

# PROPUESTA DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN DE REFLECTANCIA DIFUSA

Juana Medina M., Jazmín Carranza G., Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Luis Enrique Erro No. 1, Tonantzintla Puebla, CP 72840. Departamento de Óptica, Laboratorio de Espectrocolorimetría. Tel. (01222) 2-472049 ó 2-663100 ext. 2212. [jmedina@susu.inaoep.mx](mailto:jmedina@susu.inaoep.mx); [jazmin@inaoep.mx](mailto:jazmin@inaoep.mx)

**Resumen:** Dentro del modelo tricromático de medición del color de un objeto opaco, toda su información colorimétrica se puede determinar a partir de la medición de sus propiedades de reflectancia espectral, la cual en el caso de ser una superficie rugosa siempre será una reflectancia difusa (RD).

La aportación de nuestro trabajo, es que esta reflexión es determinada en forma tridimensional haciendo una analogía con la esfera integradora que usan los espectrocolorímetros, sólo que con nuestra propuesta podemos analizar esta reflexión tanto en un plano sagital como en uno meridional, así como en todos los planos intermedios que envuelven el volumen en el cual se está llevando dicha reflexión.

## INTRODUCCIÓN

En el área de colorimetría, uno de los parámetros importantes para determinar las coordenadas cromáticas de un objeto opaco es su reflectancia espectral. Es bien sabido que dependiendo de las características físicas de la superficie de los objetos, así como de las longitudes de onda que inciden sobre estos, es la cantidad y distribución de la energía radiante que este reflejará.

Existen comercialmente instrumentos que permiten obtener la reflectancia de manera controlada pero sólo a determinados ángulos en el plano de incidencia, perdiéndose toda la información de esa reflectancia fuera de ese plano, y esto es muy grave porque cuando se hace una inspección visual de algún objeto, no lo hacemos en el plano de incidencia solamente, sino que se hace dentro de un volumen, y esa es una no concordancia con la medición instrumental y la evaluación visual que se hace, recordemos que en colorimetría el último evaluador es el observador humano. Aunque no debemos olvidar que sí existen instrumentos como las esferas integradoras que tratan de hacer una colección de la energía radiante reflejada en forma volumétrica, pero la limitante es que en estos instrumentos se pierde la información de direccionalidad. Así la propuesta de este trabajo es implementar un método para medir la RD de un objeto sin pérdidas en la información de su direccionalidad.

Recordemos que la reflectancia de un objeto va a depender de la energía radiante incidente y del tamaño de la rugosidad de la superficie que se este

analizando respecto a la longitud de onda incidente [1]. Una manera de caracterizar la rugosidad de una superficie es a partir del parámetro  $\sigma$  [1].

La importancia de nuestro sistema es que podemos obtener de manera controlada la forma del lóbulo volumétrico de energía radiante difusa reflejada de un objeto, para diversos ángulos de detección tanto meridional como sagitalmente.

## TEORIA

En la literatura existen varios modelos para obtener la reflectancia difusa (scattered light) de un objeto cuando se incide un haz de luz sobre éste, y en base a esta reflectancia poder obtener la rugosidad rms de la superficie de un objeto.

Los modelos TIS (Total integrated scattering), ARS (angled-resolved scattering) y BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) [1], son algunos de los modelos existentes para determinar la energía radiante reflejada tanto de manera especular como de manera difusa.

La teoría en las cuales se fundamentan dichos modelos son básicamente la teoría escalar [2] y la teoría vectorial de scattering [3].

Nuestra propuesta de medición se apoya en la teoría vectorial de scattering, la cual estudia la relación que existe entre el flujo radiante incidente  $dP(\Psi)$  y el flujo radiante reflejado difusamente (scattered) por unidad de ángulo sólido  $d\Omega(\Psi; \mathbf{q}, \mathbf{f})$ ,

dentro de una dirección determinada tanto por el plano sagital como por el meridional.

$$BRDF = \frac{dP_{\text{reflejado}}(\psi, \Omega)}{dP_{\text{incidente}}(\psi, \Omega)} \quad (1)$$

En la literatura [3,4] encontramos que a la ecuación (1) se le asocia con el concepto de bidireccionalidad, debido a que relaciona precisamente la intensidad del flujo incidente respecto a la del flujo reflejado, ya sea especular o difusamente.

