L^*a^*b^*$ considerando el iluminante C como blanco adaptador: $X_w = 98.07, Y_w = 100, Z_w = 118.18$. Si, de forma paralela, tenemos calculados los valores triestímulo XYZ bajo el iluminante C y los valores psicométricos correspondientes $L^*a^*b^*C_{ab}^*h_{ab}^*$ de las muestras Munsell, podemos finalmente mostrar en diagramas cromáticos CIE- (a^*,b^*) y CIE- (C_{ab}^*,L^*) la codificación cromática predicha por nuestro sistema con respecto al observador patrón. Como cabría esperar, al mantener constante la apertura relativa $N = 4$ o variarla a $N = 2$, la codificación completa de la claridad L^* va a quedar bastante restringida, como se demuestra claramente en cortes del tipo L^* vs. C_{ab}^* (Fig. 5.42-3) para el par-ejemplo de tonos 5GY y 5P.

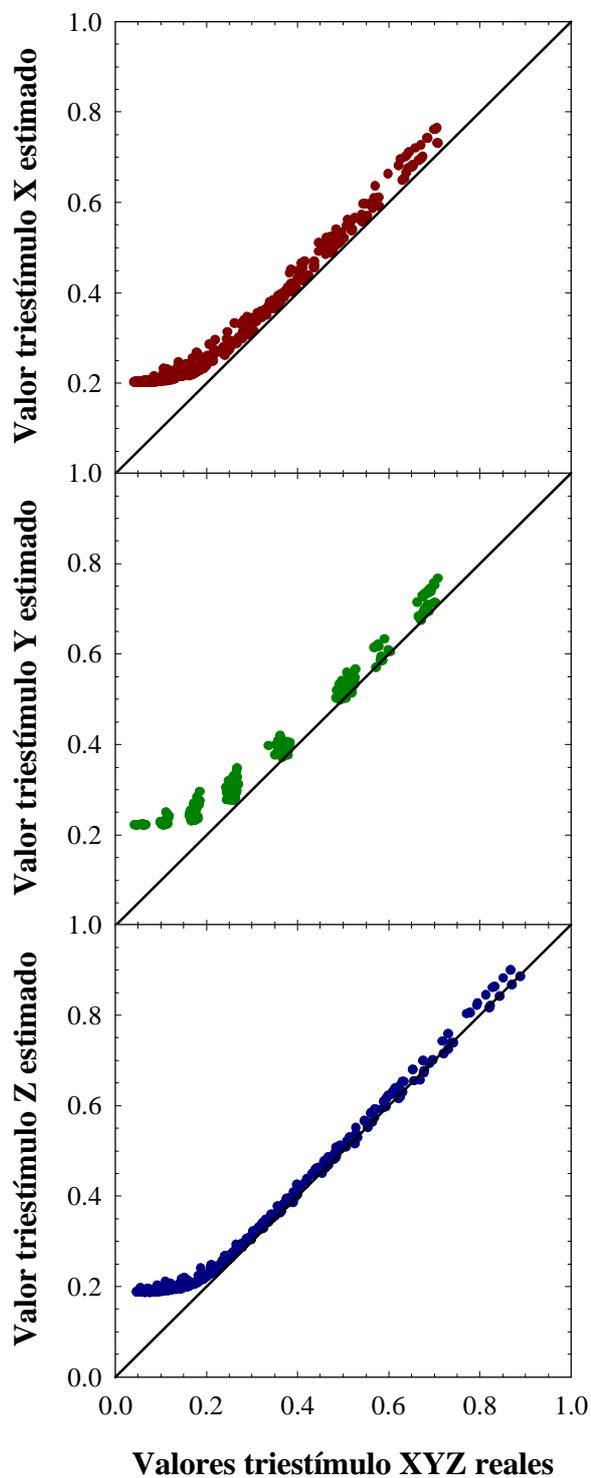


Figura 5.40: Codificación CIE-XYZ de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con $N = 4$, de los colores del Atlas Munsell. Se muestra claramente la compresión de los valores XYZ más bajos como consecuencia del rango dinámico corto de las OECFs del sistema.

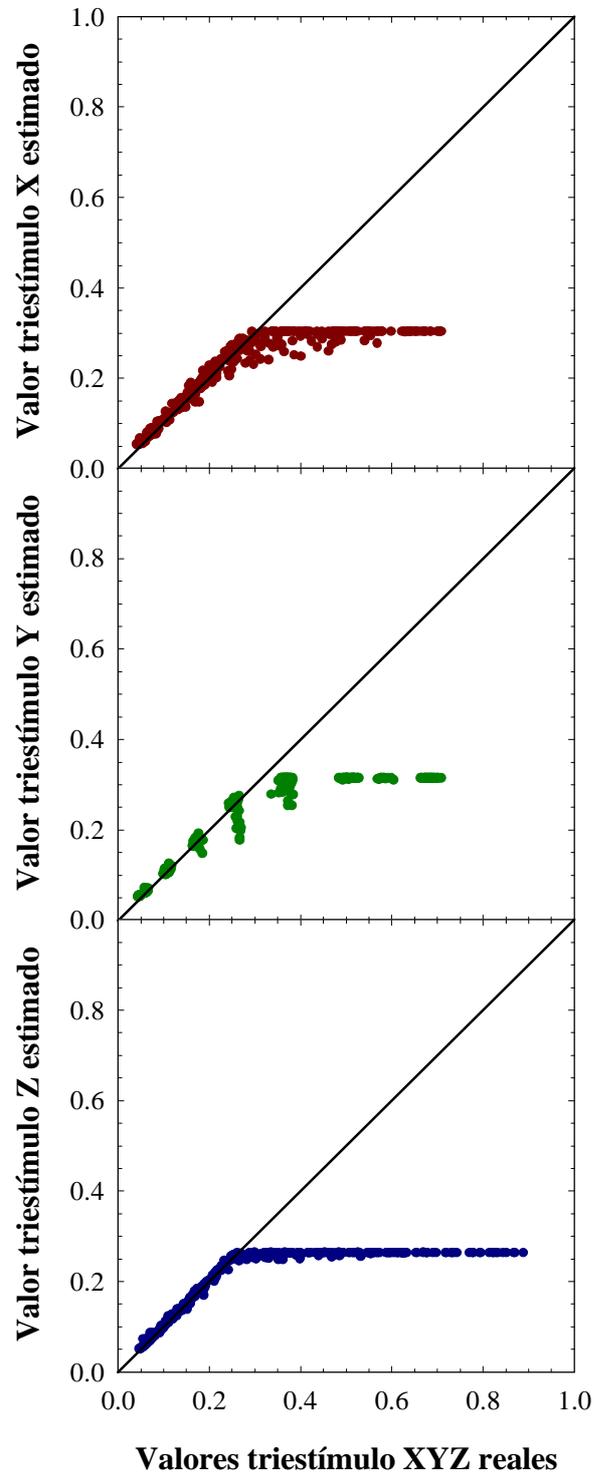


Figura 5.41: Codificación CIE-XYZ de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con $N = 2$, de los colores del Atlas Munsell. Se muestra claramente la compresión de los valores XYZ medios y altos como consecuencia del rango dinámico corto de las OECFs del sistema.

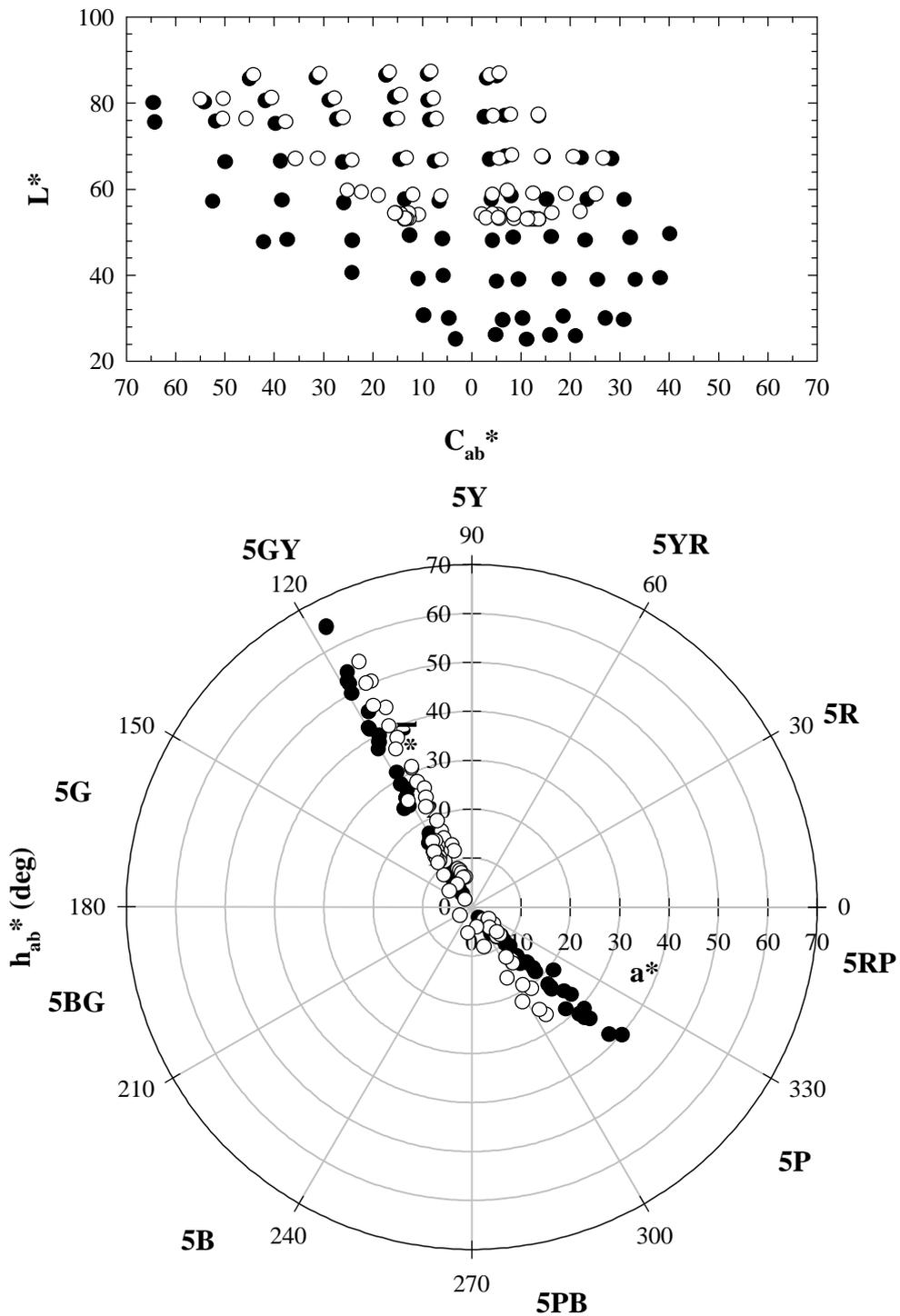


Figura 5.42: Codificación CIE- $L^*a^*b^*C_{ab}^*$ de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con $N = 4$, de los colores del Atlas Munsell de tono 5GY y 5P (símbolos oscuros: según el observador patrón CIE; símbolos claros: según nuestro sistema). Se muestra claramente en el corte L^* vs. C^* la compresión de los valores L^* más bajos como consecuencia del rango dinámico corto de las OECFs del sistema.

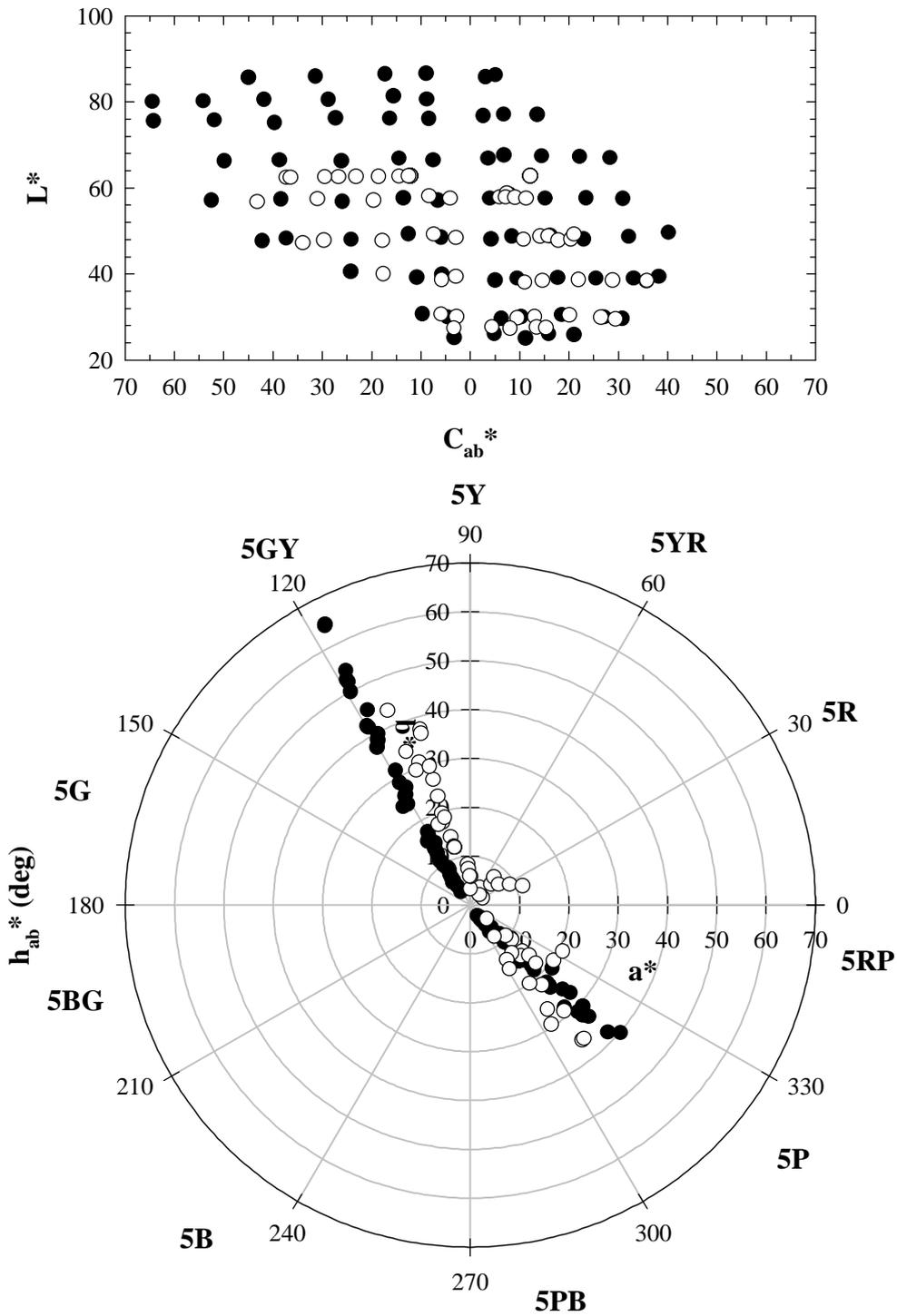


Figura 5.43: Codificación CIE-L*a*b*C_{ab}* de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con N = 2, de los colores del Atlas Munsell de tono 5GY y 5P (símbolos oscuros: según el observador patrón CIE; símbolos claros: según nuestro sistema). Se muestra claramente en el corte L* vs. C* la compresión de los valores L* medios y altos como consecuencia del rango dinámico corto de las OECFs del sistema.

Sobre la determinación de la gama de colores reproducibles

De la recolección de todos los resultados $L^*a^*b^*C_{ab}^*h_{ab}^*$ estimados teóricamente de todos los colores Munsell analizados se extraen las conclusiones siguientes al comparar los valores psicométricos según el observador patrón CIE y nuestro dispositivo de captura:

- Respecto a la codificación del valor psicométrico L^* (claridad). Tal como ya sucedía con el factor de luminancia Y , existe una compresión clara debido al rango dinámico poco extenso de las OECF. Tal efecto se observa de nuevo captando los colores bajo $N = 4$ y $N = 2$ (Fig. 5.44), que es justamente una exposición radiante cuatro veces superior a la primera. En condiciones metrológicas, gracias al algoritmo de balance de adaptación luminosa, no resulta tan dramático este efecto puesto que podemos variar intencionadamente la apertura relativa N del sistema para recuperar eficazmente la terna triestímulo de un estímulo-color de bajo factor de luminancia Y . Pero, en situaciones típicas de reproducción equivalente de color (retransmisiones deportivas y espectáculos taurinos por TV, cinematografía, etc), lo ideal sería, por tanto, extender de alguna forma el rango dinámico radiométrico (y fotométrico) del dispositivo de captura antes de realizar todos los pasos necesarios de caracterización espectral y colorimétrica.
- Respecto a la codificación del valor psicométrico C^* (croma). Existen tres comportamientos claramente diferenciados, a pesar de la variación de N (Figura 5.45): para cromas bajos, inferiores a 10, existe una sobresaturación hasta valores cercanos a 15; en el rango comprendido entre 5 y 40, un grupo numeroso de colores sufre una compresión de croma al valor $C^* = 15$; y, en general, para cromas medios y altos, aunque también en menor medida para los bajos, se aprecia claramente la reducción de croma que se advirtió con los colores óptimos o de MacAdam. Creemos que las dos primeras tendencias están correlacionadas también con los cambios de tono que se producen, pero el tercero es exclusivo de la naturaleza aditiva de la captura radiante de un dispositivo de captura. A priori, este comportamiento reductor del croma no parece que sea lineal, dado que se observan los tres comportamientos y existe una gran dispersión de los datos. Una solución plausible a este problema sería usar colores ordenados perceptualmente con el mismo iluminante (balance de blanco) que el dispositivo de captura para que se reduzca así la influencia de las desviaciones de tono.
- Respecto a la codificación del valor psicométrico h^* (tono). Existe claramente una desviación provocada por el desbalance de blanco de nuestro dispositivo de captura respecto a la cromaticidad del iluminante C (Fig. 5.46). Tal efecto de desbalance de blanco, o carencia de adaptación cromática del dispositivo de captura, se muestra patente en la aparición de un ángulo-tono que actúa como centro de gravedad del desplazamiento colorimétrico del sistema: 120 deg para $N = 4$, y, 100 deg para $N = 2$. Se observa también que tales desviaciones presentan alguna correlación con la variación de la apertura relativa N :
 - Los rojos 5R se amarillean, sobre todo los de value bajo con la captura $N = 4$, pero mucho menos con la captura con $N = 2$, pero siendo ahora los colores de value bajo los que mantienen aproximadamente el tono, mientras que los colores de value medio y alto son los que desvían principalmente hacia el amarillo;
 - Los naranjas 5YR sufren lo mismo;

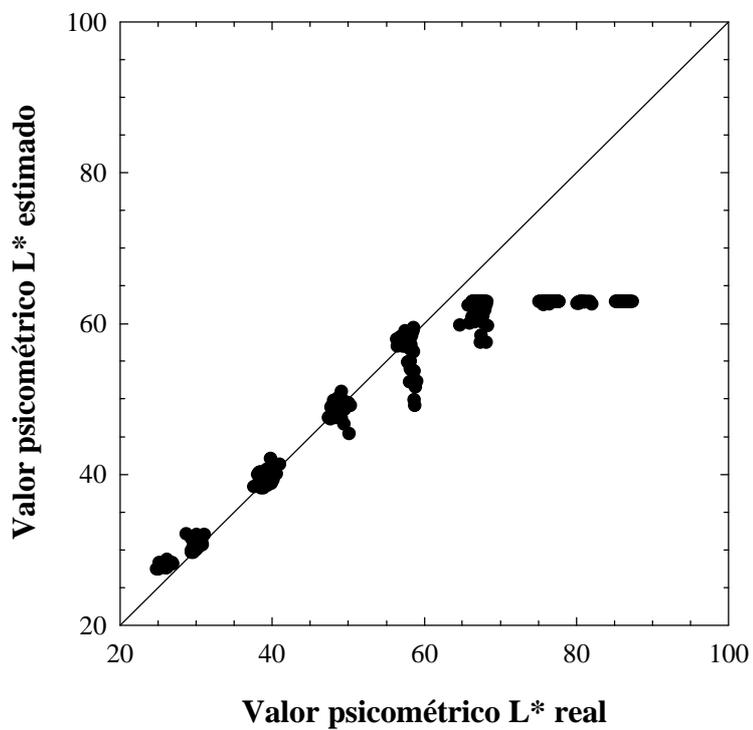
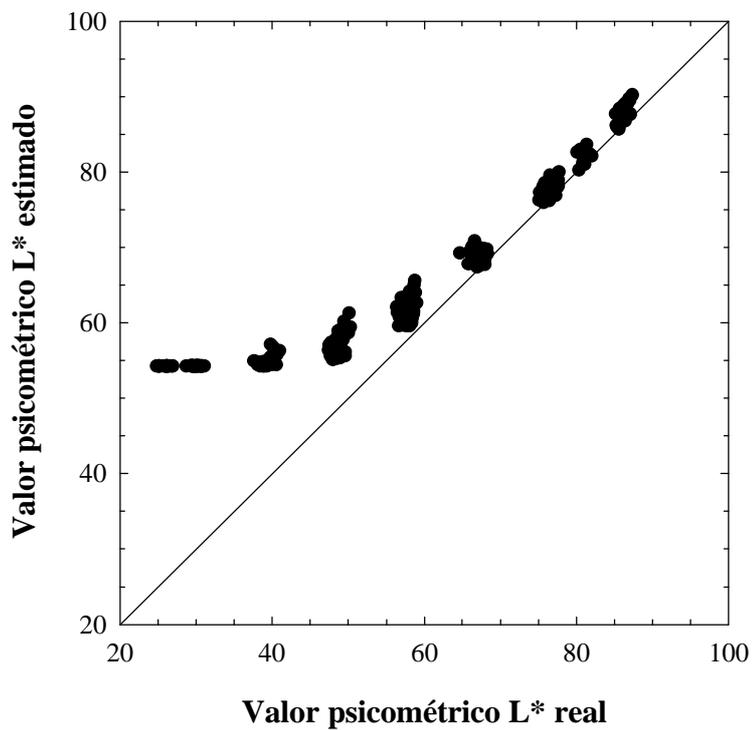


Figura 5.44: Codificación de la claridad L^* de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con $N = 4$ (arriba) y $N = 2$ (abajo), de los colores del Atlas Munsell.

