

# FUNDAMENTOS DE LA MEDIDA Y ESPECIFICACION DEL COLOR

Ing. Quím. Tomás Bense  
 COMPAÑIA INDUSTRIAL DE TABACOS  
 MONTE PAZ S.A.

## 1.- Conceptos de luz y color.

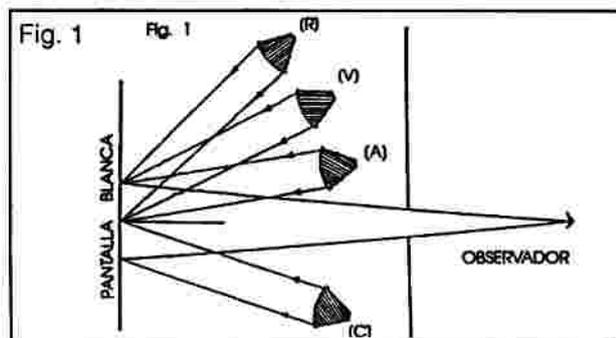
El espectro de las radiaciones electromagnéticas posee una región, comprendida entre las longitudes de onda de aproximadamente 380 y 780 nm (nanómetros), capaz de estimular la retina del ojo generando la **sensación de luz**. La magnitud de la sensación luminosa producida por un dado flujo de energía radiante dentro de dicho rango espectral dependerá de la longitud de onda. Así por ejemplo, la eficiencia visual de 1 vatio de energía radiante de 400 nm es muy débil si se compara con el vivo estímulo luminoso producido por el mismo vatio para 500 nm.

Introducido el concepto de luz podemos ahora definir el color siguiendo a JUDD: si dos objetos de igual forma y textura, iluminados con la misma luz y en iguales condiciones de observación pueden diferenciarse, el atributo de estos objetos que produce esa diferenciación es el **color**.

## 2.- Percepción visual de los colores

La percepción del color se basa en la capacidad de un observador con visión normal para apreciar diferencias de tres clases:

- Diferencias de **tinte** ("hue"), es decir puede asociar los colores distintas regiones espectrales (rojo, verde, etc.).
- Diferencias de  **saturación**  ("saturation"), es decir, en el lenguaje corriente, puede decidir si un color es mas o menos "lavado".
- Diferencias de **luminosidad** ("lightness"), término que define la intensidad de la sensación luminosa percibida: en tal sentido se hablará de colores mas claros o mas oscuros.



En el mecanismo de la visión es de particular interés una posible reacción fotoquímica inducida por la absorción de radiación en la retina, generando impulsos eléctricos que se transmiten al cerebro. La retina, una especie de ramificación del nervio óptico, contiene los elementos sensibles a la luz, células que por su forma se conocen como conos y bastones.

## 3.- Naturaleza tridimensional del color

Un color puede ser reproducido mediante el empleo de tres fuentes luminosas o colores diferentes denominados primarios, fenómeno atribuible al sistema receptor constituido por tres tipos de conos, cuyas respuestas relativas a los estímulos de los primarios generan toda la gama de sensaciones coloreadas posibles para dicho conjunto de primarios.

Consideremos un conjunto R,V,A, (rojo, verde y azul). Representaremos entre paréntesis rectos los estímulos correspondientes, [R], [V], [A]. La igualación de un color C, perteneciente a la gama obtenible con R, V, A podrá representarse por:

$$\mathcal{L}[C] \equiv \mathcal{R}[R] + \mathcal{V}[V] + \mathcal{A}[A] \quad [2]$$

La [2] implica la aditividad de los estímulos: los componentes espectrales de un haz luminoso que incide en el ojo son combinados aditivamente cuando el cristalino los enfoca sobre los conoreceptores de la retina.  $\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{V}$  y  $\mathcal{A}$  son cantidades algebraicas ordinarias que definen el número de unidades de cada estímulo que deben combinarse para lograr la igualación y se denominan **valores tristímulo**. El signo  $\equiv$  indica que la [2] no es una ecuación en el sentido usual sino que representa una equivalencia de estímulos. Para expresar  $\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{V}$  y  $\mathcal{A}$  podría utilizarse cualquier escala arbitraria, pero será conveniente elegir una escala tal que cantidades iguales de los tres primarios definan el color blanco. La realización experimental de la igualación de estímulos representada por la [2] se esquematiza en la Fig. 1.

