

IMPORTANCIA DE LA MEDIDA DEL COLOR EN LA SEGURIDAD VIAL

FRANCISCA CASTILLO RUBI (*)
MANUEL BLANCO FERNANDEZ (**)

RESUMEN. La determinación de las características ópticas es, quizás, el factor más importante a la hora de evaluar a un material de señalización. El color del mismo nos da una idea de precaución, peligro u otra información a tener en cuenta por el usuario de la carretera. Si el color en sí no es un término fácil de definir, su determinación no es tampoco tan sencilla como podría parecer. En este trabajo se presenta la problemática existente en la tecnología actual para la medida del color en materiales de carácter retrorreflectante utilizados en la señalización de carreteras. Para ello se ha procedido a la determinación de las coordenadas cromáticas, con tres colorímetros diferentes en cuanto a iluminante y geometría, en 21 materiales de distintos niveles de retrorreflexión.

ABSTRACT. *This work aims to provide a consistent and comprehensive account of the basic colorimetric recommendations of the CIE. This document is not intended to be a text book on colorimetry but rather a reference work for the basic standards that govern modern colorimetry.*

The colorimetry of retroreflective materials requires special measurement conditions because these materials show different spectral distributions of reflected light when illuminated by day and by night. The purpose of this work, is to summarize the techniques of measurement for daytime colorimetry.

1. INTRODUCCION AL COLOR

El dar una definición de color, es una de las tareas más difíciles que pueden presentarse, aun cuando todo el mundo sepa de qué se trata al oír este concepto. Por tanto, no vamos a dar una definición sino que vamos a fijarnos en los hechos fundamentales que caracterizan la percepción de un color.

En primer lugar, para que tenga lugar la percepción, es necesario que sobre la retina del ojo del observador incida energía radiante, que como es sabido está completamente determinada por la irradiancia (cantidad de energía recibida por unidad de tiempo y de superficie) y por la composición espectral (que es la energía correspondiente a cada intervalo infinitesimal de longitud de onda a lo largo del espectro). El estudio de las variaciones de estas dos magnitudes en el espacio o en el tiempo y su medida constituye la «FISICA DEL COLOR» (1-3).

Cuando la energía radiante incide sobre la retina, una parte es absorbida por los fotorreceptores que se encuentran en ella, y convertida en impulsos nerviosos, que son transmitidos al cerebro por medio de las fibras del nervio óptico, y que al ser recibidos por el lóbulo occipital dan lugar a la sensación. Esta parte del fenómeno de la visión está caracterizada por la sensibilidad de los fotorreceptores a la energía radiante. El estudio de esta sensibilidad y las variaciones que pueda experi-

mentar, según el observador o las condiciones de observación, constituye la «FISIOLOGIA DEL COLOR» (1-3).

Por último, la percepción a partir de la sensación será interpretada por el observador, y esta parte del fenómeno de la visión constituye la «PSICOLOGIA DEL COLOR».

El observador interpreta la percepción de un color por medio de unos atributos psíquicos:

- El tono.
- La claridad.
- La saturación

El primer atributo, el tono, es el que permite distinguir las sensaciones visuales en rojas, amarillas, verdes, azules, etc.). Este atributo tiene una variación continua, es decir, no tiene extremos y sus términos forman un circuito cerrado.

El segundo atributo, la claridad, es fácil de comprender, ya que existen sensaciones simples que no tienen más que este atributo, las llamadas sensaciones acromáticas que van desde el negro al blanco pasando por los grises.

El tercer atributo, la saturación, permite distinguir las sensaciones que tienen el mismo tono y claridad por acercarse más o menos al gris correspondiente. Este gris precisamente tiene la mínima saturación y constituye un extremo de este atributo. El otro es la sensación (de la misma claridad y tono) que más se aparte de él.

En lo que respecta a las unidades de medida en cada uno de los atributos, las más extendidas son las establecidas por el sistema Munsell. En este sistema, cada atributo está representado por una variable y se pretende que los pasos sean perceptualmente iguales en cada una de ellas (Fig.1).

(*) Doctora en Ciencias Químicas. Jefe de la División de Materiales Orgánicos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX-MOPU.

(**) Doctor en Ciencias Químicas. Jefe del Sector de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX-MOPU.

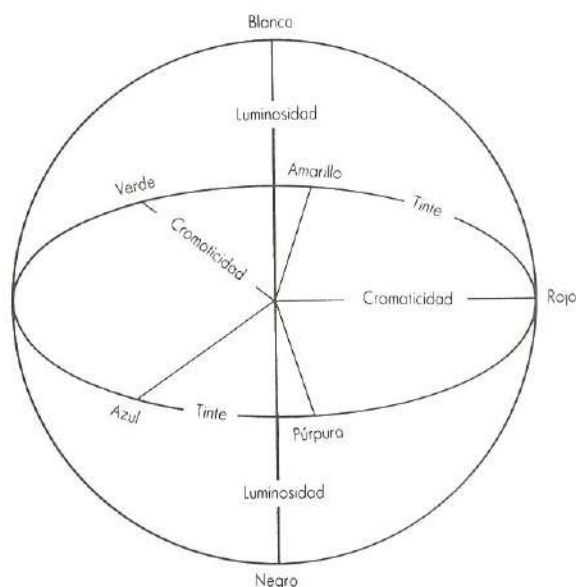


FIGURA 1. Esfera de color de Munsell.

Claridad (C), por valor Munsell (V), que varía de 0 a 10.

Tono (T), por tono Munsell (H), que divide el circuito de tonos en 100 partes.

Saturación (S), por cromía Munsell (C), con una unidad tal que llega hasta valores de 18 a 20 unidades.

Estos tres atributos de la percepción psíquica de un color son independientes entre sí y constituyen una especificación de éste. A veces se reúnen los dos atributos de tono y saturación, dándoles el nombre de cromaticidad, mientras que el atributo de claridad se relaciona con el concepto de luminosidad. Pero esta especificación no es conveniente, debido a que presenta la dificultad del establecimiento de escalas por cada uno de los atributos y de tantos sistemas de especificación como observadores.

Por otro lado, la especificación puramente física, por medio de la irradiancia espectral, tampoco es conveniente por no tener en cuenta la parte esencial del observador.

Por tanto, el problema quedaría resuelto estableciendo una conexión entre el observador y la irradiancia espectral conocida con el nombre de la «PSICOFISICA DEL COLOR» (1).

1.1. LA PSICOFISICA DEL COLOR

Se ha demostrado que las respuestas dadas por el sistema óptico humano varían muy ligeramente entre individuos con visión «normal». Sin embargo, estas diferencias, en determinadas personas, pueden ser tales que, para ellas, existen regiones del espectro en las que sólo son capaces de distinguir diferencias en la intensidad de la luz percibida y no las que son consecuencia de la longitud de onda. Tales individuos, sin sensibilidad para

los diferentes colores o para un determinado grupo de ellos, son conocidos como daltónicos.