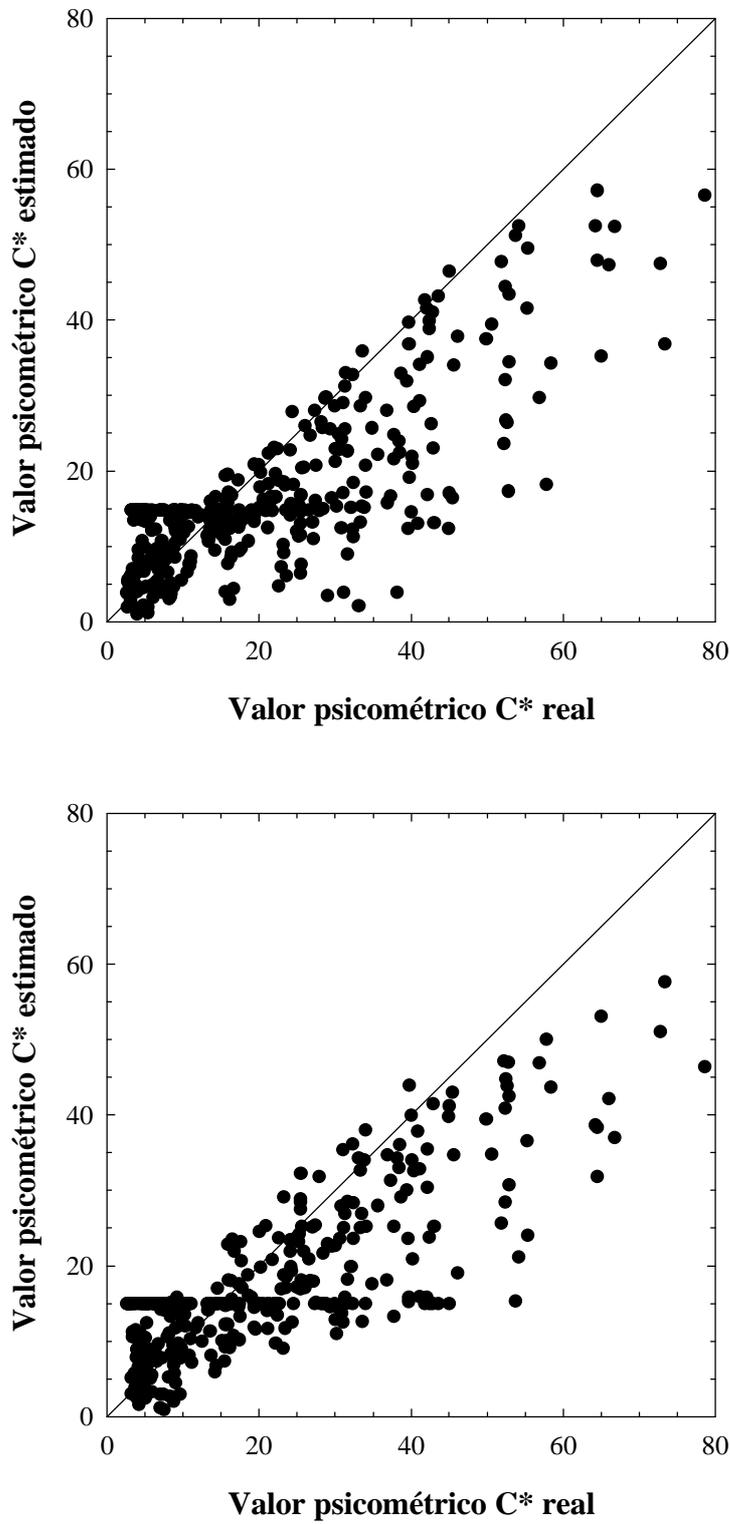


Figura 5.45: Codificación del cromata C* de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con N = 4 (arriba) y N = 2 (abajo), de los colores del Atlas Munsell.

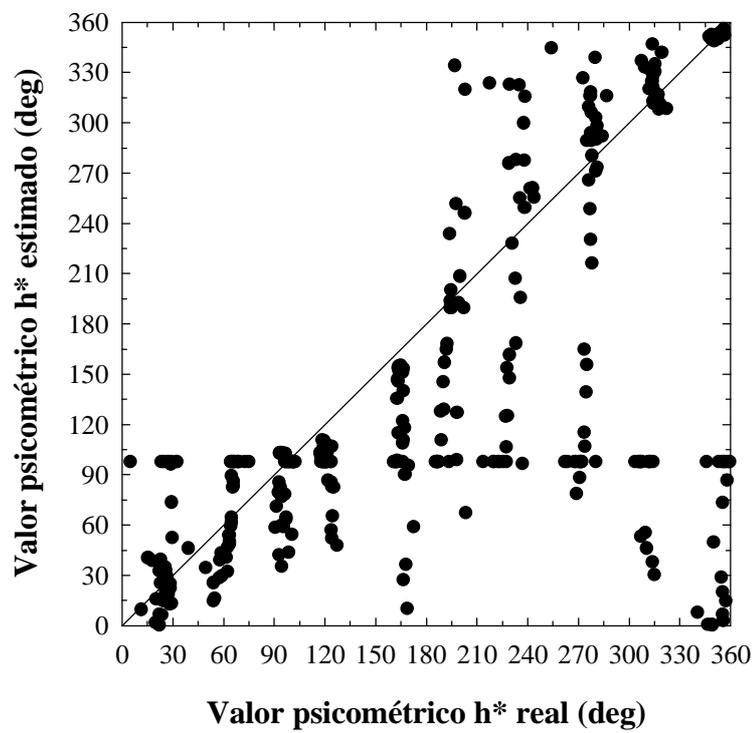
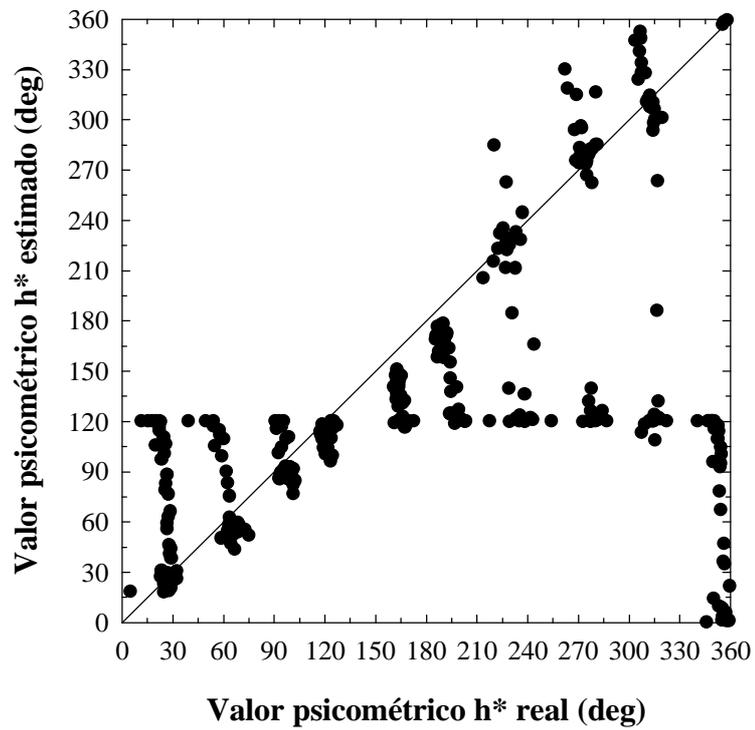


Figura 5.46: Codificación del tono h^* (deg) de nuestro dispositivo de captura, caracterizado y perfilado con $N = 4$ (arriba) y $N = 2$ (abajo), de los colores del Atlas Munsell.

Sobre la determinación de la gama de colores reproducibles

- Los amarillos 5Y se estabilizan mucho mejor con $N = 4$;
- Los verde-amarillos 5GY son los que sufren menos desplazamientos colorimétricos;
- Los verdes 5G amarillean ligeramente con $N = 4$, pero sufren desviaciones significativamente más graves (hacia los rojos) con $N = 2$;
- Los verde-azules 5BG sufren un comportamiento parecido al anterior, con la salvedad que, con $N = 2$, algunos colores recuperan su tono;
- Los azules 5B mantienen bastante bien su tono con $N = 4$, pero con $N = 2$, sufren desviaciones más grandes, desde las ya conocidas hacia el amarillo hasta el púrpura;
- Los azules-purpurados 5PB se comportan de manera similar que el grupo anterior;
- Los púrpuras 5P, para ambos valores de apertura relativa, tienden ligeramente hacia el rojo, pero siempre aparecen colores que se desvían hacia los amarillos;
- Los rojos-purpurados 5RP, al igual que los rojos 5R, invierten la desviación del grupo anterior, por lo que se desvían hacia el amarillo.

En resumen, la codificación del tono es algo compleja al no haber balance de blanco pero, en general, todos los colores de claridades comprimidas o recortadas bruscamente por el dispositivo de captura se desvían hacia el amarillo: los colores oscuros con $N = 4$ como consecuencia de la infraexposición, y, los colores claros con $N = 2$ como consecuencia de la sobreexposición.

Finalmente, como conclusión final de esta sección, debemos advertir que estos resultados son simulaciones teóricas. Tienen, por tanto, una validez limitada, pero marcan claramente unas tendencias que se reproducirán bastante bien, eso creemos, en el experimento real. En principio, la elección de estímulos-color ordenados perceptualmente, a pesar de las limitaciones del espacio CIE-L*a*b*, permite aislar claramente algunos comportamientos de desviación, como los del tono, siempre en dirección vertical. Aún así, el desbalance de blanco, desplazado también de su valor teórico ($h_{ab}^* = 252$ deg para el iluminante C, según la colorimetría relativa-absoluta) emborrona los resultados de la desviación del croma. Por tanto, esperamos en un futuro cercano corroborar estos resultados con el experimento real.

Capítulo 6. Conclusiones

En los dos capítulos anteriores, hemos resuelto progresivamente el problema de la caracterización de un dispositivo de captura (escáner, cámara) como un instrumento de medida del color (Fig. 6.1).

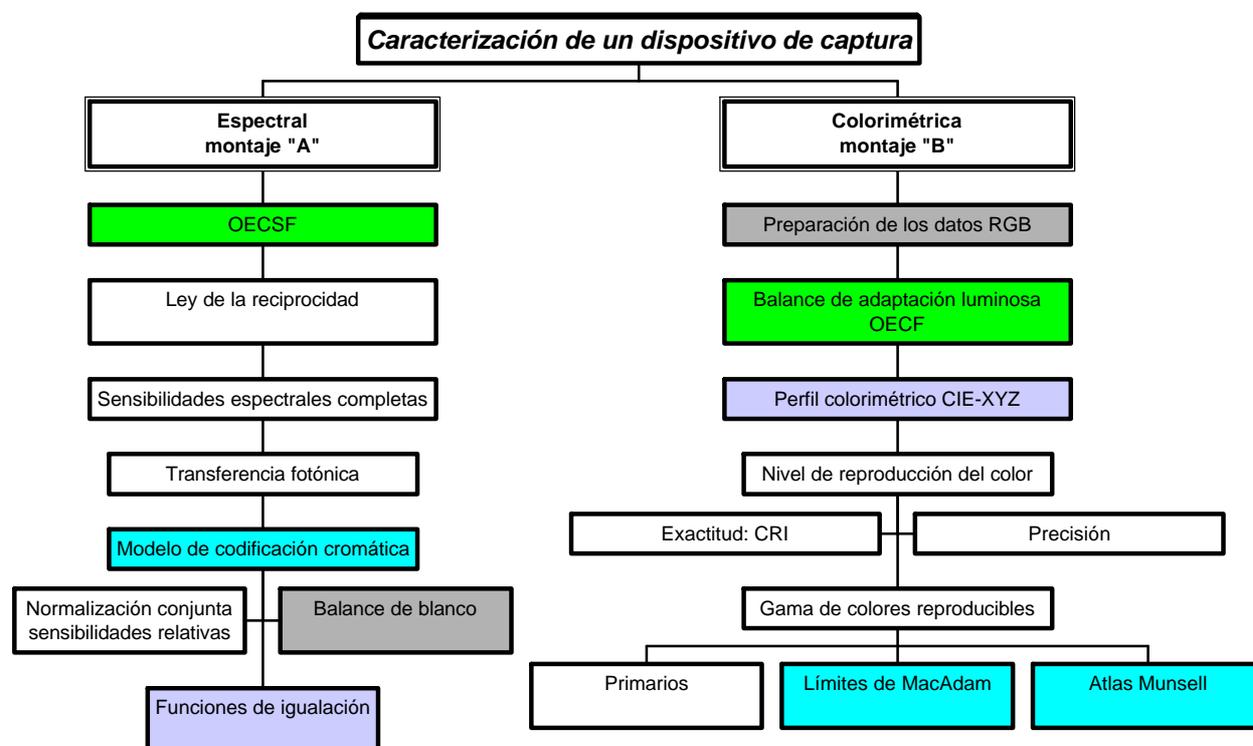


Figura 6.1: Organigrama de esta tesis doctoral.

La propuesta de caracterización de un dispositivo de captura se descompone básicamente en un algoritmo de caracterización espectral y otro de caracterización colorimétrica. Cada uno de ellos se basa en medidas experimentales y resultados diferentes pero al mismo tiempo complementarios: se necesita la caracterización espectral para abordar con éxito la caracterización colorimétrica, tal como se marca con el mismo color algunos ítems del organigrama superior.

El montaje experimental para la caracterización espectral (Montaje A) (Fig. 4.1) es el que permite obtener todos los parámetros asociados a la caracterización espectral de un dispositivo de captura. El parámetro generatriz de toda la serie de variables asociadas a la caracterización espectral es la función espectral de conversión optoelectrónica (OECSF), o función (de transferencia) respuesta optoelectrónica (ND) vs. exposición radiante (H), la cual puede describirse matemáticamente mediante una función sigmoideal o de transición de cuatro parámetros $\{a, b, c, d\}$ (Tabla 4.6). Los dos primeros parámetros se correlacionan con la altura o nivel de transición; mientras que los dos últimos tienen que ver con la posición y la pendiente del escalón o paso transitorio. En el rango espectral de análisis, 380-780 nm, hemos descubierto que la curva de visibilidad radiométrica solamente se extiende desde 390 hasta 700 nm, y que los valores sigmoideales de ajuste (c y d , sobretudo) presentan alguna correlación evidente con la longitud de onda, la

cual nos informa sobre el rango de sensibilidad espectral de cada canal-color de nuestro dispositivo de captura (Fig. 4.17-19). De forma paralela, se ha comparado las OECSFs (Fig. 4.20-1) de nuestro dispositivo real de captura con las correspondientes al observador patrón CIE-1931 XYZ, el cual consideramos un fotodetector estrictamente lineal.

Como la exposición radiante $H(\lambda)$ sobre el plano CCD depende de varias variables –radiancia $L_e(\lambda)$, apertura relativa N y tiempo de exposición t – hemos comprobado hasta qué punto la respuesta del sistema es independiente frente a valores idénticos de exposición espectral, pero obtenidos variando la apertura relativa N y/o el tiempo de exposición t . Tal relación se denota como ley de la reciprocidad. En principio, tal ley no se verifica en la Fotografía Fotoquímica o clásica, pero poco se sabía hasta ahora si se verificaba o no en Fotografía Digital. Hemos demostrado que tal ley sí existe en los dispositivos de captura, de forma muy explícita variando exclusivamente la apertura relativa N (Fig. 4.22), y, de manera no tan directa variando exclusivamente el tiempo de obturación t (Fig. 4.24). La causa de tal comportamiento aparentemente anómalo es que el tiempo de exposición t no se ajusta linealmente con el tiempo de obturación, tal como suponía el fabricante. Hemos aportado, por tanto, una nueva relación matemática hiperbólica (Fig. 4.28) que correlaciona mucho mejor ambos parámetros.

Gracias a la versatilidad de la ley de la reciprocidad, sobretodo variando exclusivamente la apertura relativa N , hemos obtenido todas las OECSFs asociadas a cada longitud de onda y canal-color ($k = R, G, B$). A partir de un formalismo general de sensibilidad espectral de un sistema fotosensor, hemos descrito dos términos ambivalentes denominados responsividad espectral $r_k(\lambda, H)$ y espectro de acción $a_k(\lambda, NDR)$ para nuestro dispositivo de captura en función de las OECSFs sigmoidales (Ec. 4.20-21). Hemos comparado otra vez estas variables (Fig. 4.29) con respecto el sistema fotodetector ideal CIE-1931 XYZ, mostrando de nuevo que cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara) no es estrictamente un sistema lineal. Como ambas funciones radiométricas son bidimensionales (Fig. 4.30-32), hemos desarrollado un algoritmo de obtención de las curvas de sensibilidad espectral relativa (Fig. 4.36) de nuestro sistema basado en el escalado relativo de los perfiles espectrales bidimensionales absolutos $r_k(\lambda, H = \text{cte})$ y $a_k(\lambda, NDR = \text{cte})$.

De forma complementaria, más bien apropiada o interesante para ámbitos optoelectrónicos, y a partir del análisis de cada curva espectral de transferencia fónica (FTSC), se han calculado para cada λ /canal-color el rango dinámico de entrada rd_E , la relación señal-ruido SNR , la capacidad de pozo lleno N_{pozo} , la función de ganancia incremental $IGSF$, la eficiencia cuántica espectral QE y la eficiencia cuántica de detección DQE (Fig. 4.39-41).

