

Capítulo 3.- La medida psicofísica del color

3.1.- INTRODUCCIÓN

El color es un atributo de la visión. Si el ser humano no poseyera ojos que detectan un ámbito poco extenso de las radiaciones electromagnéticas, no sería posible identificar subjetivamente cada uno de los colores que se perciben en la vida real.

El color, asimismo, es una característica de la luz. La luz se puede definir como “*la forma de la energía radiante que es capaz de estimular la retina del ojo humano provocando un proceso consciente que da lugar a las sensaciones visuales*”. Esta definición es subjetiva, pues la hace depender del observador. Si éste es ciego, por ejemplo, no habrá para él diferencia entre una radiación de 400 nm de longitud de onda y otra de 700 nm. Sólo podrá darse cuenta (si son lo suficientemente intensas) que la primera produce quemaduras y la segunda calor al ser absorbidas por la piel.

Pero ¿qué es el color? El color, como otros términos, tiene diferentes significados. Los físicos lo aplican a las variaciones en las distribuciones espectrales de las luces, tanto si son emitidas directamente por fuentes como si lo son indirectamente reflejadas o transmitidas por objetos. Los químicos utilizan la palabra color para referirse a diferencias espectrales debidas a variaciones en la composición molecular o en las configuraciones de los compuestos químicos. En sociología color significa un aspecto de la respuesta de un observador humano, una percepción que tiene lugar en el cerebro del observador como resultado de la estimulación visual. En el lenguaje normal el color se asocia con objetos, de modo que el mismo objeto debe de tener siempre el mismo color; así decimos rojo sangre o verde césped.

Por lo tanto todos usamos la palabra color de manera diferente dependiendo del interés del momento.

La Sociedad Óptica de los EE.UU. (OSA) definió el color en 1944 como “*aquellas características de la luz distintas de las inhomogeneidades espaciales y temporales*”. Definición poco feliz ya que induce a pensar en este atributo como una propiedad física más que psicofísica.

Por otra parte, es siempre preferible definir las cosas por lo que son y no por lo que no son. Si se tuviera que definir el color, sería quizá más simple y más directo utilizar la definición dada por Judd, que dice: “*si dos objetos de igual forma y textura iluminados con la misma luz y en iguales condiciones de observación pueden diferenciarse, el atributo de esos objetos que produce esa diferenciación es el color*”.

Si se desea otra definición más rigurosa podría decirse que: “*el color es el atributo de la luz que hace corresponder de forma unívoca a cada distribución espectral una sensación. Esta sensación está condicionada por la intensidad y duración del estímulo, el estado de adaptación del observador, el área de la retina afectada y el contraste luminoso y cromático con que se recibe*”.

Es importante destacar algo. Cuando se dice unívocamente, se indica que para cada composición espectral de la luz en las condiciones dadas se produce, una y sólo una, sensación de color. En cambio, inversamente, para cada sensación de color no existe una correspondencia biunívoca, la misma sensación puede ser producida por infinitas combinaciones de distribuciones espectrales. A este fenómeno se le llama *metamerismo*.

Es evidente, entonces, que los colores dependen de los objetos, al mismo tiempo que de la luz que los ilumina. Sea cual fuere el iluminante empleado, sus propiedades físicas permanecerán inalterables; sin embargo, su apariencia psicológica dependerá de la composición espectral del iluminante; es por tanto un fenómeno psicofísico.

No hay una sola definición de color, pero la norma UNE y la CIE definen dos conceptos diferentes **color percibido** y **color psicofísico**.

De acuerdo con la CIE (1970) el *color percibido* se define como el aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura basándose en las diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación.

El *color psicofísico* es la característica de la radiación visible que permite al observador distinguir las diferencias entre dos objetos de las mismas dimensiones, forma y estructura, siendo estas diferencias de la misma naturaleza que las producidas por una diferencia en la composición espectral de la radiación que interviene en la observación.

3.2.- ESPECIFICACIÓN DEL COLOR PERCIBIDO

De las dos acepciones dadas del color empezaremos por la respuesta del observador (aspecto perceptivo) y se utiliza el adjetivo percibido. Así pues, el **Color (percibido)** es un atributo de la percepción visual, y puede describirse por nombres de color (blanco, rojo, azul, etc.) así como por combinaciones de colores.

Luminosidad atributo de la sensación visual según la cual una superficie emite mas o menos luz.

Tono atributo de la sensación visual según la cual una superficie parece similar a uno, o a proporciones de dos de los colores percibidos amarillo, naranja, rojo, verde, azul y púrpura. Esta definición divide a los colores percibidos en dos clases.

Color (percibido) acromático color percibido sin tono.

Color (percibido) cromático color percibido con tono.

Un color percibido cromático puede mostrar un tono más o menos intensamente, por ejemplo como rosa o como rojo, por ello se define una tercera variable

Contenido de color atributo de la sensación visual según la cual una superficie parece mostrar más o menos color cromático.

Estos tres términos se utilizan en el lenguaje habitual y son las tres características básicas del color percibido con superficies emisoras (fuentes). Para las superficies receptoras y en particular para los colores dependientes (vistos con relación a otros colores) se definen, además, otras magnitudes.

Claridad (de un color dependiente) luminosidad de una superficie evaluada con la luminosidad de otra superficie igualmente iluminada, que parece blanca o altamente difusora.

Saturación contenido de color de una superficie evaluado en proporción a su luminosidad.

Croma (de un color dependiente) contenido de color de una superficie evaluado en proporción a la luminosidad de una superficie, igualmente iluminada, que parece blanca o altamente difusora.

3.3.- ESPECIFICACIÓN DEL COLOR PSICOFÍSICO

La palabra "Colorimetría" significa el conjunto de métodos para medir y evaluar el color de los objetos. Generalmente usamos el término color para referirnos a un aspecto del mecanismo visual. Estas sensaciones son fenómenos personales y tienen lugar en nuestra mente. Sólo sabemos que vemos, y estas sensaciones personales reciben el nombre de "fenómenos psicológicos" ya que únicamente el individuo que experimenta la sensación la conoce. Si ahora esta persona desea comunicar a otros algo de lo que él ve, entonces intentará describir el fenómeno psicológico y lo más probable es, cuando se describe el color percibido, el uso de palabras descriptivas que en el lenguaje común tienen una serie de asociaciones. Así cuando alguien dice amarillo todos lo comprenden y diferencian del rojo o el verde. El proceso incluye los elementos necesarios para que se entienda la comunicación, e intenta transmitir información acerca de un acontecimiento de acuerdo con una convención de reglas: las del lenguaje habitual.

La "medida del color" implica la asignación de números que representen atributos del fenómeno psicológico de lo que llamamos color. Generalmente la medida del color no intenta describir directamente percepciones de color, en vez de ello, la medida del color intenta relacionar el fenómeno psicológico (color) con el fenómeno físico (flujo luminoso, longitud de onda, etc.) que provoca la percepción. La medida del color consiste en el proceso para determinar que condiciones físicas dan lugar a una condición psicológica (perceptiva) determinada, siendo un proceso de relacionar fenómenos psicológicos a fenómenos físicos. El nombre que reciben estos procesos es "psicofísico".