La PSICOFISICA DEL COLOR, resuelve este problema al definir un observador patrón, cuyas características se han derivado de las psíquicas del observador medio. Para establecer el observador patrón hay que fijar su sensibilidad espectral a la energía radiante. En 1924 fue recomendada por la CIE la curva de eficiencia luminosa fotópica V_λ , que representa la sensibilidad espectral del observador medio relativa a la sensibilidad máxima en la longitud de onda de 555 nm, dada por $K = 683$ lúmenes/watio (fig. 2).

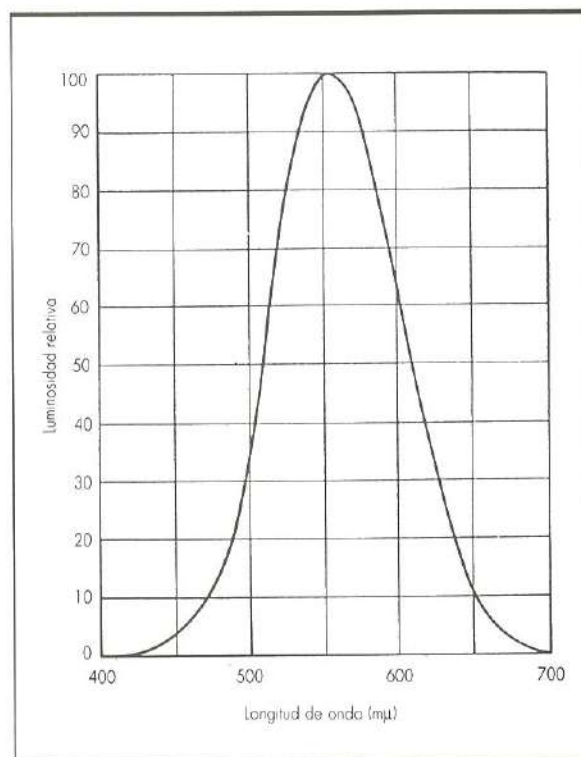


FIGURA 2. Curva de eficiencia luminosa del observador patrón. Corresponde a un ojo normal adaptado a la claridad.

1.2. ESPECIFICACION DE LOS COLORES POR MEDIO DE TRES PRIMARIOS

Según esta definición del observador patrón, podemos especificar ya, en forma directa y mediante una magnitud psicofísica, uno de los atributos del color de una fuente de energía radiante, la claridad. Esta magnitud recibe el nombre de luminancia y su medida es el objeto de la Fotometría (1).

Supongamos una superficie emitiendo energía radiante, determinada físicamente por su irradiancia espectral H_λ . La luminancia de esta superficie estará dada por:

$$L = K \int_0^\infty H_\lambda \cdot V_\lambda \cdot d_\lambda \quad [1]$$

La integración se puede realizar por un método de sumación, y para facilitar esta labor, los valores de V_λ se encuentran convenientemente tabulados.

Esta especificación es suficiente para los colores acromáticos, es decir, para los grises desde el blanco al negro. Pero para los demás se necesitan otras dos variables, ya que, como hemos visto, el color es tridimensional. Las otras dos variables que faltan y que tienen que corresponder en cierta manera a los atributos de tono y saturación, se reúnen, a veces, en el nombre de cromaticidad del color. Su especificación está fundada en el hecho, demostrado experimentalmente, de que todo color puede igualarse por la mezcla de otros tres colores (convenientemente escogidos), y en las leyes de Grassman sobre las que está basada toda la colorimetría moderna. De todo ello, resulta que la especificación de la cromaticidad de los colores puede hacerse por medio de cantidades de tres primarios (verde, rojo y azul), de cromaticidad conocida y que es preciso mezclar para igualar el color a especificar.

Evidentemente, al hablar de cantidades, nos referimos a las luminancias, que es la única variable que queda libre en los colores primarios, y que sabemos medir y especificar. Así, si por ejemplo, cogemos una luz roja, otra verde y otra azul como colores primarios y las designamos por R , V y A , respectivamente, un color cualquiera C vendrá expresado en función de ellos por:

$$C = MR + NV + PA \quad [2]$$

donde cada uno de los sumandos del segundo miembro representa la luminancia que tiene que tener cada primario para que su mezcla iguale al color de la luz dada. Los coeficientes M , N y P representan al color en el sistema de primarios (R , V , A) y se denominan coeficientes tricromáticos del color en dicho sistema.

Hay que tener en cuenta que los tres coeficientes tricromáticos M , N y P no son independientes entre sí, si se ha especificado la luminancia del color dado L_c , ya que se tiene que verificar:

$$L_c = MR + NV + PA \quad [3]$$

distinguiéndose esta ecuación de la [2] por su significado puramente fotométrico, es decir, como relación entre luminancias solamente. Por eso suelen darse solamente las dos variables:

$$m = \frac{M}{M + N + P} \quad n = \frac{N}{M + N + P} \quad [4]$$

que junto con la L_c constituyen la especificación completa del color.

No obstante, esta forma de especificar un color depende del observador que decide la igualdad entre el color a especificar y el color de la mezcla de los tres primarios del sistema.

La forma más sencilla, y al mismo tiempo más completa, de expresar esta dependencia de los sistemas de especificación de tres primarios del observador, es por medio de las llamadas «curvas de mezcla espectrales».

Estas tres curvas representan la cantidad de cada primario que se necesita para igualar a cada uno de los colores espectrales puros.

En la figura 3 se dan las curvas de mezclas espectrales encontradas por Wright, usando también como primarios luces monocromáticas de 460 nm, 530 nm y 650 nm. En estas curvas pueden observarse valores negativos (que corresponden a coeficientes tricromáticos negativos), esto es debido a que no es posible encontrar tres primarios con los que pueda obtenerse todos los colores del espectro.

Una propiedad muy importante de las curvas de mezcla espectrales es que, una vez determinadas para un observador y un sistema de primarios, no es preciso volver a determinarlas cuando se usa otra terna de primarios para el mismo observador. Las nuevas curvas de mezcla se obtienen por una combinación lineal homogénea de las anteriores (es decir, cada curva del nuevo sistema se obtiene multiplicando cada una de las tres curvas del antiguo por ciertos coeficientes, positivos o negativos, y sumando los resultados).

Observamos también que, como consecuencia de esto y de la ecuación [3], la curva de eficiencia luminosa de cada observador tiene que ser una combinación lineal de sus curvas de mezclas espectrales. Los coeficientes por los que hay que multiplicar cada una de ellas se llaman coeficientes de luminosidad de las curvas respectivas (1).