Se ha presentado una ecuación sobre la formación optoelectrónica del valor digital a partir de la exposición radiante, mono o multi-espectral (Ec. 4.27). Con este sencillo modelo, se ha comprobado el balance colorimétrico de blanco ideal (Fig. 4.42) que, supuestamente, estaba verificando nuestro dispositivo según las instrucciones del fabricante. Del mismo modo, hemos aplicado un criterio de normalización conjunta de las sensibilidades espectrales relativas. Ponderando adecuadamente las curvas de sensibilidad espectral relativa con los resultados anteriores, hemos obtenido las funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} (Ec. 4.30 y Fig.4.46). De esta forma, se ha propuesto un cambio de modelo analítico

absoluto de codificación del color a un modelo vectorial relativo utilizando directamente las \mathbf{T}_{RGB} obtenidas (Ec. 4.31). Esto ha permitido, dentro de las leyes de Grassmann (aditividad y proporcionalidad), comparar entre los niveles digitales RGB realmente capturados de una escena, utilizando el montaje experimental para la caracterización colorimétrica (montaje B), con los predichos a partir del conocimiento de \mathbf{T}_{RGB} y las distribuciones espectrales de potencia radiante absoluta de los objetos de la escena (Fig. 4.48-51).

La caracterización colorimétrica pretende siempre transformar los niveles digitales RGB de un dispositivo de captura en valores triestímulo XYZ frente a condiciones espectroradiométricas variables y desconocidas a priori. En nuestro caso, para alcanzar tal difícil objetivo, hemos aportado de forma novedosa, como aspecto destacable, un algoritmo de balance de adaptación luminosa, el cual se incorpora a un perfil colorimétrico clásico entre un espacio RGB, dependiente del dispositivo, y CIE-XYZ.

Como paso previo o inicial, los niveles digitales ND_R , ND_G , ND_B , corregidos de fondo, se han transformado en valores colorimétricos relativos RGB utilizando el balance de blanco ideal obtenido anteriormente (Ec. 5.2). Con este preámbulo algorítmico, y a partir de las curvas espectroradiométricas *OECSFs*, hemos estimado las curvas fotométricas *OECSFs* según el nivel de iluminación incidente en la escena variando la apertura relativa N de la cámara (Ec. 5.4). Con ello, hemos podido invertir las *OECSFs* calculadas en función de N (Fig. 5.2-4) para calcular los correspondientes valores colorimétricos relativos RGB según el nivel absoluto de luminancia de la escena (Ec. 5.5-8).

De esta forma, el algoritmo de balance de adaptación luminosa se añade al cálculo de la matriz de cambio de base \mathbf{M} entre \mathbf{T}_{RGB} y \mathbf{T}_{XYZ} , las funciones de igualación del observador patrón CIE-1931 XYZ. Hemos probado varias opciones algorítmicas de obtención de esta matriz, y, hemos demostrado que el algoritmo (MaxIgLS) que se basa en el desconocimiento total previo de la escena funciona de igual manera que otros que necesitan información espectral previa de la escena (No-MaxIgLS y PC).

Para evaluar el nivel de reproducción del color, tanto el grado de exactitud como el de precisión con respecto un tele-espectrocolorímetro convencional (PR-650), hemos realizado un experimento que consistió básicamente en captar una carta ColorChecker (Fig. 4.6) bajo varias fuentes luminosas, de cromaticidad y potencia luminosa variable (Fig. 4.7). Dado que los campos de iluminación sobre la carta no eran espacialmente uniformes, fue necesario caracterizarlos colocando en cada posición-color de la carta el blanco Halon y midiendo su luminancia con el tele-colorímetro (Fig. 4.8-10). Estos valores de luminancia L_E , asociados a los que emitiría el blanco ideal en las mismas posiciones, sirven solamente para evaluar el grado de exactitud en los dos algoritmos que hemos usado: CIE- $L^*a^*b^*$ y el índice de reproducción del color (CRI) utilizando el modelo de apariencia de colores aislados Hunt'91 (Apéndices A y B).

De los 72 estímulos-color posibles, solamente 53 fueron útiles, es decir, con niveles digitales aprovechables, ni infraexpuestos ($ND_k = 0$) ni sobreexpuestos ($ND_k = 255$). Dado que gracias al perfil colorimétrico nº 1 (MagIgLS) ya sabíamos que las \mathbf{T}_{RGB} eran realmente pseudo-funciones de igualación, nos propusimos averiguar qué tipo de desviación sistemática de color aparecería siempre en nuestro

dispositivo de captura funcionando a nivel bruto. Aplicando consecuentemente el perfil colorimétrico con el balance de adaptación luminosa al grupo de 53 estímulos-color, se obtuvo una corrección lineal de color (Ec. 5.19) en la que la pendiente (matriz diagonal \mathbf{B}_C) es el factor de escalado que nos faltaba al obtener las pseudo-funciones de igualación y la ordenada en el origen, simplemente un vector 3×1 \mathbf{A}_C es el error sistemático de reproducción. Al evaluar el grado conseguido de exactitud con el perfil colorimétrico bruto escalado vimos que los colores se codifican en general más claros y desaturados que los reales (Tabla 5.6, Fig. 5.14) arrastrando consigo desplazamientos de tono. En cambio, con el perfil colorimétrico compensado, los errores anteriores se compensan claramente, no llegando a la perfección deseada, pero sí de forma significativa dado que el perfil colorimétrico aplicado es válido para cualquier cromaticidad e intensidad de la fuente luminosa. Ya que la corrección de color no es infalible hemos analizado el grado de exactitud de nuestro sistema como colorímetro triestímulo XYZ en varias regiones de tono, claridad y croma. Los resultados mostrados a continuación, y basados en el conjunto de 53 estímulos-color, indican que:

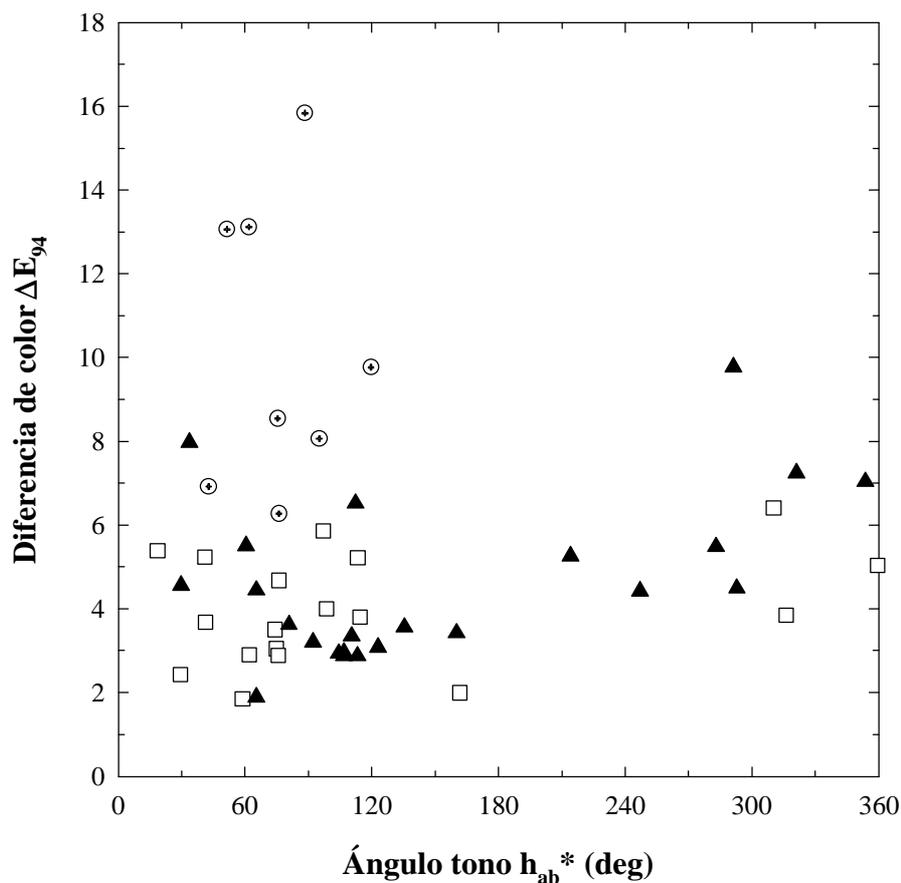


Figura 6.2: Grado de exactitud (ΔE_{94}) de los 53 estímulos-color en función de su ángulo-tono h_{ab}^* (deg). Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY.

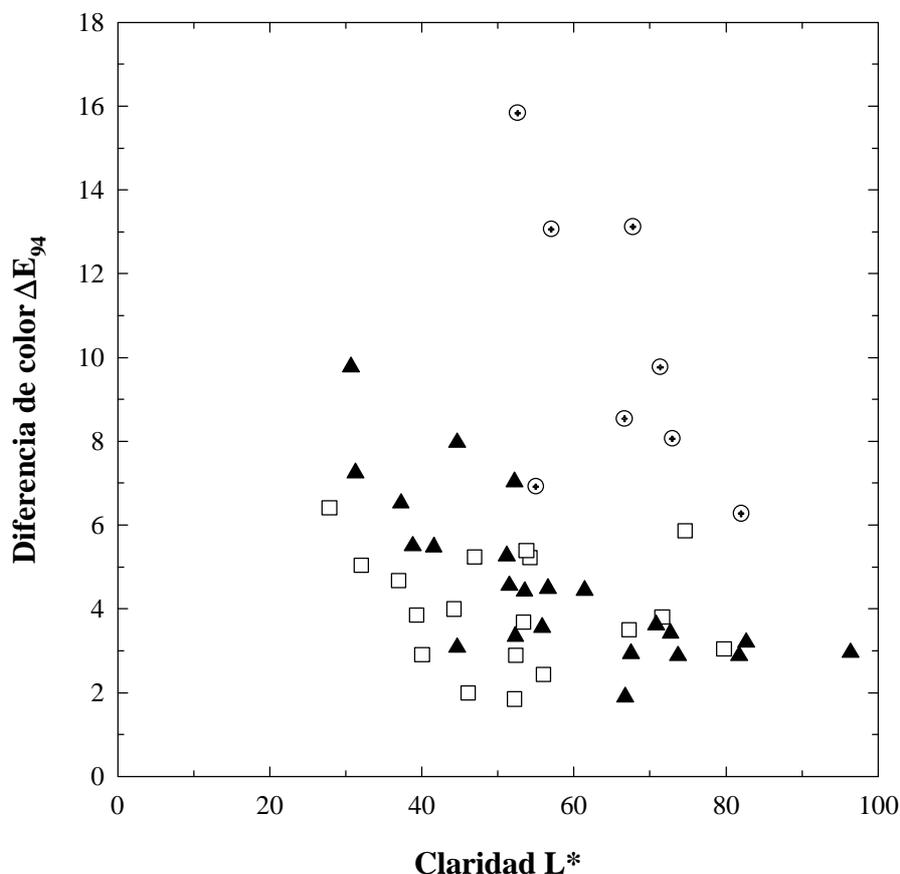


Figura 6.3: Grado de exactitud (ΔE_{94}) de los 53 estímulos-color en función de su claridad L^* . Símbolos: \odot , estímulos bajo luz INC; \square , estímulos bajo luz HWL; \blacktriangle , estímulos bajo luz DAY.

- No existe en nuestro dispositivo de captura caracterizado, perfilado y compensado, una correlación clara entre el error colorimétrico y el tono del estímulo-color.
- Existe en nuestro dispositivo de captura caracterizado, perfilado y compensado, una correlación significativa entre el error colorimétrico y la claridad (factor de luminancia) del estímulo-color: los colores oscuros siempre se estimarán peor que el resto. La razón de este comportamiento, como ya se ha advertido antes, se encuentra en el corto rango dinámico de las OECSFs, y, por extensión directa, de las OECFs. Si captamos una escena con una apertura relativa N constante, los colores más oscuros se estimarán colorimétricamente bastante mal a costa de los colores claros. Si reducimos la apertura relativa, los colores oscuros se estimarán mucho mejor, pero la mayoría de los colores claros se captarán sobreexpuestos por lo que serán inservibles para estimarles sus ternas XYZ correspondientes. Por tanto, uno de los aspectos más originales de este trabajo es que podemos variar

intencionadamente la apertura relativa N de la cámara digital sin perder la capacidad para estimar la colorimetría de cualquier escena.

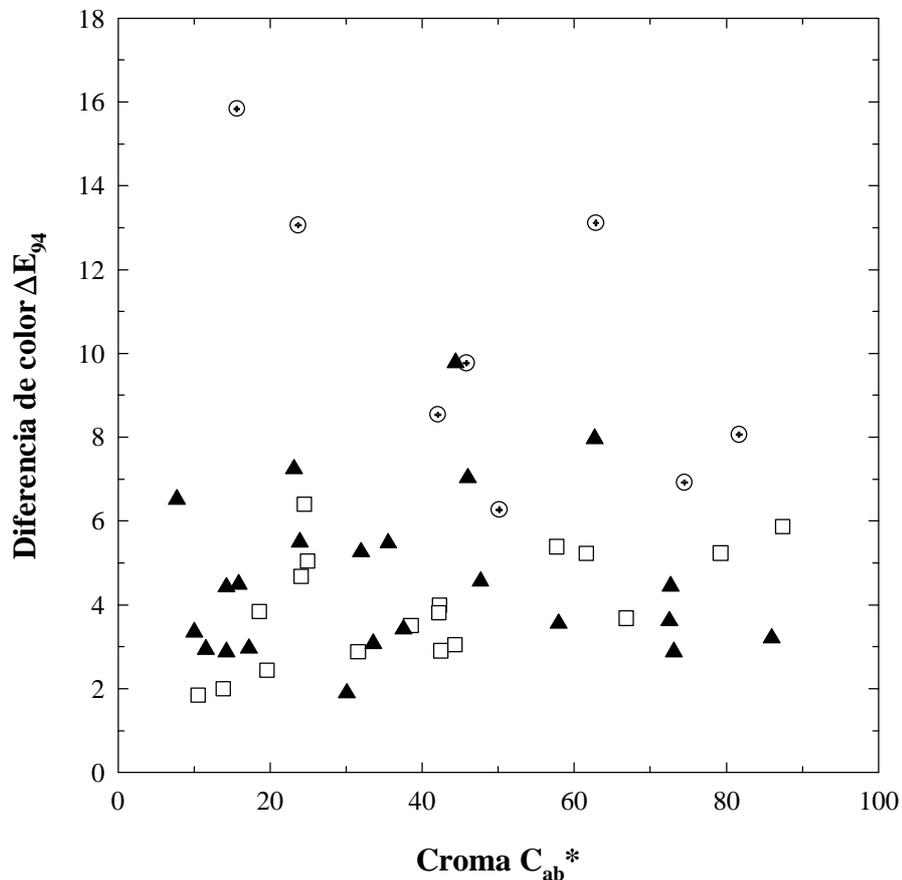


Figura 6.4: Grado de exactitud (ΔE_{94}) de los 53 estímulos-color en función de su croma C_{ab}^* . Símbolos: ⊙, estímulos bajo luz INC; □, estímulos bajo luz HWL; ▲, estímulos bajo luz DAY.

- No existe en nuestro dispositivo de captura caracterizado, perfilado y compensado, una correlación significativa entre el error colorimétrico y el croma o colorido del estímulo-color.

Aunque quizás estas observaciones finales parezcan bastante concluyentes, creemos que deberían reforzarse con un grupo mucho más numeroso de estímulos-color para que las tendencias observadas fueran estadísticamente más significativas. Para ello, habría que realizar dos experimentos paralelos sobre el mismo grupo de colores: sin variar la apertura relativa N , y, variándola intencionadamente para que todos los colores se pudieran estimar colorimétricamente lo más óptimamente posible.

Una vez evaluado el grado de exactitud colorimétrica de nuestro sistema, se centró el estudio en el grado de precisión que se podía conseguir y su comparación con el tele-espectrocolorímetro Photo Research PR-650. Este análisis se basó directamente en la aplicación de la propagación de errores aleatorios en las transformaciones colorimétricas (§ 1.1.2). Los cálculos efectuados (Ec. 5.24-25) muestran que nuestro dispositivo de captura presenta un nivel similar de precisión que el tele-colorímetro, alrededor de un 5 % de precisión relativa para los valores triestímulo XYZ, pero mucho más alto para los valores psicométricos a^* , b^* , C_{ab}^* y h_{ab}^* , excepto L^* (Tabla 5.11).

Como tarea final de este trabajo, con intereses puramente teóricos, decidimos analizar la gama de colores que lograba reproducir nuestro sistema a nivel bruto (y escalado). En primer lugar, se calcularon los primarios fundamentales asociados a las pseudo-funciones de igualación T_{RGB} , y, consecuentemente, el triángulo de reproducción aditiva, el cual se comparó con las opciones teóricas de MacAdam y de Ives-Abney-Yule (Fig. 5.33). En segundo lugar, partiendo del algoritmo de obtención de los colores óptimos y del modelo absoluto de codificación cromática (Ec. 4.27), se estimaron para cada factor de luminancia Y la gama de colores óptimos que, hipotéticamente, lograría reproducir nuestro sistema (Fig. 5.38-9). Los resultados han mostrado que, con apertura relativa N fija, nuestro dispositivo de captura posee una gama limitada de colores reproducibles y discernibles entre sí, comparada con la del sistema visual humano, como consecuencia de que siempre tiende a desaturar los colores reales que capta. En tercer lugar, y como complemento al estudio anterior, se simuló la captura de varios subconjuntos (páginas de tono constante) de colores Munsell con varias aperturas relativas. Los resultados obtenidos mostraron de nuevo la compresión de la escala de claridad (Fig. 5.44) provocada por el corto rango dinámico de las OECSFs (OECSFs). También mostraron, fruto de simular un desbalance de blanco al usar en la simulación el iluminante C, unas desviaciones sistemáticas de tono (Fig. 5.46) que correlacionaban bastante bien con la compresión de claridad: con N acertada para los colores claros, los colores oscuros se desvían de tono; con N acertada para los colores oscuros, los colores claros se desvían ahora de tono. Aunque esta última simulación puede corroborarse con el experimento real, esta última parte de la Tesis ha mostrado que los algoritmos desarrollados de caracterización y perfilado colorimétrico con adaptación luminosa permiten un análisis teórico previo de las posibilidades de reproducción del color de un dispositivo de captura (escáner, cámara) antes de orientarlo para fines metrológicos (variando controladamente la apertura relativa N) o de reproducción equivalente del color (TV, Cinematografía, Multimedia, etc).

6.1 Interés industrial y transferencia de resultados

En nuestro trabajo de tesis hemos propuesto de forma original técnicas espectralradiométricas y métodos matemáticos alternativos para caracterizar cualquier dispositivo de captura (escáner, cámara) en un instrumento colorimétrico y analizar el nivel de reproducción bruta del color, tanto en lo referente a su grado de exactitud como su nivel de precisión. A partir de aquí, creemos firmemente que se abren un sinnúmero de aplicaciones industriales utilizando un dispositivo de captura caracterizado, perfilado y compensado colorimétricamente. Veamos algunas de ellas.

Uno de los aspectos donde se muestra superior un dispositivo de captura (lineal o de mosaico), caracterizado, perfilado y compensado colorimétricamente, frente a un tele-espectrocolorímetro convencional es el campo visual de medida. En concreto, en el tele-espectrocolorímetro PR-650, el campo de visión es de 7°, pero el de medida se reduce a 1°, con lo cual es imposible medir simultáneamente los colores de una escena. En cambio, la cámara, con un objetivo fotográfico adecuado, registra simultáneamente toda la escena, y, aplicando sus datos específicos de caracterización espectral y colorimétrica, puede estimar colorimétricamente en un instante todos los objetos de interés. Es, por tanto, una ventaja crucial donde el factor tiempo puede resultar crucial, como tantas veces pasa a nivel industrial. El único aspecto a comprobar si tal uso se desea hacer con el dispositivo de captura, es la uniformidad espacial de respuesta del mosaico o línea fotosensor, ya sea CCD o CMOS.