Finalmente el modelo a utilizar será el que se adecue a los parámetros del objeto a medir y la longitud de onda incidente ( $\lambda$ ).

En la figura (1) se observa la hemiesfera formada sobre un elemento  $dA$  de la superficie. La dirección de la energía radiante incidente se especifica por el ángulo  $\Psi$  el cual se mide desde la normal de la superficie y especifica la dirección incidente del haz.

La dirección del flujo reflejado está relacionado tanto con el ángulo  $\theta$  medido desde la normal de superficie y el ángulo  $\phi$  medido desde el plano de incidencia, estos dos combinados especifican la dirección de reflexión.

Estos ángulos describen claramente las direcciones angulares de la distribución del flujo reflejado.

### SISTEMA PROPUESTO DE MEDICIÓN DE RD

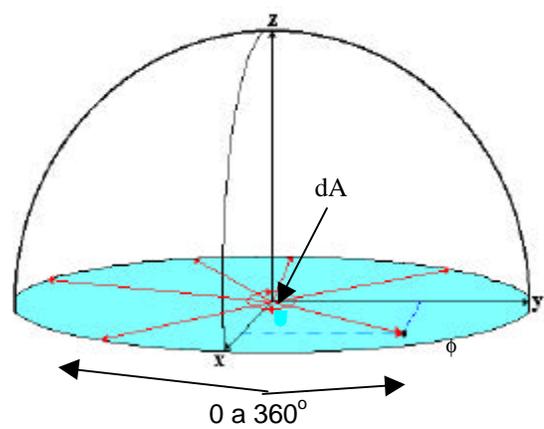
En este trabajo se reporta el diseño y construcción del sistema propuesto para la medición de la RD. Este sistema permite medir no sólo en el plano de incidencia sino además en todos los demás planos que determinan el lóbulo de energía que encierra la reflexión de un objeto de manera tridimensional. El sistema de medición consta de tres partes esencialmente:

- a) sistema de iluminación
- b) sistema de barrido
- c) sistema de detección

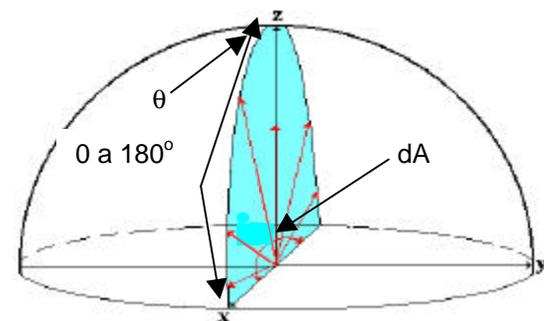
El sistema de iluminación está formado por un haz direccionado cuasimonocromático proveniente de un láser de He-Ne de baja potencia (20 mW), emitiendo en la longitud de onda de 632,8 nm. En base a algunos trabajos reportados [5,6] con esta

longitud de onda se pueden determinar rugosidades del orden de 10 nm en valor rms.

El sistema de barrido se implementa con la montura mostrada esquemáticamente en la figura (2). Se diseñó el sistema bajo la premisa de coleccionar la energía reflejada en base al sistema coordinado mostrado en la figura (1). En la misma figura 1 se puede apreciar cuál es el barrido angular tanto en forma meridional como sagital que se tiene que hacer para encontrar los lóbulos de energía reflejados.