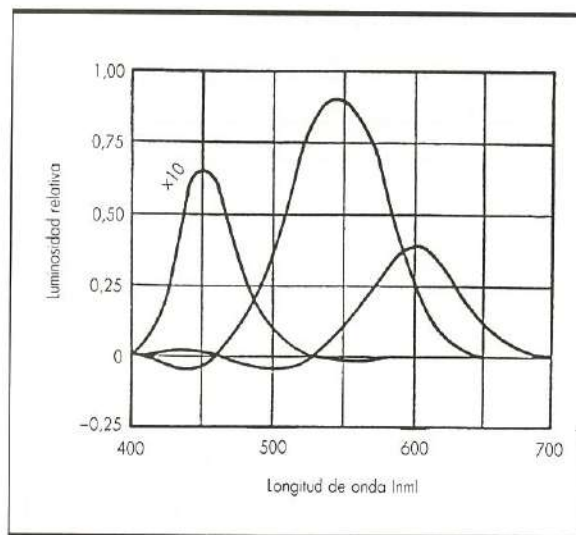


FIGURA 3. Coeficientes tricromáticos del espectro obtenidos por Wright usando como primarios luces espectrales de 460 nm, 530 nm y 650 nm.

1.3. OBSERVADOR PATRON Y SISTEMA CIE DE PRIMARIOS

Es fácil establecer ahora el observador patrón de colorimetría, fijando sus curvas de mezcla espectrales, análogamente a como se hizo para el observador patrón de fotometría fijando su curva de eficiencia luminosa. Esto fue lo que se hizo en la reunión de la CIE en 1931 donde, basándose en las medidas de Guild (siete obser-

vadores) y de Wright (cuarenta y cinco observadores), se tomaron tres curvas de mezcla como definición del observador patrón. Estas curvas casi coinciden con las de la figura 2, ya que las que en realidad se usan en la práctica son una combinación lineal homogénea de ellas (1-4).

Como se ha dicho anteriormente, en 1931 la CIE acordó tomar unas combinaciones lineales de las curvas de mezcla del observador «standard» que cumplieren las siguientes condiciones:

1. Que una de ellas coincidiera con la curva de eficiencia luminosa CIE de 1924 del observador patrón.
2. Que ninguna de ellas tuviera valores negativos, de forma que así ningún color del espectro (y tampoco ningún otro, pues todos pueden obtenerse por mezclas de colores espectrales) tuviera coeficientes tricromáticos negativos en el sistema.

Las curvas de mezcla espectrales recomendadas se dan en la figura 4. Para distinguir el sistema patrón de los demás, en él los coeficientes tricromáticos reciben el nombre de valores triestímulos y las curvas de mezcla el de curva de valores triestímulos del espectro. Evidentemente, por definición, los coeficientes de luminosidad de estas curvas son, 0, 1 y 0 (1-4).

Los valores triestímulos de los colores espectrales se representan por:

$$\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$$

y los de un color cualquiera por:

$$X, Y, Z$$

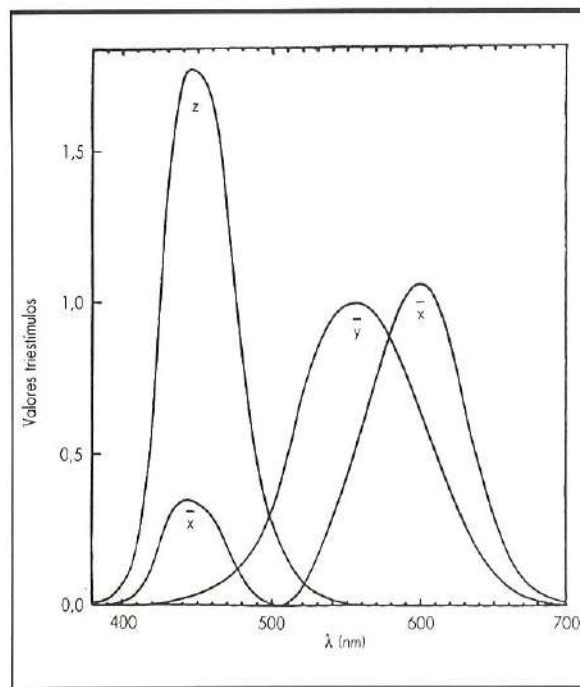


FIGURA 4. El observador patrón CIE 1931 está definido por las funciones de sensibilidad $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ que se representan en la figura.

Los valores deducidos según la ecuación [4]

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad [5]$$

que reciben el nombre de coordenadas cromáticas, y que en conjunto puede decirse que están correlacionadas con la cromacidad del color (conjunto de los dos atributos tono y saturación).

Además, en la práctica se ha generalizado el uso del valor triestímulo «Y» como medida de la capacidad del estímulo correspondiente para producir el atributo de claridad, y es conocido normalmente como factor de luminancia o reflectancia luminosa.

Si representamos en un sistema de coordenadas cartesianas los valores de «x» e «y», obtenemos el llamado diagrama cromático CIE 1931 (Fig. 5). Se ha dibujado en él la curva lugar geométrico de los puntos representativos de los colores del espectro y la recta que une sus dos extremos (representante de los púrpuras más saturados) (1-4).

Observamos que los colores primarios del sistema están representados por los puntos (1,0), (0,0) y (0,1) y, por tanto, caen fuera de la región de los colores reales. Esto quiere decir, que los primarios son colores ficticios imposibles de obtener experimentalmente, lo cual podría suponerse del hecho de que toda la luminancia reside en uno de ellos.

Es importante señalar que este diagrama no es uniforme, es decir, que la distancia entre los puntos representativos de dos colores no es proporcional a la diferencia de cromaticidad de éstos. Esto puede verse más claramente en la figura 6, en la que se representan las curvas de perceptibilidad de diferencias de cromaticidad. La distancia del punto interior de cada elipse a su contorno corresponde a 100 veces la diferencia mínima perceptible. Con esto se puede tener idea del gran número de colores que un observador normal puede distinguir como diferentes; teniendo en cuenta además los que se obtienen por variación de la luminancia, resultan más de 10 millones.

1.4. ESPECIFICACION DEL COLOR DE OBJETOS ILUMINADOS

Las luces pueden provenir de fuentes primarias (materiales emisores de energía radiante) o de fuentes secundarias (materiales que reflejan, transmiten, difunden o esparcen la energía radiante). La mayoría de los que en la vida ordinaria consideramos como objetos pertenecen a esta segunda clase.

No se debería hablar de color de un objeto, sino del color de la luz que proviene de él; sin embargo, hablaremos del color de un objeto por comodidad. Una superficie no luminosa por sí misma tiene que ser iluminada por la luz de una fuente luminosa para que pueda ser percibida. Una vez iluminada puede considerarse como luminosa por sí misma, pero teniendo en cuenta que su irradiancia espectral depende, tanto de sus propias propiedades espectrofotométricas como de la irradiancia espectral del iluminante (energía radiante que le irradia).