Ya que las aplicaciones industriales de la Colorimetría se centran bastante en el control de calidad, con el advenimiento de nuevos instrumentos tele-colorimétricos, no invasivos, basados en la caracterización espectral y colorimétrica de dispositivos de captura, se abren nuevas posibilidades donde hasta ahora solamente era posible utilizar una codificación falsa de color para efectuar controles de calidad. Así, acoplado un objetivo de microscopio sobre nuestro dispositivo de captura, se podrían realizar tareas tele-colorimétricas bajo dimensiones microscópicas (Industria textil, Medicina, Bioquímica, Gemología, etc). Ejemplos típicos podrían ser la resolución del color de 1 píxel o grupos reducidos de ellos, de interés en la estampación textil, la evolución temporal de un tejido interno infectado y posteriormente sanado, la distinción bien contrastada, tanto en claridad como en cromaticidad, de tejidos u órganos cercanos a la región de operación, o, la degradación temporal de productos químicos, biológicos (restos arqueológicos, etc), o materiales pétreos (mármoles, granitos) bajo agentes reales y en circunstancias realistas, no simuladas en laboratorio. Las posibilidades son, así lo creemos, infinitas, desde aplicaciones estrictamente científicas (estudio de procesos de control inaccesibles hasta ahora) hasta claramente industriales, tanto de banda espectral ancha como estrecha, que, incluso, pueden integrarse en procesos de producción "on-line".

Dado que los dispositivos de captura son ampliamente usados en las tecnologías multimedia, gracias al algoritmo de balance de adaptación luminosa, surgen nuevas posibilidades de reproducción del color para la TV y la Cinematografía, mezclando, por ejemplo, las señales cromáticas de dos cámaras, situadas en la misma posición pero con aperturas relativas diferentes, para ampliar el rango dinámico de luminancia de la escena que se graba, con lo que la transmisión de los datos cromáticos será mucho más exacta para las etapas posteriores. Por supuesto, esto mismo puede suponer un gran avance en Fotografía Digital, permitiendo, por ejemplo, al usuario mezclar dos imágenes de la misma escena real de gran rango dinámico de luminancias, captada bajo dos aperturas relativas diferentes. Otra aplicación es, por ejemplo, la optimización de la cadena de reproducción del color de una imagen en Artes Gráficas (captura, visualización, retoque e impresión). Dentro de este amplio campo de aplicaciones se encuentra la posibilidad, por primera vez real, de diseñar un tele-colorímetro perceptual (Fig. 1.13): ya que la salida de nuestro sistema sería en valores triestímulo absolutos t_{XYZ} (cd/m^2), y para cualquier zona de la escena, se podría implementar a continuación un modelo de apariencia de colores relacionados para estimar la respuesta de un observador humano. Por tanto, las expectativas para la Visión Artificial son también enormes.

Centrándonos de nuevo en el control de calidad, ya que este trabajo propone técnicas de caracterización espectral, optoelectrónica y colorimétrica de dispositivos de captura, se abre también la posibilidad real de comparar a nivel absoluto modelos de la misma marca y entre modelos de marcas diferentes con prestaciones aparentemente similares. Esto, por supuesto, puede suponer un gran estímulo para el avance de las tecnologías implicadas en la fabricación de dispositivos de captura.

Como ejemplo de transferencia tecnológica de los primeros resultados tenemos la caracterización espectral y colorimétrica de cámaras Sony para la caracterización colorimétrica de nuevos modelos de pantallas TV de la misma empresa. También hemos conseguido la aprobación de un proyecto CICYT, enmarcado en esta línea de investigación pero orientado también a la pseudo-coloración del infrarrojo cercano. Finalmente, se han obtenido dos patentes, una centrada en la caracterización espectral y otra en la caracterización colorimétrica con balance de adaptación luminosa.

Ya sea desde el departamento universitario (Óptica y Optometría, UPC) al que pertenece este trabajo, o directamente, desde el departamento universitario al que estoy actualmente adscrito (Interuniversitario de Óptica, Universidad de Alicante), nos encontramos muy receptivos a cualquier propuesta o iniciativa pública o privada que se enmarque dentro de cualquiera de las aplicaciones que hemos comentado.

Capítulo 7. Investigaciones futuras

Aparte de los proyectos con empresas sobre aplicaciones de este trabajo que puedan surgir, creemos, por otra parte, en el desarrollo de varias líneas de investigación centradas en el análisis del nivel de reproducción del color de dispositivos de captura.

Una línea directa, a largo plazo, es la caracterización espectral, optoelectrónica y colorimétrica de modelos de la misma marca y de modelos de marcas diferentes con prestaciones similares. Esto puede suponer, si no se dispone de fondos subvencionados, un coste económico bastante grande, pero las consecuencias de los resultados obtenidos pueden provocar un gran estímulo de innovación en las tecnologías implicadas en la fabricación de dispositivos de captura. Por ejemplo, un estudio a corto plazo podría ser la caracterización completa de un escáner de sobremesa que, como ya sabemos, posee una apertura relativa N y una fuente luminosa fijas. La única dificultad inherente de partida sería el diseño óptico sobre el plano de captación del escáner de un estímulo monocromático de radiancia variable. Otra posibilidad también a corto plazo sería la comparación directa de nuestro sistema caracterizado, perfilado y compensado con un videocolorímetro digital, aparentemente con prestaciones similares, como el Photo Research PR-920, de reciente aparición en el mercado.

Otra gran línea de investigación, a corto y medio plazo, es la optimización del nivel bruto de reproducción del color de nuestro actual dispositivo de captura. Uno de los primeros aspectos a considerar es la ampliación del grupo-test de estímulos-color, de 53 actuales a un grupo diez veces superior. Otro, por ejemplo, como cierre final al tema de la gama de colores reproducibles, sería la captación real del Atlas Munsell con varias aperturas relativas para analizar las desviaciones brutas de claridad, tono y croma, para corroborar las estimaciones que hemos ofrecido en este trabajo. Otra línea, que se pondrá en marcha a lo largo de este año, es la ampliación de la dimensionalidad de la captura del color, de 3 a 6 canales con la anteposición de un filtro coloreado $\tau(\lambda)$ delante de la cámara, para mejorar el grado de exactitud. De acuerdo con el formalismo matemático asociados a las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF), los nuevos canales-color UVW vendrían caracterizados por:

Ecuación 7.1

$$OECSF_{\lambda j} \equiv a_{\lambda j} + \frac{b_{\lambda j}}{1 + \exp\left[-\frac{H_{\lambda} - c_{\lambda j}}{d_{\lambda j}}\right]}, \quad j = U, V, W$$

$$\text{con } \begin{cases} a_{\lambda j} = a_{\lambda k} \\ b_{\lambda j} = b_{\lambda k} \\ c_{\lambda j} = \frac{c_{\lambda k}}{\tau_{\lambda}} \\ d_{\lambda j} = \frac{d_{\lambda k}}{\tau_{\lambda}} \end{cases}, \quad k = R, G, B \quad ; \quad r_j(\lambda, H) = \tau_{\lambda} r_k(\lambda, H) \quad \text{y} \quad a_j(\lambda, NDR) = \tau_{\lambda} a_k(\lambda, NDR)$$

Aunque la matriz \mathbf{M} de cambio de base sea ahora 3×6 , y tengamos que plantear otra vez un balance nuevo de adaptación luminosa, el perfil colorimétrico bruto y escalado será seguramente mucho mejor que el que tenemos ahora. La clave está en qué tipo de perfil espectral de filtro es el más adecuado para fines colorimétricos con las \mathbf{T}_{RGB} que tenemos ahora.

Otra línea de investigación básica, enmarcada en estos últimos aspectos, y a largo plazo, es el diseño o construcción de un instrumento tele-colorimétrico a partir de una cámara digital científica monocroma, con propiedades optoelectrónicas específicas (Tabla 2.10), a la que le antepondríamos un conjunto de tres filtros de forma que, globalmente, las funciones de igualación \mathbf{T}_{RGB} fueran una combinación lineal exacta de las \mathbf{T}_{XYZ} , por ejemplo, la opción de MacAdam (Fig. 1.22).

Otra línea de investigación aplicada, enmarcada también dentro de este bloque, es el estudio de la variación del nivel de reproducción del color al cambiar alguno de los parámetros optoelectrónicos de configuración base o bruta de la cámara digital (Tabla 2.4). Entre estos factores cabría destacar la ganancia externa, el factor gamma (acople al monitor de visualización) y el balance de blanco. Por ejemplo, reduciendo intencionadamente la ganancia externa, conseguiríamos que el rango dinámico de entrada fuera más extenso con lo que las OECSFs serían más suaves, con lo cual, la codificación cromática con apertura relativa N fija sería mucho más eficaz. De esta forma, las ventajas en TV y Cinematografía serían bastante evidentes: ya no sería necesario, por ejemplo, un control artificial exhaustivo de la iluminación de la escena para captar eficazmente todos los objetos. Del mismo modo, con la versatilidad del balance de adaptación luminosa, los tele-colorímetros derivados de estos dispositivos serían más rápidos: con una única captura N estimaríamos colorimétricamente más colores que con la cámara actual bajo la misma apertura relativa.

Por último, estamos también interesados en el desarrollo de un tele-colorímetro perceptual, que proporcione una salida digital según un modelo de apariencia de colores relacionados, como complemento a la investigación teórica de este campo de la Visión del Color, y, como ayuda para la comprensión y optimización de los sistemas cruzados de gestión del color, tan problemáticos a veces en Artes Gráficas o en Fotografía Digital, si incluimos en ella la captura, visualización, retoque e impresión de imágenes captadas previamente por un dispositivo de captura (escáner, cámara).

Creemos, pues, firmemente en las posibilidades de futuro de este trabajo original, ya sean teóricas o de investigación básica, u orientadas a amplios sectores industriales donde la Óptica, la Luz y el Color tengan algún papel preponderante en el control de calidad de los productos fabricados.

Anexo A

Se presenta a continuación la implementación que hacemos del modelo de apariencia de colores aislados Hunt'91 a partir de cómo el autor lo describe en su trabajo original en el Apéndice II.

Datos necesarios de entrada

Coordenadas cromáticas (x, y) y luminancias fotópicas L y escotópicas L _S	
Muestra	x, y, L, L _S
Campo adaptador	x _A , y _A , L _A , L _{AS}
Campo condicionante	x _C , y _C , L _C , L _{CS}

La luminancia fotópica del campo adaptador, L_A, se toma como L^{2/3}/200.

La luminancia escotópica del campo adaptador, L_{AS}, se toma como L_S^{2/3}/200.

La cromaticidad del campo adaptador se toma como la del blanco ideal o equienergético **E**, o sea, x_A = 1/3, y_A = 1/3. El campo condicionante es el campo visto justo antes de visualizar el color aislado. Si no existiera el campo condicionante, los valores de x_C, y_C, L_C, L_{CS} serán los mismos que los del campo adaptador. *En nuestra implementación de modelo, hemos considerado que no existía campo condicionante.*

Luminancias escotópicas

Si las luminancias escotópicas de los estímulos, L_S, no se conocieran, se pueden obtener a partir de las luminancias fotópicas del modo siguiente:

$$\frac{L_S}{2.26} = L \left(\frac{T_C}{400} - 0.4 \right)^{1/3} \quad (A1)$$

donde T_C es la temperatura correlacionada del color si las muestras tienen unas cromaticidades no demasiado lejos del locus Planckiano; para el resto, las luminancias escotópicas L_S deberían obtenerse de sus distribuciones espectrales de potencia radiante usando la función V'(λ) (Wyszecki, Stiles 1982). En nuestra implementación, ya que teníamos de partida todas las distribuciones espectrales de potencia radiante **b** de los 53 estímulos-color, hemos aplicado la segunda opción que se recomienda:

$$L_S = 1700.06 (\mathbf{V}'^t \cdot \mathbf{b}) \Delta\lambda = 1700.06 \sum_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e(\lambda) V'(\lambda) \Delta\lambda \quad (A2)$$

Modelo de apariencia para colores aislados

Pasos para ejecutar el modelo

Paso 1

Calcular X, Y, Z para la muestra, y para el campo condicionante:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{y} L \\ Y &= L \\ Z &= \frac{1-x-y}{y} L \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

En nuestra implementación, como el tele-colorímetro PR-650 ya nos proporciona los valores triestímulo absolutos t_{XYZ} de cada muestra de la carta ColorChecker, no fue necesario ejecutar este primer paso.

Paso 2

Calcular ρ , γ , β para la muestra, y para el campo condicionante:

$$\begin{aligned} \rho &= 0.38971X + 0.68898Y - 0.07868Z \\ \gamma &= -0.22981X + 1.18340Y + 0.04641Z \\ \beta &= 1.00000Z \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

siendo ρ , γ , β las respuestas de los conos o fotoreceptores fotópicos del sistema visual humano.

Paso 3

Calcular W, el ajuste de la sensibilidad al blanco ideal o equienergético:

$$W = \sqrt{\frac{\rho + \gamma + \beta}{3}} \quad (\text{A5})$$

Paso 4

Calcular F_L , el factor de adaptación luminosa al nivel fotópico:

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3}, \quad \text{con } k = \frac{1}{5L_A + 1} \quad (\text{A6})$$

Paso 5

Calcular F_ρ , F_γ , F_β , los factores de adaptación cromática:

$$h_p = \frac{3\rho_C}{\rho_C + \gamma_C + \beta_C}, \quad h_\gamma = \frac{3\gamma_C}{\rho_C + \gamma_C + \beta_C}, \quad h_\beta = \frac{3\beta_C}{\rho_C + \gamma_C + \beta_C} \quad (A6)$$

$$F_p = \frac{1 + (L_A)^{1/3} + h_p}{1 + (L_A)^{1/3} + \frac{1}{h_p}}, \quad F_\gamma = \frac{1 + (L_A)^{1/3} + h_\gamma}{1 + (L_A)^{1/3} + \frac{1}{h_\gamma}}, \quad F_\beta = \frac{1 + (L_A)^{1/3} + h_\beta}{1 + (L_A)^{1/3} + \frac{1}{h_\beta}}$$

Si no existe campo condicionante, $h_p = h_\gamma = h_\beta = 1$ y $F_p = F_\gamma = F_\beta = 1$, que es tal como lo hemos implementado en nuestro caso.

Paso 6

Calcular $\rho_a, \gamma_a, \beta_a$, las respuestas fotorreptorales adaptadas teniendo en cuenta los factores de saturación (sobreexposición) de los conos $B_{\rho u}, B_{\gamma u}, B_{\beta u}$:

$$B_{\rho u} = \frac{10^7}{10^7 + h_p(5L_A)}, \quad B_{\gamma u} = \frac{10^7}{10^7 + h_\gamma(5L_A)}, \quad B_{\beta u} = \frac{10^7}{10^7 + h_\beta(5L_A)}$$

$$\rho_a = B_{\rho u} \left[f_n \left(F_L F_p \left(\frac{L_A}{L_C} \right)^{0.2} \frac{\rho}{W} \right) \right] + 1 = B_{\rho u} \left[f_n \left(F_L \frac{\rho}{W} \right) \right] + 1 \quad (\text{en nuestro caso}) \quad (A7)$$

$$\gamma_a = B_{\gamma u} \left[f_n \left(F_L F_\gamma \left(\frac{L_A}{L_C} \right)^{0.2} \frac{\gamma}{W} \right) \right] + 1 = B_{\gamma u} \left[f_n \left(F_L \frac{\gamma}{W} \right) \right] + 1 \quad (\text{en nuestro caso})$$

$$\beta_a = B_{\beta u} \left[f_n \left(F_L F_\beta \left(\frac{L_A}{L_C} \right)^{0.2} \frac{\beta}{W} \right) \right] + 1 = B_{\beta u} \left[f_n \left(F_L \frac{\beta}{W} \right) \right] + 1 \quad (\text{en nuestro caso})$$

siendo $f_n(x)$ la función Naka-Rushton (logística, Ec. 4.9):

$$f_n(x) = 40 \frac{x^{0.73}}{x^{0.73} + 2} \quad (A8)$$

Paso 7

Calcular A_a , la señal acromática fotópica, y las señales oponentes C_1, C_2, C_3 :

$$A_a = 2\rho_a + \gamma_a + \frac{1}{20}\beta_a - 3.05 + 1$$

$$C_1 = \rho_a - \gamma_a \quad (A9)$$

$$C_2 = \gamma_a - \beta_a$$

$$C_3 = \beta_a - \rho_a$$

Modelo de apariencia para colores aislados

Paso 8

Calcular h_s , el ángulo-tono:

$$h_s = \arctg \left[\frac{t}{t'} \right] = \arctg \left[\frac{\frac{C_2 - C_3}{9}}{C_1 - \frac{C_2}{11}} \right] \in \begin{cases} [0, 90[\text{ deg , si } t, t' > 0 \\ [90, 180[\text{ deg , si } t > 0 \text{ y } t' < 0 \\ [180, 270[\text{ deg , si } t, t' < 0 \\ [270, 360[\text{ deg , si } t < 0 \text{ y } t' > 0 \end{cases} \quad (\text{A10})$$

Paso 9

Calcular el tono-cuadratura-perceptual H :

$$H = H_1 + \frac{100 \frac{h_s - h_1}{e_1}}{\frac{h_s - h_1}{e_1} + \frac{h_2 - h_s}{e_2}} \quad (\text{A11})$$

donde H_1 es 0, ó 100, ó 200, ó 300, según si es rojo, amarillo, verde o azul, respectivamente, el tono que tiene el valor inferior más cercano a h_s . Los valores de h_s y e_s , factor de excentricidad, para los tonos únicos (perceptualmente puros) son:

	h_s [deg]	e_s
Rojo	20.14	0.8
Amarillo	90.00	$0.7 \frac{L}{L+10} + 0.3 \frac{10}{L+10}$
Verde	164.25	1.0
Azul	237.53	$1.2 \frac{L}{L+10} + 0.2 \frac{10}{L+10}$

donde e_1 y h_1 son los valores de e_s y h_s , respectivamente, para el tono único que tiene el valor inferior más cercano a h_s ; e_2 y h_2 son los valores correspondientes para el tono único que tiene el valor superior más cercano a h_s . Por ejemplo: $h_s = 195$, $h_1 = 164.25$, $h_2 = 237.53$.

Paso 10

Calcular el tono-compuesto H_C :

$$H_C = \begin{cases} H_p \text{ Yellow } (100 - H_p) \text{ Red , si } H = H_p \\ H_p \text{ Green } (100 - H_p) \text{ Yellow , si } H = 100 + H_p \\ H_p \text{ Blue } (100 - H_p) \text{ Green , si } H = 200 + H_p \\ H_p \text{ Red } (100 - H_p) \text{ Blue , si } H = 300 + H_p \end{cases} \quad (\text{A12})$$

Paso 11

Calcular e_s , el factor de excentricidad, para la muestra:

$$e_s = e_1 + \frac{e_2 - e_1}{h_2 - h_1} (h_s - h_1) \quad (\text{A13})$$

donde e_1 y h_1 son los valores de e_s y h_s , respectivamente, para el tono único que tiene el valor inferior más cercano a h_s ; e_2 y h_2 son los valores correspondientes para el tono único que tiene el valor superior más cercano a h_s .

Paso 12

Calcular F_{tu} , el factor de tritanopía en baja luminancia:

$$F_{tu} = \frac{L}{L+0.1} \quad (\text{A14})$$

Paso 13

Calcular los índices amarillo-azul M_{YB} y rojo-verde M_{RG} , el colorido M , los índices relativos amarillo-azul m_{YB} y rojo-verde m_{RG} , y la saturación s :

$$\begin{aligned} M_{YB} &= 100 \left(\frac{C_2 - C_3}{9} \right) \left(e_s \frac{10}{13} N_c F_{tu} \right), & M_{RG} &= 100 \left(C_1 - \frac{C_2}{11} \right) \left(e_s \frac{10}{13} N_c \right) \\ M &= \sqrt{(M_{YB})^2 + (M_{RG})^2} \\ m_{YB} &= \frac{M_{YB}}{\rho_a + \gamma_a + \beta_a}, & m_{RG} &= \frac{M_{RG}}{\rho_a + \gamma_a + \beta_a} \\ s &= \frac{50M}{\rho_a + \gamma_a + \beta_a} \end{aligned} \quad (\text{A15})$$

donde $N_c = 0.5$ es el factor de inducción cromática del entorno.