Ajustando adecuadamente el aporte de los tres estímulos primarios puede así lograrse un segundo estímulo equivalente al primero y que produce la misma sensación de color, formando ambos un **par metámero**. Usualmente los dos estímulos poseerán diferente composición espectral. La mezcla aditiva de los tres primarios puede pues generar toda la gama de colores posibles para el dado conjunto de primarios elegido. Si el color C no perteneciera a la gama de R, V y A la igualación igualmente podría lograrse adicionando uno de los estímulos primarios al estímulo [C]: supongamos que el estímulo adicionado es el [R]. Se genera así un nuevo estímulo que ahora sí podrá ser igualado por una combinación de [V] y [A].

Esto equivale algebraicamente a:

$$C [C] \equiv V [V] - R [R] + A [A] \quad [3]$$

La [3] describe matemáticamente el fenómeno, aunque carece de sentido físico. En consecuencia, utilizando cantidades negativas podremos emplear cualquier sistema de primarios como sistema de referencia en el cual podrán expresarse todos los colores, sujeto solo a la condición trivial de que ninguno de los primarios pueda obtenerse como una mezcla de los otros dos.

**4.- Cambio de un conjunto de primarios a otro.**

Sea una especificación de color dada por valores triestímulo X, Y, Z relativos a un dado conjunto de primarios. Podremos pasar a una nueva especificación X', Y', Z' relativa a otro conjunto mediante la transformación.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K1 & K2 & K3 \\ K4 & K5 & K6 \\ K7 & K8 & K9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad [4]$$

Los coeficientes K1...K9 pueden tomar cualquier valor arbitrario, positivo, negativo o cero, siempre que no anulen el correspondiente determinante. Puesto que las excepciones en que el determinante se anule serán las triviales, la elección del sistema de primarios es muy amplio, pudiendo incluso corresponder a luces o colores no realizables físicamente. Serán así admisibles luces imaginarias definidas por composiciones espectrales que presenten valores negativos en ciertas regiones.

**5.- Sistema C.I.E. de especificación del color.**

Dejaremos de lado la evolución histórica de los sistemas de especificación de color para referirnos directamente al sistema CIE (Commission International de l'Eclairage), reconocido internacionalmente en 1931, y a sus desarrollos posteriores.

Para llegar a la evaluación numérica del color de un objeto debemos comenzar por reconocer que en el proceso intervienen tres elementos básicos:

FUENTE  
LUMINOSA ----- OBJETO ----- OBSERVADOR

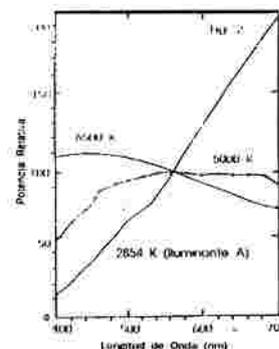
**5.1.- Especificación de la fuente luminosa.**

Es sabido que el color de un objeto se ve notablemente influido por la composición espectral de la fuente luminosa.

La especificación completa de un color requerirá pues la especificación de la fuente o **iluminante** utilizado, lo cual usualmente se hace comparando su distribución de energía con la del cuerpo negro. En particular, la temperatura a que debe calentarse dicho cuerpo a fin de igualar el color de la fuente especificada se denomina **temperatura de color** de ésta. Teniendo en cuenta las condiciones mas usuales de iluminación de los objetos, el CIE definió en primera instancia tres iluminantes tipo:

- Iluminante A: equivalente a una lámpara incandescente a filamento de tungsteno que opera a una temperatura de color de 2854 K.
- Iluminante B: representativo de la luz del mediodía. Temperatura de color de 4870 K.
- Iluminante C: representativo de la luz proveniente de un cielo cubierto promedio. Temperatura de color asociada: 6770 K.