La forma más antigua de medir el color, y la más utilizada hoy en día, es la que determina la igualdad de colores (color matching). No necesita conocer la medida de percepciones y por esta razón es aceptada por todo el mundo desde los físicos a los artistas. De esta forma podemos comunicar algo muy útil sobre el color, duplicando las condiciones de los estímulos cualquiera puede reproducir la igualdad de color, y sólo es necesario saber qué dos condiciones de estímulos provocan la misma apariencia de color.

3.4.- LA COLORIMETRÍA TRICROMÁTICA.

La colorimetría tricromática se basa en la suposición de que exista en la visión un sistema trirreceptor. No importa cuál sea la composición espectral de la radiación que llega a la retina, su respuesta será evaluada según tres parámetros.

Esto implica un proceso de integración. Cuando un observador ve un color, puede discriminar su claridad, su tono y su saturación. El observador no puede, en cambio, decir nada de la composición espectral del estímulo.

El mecanismo de la visión integra el resultado, lo que difiere, por ejemplo, del sistema auditivo, donde un oído debidamente entrenado puede discriminar los sonidos procedentes de los instrumentos en la ejecución de una partitura musical. El ojo sólo tiene en cuenta el resultado sin poder discernir (por mejor entrenamiento que el observador posea) qué tipo de radiación produce la sensación de color. Esto no implica la necesidad de medir todas las variables psicológicas de la sensación producida por la “estimulación” de la retina, sólo basta con asegurarse de que en ciertas condiciones (adaptación, contraste, campo visual) los resultados experimentales sean válidos y que esa validez se extienda dentro de una amplia (aunque reducida) gama de variaciones.

3.5.- BASES DE LA COLORIMETRÍA TRICROMÁTICA.

Un principio enunciado por Newton (1672), reafirmado por Young (1802) y verificado en la práctica, afirma que cualquier color puede ser igualado por la suma de tres colores primarios convenientemente elegidos. Este principio fundamental es la base sobre la que se sustenta toda la colorimetría. Una técnica experimental simple para llevar a cabo la duplicación de un color es la siguiente: el observador mira en un instrumento óptico cuyo campo visual está dividido en dos partes, la luz cuyo color debe igualarse se introduce en una mitad y la otra se ilumina con las luces de las tres fuentes primarias. Variando las cantidades de estas luces puede encontrarse una combinación que produce una igualación de color exacta de las dos partes del campo visual, y sólo una combinación dada produce una igualación de color. El color desconocido puede especificarse por esas cantidades llamadas **valores**

triestímulo. Los valores triestímulo así obtenidos constituyen una especificación del color para el observador y las condiciones que determinan el estímulo equivalente.

¿Cuales son los colores convenientes? Son convenientes aquellos que son suficientemente luminosos y a la vez independientes entre sí. Es preciso establecer claramente que: los primarios son estímulos especificados en magnitudes de potencia radiante de ciertas longitudes de onda cuyo efecto produce sensaciones visuales que son linealmente independientes entre sí.

3.5.1.- LEYES DE GRASSMAN.

Los diversos experimentos de hace ya muchos años sobre mezclas aditivas de colores fueron estudiados por Hermann Günter Grassman y se conocen como leyes de Grassman.

Se entiende por mezcla aditiva de colores la combinación de dos estímulos que actúan de forma que entran en el ojo simultáneamente e inciden en la misma zona de la retina. Estas leyes dan lugar a otras propiedades importantes en la igualación del color:

1.- Para especificar una mezcla de color son necesarias y suficientes tres variables independientes. De aquí el nombre de "triestímulo" y de "colorimetría tricromática" y el principio según el cual todos los tonos de color pueden igualarse con una adecuada mezcla de tres triestímulos diferentes, siendo la única condición a la hora de elegirlos que ninguno de ellos pueda obtenerse (igualarse) como mezcla de otros dos. Matemáticamente se puede expresar:

$$c(C) = r(R) + g(G) + b(B) \quad (3.1)$$

donde r, g, b son la luminancia, en lúmenes, de tres fuentes de referencia R, G, B (roja, verde, azul) necesarios para igualar c lúmenes de un color dado C.

Lo esencial de esta ley es que existe una y sólo una combinación de tres primarios que igualan cualquier color percibido.

2.- Los estímulos que evocan la misma apariencia de color producen resultados idénticos en mezclas aditivas de colores.

Este segundo principio significa que estímulos características físicas diferentes, por ejemplo con distribuciones espectrales de radiancia (flujo radiante), pueden igualar el mismo

color. Estos estímulos que físicamente diferentes que permiten la misma igualación de color se llaman *metámeros* y el fenómeno llamado *metamerismo* se presenta cuando una misma igualación de color consiste en diferentes componentes de la mezcla. Matemáticamente puede expresarse como sigue:

$$c_1(C_1) = r_1 (R) + g_1 (G) + b_1 (B)$$

$$c_2(C_2) = r_2 (R) + g_2 (G) + b_2 (B)$$

si $c_1(C_1) = c_2(C_2)$

entonces $r_1 (R) + g_1 (G) + b_1 (B) = r_2 (R) + g_2 (G) + b_2 (B)$

3.- En una ecuación de color la igualdad no varía si ambos miembros se multiplican por una constante K (ley de proporcionalidad). Esto supone que una vez igualado un estímulo las proporciones de cada componente de la mezcla aditiva no cambia cuando lo hace la luminancia del estímulo de color.

4.- Si se suman dos colores cualesquiera, evaluados con los mismos estímulos de referencia, la suma algebraica de ambos es equivalente a la suma algebraica de las cantidades de los estímulos de referencia necesarios para igualar los colores en cuestión (ley de aditividad). Matemáticamente se expresa:

$$c_1(C_1) = r_1 (R) + g_1 (G) + b_1 (B)$$

$$c_2(C_2) = r_2 (R) + g_2 (G) + b_2 (B)$$

entonces $c_1(C_1) + c_2(C_2) = (r_1 + r_2)(R) + (g_1 + g_2)(G) + (b_1 + b_2)(B)$

Sobre la base de esta propiedad se constituye toda la colorimetría actual.

Este conjunto de propiedades se conoce como leyes de las mezclas cromáticas o leyes de Grassman. Ahora bien, una igualación de color no resulta afectada por una exposición previa a la luz (sea ésta blanca o coloreada) o por un cambio de adaptación si se modifica la luminancia del «test que hay que igualar». Este hecho, conocido como *principio de persistencia* de las igualaciones de color, deja de cumplirse para niveles de luminancia altos, lo que implica que la ley de proporcionalidad también deja de cumplirse.

3.6.- SÍNTESIS TRICROMÁTICA. DIAGRAMAS RGB

De la trivariancia visual se puede deducir que es necesario mezclar tres colores para reproducir cualquier otro. Naturalmente, la mezcla debe hacerse en una proporción adecuada de los tres colores, y los tres números que expresan la proporción de mezcla deberán servir para caracterizar el color reproducido. A partir de esta simple idea, desarrollaremos un sistema de coordenadas en el que cada color real (tanto monocromático como de espectro continuo) vendrá definido por tres números.