Paso 14

Calcular F_{LS} , el factor de adaptación luminosa al nivel escotópico:

$$F_{LS} = 3800 j^2 \left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right) + 0.2(1 - j^2)^4 \left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right)^{1/6}, \quad \text{con } j = \frac{10^{-5}}{\frac{5L_{AS}}{2.26} + 10^{-5}} \quad (\text{A16})$$

Paso 15

Calcular la señal acromática escotópica A_s , teniendo en cuenta el factor de saturación B_{Su} de los bastones o fotorreceptores escotópicos:

$$B_{Su} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{1 + 0.3 \left[\left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right) \sqrt{\frac{LS}{2.26}} \right]^{0.3}} + \frac{1}{1 + 5 \left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right)} \right\} \quad (A17)$$

$$A_S = 3.05 B_{Su} f_n \left(F_{LS} \left(\frac{L_{AS}}{L_{CS}} \right)^{0.2} \sqrt{\frac{LS}{2.26}} \right) + 0.3 = 3.05 B_{Su} f_n \left(F_{LS} \sqrt{\frac{LS}{2.26}} \right) + 0.3 \quad (\text{en nuestro caso})$$

donde $f_n(x)$ es la misma función logística que en (A8).

Paso 16

Calcular A , la señal acromática total:

$$A = A_a + A_S - 0.25597 \quad (A18)$$

Paso 17

Calcular Q , la luminosidad:

$$Q = \left[1.1 \left(A + \frac{M}{100} \right) \right]^{0.9} \quad (A19)$$

Paso 18

Tabular los valores de H , H_C , M , s y Q .

Ejemplo

Para enseñar la forma en que trabaja el modelo, se proporciona el ejemplo siguiente:

	x	y	L
Muestra	0.3580	0.3900	L
Campo adaptador	1/3	1/3	$L^{2/3}/200$
Campo condicionante	1/3	1/3	$L^{2/3}/200$

Las luminancias escotópicas, divididas por 2.26, son asumidas iguales a las luminancias fotópicas: $L_S/2.26 = L$.

La apariencia de la muestra se predice para un rango de luminancias que va desde 10^5 hasta 10^{-6} cd/m² (Tabla A1).

Se incluyen también en la tabla los resultados para un color relacionado que tenga la misma cromaticidad, un factor de luminancia del 70% y una luminancia de 140 cd/m².

Tabla A1: Predicciones para la muestra aislada con varias luminancias

L (cd/m ²)	H	H_C	M	s	Q
100000.0	142	42G 58Y	5.8	2	94.2
10000.0	143	43G 57Y	14.7	7	80.4
1000.0	143	43G 57Y	23.7	16	67.3
100.0	145	45G 55Y	18.3	25	44.8
10.0	152	52G 48Y	4.5	22	22.1
1.0	162	62G 38Y	0.6	7	10.3
0.1	164	64G 36Y	0.1	1	4.8
0.01			0.0	0	2.6
0.001			0.0	0	1.7
0.0001			0.0	0	1.3
0.00001			0.0	0	1.2
0.000001			0.0	0	1.1
Predicciones para un color relacionado* de la misma cromaticidad					
L (cd/m ²)	H	H_C	M	s	Q
140	143	43G 57Y	26.2	39	33.8

*Datos para la muestra relacionada:

Iluminante: estímulo equienergético E : $x_E = 0.3333$, $y_E = 0.3333$

Luminancia del blanco de referencia: $L_W = 200$ cd/m²

Factor de inducción luminosa del entorno: $N_b = 75$

Factor de inducción cromática del entorno: $N_c = 1$

Factor de luminancia del fondo: $Y_B = 100$

Factor de luminancia de la muestra: $Y = 70$ (con lo que $L = 140$ /cd/m²)

Predicciones

Pueden observarse las tendencias siguientes a la vista de los resultados de la tabla anterior. El colorido M aumenta desde cero en niveles escotópicos a un máximo a 1000 cd/m², y entonces desciende de nuevo porque el sistema visual se acerca a su respuesta máxima (se sobreexpones o satura). La saturación s varía bastante menos en la parte principal del rango fotópico. La luminosidad Q aumenta desde valores muy bajos en niveles escotópicos hasta aproximadamente 80 en 10000 cd/m², después del cual, aunque sigue aumentado, el ritmo de aumento se ralentiza debido a que nos acercamos a la respuesta máxima. El tono-compuesto H_C muestra debido al efecto Bezold-Brücke un desplazamiento desde cerca de 43G 57Y a niveles altos de luminancia, hasta cerca de 64G 36Y a niveles fotópicos bajos.

El color relacionado a la luminancia de 140 cd/m² tiene una luminosidad $Q = 33.8$ y un colorido $M = 26.2$; parece evidente desde la parte superior de la tabla que el color aislado con luminosidad similar tendría un colorido $M \cong 12$. Este descenso en el colorido ocurre porque el color aislado se estaba visualizando en un fondo y entorno oscuro.

Anexo B

Se presenta a continuación, para el perfil colorimétrico bruto escalado nº 1 y compensado (Tabla 5.6; Fig. 5.14), cómo se insertan los datos obtenidos de haber aplicado el modelo de apariencia para colores aislados en el algoritmo del índice de reproducción del color *CRI*.

En primer lugar, se muestran los datos cromáticos estimados mediante el perfil bruto escalado para los colores útiles de la carta ColorChecker bajo la lámpara INC, para seguir con los datos colorimétricos medidos según PR-650, y, acabar con los datos cromáticos correspondientes tras aplicar el perfil compensado. De modo similar, se procederá con los datos cromáticos de los colores útiles de la carta bajo las lámparas HWL y DAY.

Tabla B1: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico bruto escalado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _C	M	s	Q
m2_INC	84.48	72.69	30.96	49	49Y 51R	22.1	28	48.1
m3_INC	47.49	48.23	34.97	103	3G 97Y	4.3	6	41.6
m5_INC	55.41	52.44	36.38	52	52Y 48R	8.4	12	42.8
m6_INC	60.09	67.28	36.95	146	46G 54Y	16.6	21	46.7
m8_INC	35.93	36.40	33.73	135	35G 65Y	1.4	2	37.0
m9_INC	83.33	63.21	27.21	24	24Y 76R	38.6	52	45.4
m11_INC	75.91	77.77	27.87	108	8G 92Y	15.5	19	49.0
m17_INC	69.55	54.38	30.85	15	15Y 85R	33.2	47	42.9
m18_INC	35.85	41.30	33.32	188	88G 12Y	16.5	26	39.5
m20_INC	108.31	101.28	47.20	72	72Y 27R	14.6	16	53.0
m21_INC	78.69	74.21	37.71	70	70Y 30R	12.3	15	48.4
m22_INC	51.94	50.45	29.62	76	76Y 24R	7.8	11	42.1

Tabla B2: Datos cromáticos referentes al observador patrón CIE-1931 XYZ (medidos por PR-650).

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _C	M	s	Q
m2_INC	60.20	47.50	11.13	46	46Y 54R	29.9	49	43.6
m3_INC	24.58	24.47	16.00	84	84Y 16R	3.9	8	34.4
m5_INC	31.67	27.61	17.11	28	28Y 72R	13.9	28	35.9
m6_INC	33.22	40.01	15.93	153	53G 47Y	22.3	38	40.8
m8_INC	14.22	13.28	15.31	359	59R 41B	3.9	11	27.7
m9_INC	61.33	37.47	7.56	16	16Y 84R	63.3	117	40.2
m11_INC	51.22	54.28	5.62	119	19G 81Y	26.5	43	45.3
m17_INC	46.85	27.94	11.84	1	1Y 99R	62.2	128	36.3
m18_INC	13.64	17.98	14.66	200	100B 0G	21.7	55	31.2
m20_INC	84.25	77.44	27.96	73	73Y 27R	17.0	21	50.0
m21_INC	53.77	49.27	17.95	69	69Y 31R	14.9	23	43.8
m22_INC	29.47	27.30	9.93	68	68Y 32R	10.7	23	35.8

Índice de reproducción del color

Tabla B3: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico compensado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _c	M	s	Q
m2_INC	51.83	37.67	0.86	53	53Y 47R	36.0	73	41.5
m3_INC	14.84	13.21	4.88	50	50Y 50R	8.4	27	29.7
m5_INC	22.76	17.42	6.28	23	23Y 77R	21.7	59	32.2
m6_INC	27.44	32.26	6.86	139	39G 61Y	21.7	44	38.9
m8_INC	3.28	1.37	3.64	386	86R 14B	9.9	87	19.6
m9_INC	50.68	28.18	2.89	14	14Y 86R	69.8	157	37.3
m11_INC	43.26	42.75	2.23	105	5G 95Y	22.6	42	42.6
m17_INC	36.90	19.36	0.75	12	12Y 88R	65.6	188	33.4
m18_INC	3.20	6.28	3.23	197	97G 3Y	22.6	110	24.8
m20_INC	75.66	66.26	17.10	68	68Y 32R	21.7	30	48.5
m21_INC	46.04	39.18	7.61	62	62Y 38R	21.0	38	41.7
m22_INC	19.29	15.42	0.48	56	56Y 44R	16.7	55	31.2

Tabla B4: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico bruto escalado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _c	M	s	Q
m1_HWL	136.93	117.84	56.92	46	46Y 54R	23.5	24	54.2
m3_HWL	189.80	182.45	139.20	57	57Y 43R	7.8	7	59.7
m4_HWL	143.85	149.80	65.11	115	15G 85Y	16.6	16	57.8
m5_HWL	246.82	219.56	165.01	23	23Y 77R	18.6	15	61.9
m6_HWL	278.39	303.94	150.53	133	33G 67Y	19.8	15	65.8
m8_HWL	108.33	101.83	113.01	356	56R 44B	9.5	10	51.5
m9_HWL	235.69	174.02	70.10	28	28Y 72R	47.6	44	59.9
m10_HWL	93.47	83.30	73.08	1	1Y 99R	16.7	19	48.3
m11_HWL	264.46	274.48	70.43	117	17G 83Y	29.0	24	65.2
m13_HWL	65.70	64.26	71.86	331	31R 69B	3.6	4	44.3
m14_HWL	116.67	133.61	57.45	142	42G 58Y	25.6	26	56.3
m15_HWL	158.95	117.54	49.46	25	25Y 75R	46.9	49	53.6
m17_HWL	189.69	141.65	88.49	7	7Y 93R	47.6	45	57.1
m18_HWL	91.98	102.53	86.96	187	87G 13Y	16.4	17	52.1
m20_HWL	248.44	228.39	112.07	69	69Y 31R	16.6	14	63.0
m21_HWL	175.34	162.41	85.92	66	66Y 34R	15.1	14	58.8
m22_HWL	114.31	108.89	64.62	69	69Y 31R	10.9	11	53.1
m23_HWL	72.74	72.24	51.23	84	84Y 16R	5.5	7	45.8

Tabla B5: Datos cromáticos referentes al observador patrón CIE-1931 XYZ (medidos por PR-650).

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _c	M	s	Q
m1_HWL	103.80	81.85	18.78	52	52Y 48R	34.2	44	50.7
m3_HWL	163.70	154.90	121.90	42	42Y 58R	9.3	8	57.8
m4_HWL	116.70	125.70	26.80	123	23G 77Y	30.4	33	56.4
m5_HWL	225.00	191.60	150.50	7	7Y 93R	25.6	22	60.5
m6_HWL	219.50	253.20	105.00	142	42G 58Y	29.1	24	64.1
m8_HWL	75.16	63.75	93.18	348	48R 52B	22.5	28	45.5
m9_HWL	235.00	147.50	37.12	23	23Y 77R	75.6	77	58.9
m10_HWL	59.61	42.40	42.83	384	84R 16B	44.5	68	40.6
m11_HWL	249.20	270.90	23.84	127	27G 73R	53.4	49	65.6
m13_HWL	29.35	23.06	44.81	345	45R 55B	19.5	39	32.7
m14_HWL	82.77	106.50	16.12	146	46G 54Y	51.2	61	54.3

m15_HWL	133.50	73.46	10.39	17	17Y 83R	95.6	132	49.4
m17_HWL	173.00	104.80	63.66	396	96R 4B	88.6	94	54.2
m18_HWL	59.11	68.74	60.71	200	100B 0G	21.9	27	47.1
m20_HWL	222.40	204.60	83.18	76	76Y 24R	18.4	16	62.1
m21_HWL	151.40	138.80	56.69	73	73Y 27R	18.1	18	57.4
m22_HWL	82.61	76.44	30.99	72	72Y 28R	15.6	20	49.3
m23_HWL	33.78	31.34	12.89	66	66Y 34R	10.8	21	36.9

Tabla B6: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico compensado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _c	M	s	Q
m1_HWL	104.28	82.82	26.82	44	44Y 56R	33.3	41	50.6
m3_HWL	157.15	147.43	109.10	45	45Y 55R	10.8	10	57.4
m4_HWL	111.20	114.78	35.02	112	12G 88Y	20.8	23	55.0
m5_HWL	214.27	184.54	134.91	17	17Y 83R	23.6	20	60.1
m6_HWL	245.74	268.92	120.44	131	31G 69Y	21.9	18	64.6
m8_HWL	75.68	66.81	82.91	356	56R 44B	17.4	21	46.4
m9_HWL	203.04	139.00	40.00	29	29Y 71R	59.3	61	57.9
m10_HWL	60.82	48.27	42.98	391	91R 9B	30.3	44	42.1
m11_HWL	231.81	239.46	40.33	118	18G 82Y	36.3	33	64.1
m13_HWL	33.05	29.24	41.76	344	44R 56B	11.9	22	35.3
m14_HWL	84.02	98.58	27.35	140	40G 60Y	32.6	38	53.1
m15_HWL	126.30	82.52	19.36	25	25Y 75R	64.3	81	50.1
m17_HWL	157.04	106.63	58.40	5	5Y 95R	63.8	68	54.2
m18_HWL	59.33	67.51	56.86	191	91G 9Y	18.0	22	47.0
m20_HWL	215.79	193.37	81.97	67	67Y 33R	20.1	18	61.5
m21_HWL	142.69	127.39	55.83	62	62Y 38R	19.7	20	56.3
m22_HWL	81.66	73.87	34.52	59	59Y 41R	16.4	21	48.8
m23_HWL	40.09	37.21	21.14	55	55Y 45R	10.0	17	38.4

Tabla B7: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico bruto escalado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _c	M	s	Q
m1_DAY	85.20	81.97	56.51	64	64Y 36R	8.0	9	48.3
m2_DAY	206.42	191.87	111.33	62	62Y 38R	14.0	12	60.9
m3_DAY	120.29	127.13	140.05	223	23B 77G	11.5	11	54.5
m4_DAY	88.22	101.85	62.52	160	60G 40Y	21.5	23	52.1
m5_DAY	138.17	135.76	152.00	325	35R 75B	3.8	4	55.3
m6_DAY	146.52	180.36	137.67	190	90G 10Y	32.8	28	59.3
m7_DAY	168.24	139.72	54.00	50	50Y 50R	28.9	29	57.0
m8_DAY	84.56	84.13	125.92	310	10R 90B	11.7	13	48.5
m9_DAY	157.13	125.19	74.45	18	18Y 82R	35.5	35	55.5
m10_DAY	71.39	69.12	74.03	351	51R 49B	4.5	5	45.6
m11_DAY	167.05	196.77	71.79	144	44G 56Y	33.2	30	61.4
m12_DAY	185.62	171.70	60.02	81	81Y 19R	19.6	18	59.8
m13_DAY	60.27	59.82	83.84	312	12R 88B	8.4	11	43.4
m14_DAY	85.13	109.22	60.45	173	73G 27Y	36.8	39	53.3
m15_DAY	105.49	86.33	50.21	23	23Y 77R	29.6	34	48.8
m16_DAY	220.60	223.28	66.78	110	10G 90Y	23.3	20	63.1
m17_DAY	123.50	101.40	92.60	390	90R 10B	30.7	32	52.1
m18_DAY	72.98	85.35	96.05	216	16B 84G	26.4	29	49.2

Índice de reproducción del color

m19_DAY	224.32	229.91	170.56	115	15G 85Y	6.4	5	62.3
m20_DAY	170.64	175.27	133.08	118	18G 82Y	6.1	5	59.2
m21_DAY	121.51	125.02	97.71	123	23G 77Y	5.5	5	54.9
m22_DAY	84.14	87.88	70.72	143	43G 57Y	6.4	7	49.8
m23_DAY	59.57	63.11	53.17	164	64G 36Y	7.5	10	43.9

Tabla B8: Datos cromáticos referentes al observador patrón CIE-1931 XYZ (medidos por PR-650).

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _C	M	s	Q
m1_DAY	41.25	35.66	16.89	41	41Y 59R	16.9	30	39.2
m2_DAY	163.20	147.10	77.68	56	56Y 44R	17.8	17	58.1
m3_DAY	78.22	82.76	113.10	231	31B 69G	16.0	18	48.8
m4_DAY	48.45	60.25	23.51	157	57G 43Y	30.2	42	46.3
m5_DAY	96.75	91.25	127.20	326	26R 74B	10.5	11	50.2
m6_DAY	101.90	136.30	105.10	197	97G 3Y	44.7	43	56.0
m7_DAY	126.10	97.10	12.50	61	61Y 39R	38.4	48	53.5
m8_DAY	43.43	39.50	96.95	315	15R 85B	18.7	28	38.7
m9_DAY	118.50	79.50	40.30	6	6Y 94R	63.0	76	50.8
m10_DAY	32.30	25.07	41.03	356	56R 44B	22.7	44	34.1
m11_DAY	126.50	159.70	28.92	145	45G 55Y	51.6	52	59.5
m12_DAY	144.50	131.80	18.73	93	93Y 7R	28.6	32	57.4
m13_DAY	19.17	15.24	52.91	323	23R 77B	14.6	36	28.7
m14_DAY	44.21	67.97	20.66	172	72G 28Y	56.8	77	48.1
m15_DAY	67.03	38.86	11.54	7	7Y 93R	74.8	132	40.7
m16_DAY	182.20	186.70	22.65	117	17G 83Y	39.0	39	61.7
m17_DAY	85.99	55.73	63.32	379	79R 21B	65.1	86	45.1
m18_DAY	32.01	42.66	65.72	221	21B 79G	39.4	59	40.3
m19_DAY	187.40	193.30	148.10	123	23G 77Y	6.4	5	60.3
m20_DAY	130.80	134.70	104.60	123	23G 77Y	5.8	5	56.1
m21_DAY	81.24	83.22	65.27	118	18G 82Y	4.7	5	50.0
m22_DAY	44.47	46.11	35.91	131	31G 69Y	4.7	7	42.2
m23_DAY	19.15	19.91	15.60	137	37G 63Y	3.1	7	31.7

Tabla B9: Datos cromáticos estimados según el perfil colorimétrico compensado.