Fig. 2



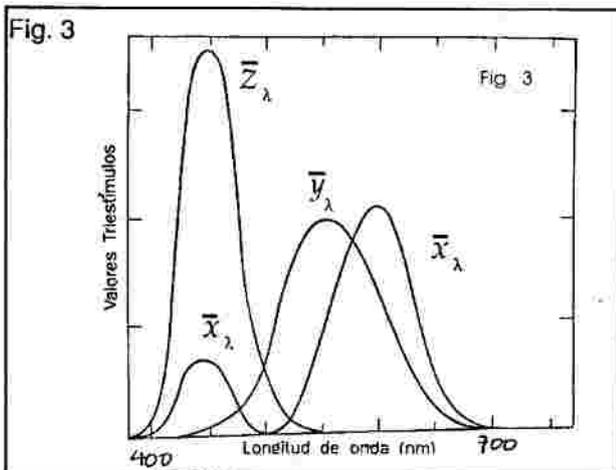
A efectos de obtener iluminantes aún más próximos a las características de la luz diurna, particularmente hacia los límites del espectro visible, el CIE adoptó en 1966 los iluminantes D50 (5000 K) y D65 (6500 K).

En la Fig. 2 se representan las curvas espectrales correspondientes a algunos de estos iluminantes.

### 5.2.- Especificación del observador

La respuesta subjetiva de un observador a un estímulo luminoso puede variar ligeramente de un individuo normal a otro. A través de experimentos y transformaciones adecuadas se han logrado establecer las cantidades promedio  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$ ,  $\bar{z}_\lambda$  de tres estímulos primarios [X], [Y], [Z], que los individuos de visión normal deben mezclar para igualar, a cada longitud de onda  $\lambda$  del espectro visible, el color de un haz de dicha longitud de onda y que posee una densidad de flujo unidad (espectro de isoenergía).

Dichas cantidades promedio sirven para definir al **observador tipo** y se hallan tabuladas. También se pueden representar gráficamente como en la Fig. 3. Las tablas y gráficas antes mencionadas suelen presentarse para ángulos de visión de 2° y 10°. Este último será más práctico cuando se intentan comparar campos de color relativamente grandes.



Los estímulos primarios [X], [Y], [Z] elegidos por el CIE son imaginarios, pero esto brinda la ventaja de hacer que la especificación de cualquier color sea positiva y que además el estímulo [Y] represente directamente la **luminosidad** (intensidad de la sensación luminosa) del color que se especifica.

La [2] se escribirá en este caso,

$$\bar{c}_\lambda [C] \equiv \bar{x}_\lambda [X] + \bar{y}_\lambda [Y] + \bar{z}_\lambda [Z] \quad [5]$$

o también,

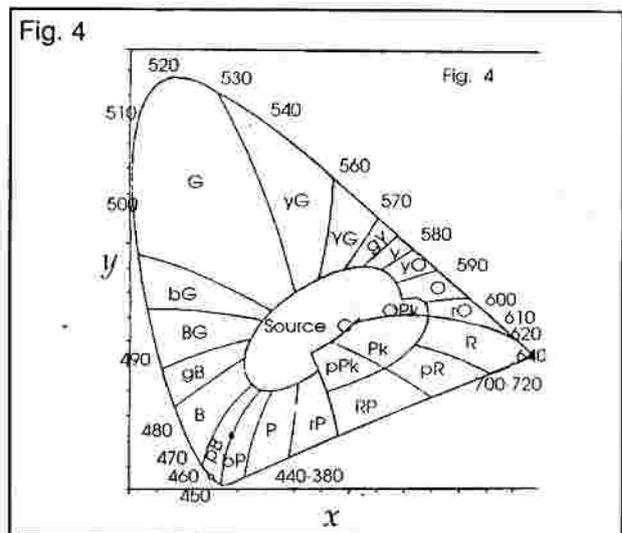
$$[C] = x [X] + y [Y] + z [Z] \quad [6]$$

donde  $x = \bar{x}_\lambda / (\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda)$ , etc. son las **coordenadas de cromaticidad**, solo dos de las cuales son independientes puesto que  $x + y + z = 1$ . El correspondiente diagrama de cromaticidad (x,y) o "triángulo de MAXWELL" se representa en la Fig. 4 (1). La [6] es la **ecuación tricromática unitaria** del sistema.

### 5.3.- Especificación del color a partir de curvas de reflectancia espectral.

Vimos que la igualación de un dado color C del espectro de isoenergía por el observador tipo puede representarse por la [5].

Si la fuente, en lugar de emitir el espectro de isoenergía está definida por una función de distribución espectral  $E_\lambda$ , los valores triestímulo deberán ser ahora  $x_\lambda \bar{E}_\lambda$ ,  $y_\lambda \bar{E}_\lambda$ ,  $z_\lambda \bar{E}_\lambda$ . Mas aún si la radiación se observa luego de reflejarse en una superficie cuyo color se desea especificar, y que posee una función de reflectancia espectral  $R_\lambda$ , los valores triestímulo se expresarán como  $\bar{x}_\lambda E_\lambda R_\lambda$ , etc.



#### (1)- CLAVES DE LA FIG. 4

G	=	verde	Pk	=	rosa
bG	=	verde azulado	R	=	rojo
BG	=	verde azul	rO	=	naranja rojizo
gB	=	azul verdoso	OPk	=	rosa anaranjado
B	=	azul	O	=	naranja
pB	=	azul purpurino	yO	=	naranja amarillento
bP	=	púrpura azulado	Y	=	amarillo
P	=	púrpura	gY	=	amarillo verdoso
rP	=	púrpura rojizo	YG	=	verde amarillo
RP	=	púrpura rojo	yG	=	verde amarillento
pR	=	rojo purpurino	Source C	=	iluminante C
pPk	=	rosa purpurino			

Dada la aditividad de estímulos, los valores tris-tímulo totales para todas la radiaciones que componen el haz reflejado vendrán dados por integrales de la forma:

$$X = \int_{\lambda=380}^{\lambda=770} \bar{x}_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda} d_{\lambda}, \text{ etc.}$$

que en la práctica son sustituidas por sumatorias de la forma:

$$X = k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=770} \bar{x}_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda}, \text{ etc.} \quad [7]$$

Donde  $k$  es un factor de normalización elegido de modo que el valor de  $Y$  calculado mediante la [7] nos dé directamente la **luminosidad** de la superficie observada, expresada como porcentaje de la luminosidad de una superficie perfectamente reflectora bajo condiciones idénticas de iluminación y observación. Los productos  $\bar{x}_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda}$ , etc. adecuadamente normalizados para diferentes iluminantes se hallan tabulados para intervalos de 5 y 10 nm y para ángulos de visión de 2° y 10°.