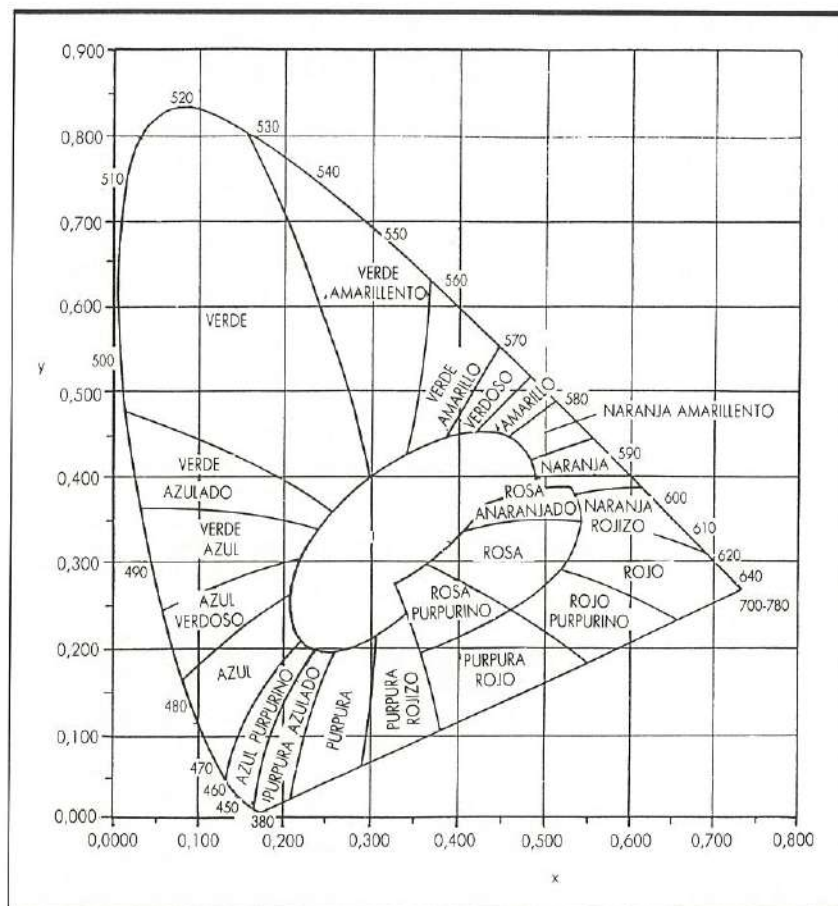


FIGURA 5.
Diagrama CIE 1931.

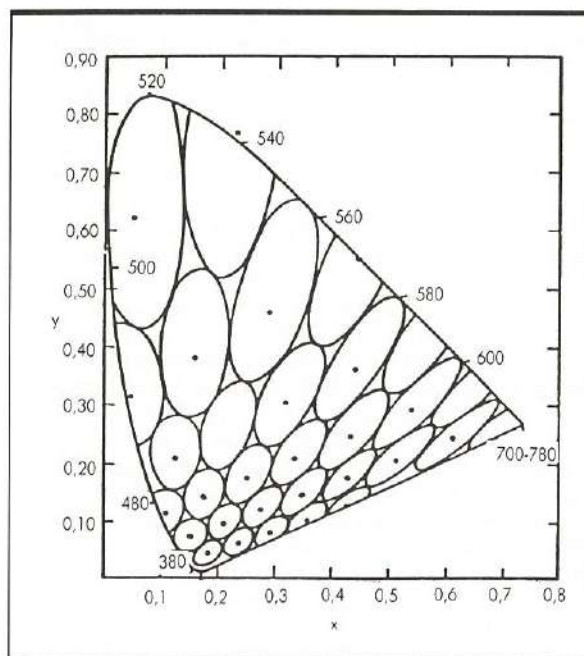


FIGURA 6. Curvas de perceptibilidad de diferencias de cromaticidad.

Como es sabido, las propiedades espectrofotométricas de un material están determinadas, si actúa por transmisión por su transmitancia espectral, T_λ (relación entre la energía transmitida y la energía incidente para cada longitud de onda), o si actúa por reflexión, por su reflectancia espectral, R_λ (razón entre la energía reflejada y la incidente para cada longitud de onda) (1).

Es necesario hacer resaltar la gran importancia que tiene el iluminante en el color de los objetos. Una especificación en el color de un material, sin especificar al mismo tiempo el iluminante usado, es absolutamente inútil. En los casos en que el material es muy selectivo, es decir, que su curva de transmitancia o de reflectancia espectral tiene cambios rápidos, los cambios de color, al variar el iluminante pueden ser sorprendentes. Este es el fundamento de los pares de muestras llamadas metámeros, se trata de muestras que presentan el mismo color bajo un iluminante, pero debido a sus distintas propiedades espectrofotométricas, bajo otro iluminante presentan distinto color (1-4).

Por otro lado, además del iluminante tiene una gran influencia en las mediciones del color, la geometría empleada, es decir, las condiciones de iluminación y de observación. Esto quiere decir que cuando se especifican las coordenadas cromáticas de un objeto es necesario especificar las condiciones geométricas de ilumi-

nación y de observación empleadas en la medición de las mismas, así como el iluminante utilizado (1-4).

2. ILUMINANTES PATRON CIE

Para facilitar los cálculos y uniformizar los resultados, se ha acordado internacionalmente realizar las medidas del color de los objetos y el cálculo de sus coordenadas CIE empleando, siempre que sea posible, uno de los iluminantes patrones siguientes (5-6):

- Iluminante patrón A; es definido en términos de distribución espectral relativa como el iluminante colorimétrico que representa la radiación de temperatura de color de 2.855,6 K.
- Iluminante patrón B; es definido en términos de distribución espectral relativa como el iluminante colorimétrico que representa la luz directa del sol con una temperatura de color de 4.874 K.
- Iluminante patrón C; es definido en términos de distribución espectral relativa como el iluminante colorimétrico que representa la luz del día (presenta una irradiancia o distribución espectral intermedia entre la luz de un día con cielo cubierto y la luz del cielo norte), con una temperatura de color de 6.774 K.
- Iluminante patrón D65; es definido en términos de distribución espectral relativa como el iluminante colorimétrico que representa la luz del día pero conteniendo parte de la región ultravioleta con una temperatura de color de 6.504 K.

El iluminante D65 se diferencia de los otros iluminantes, en que presenta radiación ultravioleta. Tiene una región espectral de 300 a 830 nm, que incluye el ultravioleta cercano.

El iluminante CIE A se consigue con el empleo de una fuente standard A según CIE, que consiste en una lámpara de filamento de tungsteno. Las fuentes B y C resultan de combinar la fuente A con una serie de filtros de soluciones de diferente composición química (4-6).

El iluminante D65 se obtiene con el empleo de una lámpara de xenon o de halógeno-tungsteno, las cuales proporcionan luz perteneciente a la región ultravioleta.

3. CONDICIONES DE ILUMINACION Y DE OBSERVACION

En la publicación CIE n.º 15.2 (1986) se recogen las diferentes geometrías empleadas en las mediciones del color y son:

1. 45°/Normal, que de forma abreviada: 45°/0°.
2. Normal/45°, que de forma abreviada: 0°/45°.
3. Difusa/Normal, que de forma abreviada: d/0°.
4. Normal/Difusa, que de forma abreviada: 0°/d.

El primer término indica la geometría de irradiación o de iluminación (ángulo de incidencia), mientras que el segundo término indica la geometría de medida (ángulo de observación).

1. **45°/Normal.** La muestra es iluminada por uno o más haces cuyos ejes forman un ángulo de $45^\circ \pm 2^\circ$ con la normal a la superficie de la muestra a medir. El ángulo formado entre la dirección de observación y la normal a la superficie de la muestra no ha de exceder de 10° . El

ángulo formado entre el eje de incidencia o de iluminación y cualquier rayo de iluminación no puede ser superior a 8° . Esta misma restricción se le exige también a la luz de observación.

2. **Normal/45°.** La muestra está iluminada por un haz cuyo eje forma un ángulo que no excede de 10° con la normal de la superficie de la muestra. La muestra es observada con un ángulo de $45^\circ \pm 2^\circ$ con la normal. El ángulo formado entre el eje y cualquier rayo de luz de iluminación no puede exceder de 8° . Esta misma exigencia la tiene también la luz de observación.

3. **Difusa/Normal.** La muestra es iluminada difusamente por una esfera integradora. El ángulo entre la normal a la muestra y el eje de observación no podrá ser superior a 10° . El ángulo formado entre el eje y cualquier rayo de luz de observación no puede exceder de 5° .

4. **Normal/Difusa.** La muestra es iluminada por un haz cuyo eje formará un ángulo con la normal a la muestra no superior a 10° . El flujo reflejado es recogido por medio de una esfera integradora. El ángulo entre el eje de luz de iluminación y cualquier rayo del haz de iluminación no podrá exceder de 5° .

4. MEDIDA DEL COLOR MEDIANTE INSTRUMENTOS

Los instrumentos utilizados para la comparación y medida del color pueden agruparse en dos categorías fundamentales: aquellos que precisan de un observador para determinar visualmente cuándo el color de la muestra queda igualado al del testigo y aquellos otros que miden fotoeléctricamente el porcentaje de reflectancia de la muestra y el testigo.

Los instrumentos empleados para medir el color pueden hacer las mediciones basándose en métodos espectrales «ESPECTROCOLORIMETROS», o bien basándose en métodos triestímulos «COLORIMETROS TRIESTIMULOS».

Los colorímetros triestímulos emplean tres filtros coloreados, tales como azul, verde y ámbar; a través de ellos efectúa la medida de la reflectancia. Los espectrocolorímetros miden la reflectancia mediante bandas estrechas sobre la totalidad del espectro, descomponiendo la luz mediante prismas o redes de difracción en bandas de 10 a 20 nm, pudiéndose obtener, por tanto, la representación gráfica de un color dado.

Los valores obtenidos mediante el empleo de colorímetros triestímulos, son unos números a los que se les conoce por el nombre de «valores triestímulos» y que se designan con las letras X, Y, Z. Como los espectrocolorímetros descomponen la luz en una serie continua de bandas estrechas, con ello se obtiene un número equivalente de valores de difícil manejo en la práctica. Por esta razón, estos valores son representados en forma de una curva sobre un gráfico en el que se representan ordenados los valores del porcentaje de reflectancia correspondiente a cada una de las bandas del espectro visible, conocido con el nombre de espectro de color de la muestra a medir.

A partir de los valores triestímulos (X, Y, Z) se pueden obtener las coordenadas de cromaticidad (x, y, z) según se indicó en la ecuación [5].

Aunque las coordenadas cromáticas se pueden obtener empleando colorímetros triestímulos o espectrocolorímetros, no obstante los valores obtenidos a partir de métodos espectrales son más exactos y más reproducibles, de tal forma que en la Publicación CIE n.º 15 de 1971 se recomiendan las técnicas espectrales.

Los instrumentos de medida del color pueden ser normalmente calibrados con pastillas de sulfato de bario. Sin embargo, en los colorímetros triestímulos los filtros no son lo suficientemente parecidos a las funciones de los valores triestímulos CIE, es necesario calibrar el instrumento con una muestra patrón que posea similares características a las de las muestras que se quieren medir. Además los patrones empleados han de ser calibrados con la misma geometría de iluminación/observación y el mismo iluminante que se vaya a emplear para las mediciones de las muestras problema.

5. VALORES TRIESTIMULOS

Cuando un objeto es iluminado con un iluminante dado, los valores triestímulos X , Y , Z de este objeto obtenidos con un espectrocolorímetro vienen dados por:

$$X = K \int_{380}^{740} R_{\lambda} \cdot Sx_{\lambda} \cdot x_{\lambda} \cdot d_{\lambda}$$

$$Y = K \int_{380}^{740} R_{\lambda} \cdot Sy_{\lambda} \cdot y_{\lambda} \cdot d_{\lambda}$$

$$Z = K \int_{380}^{740} R_{\lambda} \cdot Sz_{\lambda} \cdot z_{\lambda} \cdot d_{\lambda}$$

donde:

R_{λ} : Reflectancia a la longitud de onda o factor de reflectancia espectral.

Sx_{λ} ; Sy_{λ} ; Sz_{λ} : Coeficiente de distribución espectral del iluminante.

x_{λ} ; y_{λ} ; z_{λ} : Funciones de sensibilidad del observador patrón CIE.

La integración de cada curva en la región del espectro visible (de 380 a 740 nm) da los valores numéricos para los correspondientes valores triestímulos X , Y , Z (4,6,7).

6. COORDENADAS CROMATICAS

Como ya hemos visto anteriormente, para determinar un color se requieren tres números, conocidos con el nombre de valores triestímulos (X , Y , Z). Por tanto, si queremos representar gráficamente un color necesitaríamos un diagrama tridimensional.

Para evitar esta dificultad se introducen tres magnitudes: x , y , z , conocidas con el nombre de coordenadas cromáticas, las cuales se definen a partir de los valores triestímulos según la ecuación [5].

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

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

de tal forma que la suma de estas tres coordenadas cromáticas es igual a la unidad:

$$x + y + z = 1$$

Por tanto, dos cualesquiera de estas magnitudes son suficientes para definir un color, normalmente se eligen las magnitudes x e y .

Por consiguiente un color del espectro queda representado por un punto en un sistema de dos ejes coordenados rectangulares.

Si realizásemos este cálculo de « x » y de « y » para todos los colores del espectro y efectuásemos la representación gráfica de los mismos, obtendríamos una curva.

7. COLORIMETRIA DE MATERIALES RETRORREFLECTANTES

En primer lugar vamos a dar una idea de lo que es un material retrorreflectante.

Teóricamente un material retrorreflectante perfecto es aquel que refleja toda la luz que no ha absorbido en sentido opuesto y en la misma dirección a la de la luz incidente. No obstante, los materiales retrorreflectantes no son totalmente perfectos, por lo que la luz retrorreflejada se distribuye de una forma aproximada a la de la luz incidente.

En la actualidad se emplean estos materiales retrorreflectantes, ampliamente, en el campo de la señalización, fundamentalmente en la vertical. Señales propiamente dichas, paneles, hitos de arista son portadores de estos materiales que a la vez son responsables de la visibilidad nocturna en la carretera. Materiales retrorreflectantes están presentes en las barreras de seguridad, captafaros, conos y un extenso muestrario de dispositivos de balizamiento.

La colorimetría de los materiales retrorreflectantes requiere de condiciones de medida especiales, debido a que la distribución espectral de la luz reflejada por estos materiales es diferente cuando son iluminados por luz de día o luz de noche. El propósito de este trabajo es resumir las técnicas de medida de colorimetría tanto de día como de noche. Es necesario tener unos criterios adecuados para la precisión de las mediciones colorimétricas y elegir los instrumentos adecuados para determinar el color de los materiales retrorreflectantes. Por tanto, la elección de la geometría y de la iluminación han de ser de tal forma que simulen lo más posible la realidad (8-11).

De día, la luz que incide sobre los materiales retrorreflectantes es una combinación de la luz difusa procedente del cielo, y la luz directa procedente del sol. Estas condiciones de iluminación varían a lo largo del día, e incluso de un día a otro.

Por tanto, la luz procedente de un material retrorreflectante llega al observador por la combinación de reflexión difusa y de retrorreflexión de la luz que incide en la superficie desde la parte posterior del observador. La temperatura de color de la luz del día varía de 5.000 a 15.000 K, dependiendo de si la luz es la correspondiente a un día cubierto (luz difusa, cielo o día cubierto) o bien si la luz procede directamente del sol. La mayor

parte de la luz del cielo que incide sobre un material retrorreflectante nunca llega al observador, una parte es retrorreflejada, otra parte es reflejada especularmente y el resto es reflejada difusamente. La luz solar es reflejada difusamente y especularmente por la superficie del material retrorreflectante en el camino del observador, que es cuando domina la componente retrorreflectante.

De noche, la fuente de luz que incide sobre el material retrorreflectante, usualmente procede de los faros del coche y esta luz presenta una distribución espectral aproximadamente a la del iluminante CIE A. Los ángulos de iluminación y de observación van cambiando conforme el observador se va aproximando al material retrorreflectante.

De todo lo dicho se puede deducir que no es lo mismo hablar de color de los materiales retrorreflectantes en condiciones de día o en condiciones de noche, ya que hay una serie de factores en los dos casos que, como ya hemos visto al principio de este trabajo, afectan de forma considerable al color como son el iluminante y la geometría empleada (8-11).

A continuación vamos a abordar el problema del color de los materiales retrorreflectantes, pero principalmente en las condiciones de día.

8. PROBLEMATICA DE LAS MEDICIONES DEL COLOR EN CONDICIONES DE DIA

En la confección de las señales verticales se emplean materiales retrorreflectantes, y puesto que estas señales se encuentran colocadas verticalmente, la ilumina-

ción que incide sobre las mismas procede solamente de la mitad del cielo y el observador usualmente las ve en una dirección próxima a la normal de la señal. Por tanto, esta geometría no se ajusta a la geometría $45^\circ/0^\circ$, así como tampoco se ajusta a la geometría $d/0^\circ$ sino que es intermedia entre estos dos extremos. Sin embargo, pruebas con diferentes instrumentos han demostrado que la geometría $45^\circ/0^\circ$ es la más adecuada para la medida de materiales retrorreflectantes, debido a que los resultados de las mediciones de color con instrumentos que posean geometría esférica (geometría $d/0^\circ$ o $0^\circ/d$) dependen fuertemente del tamaño de la apertura y del atrapador de la componente especular. Por tanto, la geometría recomendada es $45^\circ/0^\circ$ (8, 10-13), excluyéndose la componente especular.

Por todo ello la geometría de iluminación y de observación para los materiales retrorreflectantes ha de ser de $45^\circ/0^\circ$. Además es importante que las aperturas de iluminación y de observación de los haces no exceda de 4 %, debido a que la geometría del instrumento es crítica.

Después de conocer la geometría de iluminación y de observación recomendada para los materiales retrorreflectantes, el siguiente problema que se nos presenta es el tipo de iluminante a emplear.

Según recomendación de la Comisión Internacional de L'Eclairage, para hacer mediciones de color en materiales retrorreflectantes y en condiciones de día el iluminante recomendado es el «iluminante CIE D65», que puede obtenerse empleando como fuentes de iluminación lámparas filtradas de xenon o de halógeno-tungsteno, las cuales proporcionan luz perteneciente a

COLOR DEL MATERIAL	COORDENADAS CROMATICAS	I*	G**	I	G	I	G
		C	$45^\circ/0^\circ$	C	$d/8^\circ$	D65	$45^\circ/0^\circ$
AMARILLO	x		0,519		0,476		0,504
	y		0,452		0,450		0,480
AZUL	x		0,104		0,197		0,144
	y		0,111		0,214		0,111
BLANCO	x		0,306		0,310		0,314
	y		0,319		0,332		0,335
MARRON	x		0,520		0,394		0,510
	y		0,354		0,357		0,394
NARANJA	x		0,584		0,506		0,561
	y		0,365		0,378		0,394
ROJO	x		0,652		0,522		0,636
	y		0,303		0,332		0,335
VERDE	x		0,129		0,214		0,128
	y		0,439		0,419		0,442

TABLA I. Coordenadas cromáticas para los materiales de nivel I de retrorreflexión.

* Iluminante.
** Geometría.

OTROS MATERIALES DE CONSTRUCCION

la región ultravioleta, y que se encuentra presente en la radiación del sol. Además, algunos materiales retrorreflektantes poseen fluorescencia, y en estos casos se ha de emplear el iluminante D65.

9. PARTE EXPERIMENTAL

9.1. APARATOS

Se han empleado tres colorímetros con diferentes tipos de iluminante y geometría de las marcas comerciales:

COLOR DEL MATERIAL	COORDENADAS CROMATICAS	I*	G**	I	G	I	G
		C	45°/0°	C	d/8°	D65	45°/0°
AMARILLO	x	0,522		0,478		0,507	
	y	0,449		0,449		0,477	
AZUL	x	0,103		0,194		0,144	
	y	0,107		0,212		0,105	
BLANCO	x	0,306		0,308		0,314	
	y	0,319		0,332		0,335	
MARRON	x	0,501		0,372		0,492	
	y	0,356		0,360		0,467	
NARANJA	x	0,593		0,519		0,573	
	y	0,354		0,363		0,382	
ROJO	x	0,646		0,512		0,642	
	y	0,296		0,330		0,323	
VERDE	x	0,132		0,245		0,128	
	y	0,432		0,480		0,433	

TABLA II. Coordenadas cromáticas para los materiales de nivel 2 de retrorreflexión.

* Iluminante.
** Geometría.

COLOR DEL MATERIAL	COORDENADAS CROMATICAS	I*	G**	I	G	I	G
		C	45°/0°	C	d/8°	D65	45°/0°
AMARILLO	x	0,512		0,468		0,492	
	y	0,437		0,444		0,467	
AZUL	x	0,103		0,175		0,147	
	y	0,116		0,203		0,128	
BLANCO	x	0,302		0,305		0,307	
	y	0,311		0,326		0,327	
MARRON	x	0,473		0,390		0,457	
	y	0,359		0,363		0,395	
NARANJA	x	0,548		0,494		0,514	
	y	0,377		0,386		0,410	
ROJO	x	0,620		0,496		0,612	
	y	0,297		0,330		0,327	
VERDE	x	0,157		0,206		0,145	
	y	0,405		0,429		0,429	

TABLA III. Coordenadas cromáticas para los materiales de nivel 3 de retrorreflexión.

* Iluminante.
** Geometría.

Gardner (C, 45°/0°), Dr. Lange (D65, d/8°) y Minolta (D65,45°/0°).

9.2. MATERIALES

Se ha hecho uso de 21 materiales poliméricos retrorreflectantes, de origen sintético, clasificados desde el punto de vista químico como carboxipolímeros y, desde el físico, como termoestables. Dichos materiales se han identificado como de siete colores diferentes y dentro de cada color con los números 1, 2 y 3, siendo este orden creciente el de un menor a mayor nivel de retrorreflexión. Los materiales sometidos a experimentación son de los utilizados en la señalización vertical reflexiva.

10. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las tablas I, II y III muestran los resultados obtenidos para los materiales de niveles 1, 2 y 3 de retrorreflexión, respectivamente. Asimismo, las figuras 7, 8 y 9

representan la situación del punto correspondiente a las coordenadas cromáticas para los materiales de niveles de retrorreflexión 1, 2 y 3, respectivamente, en el diagrama de la CIE. En los mencionados diagramas se encuentran señalados los recintos de color admitidos en la actualidad para los materiales retrorreflectantes de los colores aquí considerados y que son los indicados en el actual Pliego de Condiciones de la señalización vertical reflexiva del MOPU.

De los resultados obtenidos (tablas I, II y III) se pueden comprobar las diferencias de los valores en las coordenadas cromáticas (x , y) al cambiar las condiciones de medida, lo que implica la importancia que presenta la elección del tipo de iluminante y de la geometría utilizada en las determinaciones colorimétricas de los materiales retrorreflectantes.

Como ya se ha dicho anteriormente, la Comisión Internacional de l'Eclairage recomienda que las medi-

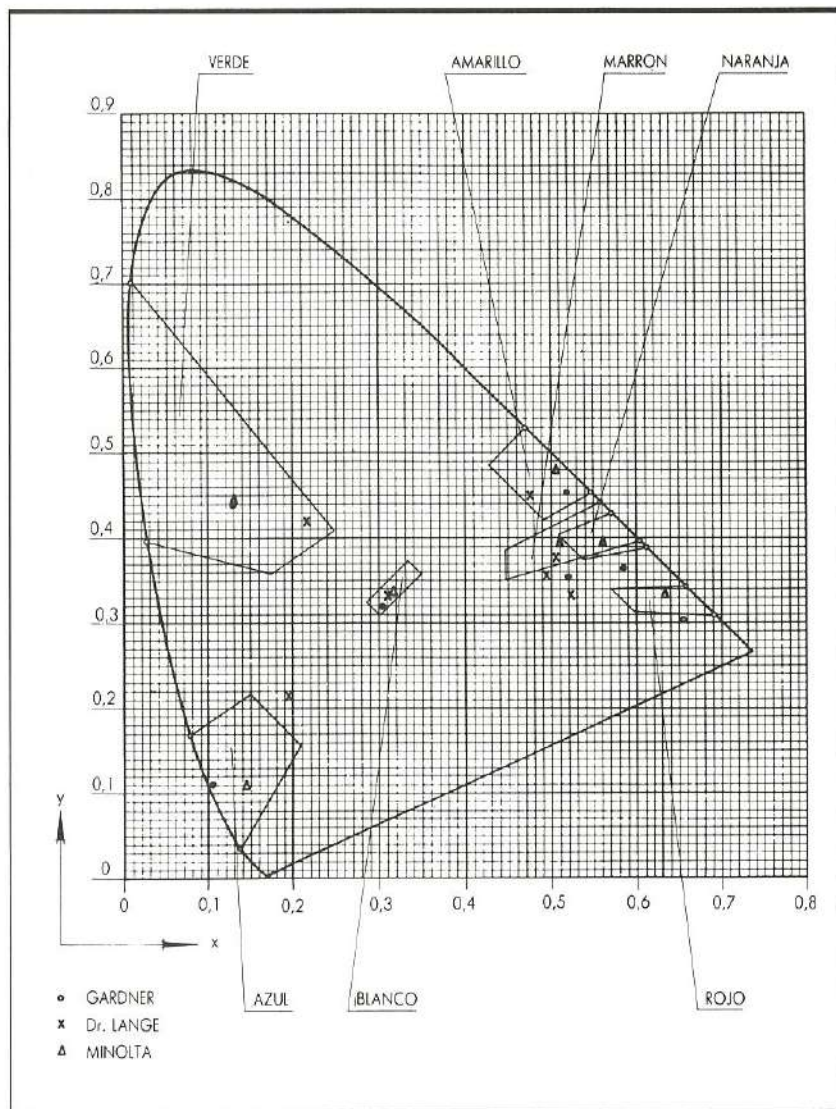


FIGURA 7. Representación de las coordenadas cromáticas para los materiales de niveles de retrorreflexión 1.