MUESTRA	X (cd/m ²)	Y (cd/m ²)	Z (cd/m ²)	H	H _C	M	s	Q
m1_DAY	52.55	46.95	26.41	43	43Y 57R	14.8	23	42.1
m2_DAY	173.77	156.85	81.23	58	58Y 42R	17.8	17	58.8
m3_DAY	87.63	92.11	109.95	229	29B 71G	11.7	12	50.5
m4_DAY	55.57	66.83	32.43	158	58G 42Y	25.7	34	47.3
m5_DAY	105.52	100.73	121.91	333	33R 77B	7.8	8	51.7
m6_DAY	113.86	145.34	107.58	191	91G 9Y	37.6	35	56.9
m7_DAY	135.59	104.70	23.90	51	51Y 49R	38.2	44	54.1
m8_DAY	51.91	49.11	95.82	315	15R 85B	15.1	20	41.6
m9_DAY	124.48	90.17	44.35	14	14Y 86R	49.8	57	52.1
m10_DAY	38.73	34.10	43.93	354	54R 46B	13.5	23	37.4
m11_DAY	134.40	161.75	41.69	142	42G 58Y	40.6	40	59.5
m12_DAY	152.97	136.67	29.93	82	82Y 18R	25.3	27	57.3
m13_DAY	27.62	24.79	53.74	322	22R 78B	12.3	24	33.3
m14_DAY	52.48	74.19	30.36	173	73G 27Y	46.9	60	49.0
m15_DAY	72.84	51.31	20.11	17	17Y 83R	47.7	72	43.2

m16_DAY	187.95	188.26	36.69	110	10G 90Y	29.7	28	61.6
m17_DAY	90.85	66.38	62.50	386	86R 14B	47.2	58	47.3
m18_DAY	40.33	50.33	65.96	219	19B 81G	32.2	44	42.6
m19_DAY	191.67	194.89	140.47	106	6G 94Y	6.3	5	60.5
m20_DAY	137.99	140.25	102.99	106	6G 94Y	5.7	5	56.7
m21_DAY	88.86	90.00	67.62	102	2G 98Y	4.7	5	51.0
m22_DAY	51.49	52.86	40.62	119	19G 81Y	4.3	6	43.8
m23_DAY	26.92	28.08	23.07	148	48G 52Y	3.9	8	34.9

Con estos datos cromáticos, el paso siguiente para iniciar el cálculo del índice de reproducción del color CRI es tabular las diferencias perceptuales individuales de luminosidad ΔQ , colorido ΔM y tono ΔH de todo el conjunto de colores:

Tabla B10: Diferencias perceptuales del conjunto-test tras aplicar los perfiles colorimétricos y el modelo de apariencia para colores aislados.

MUESTRA	H _c (PR-650)	Perfil colorimétrico bruto escalado			Perfil colorimétrico compensado		
		ΔQ	ΔM	ΔH	ΔQ	ΔM	ΔH
m2_INC	46Y 54R	4.5	-7.8	3.2	-2.1	6.1	7.0
m3_INC	84Y 16R	7.2	0.4	18.9	-4.7	4.6	-34.5
m5_INC	28Y 72R	6.8	-5.5	24.7	-3.7	7.9	-4.3
m6_INC	53G 47Y	5.9	-5.7	-7.4	-1.9	-0.5	-13.8
m8_INC	59R 41B	9.3	-2.5	176.2	-8.1	6.0	27.2
m9_INC	16Y 84R	5.2	-24.7	8.2	-2.8	6.5	-2.0
m11_INC	19G 81Y	3.7	-11.0	-10.8	-2.7	-3.9	-13.1
m17_INC	1Y 99R	6.7	-29.0	14.3	-2.8	3.5	10.9
m18_INC	100B 0G	8.3	-5.2	-12.7	-6.4	0.9	-3.4
m20_INC	73Y 27R	3.0	-2.4	-1.2	-1.5	4.7	-5.1
m21_INC	69Y 31R	4.5	-2.6	1.2	-2.1	6.1	-6.5
m22_INC	68Y 32R	6.3	-2.9	7.8	-4.6	6.1	-12.0
m1_HWL	52Y 48R	3.5	-10.7	-5.4	-0.1	-0.9	-8.3
m3_HWL	42Y 58R	1.9	-1.5	14.9	-0.4	1.5	3.1
m4_HWL	23G 77Y	1.4	-13.8	-8.0	-1.3	-9.6	-10.7
m5_HWL	7Y 93R	1.5	-7.0	15.2	-0.3	-2.0	9.8
m6_HWL	42G 58Y	1.7	-9.3	-9.4	0.6	-7.2	-10.9
m8_HWL	48R 52B	6.0	-13.1	7.5	0.9	-5.2	7.7
m9_HWL	23Y 77R	1.0	-28.0	4.9	-1.0	-16.3	5.5
m10_HWL	84R 16B	7.7	-27.8	17.3	1.4	-14.2	7.5
m11_HWL	27G 73R	-0.4	-24.4	-9.8	-1.5	-17.1	-9.0
m13_HWL	45R 55B	11.7	-15.9	-14.2	2.6	-7.6	-0.6
m14_HWL	46G 54Y	1.9	-25.6	-4.2	-1.3	-18.7	-6.7
m15_HWL	17Y 83R	4.2	-48.7	7.8	0.7	-31.2	8.1
m17_HWL	96R 4B	2.9	-41.0	11.8	-0.0	-24.7	9.0
m18_HWL	100B 0G	4.9	-5.5	-12.9	-0.1	-3.9	-9.1
m20_HWL	76Y 24R	1.0	-1.8	-7.6	-0.6	1.7	-9.5
m21_HWL	73Y 27R	1.5	-3.0	-7.0	-1.0	1.7	-11.0
m22_HWL	72Y 28R	3.7	-4.7	-2.7	-0.5	0.8	-12.6
m23_HWL	66Y 34R	8.9	-5.4	18.1	1.6	-0.8	-11.3
m1_DAY	41Y 59R	9.1	-8.9	23.0	2.9	-2.1	2.2
m2_DAY	56Y 44R	2.8	-3.8	6.5	0.8	0.0	1.9
m3_DAY	31B 69G	5.7	-4.6	-8.7	1.6	-4.3	-2.8
m4_DAY	57G 43Y	5.8	-8.7	3.6	1.0	-4.5	1.2

Índice de reproducción del color

m5_DAY	26R 74B	5.2	-6.7	-0.5	1.5	-2.7	7.4
m6_DAY	97G 3Y	3.3	-12.0	-7.6	0.9	-7.1	-6.3
m7_DAY	61Y 39R	3.5	-9.5	-11.1	0.7	-0.3	-10.1
m8_DAY	15R 85B	9.8	-7.0	-4.9	2.9	-3.6	-0.2
m9_DAY	6Y 94R	4.8	-27.5	12.4	1.3	-13.2	8.5
m10_DAY	56R 44B	11.5	-18.2	-5.0	3.3	-9.2	-1.4
m11_DAY	45G 55Y	1.8	-18.4	-1.2	-0.1	-11.0	-2.7
m12_DAY	93Y 7R	2.4	-9.1	-11.2	0.2	-3.3	-10.2
m13_DAY	23R 77B	14.7	-6.2	-11.0	4.6	-2.3	-1.5
m14_DAY	72G 28Y	5.2	-20.0	1.4	0.8	-9.8	0.7
m15_DAY	7Y 93R	8.1	-45.1	16.4	2.6	-27.1	10.4
m16_DAY	17G 83Y	1.4	-15.7	-7.6	-0.1	-9.3	-6.8
m17_DAY	79R 21B	7.0	-34.4	10.8	2.1	-17.9	6.8
m18_DAY	21B 79G	8.9	-13.0	-4.6	2.3	-7.2	-1.6
m19_DAY	23G 77Y	2.0	-0.1	-8.4	0.2	-0.0	-17.2
m20_DAY	23G 77Y	3.1	-0.3	-4.7	0.6	-0.0	-17.2
m21_DAY	18G 82Y	4.9	-0.9	4.5	1.0	0.1	-16.0
m22_DAY	31G 69Y	7.6	1.7	11.1	1.6	-0.4	-12.4
m23_DAY	37G 63Y	12.2	4.4	27.1	3.2	0.8	10.7

El paso siguiente, y clave, es ponderar las diferencias perceptuales en dos partes teniendo en cuenta el porcentaje de tono compuesto H_C . Por ejemplo: si $H_C = 21G 79Y$, las diferencias perceptuales se descomponen en $\Delta Q_1 = 0.21\Delta Q$, $\Delta Q_2 = 0.79\Delta Q$, $\Delta M_1 = 0.21\Delta M$, $\Delta M_2 = 0.79\Delta M$, $\Delta H_1 = 0.21\Delta H$ y $\Delta H_2 = 0.79\Delta QH$. Las diferencias parciales "1" se agrupan en el tono verde G, mientras que las diferencias parciales "2" quedan con el tono amarillo Y. Realizando este proceso con cada uno de los colores del conjunto, nos queda un formato de tabla parecido a éste:

Tabla B11: Ponderación de las diferencias perceptuales de varios estímulos del conjunto-test.

ΔX	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	MUESTRA
ΔQ	-0.79	-0.24			m9_HWL: 23Y 77R
ΔM	-12.49	-3.84			
ΔH	4.23	1.30			
ΔQ	1.19			0.24	m10_HWL: 84R 16B
ΔM	-11.89			-2.35	
ΔH	6.30			1.24	
ΔQ	-1.10	-0.40			m11_HWL: 27Y 73R
ΔM	-12.50	-4.60			
ΔH	-6.56	-2.41			
ΔQ	1.19			1.46	m13_HWL: 45R 55B
ΔM	-3.42			-4.20	
ΔH	-0.27			-0.34	
ΔQ		-0.68	-0.58		m14_HWL: 46G 54Y
ΔM		-10.03	-8.65		
ΔH		-3.59	-3.10		

A partir de aquí, lo que resta es un cálculo completamente estadístico: para cada región tonal, se tabulan los promedios de las diferencias perceptuales parciales (tal como se disponen en columnas), tanto si se considera el signo (diferencias relativas) como si no (diferencias absolutas). Los últimos se utilizan para calcular los índices perceptuales combinados IcQ , IcM e IcH como promedio en los cuatro tonos de la variable $100-m_{\Delta X}$. En cambio, los primeros sólo sirven computacionalmente para marcar con el signo la tendencia general de la desviación de color en cada región tonal. Salvo que el promedio relativo sea menor de la unidad, con lo cual no se marca desviación, tenemos que:

- un signo +(-) en la variable Q indicará que los colores se reproducen más claros (oscuros);
- un signo + (-) en la variable M indicará que los colores se reproducen más saturados (desaturados);
- un signo + (-) en la variable H indicará que los colores se desvían en sentido antihorario (horario) hacia la región tonal vecina;

Al final, el índice de reproducción del color CRI no es más que un promedio ponderado de los índices combinados, dando más preponderancia a la variable tono H que al resto:

Ecuación B1

$$CRI = \frac{IcQ + IcM + kIcH}{k + 2}, \quad k = 2$$

La razón de esta última ponderación se debe a que el sistema visual humano es mucho más sensible a diferencias de tono que de luminosidad o de saturación. Con lo cual, en términos estadísticos generales, parece ser que somos mucho más estrictos, o menos tolerantes, al juzgar diferencias de tono que otras cuantitativamente iguales de luminosidad o de saturación. Por ejemplo, en el algoritmo que propone desde 1995 la CIE para el cálculo de diferencias de color (Ec. B2), las diferencias psicométricas ΔL^* , ΔC^* , ΔH^* en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ se ponderan con varios factores como k_L , k_C y k_H . En condiciones habituales, los tres factores se toman como la unidad, pero si copiamos la idea del algoritmo CRI, $k_L = k_C = 2$ y $k_H = 1$. En nuestros cálculos del Capítulo 5 hemos considerado siempre $k_L = k_C = k_H = 1$.

Ecuación B2

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

$$\text{con } S_L = 1, \quad S_C = 1 + 0.045C_{std}^*, \quad S_H = 1 + 0.015C_{std}^*$$

Por tanto, como conclusión de este anexo reproducimos la Tabla 5.6, aquella en la que se mostraron los resultados bajo el algoritmo CRI de los perfiles colorimétricos bruto escalado y compensado nº 1.

Índice de reproducción del color

Tabla B12: Resultados del algoritmo de índice de reproducción del color al perfil colorimétrico nº 1.

PERFIL COLORIMÉTRICO BRUTO Y ESCALADO					PERFIL COLORIMÉTRICO COMPENSADO				
ABSOLUTO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	ABSOLUTO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
ΔQ	3.01	7.59	2.21	4.36	ΔQ	1.02	6.21	0.52	1.69
ΔM	10.77	9.35	4.19	4.86	ΔM	5.58	7.61	2.46	2.39
ΔH	7.78	9.82	3.47	9.30	ΔH	3.95	10.56	3.20	2.35
RELATIVO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	RELATIVO	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
ΔQ	3.00	2.07	2.21	4.36	ΔQ	0.18	-0.13	0.25	0.20
ΔM	-10.77	-3.61	-3.93	-4.86	ΔM	-4.36	-1.09	-2.43	-1.89
ΔH	5.75	0.51	-1.63	3.25	ΔH	1.65	-4.23	-2.65	1.29
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcQ	96.99	92.41	97.79	95.64	IcQ	98.98	93.79	99.48	98.3
juicio relativo	claro	claro	claro	claro	juicio relativo	igual	igual	igual	Igual
$IcQ = 95.71$					$IcQ = 97.64$				
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcM	89.23	90.65	95.81	95.14	IcM	94.42	92.39	97.54	97.61
juicio relativo	débil.	débil.	débil.	débil.	juicio relativo	débil.	débil.	débil.	Débil
$IcM = 92.71$					$IcM = 95.49$				
	ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL		ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL
IcH	92.22	90.18	96.53	90.70	IcH	96.05	89.44	96.80	97.65
juicio relativo	R → Y	igual	G → Y	B → R	juicio relativo	R → Y	Y → R	G → Y	B → R
$IcH = 92.41$					$IcH = 94.99$				
$CRI = 93.31$					$CRI = 95.78$				

Referencias

- Acharya, T.; Tsai, P-S. (1999). "A new block matching based color interpolation algorithm". *Proceedings of SPIE*, 3648: 60-65.
- Advanced Imaging. (2000). "Advanced Imaging's BUYERS GUIDE Introduction". *Advanced Imaging*, 15(12): 8-10.
- Agfa. (1996). *Fotografía Digital. Teoría y conceptos básicos*. Amberes: Agfa Gevaert N.V.
- Alessi, P.J. (1996). "CIE Guidelines for coordinated research on evaluation of colour appearance models for reflection print and self-luminous display comparisons". *Color Research and Application*, 19(1): 48-58.
- Artigas, J.M.; et al. (1995). *Óptica Fisiológica: Psicofísica de la Visión*. Madrid: InterAmericana McGraw-Hill.
- Attridge, G.G.; Pointer, M.R. (1994). "Colour Science in Photography". *The Journal of Photographic Science*, 42: 197-209.
- Attridge, G.G.; Pointer, M.R.; Reid, D.G. (1991). "The Application of a Colour Reproduction Index to Photographic Reflection Prints-II". *The Journal of Photographic Science*, 39: 183-192.
- Attridge, G.G.; et al. (1993). "The Application of a Colour Reproduction Index to Photographic Transparencies". *The Journal of Photographic Science*, 41: 11-17.
- Attridge, G.G.; et al. (1995). "Colour Reproduction Indices and Acceptability of Prints at Controlled Density Levels". *The Journal of Photographic Science*, 43: 144-151.
- Barnard, K.; Funt, B. (1999). "Camera calibration for color research". *Proceedings of SPIE*, 3644: 75-85.
- Berger-Schunn, A. (1994). *Practical Color Measurement. A Primer for the Beginner. A Reminder of the Expert*. New York: John Wiley & Sons.
- Berns, R.S. (2000). *Billmeyer & Saltzman's principles of color technology*. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons.
- Berns, R.S.; Petersen, K.H. (1988). "Empirical Modeling of Systematic Spectrophotometric Errors". *Color Research and Application*, 13(4): 243-256.
- Berns, R.S.; Reniff, L. (1997). "An Abridged Technique to Diagnose Spectrophotometric Errors". *Color Research and Application*, 22(1): 51-60.

B&H The Professional's Source (2001, junio). *B&H Photo Video Pro Audio Home Page* [En línea]. Página web, URL <<http://www01.bhphotovideo.com>>. [Consulta el 11 de junio de 2001].

Borges, C.F. (1994). "Numerical determination of tristimulus values". *Journal of the Optical Society of America A*, 11(12): 3152-3161.

Boyle, W.S., Smith, G.E. (1970). "Charge Coupled Semiconductor Devices". *Journal of the Bells Systems Technology* 49: 587-593.

Brainard, D.H. (1995). "Colorimetry". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 26, p. 1-54.

Brill, M.H. (1996). "Do Tristimulus Values Have Units?". *Color Research and Application*, 21(4): 310-313.

Burns, P.D.; Berns, R.S. (1997). "Error Propagation Analysis in Color Measurement and Imaging". *Color Research and Application*, 22(4): 280-289.

Capilla, P. (1995). "Funciones de Igualación de Color vs. Sensibilidad Espectral de los Mecanismos Fundamentales". *Ver y Oír*, 96(6): 17-24.

Carroll, B.H.; Higgins, G.C.; James, T.H. (1980). *Introduction to photographic teory, The silver halide process*. New York: John Wiley & Sons.

Chang, G-W.; Chen, Y-C. (2000). "Colorimetric modeling fo vision systems". *Journal of Electronic Imaging*, 9(4): 432-444.

Chapinal, G. (2001). *Imaging Arrays with In-Pixel Memory Implemented in CMOS Technology*. Doctoral Dissertation, Department of Electronics, Universidad de Barcelona.

Cohen, J.B. (1988). "Color and color mixture: Scalar and vector fundamentals". *Color Research and Application*, 13(1): 5-39.

Commission Internationale de l'Eclairage (2001, mayo). *CIE Web site of the International Commission on Illumination* [En línea]. Página web, URL <<http://www.cie.co.at/ciecb/>>. [Consulta el 8 de junio de 2001].

Commission Internationale de l'Eclairage. (1986). *Colorimetry*. Vienna: CIE. Publication n° 15.2.

Commission Internationale de l'Eclairage. (1987). *International lighting vocabulary*. Vienna: CIE. ; Publication n° 17.4.

Commission Internationale de l'Eclairage. (1995a). *Method of measuring and specifying colour rendering of light sources*. Vienna: CIE. Publication n° 13.3. [Incluye diskette D008.]

Commission Internationale de l'Eclairage. (1995b). *Industrial colour difference evaluation*. Vienna: CIE. Publication n° 116.

Commission Internationale de l'Eclairage. (1996a). *The relationship between digital and colorimetric data for computer-controlled CRT displays*. Vienna: CIE. Publication n° 122.

Commission Internationale de l'Eclairage. (1996b). *Proceedings of the CIE Expert Symposium'96 on Colour Standards for Image Technology*. Vienna: CIE. Publication x10.

Commission Internationale de l'Eclairage. (1998). *Proceedings of the CIE Expert Symposium'97 on Colour Standards for Image Technology*. Vienna: CIE. Publication x14.

Corbalán, M. (1997). *Métodos de procesado de la información de color para la mejora del reconocimiento de objetos por correlación óptica*. Tesis Doctoral, Departament d'Òptica i Optometria, Universitat Politècnica de Catalunya.

Dainty, J.C.; Shaw, R. (1974). *Image Science: Principles, analysis and evaluation of photographic-type imaging processes*. London: Academic Press.

Dillon, P.L.P., Lewis, D.M., Kaspar, F.G. (1978). "Color Imaging System Using a Single CCD Area Array". *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 25: 102-107.

European Broadcasting Union. (1989). *Methods of measurement of the colorimetric fidelity of television cameras*. Brussels: EBU. Publication 3237-E.

Engelhardt, K.; Seitz, P. (1993). "Optimum color filters for CCD digital cameras". *Applied Optics*, 32(16): 3015-3023.

Fairchild, M.D. (1998). *Color Appearance Models*. New York: Addison-Wesley.

Fairchild, M.D.; Reniff, L. (1991). "Propagation of Random Errors in Spectrophotometric Colorimetry". *Color Research and Application*, 16(6): 360-367.

Finlayson, G.D.; Drew, M.S. (1997). "Constrained least-squares regression in colour spaces". *Journal of Electronic Imaging*, 6(4): 484-493.

Finlayson, G.D.; Hordley, S.; Hubel, P.M. (1998). "Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 6: 90-95.