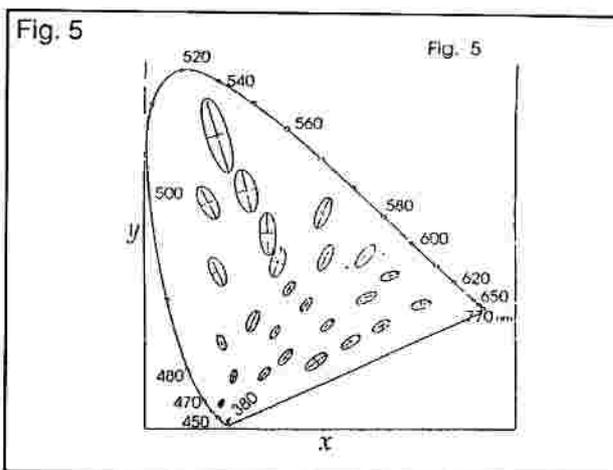
Calculados  $X, Y, Z$ , se pasa a las coordenadas de cromaticidad  $x, y, z$  a través de las relaciones conocidas  $x = X/(X+Y+Z)$ , etc.

El Sistema Monocromático para especificación de color es un sistema alternativo que deriva en forma directa de la evaluación previa de las coordenadas de cromaticidad en el Sistema CIE, y cuya consideración omitiremos aquí remitiéndonos a la bibliografía.

## 6.- Colorimetría diferencial.

Desde el punto de vista del uso industrial, más que medir un color tal vez sea más importante determinar las magnitudes de las diferencias respecto a un color de referencia o patrón. Esto condujo a numerosos esfuerzos intentando definir un sistema de medición de diferencias de colores. En tal sentido es particularmente importante tratar de determinar la **mínima diferencia perceptible**. La meta sería expresar la diferencia total de color entre dos muestras por un número único calculado a partir de las coordenadas de dichas muestras en algún sistema de color cuyos espaciamentos visuales fueran uniformes, y utilizando alguna ecuación que llamaríamos "ecuación de diferencia de color". La búsqueda de

este ideal debe enfrentar el problema de la no uniformidad del espacio cromático definido por el CIE. En efecto, el diagrama de cromaticidad del CIE (1931) y la luminosidad  $Y$  no son representativos de igual espaciamiento visual. Es decir, iguales espaciamientos en los valores de  $Y$  no representan iguales efectos visuales para todos los valores de  $Y$ . Tampoco iguales incrementos de  $x$  e  $y$  representan el mismo efecto visual en diferentes ubicaciones del diagrama  $(x, y)$ . Esto se aprecia claramente en la Fig. 5, donde se representan las elipses de MacADAM sobre el espacio cromático. La distancia del centro a un punto del perímetro de estas elipses representa un mismo efecto de diferencia de color en la percepción visual (para hacer más clara su representación las elipses de la Fig. 5 fueron dibujadas 10 veces mayores que su verdadero tamaño). Puede apreciarse que el efecto visual de un dado cambio de cromaticidad varía en aproximadamente un factor de 30 a 1 entre el eje menor de la elipse mas pequeña y el eje mayor de las más grandes. Esta falta de uniformidad es resultado directo de la elección de los estímulos primarios  $X, Y, Z$  del sistema CIE, elección que, como vimos, incorporó ciertas ventajas al sistema. Son indiscutibles las ventajas que presentaría un espacio cromático en el cual en todos sus puntos un dado cambio en cualquier coordenada produjera el mismo efecto visual: permitiría por ejemplo establecer tolerancias de carácter general en función de las tres coordenadas del sistema. Lamentablemente este ideal es difícil de lograr en la práctica, si bien existen aproximaciones razonablemente satisfactorias. Nos referiremos brevemente a algunas de ellas.



## 7.- Evaluación de las diferencias cromáticas.

Partiendo de espacios cromáticos no uniformes, como el CIE, y aplicando transformaciones lineales u otras más complejas se pueden lograr aproximaciones más o menos satisfactorias al ideal del espacio cromático uniforme. Entre las lineales citemos las correspondientes al sistema  $r, g, b$  de JUDD (1935), al

sistema L,a,b, de HUNTER (1948-1958), o al  $L^*, u^*, v^*$ , (CIELUV) del CIE (1975). Entre las no lineales citemos las correspondientes al sistema FMC-II (FRIELE-MacADAM-CHICKERING) (1967) o al sistema  $L^*, a^*, b^*$ , (CIELAB) del CIE (1976). Como ejemplo desarrollaremos las transformaciones correspondientes a este último, muy empleado actualmente.