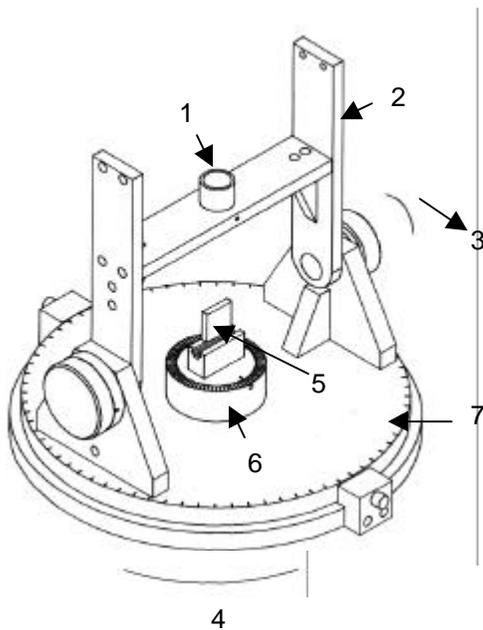


a)



b)

**Fig.1** a) Barrido para la detección del flujo radiante reflejado variando sólo el ángulo  $\phi$  ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ) para  $\theta=0^\circ$ ,  
 b) barrido para la detección del flujo radiante reflejado variando únicamente el ángulo  $\theta$  ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) y manteniendo  $\phi$  constante.



**Fig. 2** Montura para la medición de RD.

Básicamente la montura consta de los siguientes elementos :

1. Porta detector (en esta parte de la montura se coloca el detector que permitirá sensar el flujo radiante reflejado)
2. Puente con movimiento concéntrico al centro de la montura.
3. Movimiento accionado por una manivela que permite seleccionar el ángulo meridional  $\theta$  en el cual se desea detectar la energía radiante reflejada.
4. Movimiento sagital para el ángulo  $\phi$  desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ .
5. Porta muestras con desplazamiento lateral.
6. Base del porta muestra (esta base puede rotar de  $0$  a  $360^\circ$  en la dirección paralela al ángulo  $\phi$ )
- 7 Base graduada.

En base a los movimientos angulares permitidos por la montura, vemos que podemos obtener la reflectancia de un objeto en un espacio tridimensional. Además al permitir rotar a la base de la muestra o del objeto bajo estudio, podemos

controlar también el ángulo de incidencia de la energía radiante, obteniéndose así lóbulos de energía radiante reflejada en toda la hemiesfera determinada por el área de la superficie de la muestra.

El sistema de detección consta de un detector con las siguientes características:

Respuesta espectral	185nm-900nm
Pico espectral	500 nm
Responsividad pico	100 V/ nW
Campo de visión	$95^\circ$
Área activa	4mm x 13 mm

El detector puede ser desplazado radialmente y girado angularmente sobre su soporte.

El sistema de iluminación en base a un laser sin expandir con un diámetro de cintura de unos cuantos milímetros y con una divergencia de haz del orden de segundos de grado, así como una alineación que siempre asegura que el haz incide en el centro del área activa del detector, elimina los problemas de cambio de responsividad en función de la región del área activa utilizada en el detector.

La resolución angular es de  $5^\circ$  en cualquiera de sus escalas angulares actualmente. El detector se colocó a una distancia de 67,7 mm a partir del plano de la muestra.

La operación actual del sistema es manual y aunque el tiempo de medición es largo y cansado es posible obtener los lóbulos de reflectancia para diferentes muestras con relativa facilidad.

## RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LA RD.

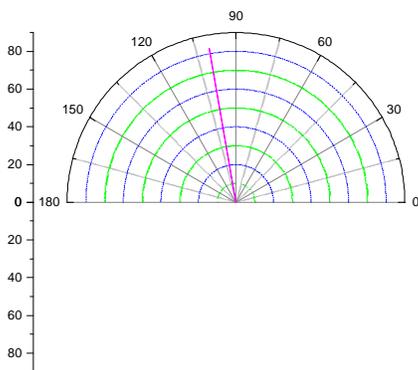
En estos primeros resultados se hizo una selección de muestras con propiedades extremas, un espejo que teóricamente debe ser considerado una microrugosidad para la longitud de onda con que estamos trabajando y la superficie de una cartulina que muestra ser un difusor por lo que se espera sea un buen ejemplo de una macrorugosidad.