-
- Frehlich, R.G. (1992). "Estimation of the nonlinearity of a photodetector". *Applied Optics*, 31(28): 5926-5929.
- Gardner, D. (1999). "Demystifying high-performance CCD camera specs and terms". *Advanced Imaging*, 14(4): 64-67.
- Grum, E.; Bartleson, C.J. (1980). *Color Measurement. Optical Radiation Measurements*. Vol. II. New York: Academic Press.
- Hamilton, J.F. (1977). "Reciprocity failure and the intermittency effect". En: James, T.H. (ed.) *The Theory of the Photographic Process*. 4th Ed. New York: MacMillan Publishing, cap. II, p. 133-145.
- Hardeberg, J.Y.; Brettel, H.; Schmitt, F. (1998). "Spectral characterization of electronic cameras". *Proceedings of SPIE*, 3409: 100-109.
- Hardeberg, J.Y.; et al. (1999). "Multispectral Image Acquisition and Simulation of Illuminant Changes". En: MacDonald, L.W.; Luo, R. (eds.): *Colour Imaging: Vision and Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- Herzog, P.G.; et al. (1999). "Colorimetric characterization of novel multiple-channel sensors for imaging and metrology". *Journal of Electronic Imaging*, 8(4): 342-353.
- Hindus, L.A. (2001). "CMOS: The Image of the Future". *Advanced Imaging*, 16(5): 33-35.
- Holm, J.; Tastl, I.; Hordley, S. (2000). "Evaluation of DSC (Digital Still Camera) Scene Analysis Error Metrics - Part 1". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 8: 279-287.
- Horn, B.K.P. (1984). "Exact Reproduction of Colored Images". *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 26: 135-167.
- Holst, G.C. (1998). *CCD Arrays, Cameras and Displays*. 2nd Ed. Bellingham: SPIE Press.
- Hong, G.; Luo, M.R.; Rhodes, P.A. (2001). "A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling". *Color Research and Application*, 26(1): 76-84.
- Hubel, P.M.; Sherman, D.; Farrell, J.E. (1994). "A comparison of methods of sensor spectral sensitivity estimation". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 2: 45-48.
- Hunt, R.W.G. (1980). "Color Specification". En: Grum, E.; Bartleson, C.J. (Eds.) *Color Measurement. Optical Radiation Measurements*. Vol. II. New York: Academic Press.

Hunt, R.W.G. (1991). "Revised Colour-Appearance Model for Related and Unrelated Colours". *Color Research and Application*, 16(3): 146-165.

Hunt, R.W.G. (1995). *The Reproduction of Colour*, 5th Ed. Kingston-upon-Thames: Fountain Press.

Hunt, R.W.G. (1997). "Bits, Bytes, and Square Meals in Digital Imaging". *IS&T Reporter*, 12(4): 1-5.

Hurwitz, J.E.D.; et al. (1997) "An 800K-Pixel Color CMOS Sensor for Consumer Still Cameras". *Proceedings of SPIE*, 3019: 115-124.

IEC 61966-2-1 Ed.1: 1999. *Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB*.

IEC 61966-3 Ed.1: 2000. *Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 3: Equipment using cathode ray tubes*.

IEC 61966-9 Ed. 1: 2000. *Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 9: Digital cameras*.

Ikeda, H.; Dai, W.; Higaki, Y. (1992). "A Study on Colorimetric Errors Caused by Quantizing Color Information". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41(6): 845-849.

Imai, F.H.; Berns, R.S.; Tzeng, DI-Y. (2000). "A Comparative Analysis of Spectral Reflectance Estimated in Various spaces Using a Trichromatic Camera System". *Journal of Imaging Science and Technology*, 44(4): 280-287.

International Color Consortium (1996, diciembre). ICC Home page [En línea]. Página web, URL <<http://www.color.org>>. [Consulta el 11 de junio de 2001].

ISO WD 12231 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Terminology* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO 12232: 1998. *Photography - Electronic still picture cameras - Determination of ISO speed*.

ISO 12233: 2000. *Photography - Electronic still picture cameras - Resolution measurements*.

ISO FDIS 12234-1 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Removable memory: Basic removable-memory model* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO FDIS 12234-2 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Removable memory: Image data format - TIFF/EP* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO FDIS 12234-3 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Removable memory: Design rule for camera file system (DCF)* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO 14524:1999. *Photography - Electronic still picture cameras - Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs)*.

ISO DIS 15739 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Noise measurements* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO WD 15740 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Picture Transfer Protocol (PTP) for Digital Still Photography Devices* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO WD 17321-1 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Joint Working Group on ISO 17321. Graphic technology and photography - colour characterization of digital still cameras (DSCs) - Part 1: Stimuli, metrology, and test procedures* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/WG20/WG20_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO WD 17321-2 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Joint Working Group on ISO 17321. Graphic technology and photography - colour characterization of digital still cameras (DSCs) - Part 2: ISO RGB colour space specification, colour analysis error metrics, and methods for determining characterization transforms* [En línea]. Página Web, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/WG20/WG20_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

ISO WD 22028 (2001, mayo). *International Organization for Standardization. Technical Committee no. 42: Photography. Electronic still picture imaging. Extended colour encoding for digital still image storage, manipulation and interchange* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/wg18/wg18_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].

- IS&T - The Society for Imaging Science and Technology (2001, junio). *Society for Imaging Science and Technology - IS&T* [En línea]. Página web, URL <<http://www.imaging.org>>. [Consulta el 8 de junio de 2001].
- Jacobson, R.E. (1995). "An Evaluation of Image Quality Metrics". *The Journal of Photographic Science*, 43: 7-16.
- Jacobson, R.E. et al. (1994). "Evaluation of a Colour Reproduction Index of Images on a Soft Display". *The Journal of Photographic Science*, 42: 80-82.
- Janesick, J.R. (1999) *Absolute Standardization and Optimization of Digital CCDs and Cameras*. [Short Course Notes SC52] Bellingham: SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- Janesick, J.R. (2001). *Scientific Charge-Coupled Devices*. Bellingham: SPIE Press.
- Janesick, J.; Klaasen, K.P.; Elliott, T. (1987). "Charge-coupled-device charge-collection efficiency and the photon-transfer technique". *Optical Engineering*, 26(10): 972-980.
- Johnson, T. (1996). "Methods for characterizing colour scanners and digital cameras". *Displays*, 16(4): 183-191.
- Johnson, C.B.; Owen, L.D. (1995). "Image tube intensified electronic imaging". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 21, p. 1-32.
- Johnson, K.M.; Hesselink, L.; Goodmann, J.W. (1984). "Holographic reciprocity failure". *Applied Optics*, 23: 218-227 (1984).
- Joshi, A.M.; Olsen, G.H. (1995). "Photodetection". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 16, p. 1-21.
- Kang, H.R. (1997). *Color Technology for electronic imaging devices*. Bellingham: SPIE Press.
- König, F.; Praefcke, W. (1998). "A Multispectral Scanner". *Proceedings of Colour Imaging in Multimedia*, 1: 65-73.
- Kuno, T.; et al. (1999). "Aliasing reduction method for color digital still cameras with a single-chip charge-coupled device". *Journal of Electronic Imaging*, 8(4): 457-466.
- Lake, D. (1996). "Solid State Color Cameras: Tradeoffs and Costs Now". *Advanced Imaging*, 11(4): 63-66.

-
- Lang, H. (1997). "How Much Physics Does Colorimetry Really Need". *Color Research and Application*, 22(3): 212-215.
- Lemstrom, G.; Reini, J. (1996). "3-CCD Color-Line Scan Technology: Image Capture for the New Vision". *Advanced Imaging*, 11(4): 60-62.
- Luther, R. (1927). "Aus Dem Gebiet der Farbremetik". *Zeitung Technicalische Physics* 8: 540-558.
- MacDonald, L.W. (1996): "Developments in colour management systems". *Displays*, 16(4): 203-211.
- Margulis, D. (1995). *Photoshop profesional: corrección de color, retoque y manipulación de imágenes*. Madrid: RA-MA.
- Marimont, D.H.; Wandell, B.A. (1992). "Linear models of surface and illuminant spectra". *Journal of the Optical Society of America A*, 9(11): 1905-1913.
- Martínez, K.; Cupitt, J.; Saunders, D. (1993). "High resolution colorimetric imaging of paintings". *Proceedings of SPIE*, 1901: 25-36.
- Martínez-Uriegas, E. (1997). "Diferencias físicas, psicofísicas y neurales entre procesos cromáticos y acromáticos". *Óptica Pura y Aplicada*, 30(2): 63-83.
- Martínez-Verdú, F.M. (1999). "El control del color en las tecnologías multimedia". *Ver y Oír*, 133(3): 137-152.
- Martínez-Verdú, F.M.; Pujol, J. (2000). *Revisión del rendimiento del color de fuentes luminosas*. Óptica Pura y Aplicada [en prensa].
- Martínez-Verdú, F.M.; Pujol, J.; Capilla, P. (2000). "Calculation of the Color-Matching Functions of Digital Cameras from their Complete Spectral Responsivities". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 8: 184-190.
- Martínez-Verdú, F.M.; Pujol, J.; Capilla, P. (2001). "Calculation of the Color-Matching Functions of Digital Cameras from their Complete Spectral Responsivities". *Journal of Imaging Science and Technology* [aceptado].
- Martínez-Verdú, F.M.; Pujol, J.; Capilla, P. (2001). "Verification of the Reciprocity Law in Digital Photography". *Journal of Electronic Imaging* [enviado].
- Mazor, B. (1996). "A Decade of Advanced Imaging: Where We've Been and Where You've Been". *Advanced Imaging*, 11(5): 46-54.

- Norton, P.R. (1995). "Photodetectors". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 15, p. 1-46.
- Oshima, S. (1988). "Zoom lenses for Television-Canon's Design Philosophy". *Image Technology*, 70: 11-13.
- Owens, J.C. (1995). "The impact of Multimedia on Our Industry, Our Society, and Us". *IS&T Reporter*, 10(3): 1-4.
- Park, S.O.; et al. (1995). "Development of spectral sensitivity measurement system of image sensor devices". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 3: 115-118.
- Parkkinen, J.P.S.; Hallikainen, J.; Jaaskelainen, T. (1989). "Characteristic spectra of Munsell colors". *Journal of the Optical Society of America A*, 6(2): 318-322.
- Parulski, K.A.; et al. (1991). "A High Performance Digital Color Video Camera". *Proceedings of SPIE*, 1448: 45-58.
- Pearson, M.L.; Yule, A.C. (1973). "Transformation of color Mixture Functions Without Negative Portions". *Journal of Color & Appearance*, 2(1): 30-35.
- Perales, B. (1994). *Cámaras de vídeo*. Madrid: Paraninfo.
- PIMA WD 7666 (2001, junio). *Photographic & Imaging Manufacturers Association. Photography - Electronic still picture imaging - Reference output medium metric RGB color encoding (ROMM-RGB)* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/it10/it10_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].
- PIMA WD 7667 (2001, junio). *Photographic & Imaging Manufacturers Association. Photography - Electronic still picture imaging - Extended sRGB color encoding - e-sRGB* [En línea]. Fichero PDF, URL <http://www.pima.net/standards/it10/it10_POW.htm>. [Consulta el 7 de junio de 2001].
- Pratt, W.K. (1991) "Point and spectral image restoration techniques". En. *Digital Image Processing*. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, cap. 13, p. 399-419.
- Pratt, W.K.; Mancill, C.E. (1975). "Spectral Estimation Techniques for the Spectral Calibration of a Color Image Scanner". *Applied Optics*, 14(11): 73-75.
- Proudfoot, C.N. (1997). *Handbook of Photographic Science and Engineering*. 2nd Ed. Springfield: IS&T Press.

Quan, S.; Ohta, N.; Katoh, N. (2000). "Optimization of Camera Spectral Sensitivities". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 8: 273-278.

Reis, C. (1991). "Color Image Pitfalls, Color Management, and The Quest for a Unified Solution". *Advanced Imaging*, 11(7): 39-41.

Rhody, H. (1996). "CIS and Imaging Science as a Discipline". *IS&T Reporter*, 11(3): 1-4.

Saunders, D.; et al. (1998). "Maintaining Accurate Colour in Images Transferred Across the Internet". *Proceedings of Colour Imaging in Multimedia*, 1: 227-236.

Sawyer, B.; Pronk, R. (1998). *Cámaras digitales*. Madrid: Paraninfo.

Seim, T.; Valberg, A. (1986). "Towards a Uniform Color Space: a Better Formula to Describe the Munsell and OSA Color Scales". *Color Research and Application*, 11(2): 11-24.

Sharma, G. (2000). "Targetless Scanner Color Calibration". *Journal of Imaging Science and Technology*, 44(4): 301-307.

Sharma, G.; Trussell, H.J. (1996). "Set theoretic estimation in color scanner characterization". *Journal of Electronic Imaging*, 5(4): 479-489.

Sharma, G.; Trussell, H.J. (1997a). "Digital Color Imaging". *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(7): 901-932.

Sharma, G.; Trussell, H.J. (1997b). "Figures of Merit for Color Scanners". *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(7): 990-1001.

Sharma, G.; Trussell, H.J.; Vrhel, H.J. (1998). "Optimal non-negative color scanning filters". *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(1), 129-133.

Spaulding, K.E.; Woolfe, G.J.; Giorgianni, E.J. (2000). "Images States and Standard Color Encodings (RIMM/ROMM RGB)". *Proceedings of Color Imaging Conference*, 8: 288-294.

SPIE - The International Society for Optical Engineering. The Optics, Photonics, Fibers, and Lasers Resource (2001, junio). *SPIE Web. The website for optics, photonics, and imaging* [En línea]. Página web, URL <<http://www.spie.org>>. [Consulta el 8 de junio de 2001].

Spiegel, M.R. (1991). *Probabilidad y estadística*. México: McGraw-Hill.

Sproson, W.N. (1983). *Colour Science in Television and Display Systems*. Bristol: Adam Hilger.

- Stark, B.; et al. (1992). "Method for determining the electron number in charge-coupled measurement devices". *Optical Engineering*, 31(4): 852-856.
- Stokes, M.; Fairchild, M.D.; Berns, R.S. (1992). "Precision Requeriments for Digital Color Reproduction". *ACM Transactions on Graphics*, 11(4): 406-422.
- Tani, T. (1995). *Photographic Sensitivity: Theory and Mechanisms*. New York: Oxford University Press.
- Tani, T. (1998). "Progress and Future Prospects of Silver Halide Photography Compared with Digital Imaging". *Journal of Photographic Science and Technology*, 42(1): 1-14.
- Tominaga, S. (1996). "Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions". *Journal of the Optical Society of America A*, 13: 2163-2173.
- Tominaga, S. (1999). "Spectral imaging by a multichannel camera". *Journal of Electronic Imaging*, 8(4): 332-341.
- Tredwell, T.J.. (1995). "Visible Array Detectors". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 22, p. 1-38.
- Trussell, H.J. (1991). "Application of Set Theoretic Methods to Color Systems". *Color Research and Application*, 16(1): 31-41.
- Unión Europea, Directorio General XII, Organización Europea de Metrología. (1998). *Catálogo de los servicios europeos de calibración de radiación óptica*. Bruselas. SMT4-CT96-6511.
- Valberg, A.; et al. (1986). "Reconstruction of equidistant color space from responses of visual neurones of macaques". *Journal of the Optical Society of America A*, 3(10): 1726-1733.
- Venable, W.H. (1989). "Accurate Tristimulus Values from Spectral Data". *Color Research and Application*, 14(5): 260-267.
- Viggiano, J.A.S.; Moroney, N.M. (1998). "Color Reproduction Algorithms and Intent". En: Eschbach, R., Braun, K. (Eds.) *Recent Progress in Color Science*. Springfield: IS&T - Society for Imaging Science and Technology, p. 104-106.
- Vora, P.L.; Trussell, H.J. (1993). "Measure of goodness of a set of color-scanning filters". *Journal of the Optical Society of America A*, 10(7): 1499-1508.
- Vora, P.L.; Trussell, H.J. (1997a). "Mathematical Methods for the Design of Color Scanning Filters". *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(2): 312-320.

Vora, P.L.; Trussell, H.J. (1997b). "Mathematical Methods for the Analysis of Color Scanning Filters". *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(2): 321-327.

Vora, P.L.; et al (1997a). *Digital color cameras – I – Response models*. Palo Alto: Hewlett Parckard. HP-97-53.

Vora, P.L.; et al. (1997b). *Digital color cameras – I – Spectral response*. Palo Alto: Hewlett Parckard. HP-97-54.

Vrhel, M.J.; Trussell, H.J. (1992). "Color Correction Using Principal Components". *Color Research and Application*, 17(5): 328-338.

Vrhel, M.J.; Trussell, H.J. (1994). "Filter Considerations in Color Correction". *IEEE Transactions on Image Processing*, 3(2): 147-161.

Vrhel, M.J.; Trussell, H.J. (1999). "Color Device Calibration: A Mathematical Formulation". *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(12): 1796-1806.

Vrhel, M.J.; Gershon, R.; Iwan, L.S. (1994). "Measurement and Analysis of Obejct Reflectance Spectra". *Color Research and Application*, 19(1): 4-9.

Vrhel, M.J.; Trussell, H.J.; Bosch, J. (1995). "Design and realization of optimal color filters for multi-illuminant correction". *Journal of Electronic Imaging*, 4(1): 6-14. Wandell, B.A.; Farrell, J.E. (1993). "Water into Wine: Converting Scanner RGB to Tristimulus XYZ". *Proceedings of SPIE*, 1909: 92-101.

Wolski, M.; et al. (1996). "Optimization of Sensor Response Functions for Colorimetry of Reflective and Emissive Objects". *IEEE Transactions on Image Processing*, 5(3): 507-517.

Wood, C.A.; et al. (1987). "The Application of Colour Reproduction Indices to Photographic Reflection Prints". *The Journal of Photographic Science*, 35: 66-70.

Wyszecki, G; Stiles, W.S. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons.

Yencharis, L. (1996). "The Imaging Industry at Advanced Imaging's 10th Anniversary". *Advanced Imaging*, 11(5): 66-68.

Zalewski, E.F. (1995). "Radiometry and Photometry". En: *Handbook of Optics (The Optical Society of America)*. Vol. I. 2nd Ed. New York: The Optical Society of America, cap. 24, p. 1-51.

Índice

A

aceptabilidad, 54, 65, 68, 71, 85, 295, 302
Acharya, 381
 adaptación
 cromática, 152, 187, 273, 348, 366
 luminosa, 152, 283, 296, 366, 369
Advanced Imaging, 126, 156, 381, 384, 387, 388, 390, 392
Agfa, 123, 381
Alessi, 63, 381
 aliasing, 139
 anchura de banda espectral, 33, 196
 ANSI, 171
 apertura relativa, 23, 52, 129, 133, 150, 151, 157, 174, 185,
 192, 205, 223, 267, 278, 315, 343, 354, 359, 364
 arquitectura
 de barrido progresivo, 132
 de color, 137
 3-CCDs, 137
 filtros estáticos, 139
 tiras de filtros, 139, 180
 IT, 132
Artigas, 35, 45, 54, 77, 381
 atlas de color
 Munsell, 37, 96, 205, 266, 342, 359
Attridge, 67, 70, 381
 aumento lateral, 199

B

B&H, 126, 382
 balance
 de adaptación luminosa, 24, 185, 193, 279, 315, 339,
 348, 355, 360
 de blanco, 35, 92, 128, 152, 159, 169, 174, 180, 186,
 192, 256, 277, 305, 315, 339, 364
 equienergético, 258, 288, 354
 de grises, 67, 278
 de negro, 129, 152
Barnard, 381
Bartleson, 27, 29, 384
Berger-Schunn, 43, 381
Berns, 43, 45, 46, 50, 147, 331, 335, 381, 382, 385, 391
 blanco
 adaptado, 181, 185
 adoptado, 181, 185
 de referencia, 35, 152, 275, 294
 patrón, 203, 278

perfecto, 35, 181, 203, 278, 294, 355, 366. Véase
 estímulo equienergético

Borges, 43, 382
Bosch, 94, 98, 391, 392
Boyle, 130, 140, 382
Brainard, 30, 74, 86, 382
Brettel, 184, 384
Brill, 29, 32, 382
 BSI, 171
Burns, 46, 50, 382

C

cabina luminosa, 202, 266
 calibración, 60, 126, 190
 cámara
 CCD-RGB, 21, 74, 75, 91, 127, 156
 digital, 75, 123
 electrónica, 126
 de tubo de imagen, 75
 campo
 adaptador, 365
 condicionante, 365
 de visión, 21, 51, 202, 360
Capilla, 55, 382, 388
 caracterización, 60, 126, 190
 colorimétrica, 24, 192, 353
 espectral, 24, 192, 353
 fotométrica, 175, 185
Carroll, 223, 382
 carta ColorChecker, 70, 96, 184, 201, 266, 289, 292, 294,
 297, 325, 355, 366, 373
 CCD, 130, 143, 163, 360, 383, 384, 387, 388
Chang, 184, 382
Chapinal, 132, 382
Chen, 184, 382
 CIE, 27, 32, 49, 61, 153, 171, 181, 186, 382
 CIE-1976 (u',v'), 332, 336
 CIECAM'97, 62, 153, 215
 CIE-L*a*b*, 35, 70, 143, 147, 185, 193, 266, 292, 313,
 337
 CIE-XYZ, 32, 48, 74, 125, 143, 157, 223, 239, 257, 264,
 277, 330, 354
 claridad, 36, 58, 71, 194, 279, 302, 330, 338, 343, 356
 CMOS, 132, 143, 360, 382, 384, 385
 codificación
 bruta, 154, 155, 180, 186, 191, 277, 292, 294, 343.
 Véase imagen bruta
 CIE-L*a*b*, 61

CIE-XYZ, 61, 192, 330
CMYK, 59, 61, 182, 330
dependiente del dispositivo, 60, 152, 330
e-sRGB, 181
independiente del dispositivo, 61
Munsell, 61
NCS, 61
RGB, 58, 61, 180, 277, 330
sRGB, 77, 153, 181, 185, 266
Yxy, 61
coeficiente
 de dispersión, 45
 de variación, 45, 210. *Véase* incertidumbre relativa
Cohen, 86, 382
color
 acromático, 36, 256
 aislado, 32, 186, 294, 355
 óptimo, 193, 333, 348, 359
 preferido, 67
 psicocuantitativo, 29
 psicofísico, 27
 psicológico, 27
 psicométrico, 29
 relacionado, 32, 186, 294, 360, 371
colorido, 37, 294, 310, 369, 377
Colorimetría, 27
 absoluta, 34
 completamente-relativa, 34, 294
 relativa, 34
 relativa-absoluta, 34, 294
colorímetro, 21, 45, 77, 126, 190
componentes principales, 30, 91, 184, 285
compresión, 58
condiciones de visualización, 58, 66
conjunto
 entrenamiento, 22, 91, 95, 100, 187, 289, 325
 test, 23, 187, 289, 325
constante de conversión
 fotópica, 33
 optoelectrónica, 114, 161, 247
conversor analógico-digital, 124, 130, 140, 169, 200
coordenadas cromáticas, 53
copia, 38, 56, 65
Corbalán, 143, 152, 383
corrección
 de campo plano, 180, 213
 de color, 24, 99, 186, 193, 293, 298, 301, 310, 356
croma, 37, 58, 71, 194, 302, 330, 338, 348, 356
cromaticidad, 23, 51, 65, 174, 206, 256, 260, 279, 325, 334,
 348, 356, 371
cuantización, 58
Cupitt, 94, 388

D

Dai, 147, 385
Dainty, 107, 117, 136, 223, 383
desviación
 estadística, 44, 316
 estándar, 161, 175, 201, 249
diferencia de color, 37, 70, 185, 267, 294, 302
difusión, 173, 180, 205
digitalización, 137
Dillon, 139, 383
DIN, 171
dispositivo
 de captura, 22, 55, 189, 330, 343
 de impresión, 22
 de visualización, 22, 55, 330
distancia, 28
distribución
 de Poisson, 108, 144
 de Student, 44
 de Gauss (normal), 44
distribución espectral de potencia radiante, 29, 55, 65, 86,
 94, 107, 181, 196
 absoluta, 21, 35, 193, 205, 266, 355, 365
 relativa, 342
Drew, 91, 96, 101, 285, 383

E

EBU, 184, 383
efecto fotoeléctrico, 75, 124, 130
eficiencia cuántica, 107, 135, 165, 192, 252, 354
 de detección, 116, 165, 192, 252, 354
Elliott, 133, 161, 387
Engelhardt, 94, 383
error
 absoluto, 266
 aleatorio, 23, 43, 293, 315, 359
 estándar, 45, 216, 325
 relativo, 266
 sistemático, 23, 43, 110, 302, 330
escala
 interválica, 29
 nominal, 28
 ordinal, 29
 proporcional, 29
escalado
 psicocuantitativo, 39
 psicométrico, 39
escáner, 55, 126, 190, 363
espectro de acción, 118, 157, 165, 184, 192, 238, 252, 354
espectrofotómetro, 21, 35, 45, 51, 77

espectroradiómetro, 21
 estándar, 38
Wiener
 estimación de, 184
 estímulo equienergético, 35, 55, 80, 136, 152, 159, 181,
 185, 257, 277, 339. Véase blanco perfecto
 estímulo-color, 29, 257, 330, 352
 EUROMET, 45, 391
 exactitud, 21, 43, 50, 53, 143, 187, 193, 291, 313, 355, 363
 exposición, 278
 cuántica, 107, 118, 133
 equivalente de ruido, 107
 equivalente de saturación, 108
 exposición espectral, 135, 152, 157, 192, 195, 223
 equivalente de ruido, 150, 218, 240
 equivalente de saturación, 218, 240

F

factor de calidad
 de Neugebauer, 101, 291
 de Vora, 102, 291
 del color, 102, 291
 factor de luminancia, 203, 325, 334, 348, 371. Véase
 claridad
Fairchild, 27, 32, 36, 37, 39, 41, 43, 45, 62, 63, 147, 152,
 215, 383, 391
Fairman, 86
Farrell, 91, 384, 392
Finlayson, 91, 96, 101, 184, 285, 383
 FOGRA, 170
 formato de imagen, 125, 188
 GIF, 125
 gráfico, 125
 JPEG, 125
 NTSC, 155
 PAL, 155
 TIFF, 125
 TIFF/EP, 188
 vídeo, 125
 fotodiodo, 51, 107, 130
 fotoelectrón, 134, 144, 161
 Fotografía Fotoquímica, 56, 67, 136, 172, 173, 223, 354
 fotón, 55, 75, 107
 fotosensor, 29, 30, 100, 107, 157, 257
Frehlich, 51
 fuente luminosa, 23, 29, 34, 60, 97, 126, 152, 174, 190,
 195, 256, 266
 función
 cumulativa gaussiana, 215
 cumulativa Weibull, 215

de conversión optoelectrónica, 173, 176, 182, 185, 193,
 279, 343, 355, 359
 de ganancia incremental, 176
 hiperbólica, 236
 logística, 176, 215, 367
 lorentziana, 197
 sigmoide, 215, 224, 249, 353
 sigmoide asimétrica, 215
 función espectral,
 de conversión optoelectrónica, 109, 150, 159, 164, 175,
 184, 192, 215, 224, 238, 247, 278, 331, 353, 359, 363
 de ganancia incremental, 111, 165, 192, 251, 354
 de transferencia fotónica, 114, 163, 192, 249, 354
 funciones de igualación, 31, 48, 55, 74, 118, 152, 157, 186,
 257, 277, 286, 354
 fundamentales de la visión cromática, 55
Funt, 381

G

gain, 140, 141, 169, 200
 gama de colores reproducibles, 58, 90, 143, 181, 186, 330,
 359
 gamma, 67, 128, 153, 169, 364
 ganancia, 134
 de vídeo, 128, 150, 169, 256, 260, 364
Gardner, 161, 384
Gershon, 96, 391, 392
Giorgianni, 181, 182, 390
Goodman, 223
Grassmann
 leyes de, 74, 86, 267, 301, 343, 355
Grum, 27, 29, 384

H

Hallikainen, 96, 389
Hamilton, 136, 223, 384
Hardeberg, 95, 98, 184, 384
Herzog, 94, 384
Hesselink, 223, 387
Higaki, 147, 385
Higgins, 223, 382
Hindus, 133, 384
Holm, 67, 185, 384
Holst, 132, 133, 141, 144, 148, 175, 199, 384
Hong, 93, 384
Hordley, 184, 185, 383, 384
Horn, 75, 384
Hubel, 184, 383, 384
Hung, 186

Hunt, 29, 37, 41, 54, 56, 57, 62, 65, 67, 69, 70, 75, 77, 81,
82, 126, 131, 136, 147, 193, 215, 291, 293, 296, 305,
331, 335, 355, 365, 384, 385
Hurwitz, 133, 385

I

ICC, 170, 182, 385
IEC, 61, 66, 75, 77, 170, 172, 184, 385
TC100, 172
IEEE 1394, 188
Ikeda, 147, 385
iluminante, 34, 35, 65, 77, 183, 260, 292, 334, 348
tipo F, 97, 260
imagen
bruta, 125, 199
de fondo, 161, 200
ideal, 107
original, 58
reproducida, 58
Imai, 95, 385
incertidumbre relativa, 45, 79, 325. Véase coeficiente de
variación
inconstancia del color, 206
índice
combinado de diferencias visuales, 70, 295, 377
de rendimiento en color, 186, 196
de reproducción del color, 25, 70, 193, 293, 355, 377
de verificación de la ley de la reciprocidad, 230
infraexposición, 175, 282
intensidad, 23, 325, 356
intervalo de confianza, 45
IrDA, 188
iris, 128, 190, 228. Véase apertura relativa
IS&T, 57, 62, 387
ISO, 61, 70, 109, 170, 199, 385
TC130, 172
TC42, 172, 386
ITU, 61, 170
Ives-Abney-Yule
compromiso de, 81, 331
Iwan, 96, 391, 392

J

Jaaskelainen, 96, 389
jacobiano, 47, 293
Jacobson, 58, 70, 387
James, 223, 382, 384
Janesick, 133, 144, 148, 156, 161, 175, 201, 247, 248, 387
Johnson, 115, 223, 387
Joshi, 130, 387

K

Kang, 58, 70, 387
Kaspar, 139, 383
Katoh, 390
Klaasen, 133, 161, 387
König, 94, 387
Kuno, 139, 387

L

Lake, 139, 141, 387
Lang, 29, 32, 388
Lemstrom, 138, 388
Lewis, 139, 383
ley de la reciprocidad, 136, 175, 179, 182, 192, 198, 223,
354
luminancia, 34, 51, 278, 292, 294, 355, 371
absoluta, 65
escotópica, 365
fotópica, 365
relativa, 65
luminosidad, 36, 294, 310, 370, 377
Luo, 93, 384
Luther
condición de, 75, 181, 293, 388
LUTs, 23

M

MacAdam, 80, 193, 331, 332, 333, 335, 336, 337, 338, 342,
348, 359, 364
límites de, 335, 342
MacDonald, 57, 58, 69, 70, 384, 388
Mancill, 95, 184, 389
mapa de iluminación, 203, 294, 355
Margulis, 70, 73, 388
Marimont, 97, 388
Martínez, 57, 94, 388
Martínez-Uriegas, 139, 388
Martínez-Verdú, 57, 172, 186, 388
matriz
autocorrelación, 95, 289
correlación, 48
covarianza, 46, 98, 100, 211, 289, 293, 315
inversa generalizada, 88, 184, 286
Mazor, 56, 388
MCI, 127
media, 44, 108, 175, 200, 248, 292, 315
medida, 28
medio de soporte, 58
metamerismo, 54, 65, 117

del dispositivo, 90, 256, 330
 metámero
 fundamental, 87, 273, 290
 negro, 86
 mínimos cuadrados, 91, 187, 285
 modelo de apariencia, 27, 63, 293, 355
 colores aislados, 25
 modo
 campo, 129, 155
 cuadro, 129, 155
 de integración, 155
 fotovoltaico, 130
 monitor CRT, 74, 78, 126, 141, 153, 169, 186, 266
 monocromador, 182, 195, 200, 213
 montura tipo bayoneta, 52, 129
Moroney, 65, 391
 MOS, 131
 MPEG, 125
 MTF, 179
 muestra, 38, 60, 65, 296
 muestreo, 58
 Multimedia, 57

N

nitidez, 58
 nivel
 de pedestal, 129, 155, 169
 nivel digital, 22, 35, 125, 144, 161, 193, 200, 260, 277, 355
 relativo, 135, 164, 214, 240
 no-linealidad
 diferencial, 141
 integral, 141
 norma, 28
Norton, 130, 389

O

objetivo fotográfico, 23, 52, 127, 133, 151, 157, 169, 174,
 196, 224, 360
 objeto, 29
 observador, 27, 32, 54, 60, 65, 74, 186, 330
 patrón, 91, 185, 192, 223, 239, 296, 301, 330, 343, 354
 obturador electrónico, 127, 128, 150, 169, 178, 228
 offset, 140, 169, 200
 Ofimática, 57
Ohta, 390
Olsen, 130, 387
 ONU, 170
 operación
 global, 125
 local, 125

puntual, 125
 operador proyección, 87
 ortogonal, 87
Oshima, 137, 389
Owen, 115, 387
Owens, 56, 389

P

Park, 389
Parkkinen, 96, 389
Parulski, 128, 389
Pearson, 80, 389
 película fotográfica, 107
Perales, 35, 389
 perceptibilidad, 295, 301, 302
 perfil colorimétrico, 74, 181, 193, 277, 291, 306, 331, 338,
 355. Véase transformación de color
 bruto, 280, 285
 bruto escalado, 301, 310, 339, 343, 356, 373
 compensado, 373
 de máxima ignorancia, 91, 185, 285, 355
 de no-máxima ignorancia, 285
 periodo de registro horizontal, 150, 224, 235
Petersen, 45, 381
 PIMA, 172, 181, 182, 389
 píxel, 124, 130, 144, 161, 199, 249
 Plumbicón, 137
 POCS, 87, 90, 98, 184
Pointer, 67, 70, 381
 pozo lleno, 146, 163, 164, 192, 249, 354
Praefcke, 94, 387
Pratt, 95, 184, 389
 precisión, 21, 43, 50, 53, 143, 193, 291, 314, 355
 relativa, 146, 325, 359
 primarios, 30, 55, 65, 74, 193, 331
 fundamentales, 87, 99, 193
 irreales, 81
 principio de univariancia, 54, 117, 134, 256, 274, 330
 prisma dicróico, 137
 profundidad
 de bits, 146, 330, 342
 de respuesta, 110, 119, 135
Pronk, 123, 390
Proudfoot, 136, 224, 389
 pseudo-funciones de igualación, 83, 138, 164, 192, 264,
 289, 301, 331, 355
Pujol, 186, 388

Q

Quan, 390

R

radiación
 infrarroja, 76
 ultravioleta, 76
radiancia espectral, 29, 55, 133, 157, 182, 223, 354
 equivalente de ruido, 159
 equivalente de saturación, 159
radiómetro, 182, 195
rango dinámico, 58, 110, 140, 187
 de entrada, 119, 164, 175, 192, 249, 342, 354
 de luminancias, 278, 360
 de salida, 119, 147, 149, 164, 249, 342
red de difracción, 51
referencia, 38, 60, 65, 296
reflectancia espectral, 23, 29, 35, 51, 65, 94, 181, 184, 205, 289
Reid, 70, 381
Reini, 138, 388
Reis, 57, 58, 390
relación
 de identidad, 31, 86
 señal-ruido, 79, 104, 111, 128, 146, 164, 175, 192, 251, 290, 354
Reniff, 43, 45, 381, 383
repetibilidad, 21, 43, 314
reproducción del color, 54, 58
 colorimétrica, 65
 correspondiente, 67, 156, 273
 equivalente, 66, 152, 359
 espectral, 65
 exacta, 65, 152, 273, 293
 preferida, 67
resolución
 espacial, 58, 107, 127, 179, 190, 360
 espectral, 196
responsividad espectral, 118, 157, 165, 184, 192, 238, 252, 354
Rhodes, 93, 384
Rhody, 56, 390
rugosidad, 58
ruido
 aleatorio. *Véase* error aleatorio
 de fondo, 265, 277. *Véase* imagen de fondo
ruido optoelectrónico, 175, 180, 249
 base, 145
 de corriente oscura, 144, 161, 201
 de cuantización, 146
 de disparo, 144, 161
 de lectura base, 110, 161, 251
 de patrón, 144, 161, 175, 251

S

saturación, 37, 336, 369
Saunders, 94, 388, 390
Sawyer, 123, 390
Schmitt, 184, 384
Seim, 39, 390
Seitz, 94, 383
sensibilidad espectral, 32, 55, 76, 98, 118, 135, 137, 157, 182, 218, 354
 relativa, 192, 240, 260, 354
sensibilidad fotográfica, 178
sensor optoelectrónico, 21, 22, 76, 124, 128, 169, 283
 HyperHAD, 130
serie de exposición, 174, 198, 200, 223, 229, 279
Sharma, 98, 101, 104, 184, 290, 390
Shaw, 107, 117, 136, 223, 383
Sherman, 384
SID, 62
sistema
 aditivo, 54, 56, 59, 63, 117
 sustractivo, 56, 59, 63
sistemas de gestión del color, 58, 128, 170
Smith, 130, 140, 382
sobreexposición, 175, 282, 367
Spaulding, 181, 182, 390
SPIE, 57, 390
Spiegel, 44, 390
Sproson, 85, 390
Stark, 133, 391
Stiles, 34, 35, 37, 39, 45, 55, 76, 77, 86, 97, 133, 136, 138, 152, 159, 257, 331, 335, 365, 392
Stokes, 147, 391

T

Tani, 126, 136, 391
tarjeta digitalizadora, 124, 128, 141, 146
Tastl, 185, 384
Tecnología del Color, 57, 170
tele-colorímetro, 21, 41, 126, 292, 316, 360
tele-espectrocolorímetro, 35, 41, 51, 77, 181, 189, 193, 355
tele-espectroradiómetro, 21, 196. *Véase* tele-espectrocolorímetro
Televisión, 67, 74, 152, 348, 360
temperatura de color, 152, 196, 256, 365
textura, 58
tiempo de exposición, 133, 150, 157, 174, 192, 229, 283, 354.
tolerancia
 industrial, 302
 perceptual, 35, 70, 156

Tominaga, 94, 391
 tono, 36, 58, 71, 194, 294, 302, 310, 330, 336, 348, 356,
 368, 377
 puro, 368
 transformación
 de color, 23, 58, 125
 multivariante lineal, 46
 multivariante no lineal, 46
 univariante, 46
 transmitancia espectral, 29, 51, 55, 65, 133
Tredwell, 130, 132, 139, 391
Trussell, 30, 86, 88, 91, 94, 98, 101, 104, 184, 285, 290,
 390, 391, 392
Tsai, 381
 TWAIN, 127
Tzeng, 385

U

UNE, 171
 unidad de frame, 150, 224
 USB, 188

V

Valberg, 39, 390, 391
 valores triestímulo, 27, 29, 30, 125, 181, 193, 338, 355
 absolutos, 21, 33, 35, 157, 205, 277, 310, 360, 366
 compensados, 299
 fundamentales, 55
 medidos, 299

relativos, 23, 34, 35, 55, 278, 293
 varianza, 44, 200, 292, 315
 vector-luz, 30
 velocidad de captura, 173, 175
Venable, 43, 45, 391
 videocámara, 35, 55, 75, 123
 videocolorímetro digital, 363
 Vidicón, 137
Viggiano, 65, 391
Vora, 14, 94, 98, 101, 184, 290, 291, 391, 392
Vrhel, 30, 91, 94, 96, 98, 101, 285, 390, 392

W

Wandell, 91, 97, 388, 392
Wolski, 101, 290, 392
Wood, 70, 392
Woolfe, 181, 182, 390
 WYSIWYG, 70, 125, 128, 152
 Wyszeccki, 34, 35, 37, 39, 45, 55, 76, 77, 86, 97, 133, 136,
 138, 152, 159, 257, 331, 335, 365, 392

Y

Yencharis, 56, 392
Yule, 80, 82, 332, 333, 359, 389

Z

Zalewski, 51, 392