Elijamos un blanco de referencia, por ejemplo, la fuente equienergética. Aunque por costumbre se suele utilizar el término «blanco», debería estrictamente decirse «acromático», ya que, en realidad, los términos blanco, gris claro, gris oscuro o negro sólo hacen referencia a la claridad, que como veremos más adelante está asociada a la luminancia pero no a la composición espectral. Elijamos tres estímulos, preferiblemente espectrales (no necesariamente), a los que nos referiremos como primarios. Aunque esta elección es en principio arbitraria, parece lógico escoger un color de un extremo del espectro (violeta o azul), uno del centro (verde) y uno del otro extremo (rojo). Por consiguiente, los representaremos por λ_R , λ_G y λ_B . En el sistema CIE (1931) se toman como primarios el 435,8 nm (violeta), el 546,1 (verde) y el 700 (rojo), los dos primeros extraídos de una lámpara de vapor de Hg de alta presión.

¿Qué flujo de cada uno de ellos habrá que mezclar para «igualar» (esto es, obtener un metámero) un flujo de una radiación monocromática? Haciendo el experimento con los primarios anteriores, se obtiene

$$a(\lambda) = b(R) + c(G) + d(B)$$

dividiendo por a se obtiene

$$(\lambda) = b/a(R) + c/a(G) + d/a(B)$$

para los cocientes se establecen los siguientes coeficientes:

$$\frac{d}{a} = \bar{b} \quad \frac{c}{a} = \bar{g} \quad \frac{b}{a} = \bar{r}$$

y la ecuación final queda

$$(\lambda) = \bar{b}(B) + \bar{g}(G) + \bar{r}(R)$$

La gráfica siguiente muestra las funciones colorimétricas establecidas por la CIE y conocidas como *sistema colorimétrico RGB CIE 1931*.

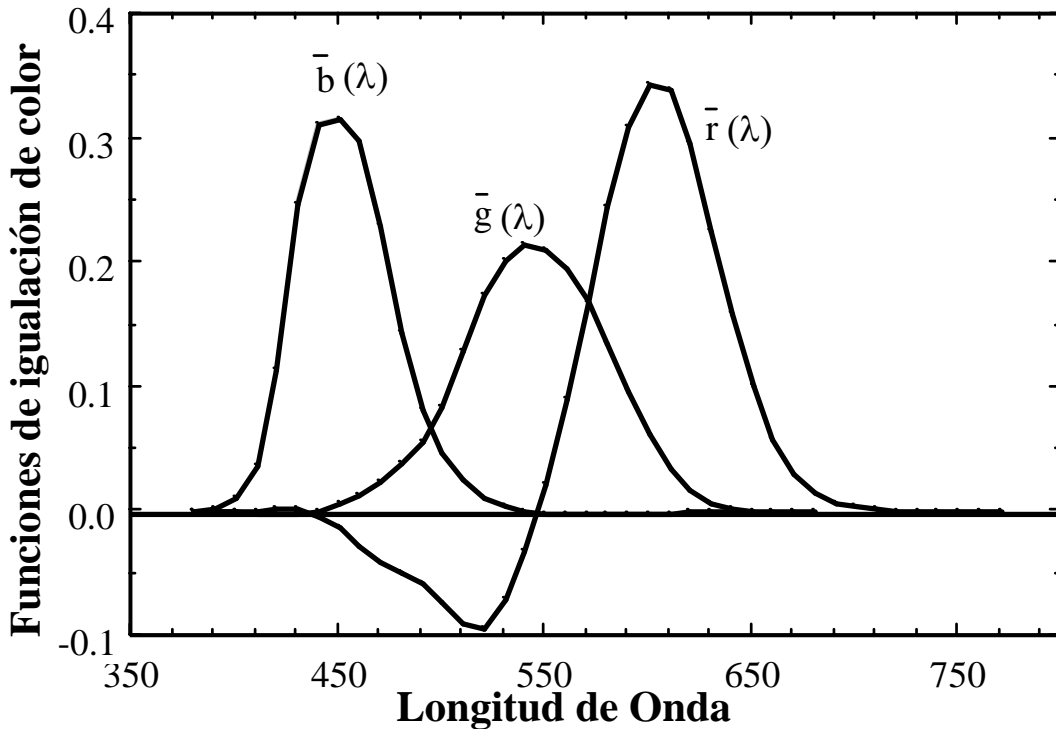


Figura 3.1 Funciones de igualación de color CIE (1931)

Nótese que en las curvas colorimétricas hay valores negativo, y en la especificación de muchos colores sus valores triestímulo serán negativos. ¿Qué significa un color negativo? Físicamente y psicológicamente carece de sentido, es simplemente una forma matemática de representar un fenómeno real. Cuando se igualan algunos colores, especialmente los espectrales no se puede obtener una ecuación de color similar a la (3.1), aún combinando todos los valores posibles de las tres luces de referencia, siendo preciso mezclar el color C con una de las luces primarias e igualar la mezcla resultante con las otras dos luces. Así, por ejemplo:

$$c(C) + r(R) = b(B) + g(G)$$

Las cantidades de r añadidas a c pueden considerarse como una cantidad negativa, lo que permite establecer la verdadera ecuación de igualación de color como:

$$c(C) = -r(R) + b(B) + g(G)$$

Definamos ahora las siguientes cantidades, que denominaremos coordenadas cromáticas:

$$r_\lambda = \frac{\bar{r}_\lambda}{\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda} \quad g_\lambda = \frac{\bar{g}_\lambda}{\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda} \quad b_\lambda = \frac{\bar{b}_\lambda}{\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda}$$

Si se representan en un plano las coordenadas r, g de cada λ , se obtiene una curva (figura 3-2) sobre la que se sitúan los colores espectrales. Por tanto, nos referiremos a ella como lugar del espectro o *locus espectral*. Los primarios λ_R , λ_G y λ_B se sitúan en los vértices del triángulo de coordenadas (1,0,0), (0,1,0) y (0,0,1). Por razones que se comentarán más adelante, a la línea recta que une los extremos del espectro cerrando el locus se la denomina recta de los púrpuras. Este sistema de representación de coordenadas recibe el nombre de diagrama cromático.

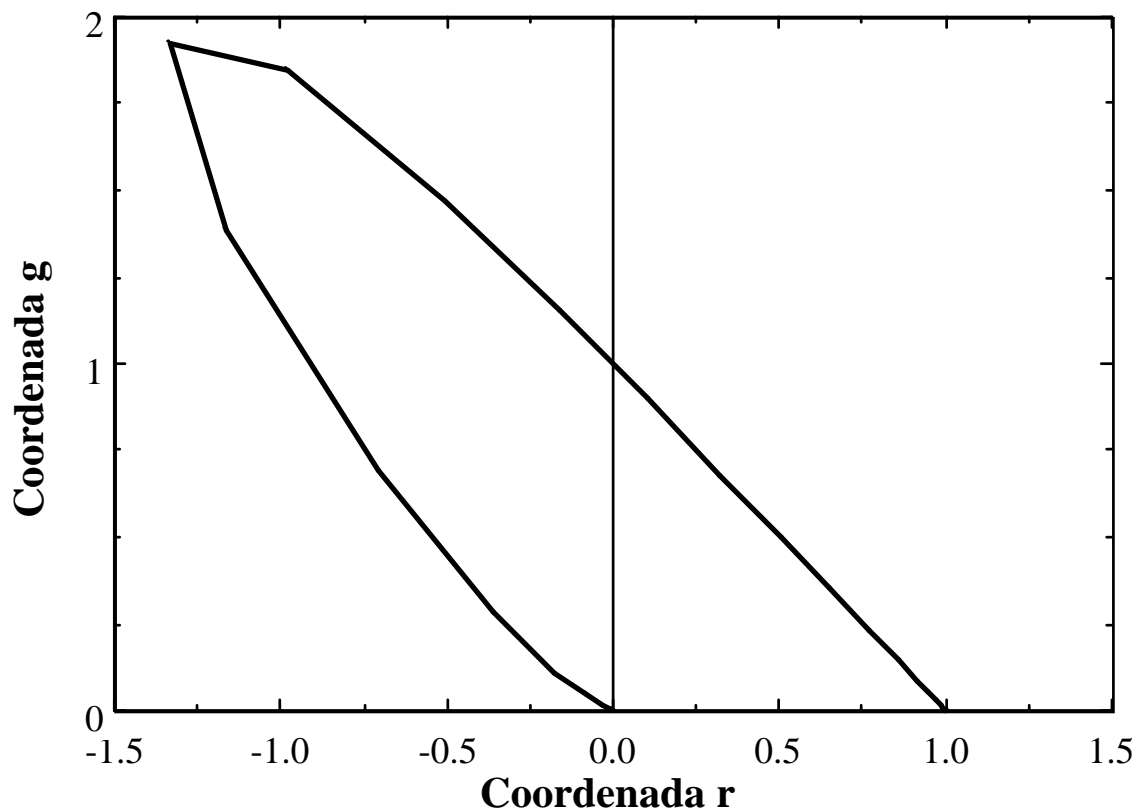


Figura 3.2 Diagrama cromático RGB (CIE 1931)

Si bien el sistema colorimétrico RGB se normalizó y se puede especificar un color unívocamente, existían dos problemas que decidieron a la CIE optar por otro que fuera más práctico. Tales problemas eran:

1.- La necesidad de que la especificación del color pudiera evaluar directamente la luminosidad/claridad de la muestra sin necesidad de realizar ningún cálculo extra.

2.- Puesto que las funciones colorimétricas $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ y $\bar{g}(\lambda)$ muestran valores negativos, el cálculo del color de una muestra implica el manejo de cantidades negativas no siempre comprensibles por todos los usuarios.

Por estas razones la CIE recomendó la adopción de un nuevo sistema basado en tres colores primarios ideales (no reales) obtenidos mediante una transformación matricial del tipo

$$[X] = a_{11}[R] + a_{12}[G] + a_{13}[B]$$

$$[Y] = a_{21}[R] + a_{22}[G] + a_{23}[B]$$

$$[Z] = a_{31}[R] + a_{32}[G] + a_{33}[B]$$

que diera como resultado el que una de las curvas colorimétricas fuera igual, o muy parecida, a la eficiencia luminosa espectral $V(\lambda)$ y que las ordenadas fueran todas positivas.

Para resolver estos problemas la CIE propuso un nuevo sistema para la especificación del color, basado en las siguientes hipótesis:

a) Elección de los tres primarios XYZ de forma que el valor triestímulo Y lleve toda la información del flujo luminoso del color.

b) Los lados XY e YZ del triángulo que definen los primarios en el diagrama cromático son tangentes al lugar espectral (figura. 3.3). De esta forma, el triángulo incluye todos los estímulos de color reales. No obstante, como puede observarse en la figura 3.3, los primarios XYZ corresponden a estímulos irreales.

c) El estímulo equienergético tiene valores triestímulo iguales. Es decir:

$$X_E = Y_E = Z_E$$

La transformación de un sistema de especificación del color, basado en tres *primarios*, por ejemplo RGB, a otro sistema basado en otra terna de primarios, como el XYZ, puede establecerse a partir de la expresión de un conjunto de primarios en función del otro, es decir:

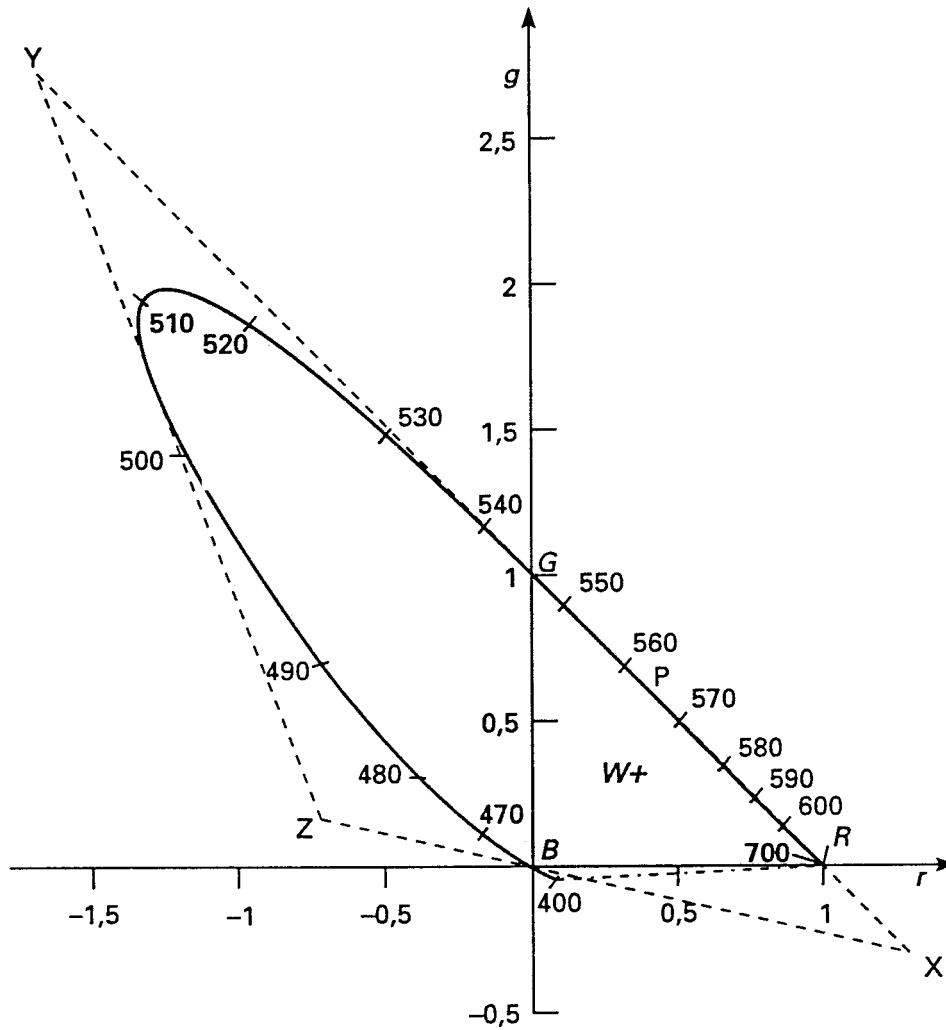


Figura 3.3. Diagrama de cromaticidad en el sistema XYZ. como puede observarse, los lados XY e YZ son paralelos al lugar espectral

La relación entre los primarios XYZ y RGB para el observador patrón CIE-1931 de 2° viene dada por:

$$\begin{aligned}
 [X] &= 2,7689 [R] + 1,7517 [G] + 1,1302 [B] \\
 [Y] &= [R] + 4,5907 [G] + 0,0601 [B] \\
 [Z] &= 0,0565 [G] + 5,5943 [B]
 \end{aligned}$$

Por consiguiente, la matriz de transformación es

$$A = \begin{vmatrix} 2,7689 & 1,7567 & 1,1302 \\ 1 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0,0565 & 5,5943 & \end{vmatrix}$$

A partir de la transformación pueden obtenerse las *funcionas de igualación de color* en este sistema $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$, que están relacionadas con $(\bar{r}_\lambda, \bar{g}_\lambda, \bar{b}_\lambda)$ por:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_\lambda \\ \bar{y}_\lambda \\ \bar{z}_\lambda \end{pmatrix} = \mathbf{A}^T \begin{pmatrix} \bar{r}_\lambda \\ \bar{g}_\lambda \\ \bar{b}_\lambda \end{pmatrix}$$

donde A es la matriz dada anteriormente.

Los nuevos valores triestímulos espectrales están definidos en la tabla 3.2 y en la figura 3.4 está representado el conjunto de las tres curvas llamadas **funciones colorimétricas** o antes coeficientes de distribución.

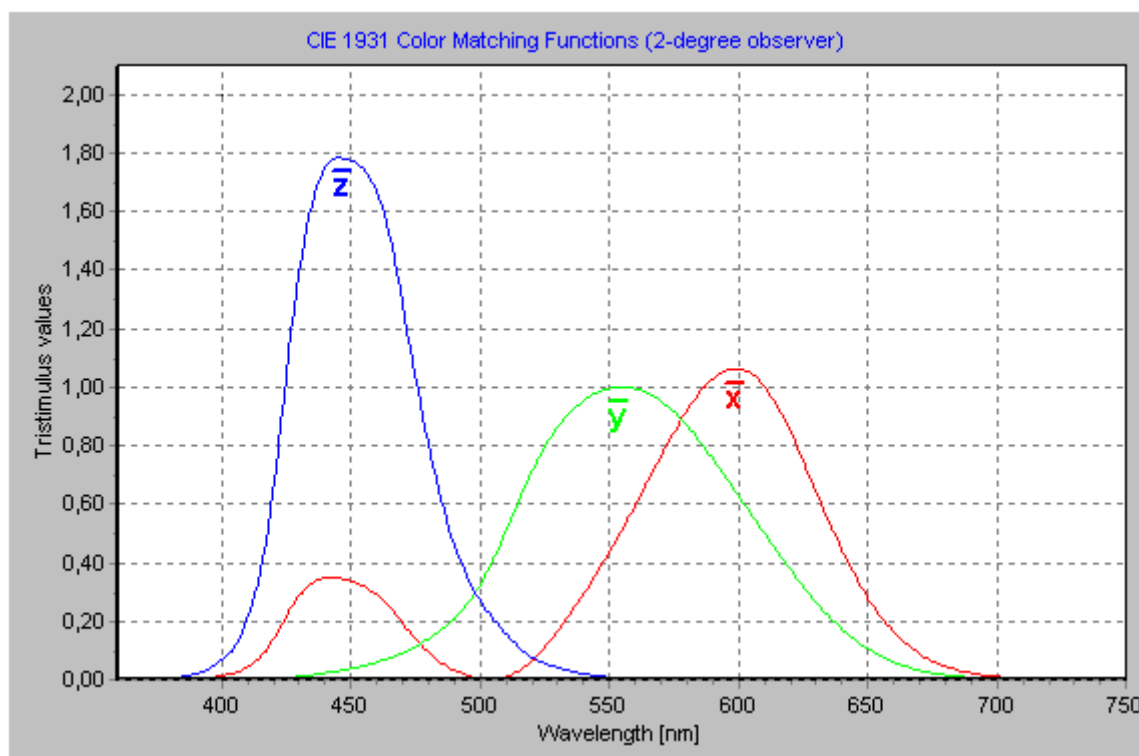


Figura 3.4. Funciones colorimétricas \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ , en función de la longitud de onda λ para el observador patrón CIE 1931

Los valores de estas funciones colorimétricas indican las cantidades de cada uno de los estímulos de referencia que se necesitan para igualar cada radiación monocromática del

espectro visible, para un watio de potencia. Es decir, son los valores triestímulo de las componentes espectrales de la radiación equienergética, cuyo flujo radiante es la unidad.

Las principales características de estas funciones colorimétricas son:

1.- Todas las ordenadas son positivas, luego los valores triestímulo que se obtengan son siempre positivos.

2.- los valores correspondientes a la segunda función son iguales a los de la eficiencia luminosa: $\bar{y}_\lambda = V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}$ y, por tanto, los resultados de aplicar esta función serán proporcionales a la luminancia.

3.- Las áreas bajo las tres curvas son iguales.

Estas funciones colorimétricas definen y componen el **sistema colorimétrico patrón CIE 1931**, aplicable a campos de observación hasta 4°, siendo un sistema lineal y unívoco para la evaluación de cualquier radiación con ayuda de estas funciones. Igualmente queda definido el **Observador colorimétrico patrón UNE 3**, llamado también *Observador patrón* o *Observador 2°* siendo un receptor teórico de radiación, adoptado por acuerdo internacional, cuyas características colorimétricas corresponden a los valores triestímulo espectrales.

3.7.-COORDENADAS DE CROMATICIDAD

Adoptado el sistema colorimétrico anterior vamos a determinar los valores triestímulo de una radiación monocromática de longitud de onda 500 nm y flujo radiante 1 watio. A partir de la tabla 3.2 se obtiene

$$X = 0.0063 \qquad Y = 0.3086 \qquad Z = 0.2862$$

Para otra radiación de la misma longitud de onda y un flujo radiante de dos watios, los valores triestímulo son ahora el doble de los anteriores:

$$X = 0.0063 \cdot 2 = 0.0126 \qquad Y = 0.3086 \cdot 2 = 0.6172 \qquad Z = 0.2862 \cdot 2 = 0.5724$$

Así pues, los valores triestímulo no indican de un modo fácilmente comprensible la naturaleza de la diferencia de color cuando ésta se presenta. Las dos radiaciones anteriores son de la misma calidad cromática (tono y saturación) pero una es más luminosa que otra, lo que viene confirmado por el triestímulo Y.

La evaluación de la cromaticidad de un estímulo de color se lleva a cabo definiendo tres nuevas variables llamadas **coordenadas cromáticas** o **coordenadas de cromaticidad**, como las relaciones de cada uno de los valores triestímulo y su suma:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Sólo dos de estas variables son independientes, cumpliéndose su relación indiferentemente de los valores asignados a X, Y, Z . Por ello, en lugar de utilizar los valores triestímulo para especificar un color, se comprende mejor si se especifica en función de Y, x, y. En el ejemplo anterior se puede comprobar que las radiaciones monocromáticas tienen la misma cromaticidad y se diferencian en la luminosidad debida al flujo radiante.

La cromaticidad puede representarse convenientemente en un plano mediante los valores x, y sobre un sistema cartesiano. Si se representase los valores triestímulo se necesitaría una representación tridimensional con los problemas que lleva.

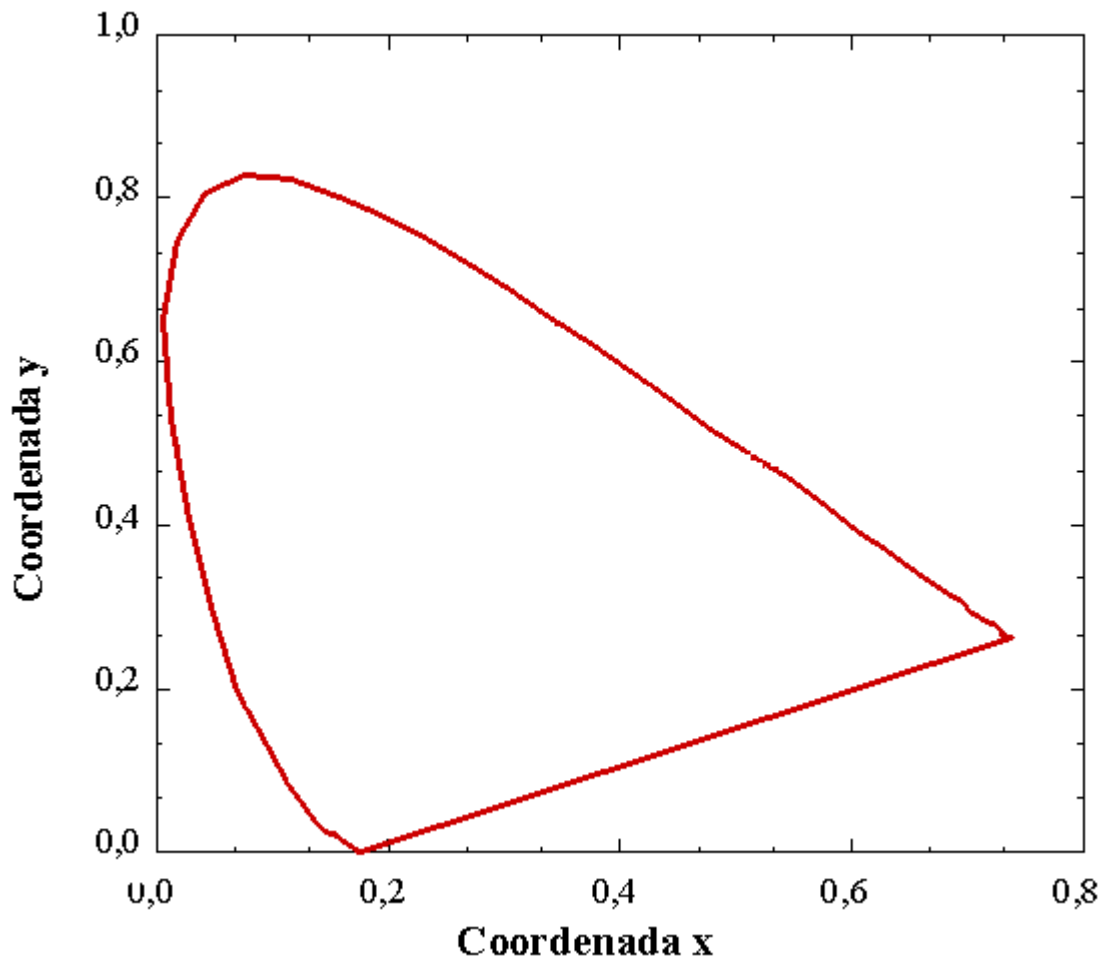


Figura 3.5 Diagrama cromático (x,y) para el observador patrón CIE-1931 con el lugar espectral y la línea de púrpuras

La figura 3.5 muestra la curva obtenida al representar las coordenadas de cromaticidad de los colores del espectro visible, llamada **spectrum locus** o **lugar de los estímulos espectrales**. La recta que une los extremos de la curva se llama **límite de púrpuras**, y el conjunto recibe el nombre de **diagrama cromático** o **diagrama de cromaticidad CIE 1931** dentro del cual deben hallarse los puntos representativos de todos los colores reales.

3.8.- EL OBSERVADOR SUPLEMENTARIO.

El sistema colorimétrico patrón CIE 1931 es sólo aplicable a campos visuales con ángulos de observación de hasta 4° , equivalentes aproximadamente al tamaño de una moneda grande a una distancia media de observación. Pero, en la práctica industrial, se utilizan campos mayores para comparar colores, por ello en 1959 la CIE publicó los valores triestímulo espectrales para el **Observador suplementario**, basado en trabajos experimentales previos. Los datos se obtuvieron igualando luces monocromáticas con un colorímetro aditivo visual para un ángulo de 10° , con la región central tapada. Las nuevas funciones colorimétricas se detallan en la tabla 3.3 y se representan en la figura 3.6

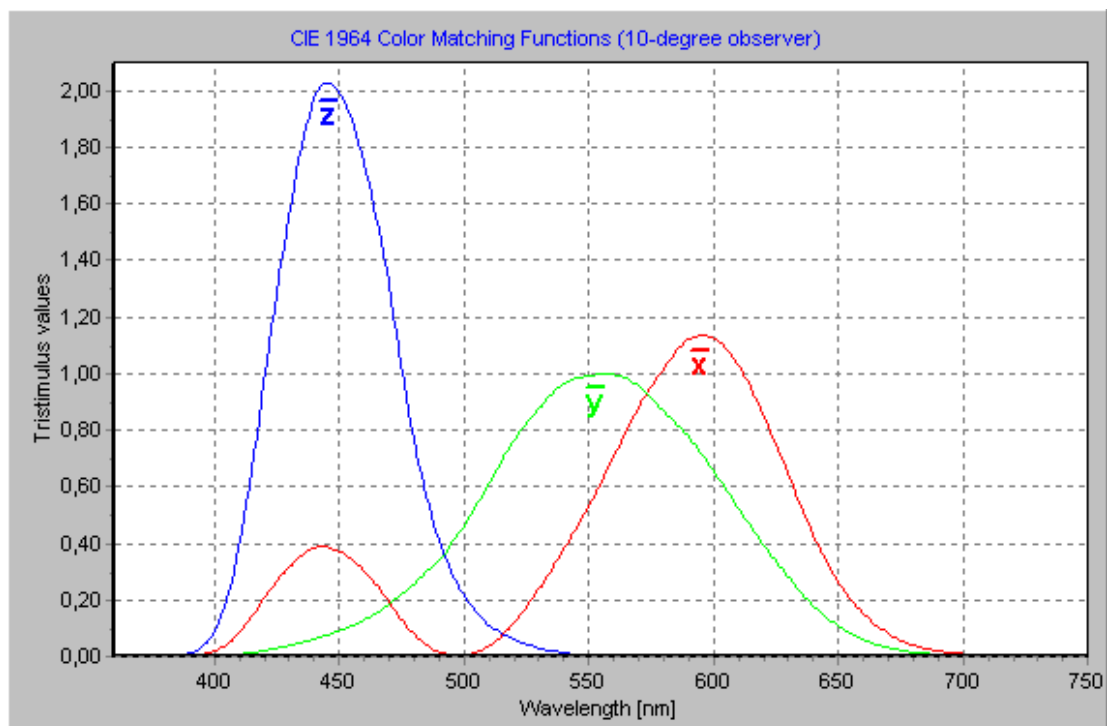


Figura 3.6. Funciones de igualación de color \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ en función de la longitud de onda λ para el observador patrón suplementario CIE-1964.

Las principales diferencias entre las funciones de igualación de color del observador patrón y del observador suplementario se encuentran en la zona del espectro correspondiente a las longitudes de onda cortas, donde la sensibilidad es mayor para el segundo y de forma más definida en la curva \bar{z}_λ . La comparación entre los diagramas cromáticos CIE 1931 con el del observador suplementario CIE-1964 puede verse en la figura 3.7.

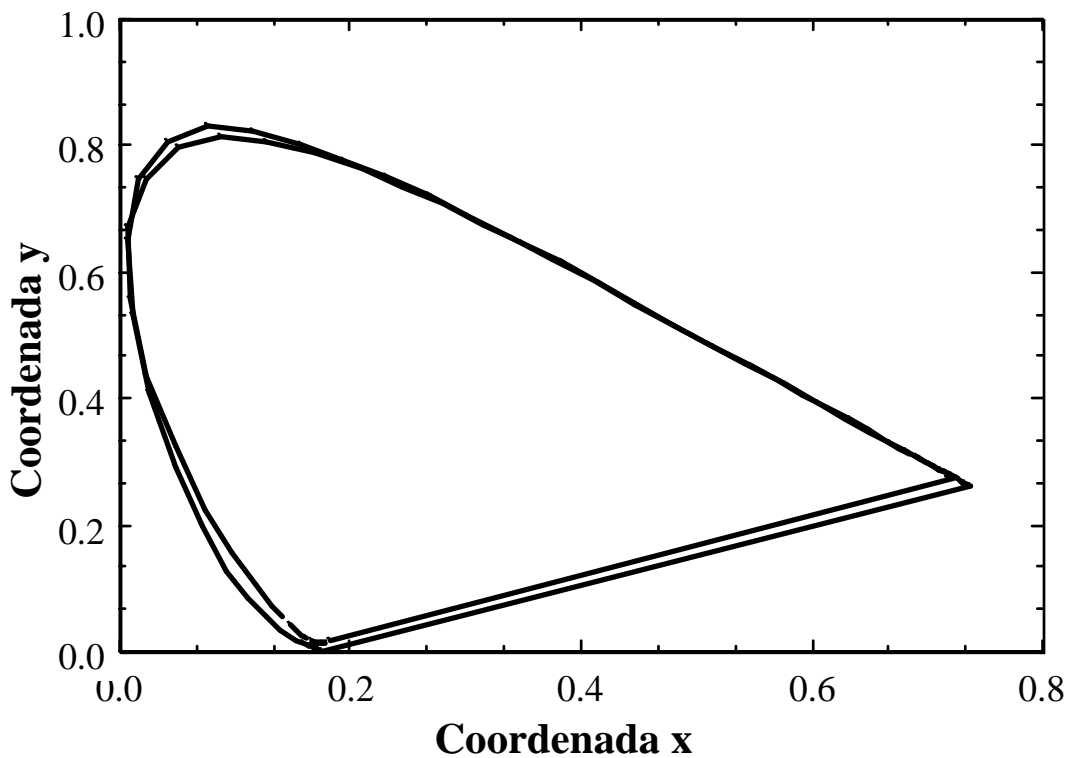


Figura 3.7.- Comparación de los diagramas cromáticos CIE(x,y) 1931 y CIE (x,y) 1964

TABLA 3.1: OBSERVADOR PATRÓN CIE (1931). FUNCIONES DE IGUALACIÓN DE COLOR Y COORDENADAS CROMÁTICAS

λ	\bar{r}_λ	\bar{g}_λ	\bar{b}_λ	r_λ	g_λ	b_λ
380	0	0	0.0012	0.0272	-0.0115	0.9843
390	0.0001	0	0.0036	0.0263	-0.0114	0.9851
400	0.0003	-0.0001	0.0121	0.0247	-0.0112	0.9865
410	0.0008	-0.0004	0.0371	0.0225	-0.0109	0.9884
420	0.0021	-0.0011	0.1154	0.0181	-0.0094	0.9913
430	0.0022	-0.0012	0.2477	0.0088	-0.0048	0.996
440	-0.0026	0.0015	0.3123	-0.0084	0.0048	1.0036
450	-0.0121	0.0068	0.3167	-0.0390	0.0218	1.0172
460	-0.0261	0.0148	0.2982	-0.0909	0.0517	1.0392
470	-0.0393	0.0254	0.2299	-0.1821	0.1175	1.0646
480	-0.0494	0.0391	0.1449	-0.3667	0.2906	1.0761
490	-0.0581	0.0569	0.0826	-0.7150	0.6996	1.0154
500	-0.0717	0.0854	0.0478	-1.1685	1.3905	0.7780
510	-0.0890	0.1286	0.0270	-1.3371	1.9318	0.4053
520	-0.0926	0.1747	0.0122	-0.9830	1.8534	0.1296
530	-0.0710	0.2032	0.0055	-0.5159	1.4761	0.0398
540	-0.0315	0.2147	0.0015	-0.1707	1.1628	0.0079
550	0.0228	0.2118	-0.0006	0.0974	0.9051	-0.0025
560	0.0906	0.1970	-0.0013	0.3164	0.6881	-0.0045
570	0.1677	0.1709	-0.0013	0.4973	0.5067	-0.0040
580	0.2453	0.1361	-0.0011	0.6449	0.3579	-0.0028
590	0.3093	0.0975	-0.0008	0.7617	0.2402	-0.0019
600	0.3443	0.0625	-0.0005	0.8475	0.1537	-0.0012
610	0.3397	0.0356	-0.0003	0.9059	0.0949	-0.0008
620	0.2971	0.0183	-0.0001	0.9425	0.0580	-0.0005
630	0.2268	0.0083	-0.0001	0.9649	0.0354	-0.0003
640	0.1597	0.0033	0	0.9797	0.0205	-0.0002
650	0.1017	0.0012		0.9888	0.0113	-0.0001
660	0.0593	0.0004		0.994	0.0061	-0.0001
670	0.0315	0.0001		0.9966	0.0035	-0.0001
680	0.0169	0		0.9984	0.0016	0
690	0.0082			0.9996	0.0004	
700	0.0041			1	0	

**TABLA 3.2 FUNCIONES DE IGUALACIÓN $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ DEL OBSERVADOR
PATRÓN CIE 1931 CON 5 nm DE INTERVALO.**

λ	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
380	0.001368	0.000039	0.006450001
385	0.002236	0.000064	0.01054999
390	0.004243	0.00012	0.02005001
395	0.00765	0.000217	0.03621
400	0.01431	0.000396	0.06785001
405	0.02319	0.00064	0.1107
410	0.04351	0.00121	0.2074
415	0.07763	0.00218	0.3713
420	0.13438	0.004	0.6456
425	0.21477	0.0073	1.0390501
430	0.2839	0.0116	1.3856
435	0.3285	0.01684	1.62296
440	0.34828	0.023	1.74706
445	0.349287	0.02835125	1.7804334
450	0.3390941	0.03622571	1.7758671
455	0.3228868	0.04584267	1.7524663
460	0.2972579	0.05745872	1.6887372
465	0.2604227	0.07091109	1.564528
470	0.2068115	0.0872328	1.3387362
475	0.1522833	0.1078846	1.090148
480	0.1042979	0.1334528	0.8566193
485	0.06458099	0.1627177	0.6521049
490	0.03641283	0.199418	0.4919673
495	0.0175404	0.2474812	0.3729459
500	0.006296346	0.308578	0.2861686
505	0.002236293	0.3892875	0.2234533
510	0.00698208	0.4829395	0.1685608
515	0.02399277	0.5869653	0.1200751
520	0.05537861	0.6908424	0.08384531
525	0.09945645	0.7778368	0.06078835
530	0.1538542	0.8494916	0.04489859
535	0.2133658	0.9054432	0.03208872

540	0.2771017	0.9472252	0.02198925
545	0.3314384	0.9712606	0.01586364
550	0.4033784	0.9903128	0.01037792
555	0.480064	0.999112	0.0067854
560	0.5612094	0.9983255	0.0045342
565	0.6447602	0.9864444	0.0031414
570	0.7288284	0.9638568	0.0023094
575	0.8109264	0.9311628	0.0018898
580	0.8878944	0.8892048	0.0017112
585	0.9552776	0.838622	0.0015136
590	1.0090892	0.781192	0.001205
595	1.047188	0.7200036	0.0010356
600	1.0628068	0.6566744	0.00088688
605	1.0552244	0.5924756	0.00068592
610	1.0226662	0.5283528	0.0004354
615	0.9664916	0.4656776	0.00026544
620	0.890502	0.405032	0.00021196
625	0.794186	0.3447768	0.00013596
630	0.6856022	0.2865936	0.000065
635	0.5811052	0.2353344	0.00003572
640	0.4847436	0.1911552	0.00002364
645	0.412098	0.1596464	0.0000162
650	0.3285168	0.1250248	0.0000054
655	0.2561184	0.09618864	0
660	0.1959232	0.07282552	0
664	0.1553667	0.05739621	0
670	0.106465	0.03908496	0
675	0.07680428	0.02807664	0
680	0.05628216	0.02050112	0
685	0.04087536	0.01483718	0
690	0.02838056	0.01027339	0
695	0.01959988	0.007085424	0
700	0.01383132	0.004995796	0
705	0.009938846	0.003589099	0
710	0.007088746	0.002559876	0
715	0.005052583	0.00182458	0
720	0.003575748	0.001291268	0
725	0.00252302	0.0009111088	0
730	0.001781438	0.00064331	0

735	0.001246275	0.0004500528	0
740	0.0008624332	0.0003114404	0
745	0.0006405156	0.0002313019	0
750	0.0004424536	0.0001597781	0
755	0.0003097586	0.0001118595	0
760	0.000219171	0.00007914667	0
765	0.0001550236	0.00005598187	0
770	0.0001095515	0.00003956104	0
775	0.0001022245	0.00003691512	0
780	0	0	0

**TABLA 3.3 FUNCIONES DE IGUALACIÓN $\bar{x}_{10\lambda}$, $\bar{y}_{10\lambda}$, $\bar{z}_{10\lambda}$ DEL OBSERVADOR
PATRÓN CIE 1964 CON 5 nm DE INTERVALO.**

λ	$\bar{x}_{10\lambda}$	$\bar{y}_{10\lambda}$	$\bar{z}_{10\lambda}$
380	0.0002	0	0.0007
385	0.0007	0.0001	0.0029
390	0.0024	0.0002	0.0105
395	0.0072	0.0008	0.0323
400	0.0191	0.002	0.086
405	0.0434	0.0045	0.1971
410	0.0847	0.0088	0.3894
415	0.1406	0.0145	0.6568
420	0.2045	0.0214	0.9725
425	0.2647	0.0295	1.2825
430	0.3147	0.0387	1.5535
435	0.3577	0.0496	1.7985
440	0.3837	0.0621	1.9673
445	0.388	0.0722	2.0244
450	0.3749	0.086	2.006
455	0.3495	0.1028	1.9248
460	0.3115	0.1229	1.7806
465	0.2643	0.1478	1.5956
470	0.2082	0.1774	1.37
475	0.1446	0.2136	1.088
480	0.0894	0.246	0.8183
485	0.0481	0.2887	0.6068
490	0.0196	0.3314	0.4424
495	0.0067	0.3825	0.3227
500	0.0031	0.4476	0.2323
505	0.0121	0.5167	0.1703
510	0.0324	0.5915	0.1202
515	0.0633	0.6697	0.0871
520	0.1079	0.7475	0.0651
525	0.161	0.8121	0.0459
530	0.2235	0.865	0.0329

535	0.2903	0.9146	0.0222
540	0.3619	0.9556	0.0151
545	0.4215	0.9762	0.0099
550	0.4977	0.9883	0.0054
555	0.5807	0.9968	0.0021
560	0.6698	0.9997	0.0002
565	0.7583	0.9897	0
570	0.8459	0.9677	0
575	0.9237	0.9328	0
580	0.9896	0.8872	0
585	1.051	0.843	0
590	1.1042	0.7979	0
595	1.1311	0.7438	0
600	1.1312	0.6836	0
605	1.1059	0.6198	0
610	1.0567	0.5545	0
615	0.9848	0.4881	0
620	0.8954	0.4231	0
625	0.796	0.3623	0
630	0.6913	0.3059	0
635	0.5799	0.2499	0
640	0.4711	0.1981	0
645	0.3947	0.1631	0
650	0.3122	0.1264	0
655	0.2413	0.0963	0
660	0.1821	0.0722	0
665	0.1352	0.0533	0
670	0.0988	0.0387	0
675	0.0711	0.0278	0
680	0.0504	0.0196	0
685	0.0355	0.0138	0
690	0.0248	0.0096	0
695	0.0172	0.0067	0
700	0.0119	0.0046	0
705	0.0083	0.0032	0
710	0.0057	0.0022	0
715	0.0039	0.0015	0
720	0.0027	0.001	0
725	0.0019	0.0007	0

730	0.0013	0.0005	0
735	0.0009	0.0003	0
740	0.0006	0.0002	0
745	0.0005	0.0002	0
750	0.0003	0.0001	0
755	0.0002	0.0001	0
760	0.0002	0.0001	0
765	0.0001	0	0
770	0.0001	0	0
775	0.0001	0	0
780	0	0	0