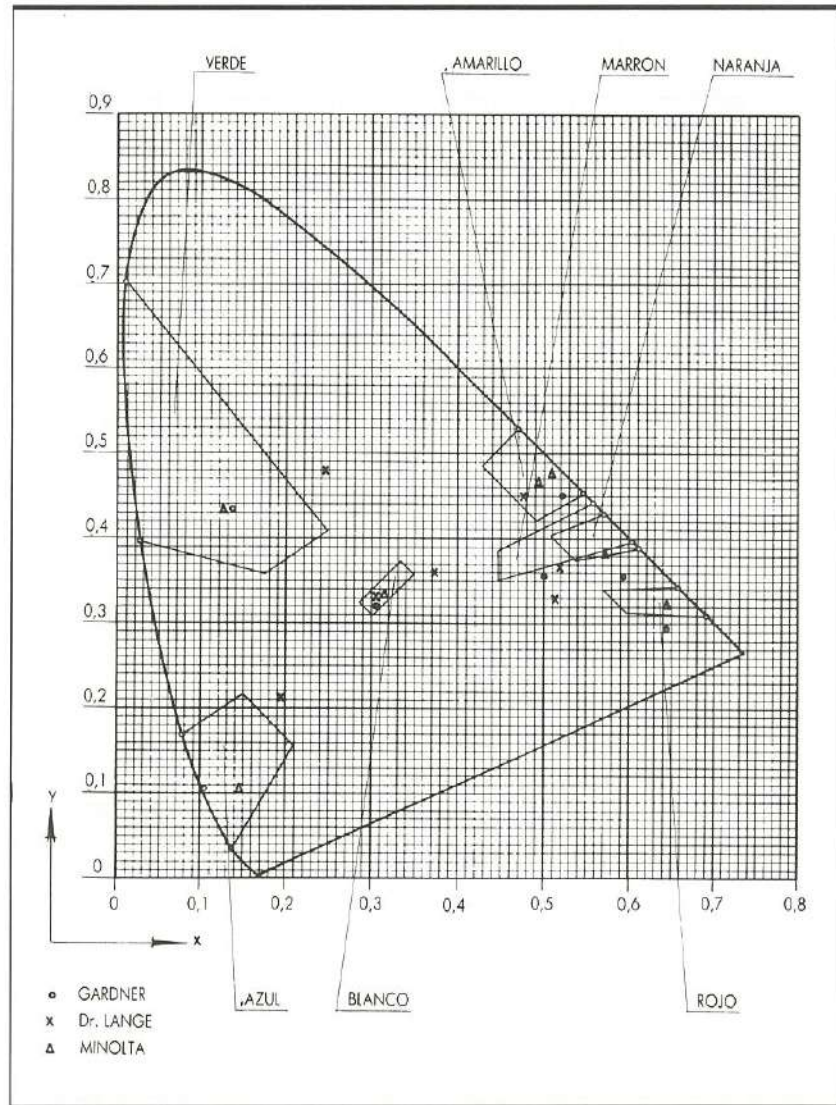


FIGURA 8. Representación de las coordenadas cromáticas para los materiales de niveles de retrorreflexión 1.

ciones de las coordenadas cromáticas se hagan empleando iluminante D65 y una geometría de iluminación/observación de $45^\circ/0^\circ$ (8, 10, 11). Además, este mismo Organismo ha confeccionado un diagrama donde se encuentran, perfectamente definidas, las áreas de los dominios de cromaticidad para los diferentes colores en materiales retrorreflectantes y que figuran en el actual Pliego de Condiciones del MOPU (12, 13).

En las figuras 7, 8 y 9 se comprueba que al representar los colores determinados con la geometría e iluminante recomendados, todos ellos se encuentran dentro de los dominios de cromaticidad de la CIE. En cambio, en las otras condiciones de medida utilizadas en este trabajo, se puede ver que al realizar la representación de los colores, no todos ellos se encuentran ubicados en los recintos correspondientes, siendo mayor la desviación en los colores rojo, naranja y marrón cuando

se llevan a cabo las medidas en condiciones de iluminación difusa y de observación 8° ($d/8^\circ$).

11. BIBLIOGRAFIA

1. PLAZA MONTERO, L. (1953). «Especificación de colores. Sistema CIE 1931». Instituto de Optica Daza de Valdés (CSIC), Madrid.
2. PLAZA MONTERO, L. (1961). «Colorimetría». Acero y Energía, 17, Madrid.
3. JUDD, D. B. (1954) (trad. del Dr. L. Plaza Montero). «Problemas actuales del color», Madrid.
4. HARDY, A. C. (1936). «Handbook of Colorimetry». The Technology Press.
5. Pub. CIE n.º 13.2, 1974.
6. Pub. CIE n.º 15.2, 1986.
7. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02, E 811.

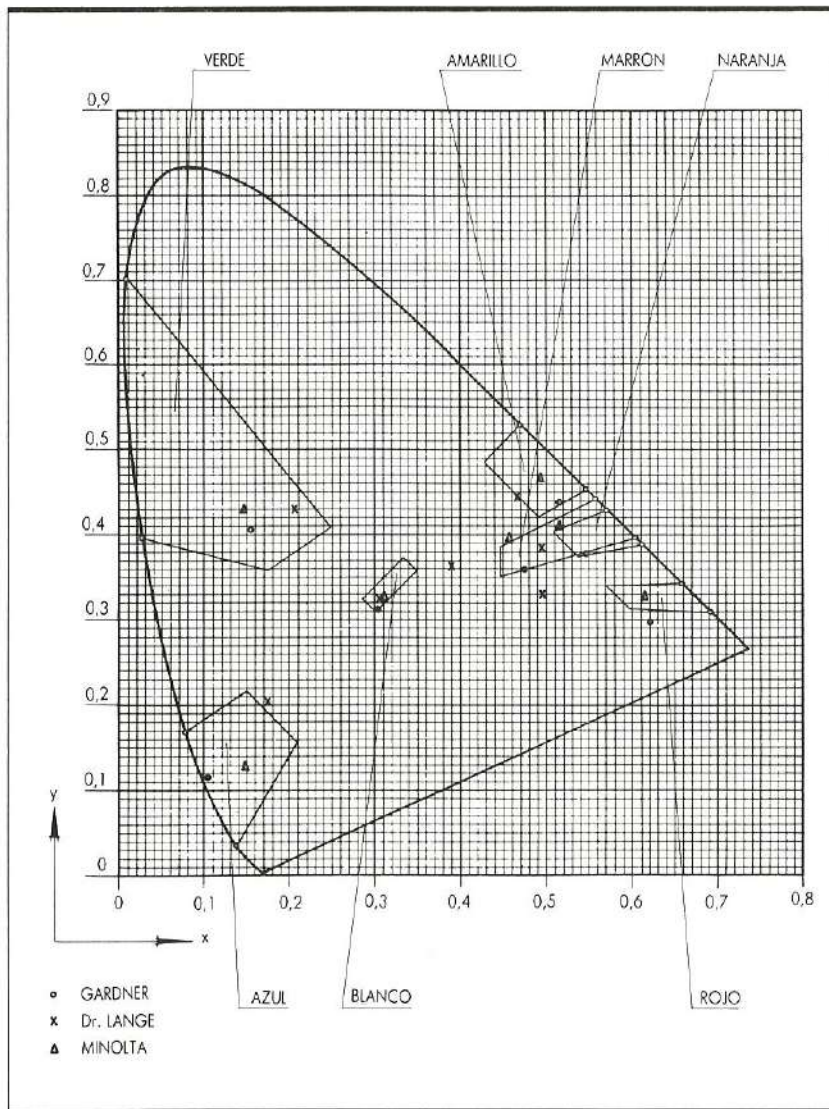


FIGURA 9. Representación de las coordenadas cromáticas para los materiales de niveles de retroreflexión 3.

8. Pub. CIE n.º 54, 1982.

9. Pub. CIE n.º 15, 1971.

10. Pub. CIE n.º 39, 1978.

11. Pub. CIE n.º 39.2, 1983.

12. Propuesta de Pliego de Condiciones para la señalización vertical reflexiva. MOPU. Madrid, 1988.

13. CASTILLO, F., y BLANCO, M. «Problemática de la determinación del color en materiales retrorreflectantes». Ver y Oír (en prensa).

14. CASTILLO, F., y BLANCO, M. «Problemática de la determinación del color en materiales retrorreflectantes», Ver y Oír, vol. 47, pág. 29-40 (1990).