El utilizar la superficie de un espejo de primera superficie permite determinar la sensibilidad del instrumento a la resolución de escala que se maneja

actualmente ( $5^\circ$ ), además de que esta prueba sirvió para corroborar la alineación del sistema de iluminación/detección. En la tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones obtenidas para esta superficie especular. El flujo incidente fue de  $10^\circ$  respecto a la normal a la superficie de la muestra, esta normal corresponde a un ángulo  $f = 90^\circ$  en la gráfica de la figura 3. Las mediciones son reportadas en el plano de incidencia,  $q = 0^\circ$  y se realizó un barrido en el ángulo  $f$  de  $75^\circ$  a  $125^\circ$ . Como era de esperarse el flujo reflejado fue diferente de cero para una sola posición, la del ángulo especular.

$\phi$ (grados)	Reflectancia medida (%)
75	0
80	0
85	0
90	0
95	0
100	83,227
105	0
110	0
115	0
120	0
125	0

**Tabla 1.** Reflectancia en el plano de incidencia ( $q=0$ ), para una superficie muy pulida



**Fig. 3** Reflectancia de una superficie muy pulida de un haz incidente a  $80^\circ$ . La longitud de la línea magenta corresponde a un 83.227%.

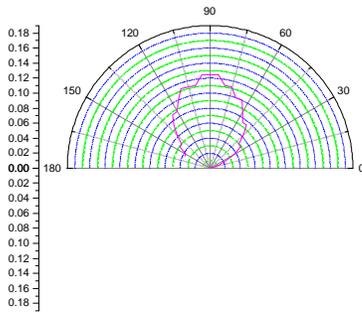
Ahora, analicemos el caso donde el objeto ya no posee una reflexión especular predominante.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para una cartulina blanca, la cual fue seleccionada por ser un buen reflector difuso.

El ángulo de incidencia fue de nuevo de  $10^\circ$ , para un ángulo  $\theta = 0^\circ$  (plano de incidencia) y se hizo un barrido de  $0^\circ$  a  $155^\circ$  en  $\phi$  para la detección del flujo reflejado.

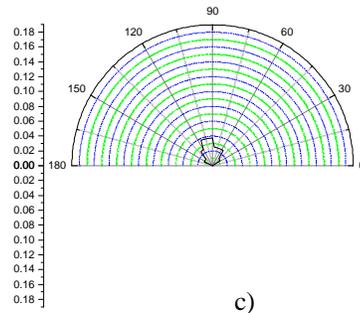
$\phi$ (grados)	Reflectancia medida (%)
0	0,0000
5	0,0000
10	0,0000
15	0,0000
20	0,01247
25	0,02494
30	0,03741
35	0,04988
40	0,04988
45	0,06235
50	0,07482
55	0,07482
60	0,08729
65	0,09976
70	0,09976
75	0,11223
80	0,11223
85	0,1247
90	0,1247
95	0,1247
100	0,11223
105	0,11223
110	0,11223
115	0,09976
120	0,08729
125	0,08729
130	0,07482
135	0,06235
140	0,04988
145	0,04988
150	0,03741
155	0,03741

**Tabla 2.** Reflectancia en el plano de incidencia para la superficie de una cartulina blanca.



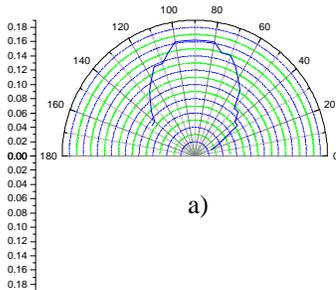
**Fig. 4** Reflectancia de la cartulina blanca en el plano de incidencia. Haz incidiendo a  $80^{\circ}$ .

En la figura 4 se puede apreciar una redistribución del flujo difuso y que no existe un pico en la dirección especular, demostrándose que es una buena superficie reflectora.

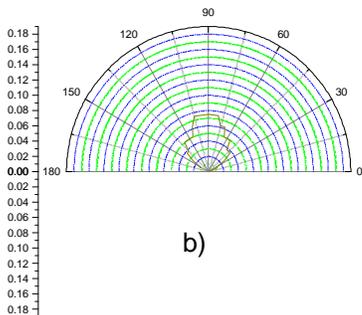


**Fig. 5** Evolución de las curvas para diferentes ángulos fuera del plano de incidencia. a)  $\theta = 15^{\circ}$ ; b)  $\theta = 30^{\circ}$ ; c)  $\theta = 50^{\circ}$ ; Los demás parámetros son idénticos a los de la figura 4.