### 8.- Sistema CIELAB.

Este sistema define la diferencia de color según:

$$D = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

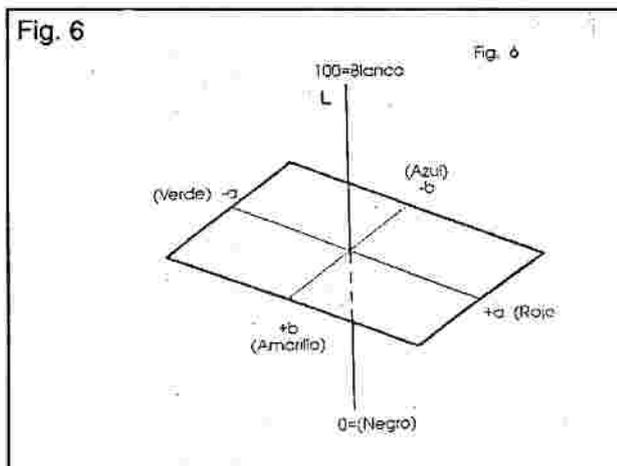
Donde

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 [(x/x_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (z/z_0)^{1/3}]$$

limitados a las condiciones  $x/x_0, y/y_0, z/z_0 > 0.01$ , siendo  $x_0, y_0, z_0$ , los valores triestímulo para el iluminante considerado. En la Fig. 6 se da la representación tridimensional del sistema.



### 9.- Tolerancias de color.

El establecer las tolerancias de color para un dado producto es un problema técnico, que involucra al fabricante y al cliente, y donde juega un papel importante el compromiso entre costo y calidad.

Es común proceder en este caso de un modo empírico: fabricante y cliente fijan los límites prácticos de lo aceptable en base a opiniones de observadores experimentados o panelistas representativos del mercado consumidor. Una vez fijados estos límites se medirá la diferencia de color entre ellos mediante un sistema instrumental adecuado, o bien seleccionando muestras del producto que cubran la región de tolerancia. Este último procedimiento, muy sencillo y barato es poco seguro dada la eventual alteración que dichas muestras pueden sufrir con el tiempo.

La experiencia indica que, en general, de 1 a 3 unidades CIELAB de diferencia de color (D) es una tolerancia rigurosa, mientras que entre 3 y 6 unidades se tiene un rango de tolerancia normal para la mayor parte de los requerimientos usuales.

Si, además de la tolerancia en D queremos establecer tolerancias en las coordenadas  $L^*, a^*$  y  $b^*$ , para hacerlo puede seguirse el modelo de LIND o WARNER (1989). Estos, trabajando sobre tres tipos de tintas de proceso utilizadas en imprenta: ciano (azul), magenta (verde) y amarillo establecieron que las tolerancias aceptables para un 50% de los observadores eran del siguiente orden:

	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Ciano	-0.7/+2.3	-1.9/+1.3	-2.3/+2.1
Magenta	-1.9/+0.9	-3.1/+0.4	-3.2/+4.1
Amarillo	-0.6/+0.3	-0.6/+2.6	-5.1/+5.5



Ingeniería Tecnología y Procesos

## AL SERVICIO DE LA INDUSTRIA CON LA EXCELENCIA POR OBJETIVO

- *Proyectos de prefactibilidad y factibilidad.*
- *Reconversión y modificación de Plantas, equipamiento, Ingeniería y Arquitectura Industrial.*
- *Optimización de Procesos y Servicios Industriales, Generación y Desarrollo de Tecnología.*
- *Montajes Industriales, Dirección de Obra y puesta en marcha.*

LUIS FRANZINI 976 Apto. 02  
Tel: 71 49 00  
TLFax 576907

P.O.BOX 18031  
C.P. 11.400

Fig. 7

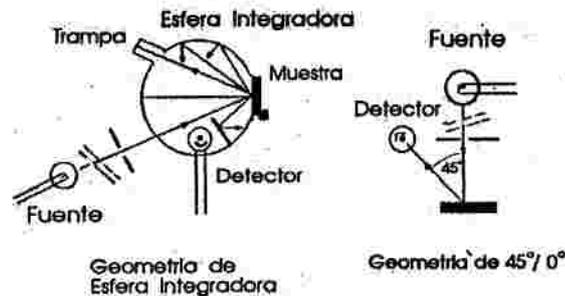


Fig. 7

Así por ejemplo, los rangos de tolerancia para una tinta magenta impresa sobre papel, y cuyas coordenadas CIELAB son  $L^*=50.4$ ,  $a^*=61.0$  y  $b^*=-1.5$  serán respectivamente 48.5/51.3, 57.9/61.4 y -4.7/2.6 (obsérvese la asimetría respecto al valor central).

#### 10.- Principios de la instrumentación utilizada.

La instrumentación utilizada para la medida y especificación de color está diseñada fundamentalmente para evaluar la función de reflectancia  $R_\lambda$  utilizando alguna referencia adecuada, como el óxido de magnesio, el sulfato de bario o placas de cerámica previamente calibradas. El procesamiento electrónico de las señales fotoeléctricas, podrá, según el grado de sofisticación del instrumento, suministrar directamente las coordenadas de color en uno o mas sistemas cromáticos, así como otros parámetros de interés.

Para iluminar la muestra y evaluar las radiaciones reflejadas los instrumentos utilizados suelen responder a dos alternativas: a) Geometría de  $45^\circ/0^\circ$ , es decir, iluminación normal a la muestra y observación ubicando el detector a un ángulo de  $45^\circ$  con la normal (o viceversa) o b) Geometría de iluminación casi normal y recolección mediante esfera integradora de la radiación reflejada en forma difusa. En este caso la esfera puede poseer una trampa para eliminar la radiación reflejada en forma especular. El uso de una u otra geometría suele depender de los problemas en estudio, pero en muchos casos prácticos suele preferirse la primera (v.Fig. 7).

En cuanto al sistema fotométrico destinado a analizar la radiación reflejada, convendrá distinguir entre los sistemas puramente espectrofotométricos, y los colorímetros triestímulo, en los que mediante combinaciones adecuadas de fuentes luminosas, filtros y detectores, se logran curvas de respuesta similares a las del observador tipo del CIE para un dado iluminante, es decir, similares a las representadas en la Fig. 3.

#### Bibliografía General

- 1.- Lozano, D.L. El Color y su Medición. Ed. America Lee, 1978.
- 2.- Wendlant, W.WM y H.G. Hetch. Reflectance Spectroscopy, Interscience, 1966.
- 3.- Judd, D.B y Wyszecki, G. Color in Business, Science and Industry. Wiley, 1963.
- 4.- Billmeyer, F.W. Instrumental Concepts Applied to the Color Measurement Problem. Optical Spectra, Julio/Agosto 1968.
- 5.- Billmeyer, F.W. Color Scales and Chromaticity Diagrams. Optical Spectra, Marzo/Abril 1969.
- 6.- Billmeyer, F.W. Color Spaces and Color Difference Equations. Optical Spectra, Mayo/Junio 1969.
- 7.- Billmeyer, F.W. New Color - Difference Equations and their Relation to Curved Color Spaces. Optical Spectra, Julio/Agosto 1969.
- 8.- Burns, M. You Can Check Color Appearance by Spectrophotometer. Industrial Research & Development. Marzo 1980.
- 9.- Lind, J. and Warner, R. Controlling the Color of Ink on Paper. How to Establish Color Tolerances. 20 th. Int. Research Conference Moscow, USSR. 10-15 Setiembre, 1989.