Una de las ventajas del sistema diseñado es que nos permite realizar mediciones fuera del plano de incidencia. La secuencia de curvas de la figura 5 muestra la evolución de éstas gráficas en función del ángulo  $\theta$  que cuantifica que tan lejos se está del plano de incidencia. Como puede verse el flujo reflejado es mayor (en este caso) en el plano de incidencia y va disminuyendo conforme nos alejamos de él.



a)



b)

Las mediciones de la reflectancia de todas las gráficas son el promedio de 3 mediciones hechas en cada punto, y con el sistema propuesto se ha obtenido una completa repetibilidad hasta la cuarta cifra después del punto decimal en la energía reflejada detectada, lo cual ejemplifica la robustez del sistema.

Con estos resultados podemos darnos cuenta de la influencia de la rugosidad en la distribución de la reflectancia difusa.

La variación en la temperatura (que fue de 2 C) no afectó la repetibilidad de las mediciones.

La incertidumbre en las medidas angulares es de  $\pm 1,4433^{\circ}$  [7] en ambos barridos.

La fuente (laser) con la que hicimos nuestras mediciones presenta una estabilidad en su potencia de emisión cuya incertidumbre es de  $\pm 5,836 \times 10^{-6}$  A [7]. Esta estabilidad fue medida en un lapso de 3 horas que es el tiempo aproximado de medición.

La incertidumbre asociada a la reflectancia es de  $\pm 2,94 \times 10^{-5}$  (adimensional) [7].

## CONCLUSIONES

En este trabajo sólo se están presentando algunos resultados obtenidos en la caracterización tanto para una muestra difusa (cartulina blanca) como para una muestra muy pulida (espejo), como ejemplos extremos de rugosidades.

El trabajo a futuro consiste en utilizar superficies de materiales de referencia con una rugosidad certificada para calibrar el sistema y poder encontrar la correlación entre las propiedades de las curvas que se reportan en función de estas rugosidades.

Se debe automatizar el barrido para tener una adquisición de datos más rápida, minimizando el efecto de la estabilidad de la fuente. La resolución de la escala se va a mejorar utilizando un sistema tipo vernier.

Se tienen problemas de viñeteo debido a los diferentes elementos mecánicos por lo que los barridos no alcanzan los ángulos extremos ni la reflexión especular a incidencia normal.

Para la medición de microrugosidades  $\sigma \ll \lambda$  el polvo es una variable crítica que se tendría que controlar. Se pueden buscar métodos de interpolación que permitan inferir las curvas intermedias y calcular una reflectancia total a partir de pocas curvas en planos discretos y así utilizar algunos de los modelos de análisis de rugosidades reportados para obtener la caracterización de la superficie.

Es trabajo a futuro de los autores obtener los parámetros de rugosidad de este objeto a partir de estas curvas y después relacionarlo con su apariencia de color.

## REFERENCIAS

- [1] J. M. Bennett and L. Mattsson., Introduction to Surfaces Roughness and Scattering (Optical Society of America), Washington, D. C., 1989.
- [2] P. Beckmann and A. Spizzichino, the Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, 1963.
- [3] J.M.Elson and J.M. Bennett, Vector scattering theory, *Opt. Eng.* 18, 2, 1979, 116-124.
- [4] K. E. Torrance and E.M. Sparrow, Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces, *Journal Of the Optical Society of America*, 57, 9, 1966, 1105-1114.
- [5] J. A. Detrio and S. M. Miner, Standardized Total Integrated Scatter Measurements of Optical surfaces, 24, 3, 1985, 419-422.
- [6] L. R Baker and H. E. Bennett, Measurement and effects of surface Defects and Quality of Polish, *Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 525, 1985, 58-63.
- [7] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones.