

REALIZACIÓN DE UNA ESCALA DE REFLECTANCIA BIDIRECCIONAL EN INFRARROJO CERCANO

N. Tejedor, A. Ferrero, P. Santafé-Gabarda y J. Campos

Grupo de Investigación para Medidas de Radiación Óptica (GIMRO)
Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IO-CSIC)
C/. Serrano 144, 28006 Madrid
+34 915 61 68 00 EXT. 442208; nestor.t@csic.es

RESUMEN. Debido a la creciente importancia del intervalo espectral infrarrojo cercano en la caracterización de materiales, es interesante disponer de una escala para poder realizar la medida de la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF). Esta función describe la distribución angular de la radiancia de una superficie respecto a la irradiancia incidente, cuando se incide direccionalmente. En este trabajo se describen resultados previos obtenidos en el IO-CSIC para esta magnitud.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades de difusión están condicionadas por la rugosidad y estructura de la superficie y por los índices de refracción complejos de los materiales que componen el objeto, ya que estos índices determinan el coeficiente de absorción, el de reflexión y el de transmisión de los materiales. El conocimiento exacto de esas magnitudes y la estructura podría dar lugar al desarrollo de modelos con los que evaluar la transmitancia y reflectancia de los objetos y sus distribuciones espaciales y angulares. Sin embargo, esto sólo se puede hacer en casos muy simples. Por este motivo, la media de esas distribuciones es una herramienta básica para el conocimiento de la estructura y propiedades de los materiales.

En este trabajo, nos centraremos en la distribución de la reflectancia espectral, caracterizándola a través de la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Esta magnitud relaciona la radiancia de la muestra a estudiar con la irradiancia incidente, cuando se incide direccionalmente.

Se presentan los resultados preliminares de una medida de reflectancia bidireccional (en una dirección de incidencia y una de observación) de una muestra altamente reflectante de las que se usan habitualmente como patrón de reflectancia difusa. Esto es el paso previo para la realización de la escala de reflectancia bidireccional en el rango espectral del infrarrojo cercano.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN

2.1. Descripción del sistema de medida

El IO-CSIC (Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas) ha desarrollado una instalación para poder medir la BRDF, además de otras funciones relacionadas con ésta. Este sistema se denomina Goniospectrofotómetro Español (GEFE) [1], el cual nos permite fijar cualquier geometría de irradiación y colección para poder realizar medidas tanto de la reflectancia bidireccional como de su distribución angular. Este sistema consta de 3 partes diferenciadas entre sí (véase "Fig. 1"):

- El subsistema de iluminación, constituido por una fuente LDLS (*laser driven light source*, modelo EQ-77), que presenta una radiancia superior a 40 mW/(mm² sr nm) (dependiente de la longitud de onda) en un rango espectral comprendido entre 170 nm y 2500 nm, un monocromador Bentham modelo TMc300, el cual permite seleccionar una banda

- espectral en las mediciones entre 800 nm y 1700 nm en este caso, y un sistema de lentes que permite transportar el flujo radiante de la fuente de iluminación a la muestra.
- El subsistema de posicionamiento de la muestra, compuesto por un brazo-robot que permite colocar la muestra en el plano de medida; además de una plataforma móvil que rota en torno a un anillo cuyo centro se sitúa sobre el plano de la muestra. La combinación de los movimientos del brazo-robot y la plataforma móvil realiza las geometrías de medida requeridas.
 - El sistema de detección constituido por un fotodiodo de InGaAs, conectado a un amplificador de corriente (Keithley, modelo 6485), un espectrorradiómetro y una cámara.

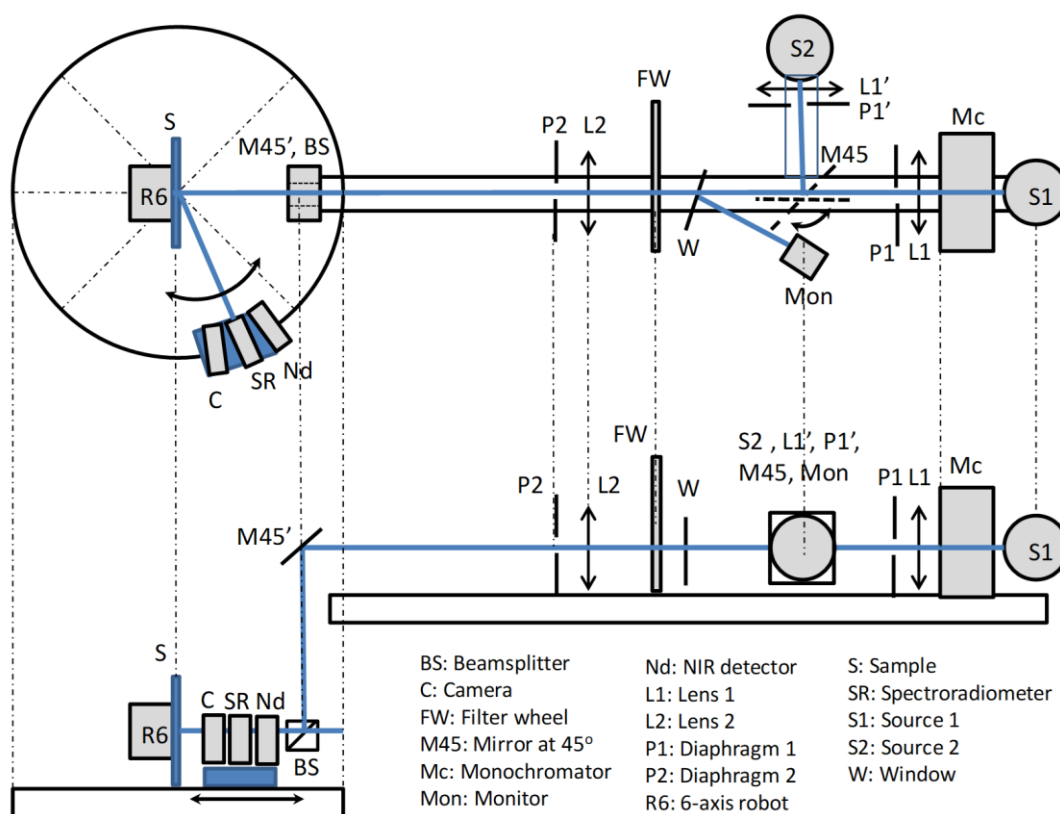


Fig. 1: Vista superior y de perfil del GEFE empleado en la medición, con sus correspondientes subsistemas.

2.2. Ecuación de medida

La BRDF [2,3] de la muestra se define como:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

donde θ y φ denotan, respectivamente, las coordenadas polar y azimutal para ambas direcciones de irradiación (subíndice i) y reflexión (subíndice r). L y E son radiancia e irradiancia,

respectivamente. La dependencia espectral no se indica por simplificar, pero es una de las variables.

La expresión anterior se puede reescribir en términos del flujo radiante, Φ , al ser el área irradiada y emisora de la muestra las mismas:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\Phi_r(\theta_r, \varphi_r)}{d\Phi_i(\theta_i, \varphi_i)\omega_r \cos \theta_r}$$

que se relacionaría con las señales del fotodiodo y con la geometría de la medida como:

$$f_r^s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{S_r(\theta_r, \varphi_r)}{S_d(\theta_i, \varphi_i)} \left(\frac{1}{\omega_r \cos \theta_r} \right)$$

donde S_r y S_d son la señal reflejada y directa registradas, respectivamente, ω_r el ángulo sólido de colección y θ_r el ángulo polar de colección. Nótese que la señal del fotodiodo es equivalente al cociente entre flujo radiante y responsividad, que es constante para sistemas lineales, y puede cancelarse en el cociente entre señales.

Finalmente, su incertidumbre relativa será, por lo tanto:

$$u_r f_r^s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \sqrt{u_r^2(S_r) + u_r^2(S_d) + u_r^2(\omega_r) + u_r^2(\cos \theta_r)}$$

donde $u_r^2(S_r)$ y $u_r^2(S_d)$ son el cuadrado de la incertidumbre relativa de la señal reflejada y directa, respectivamente, $u_r^2(\omega_r)$ es el cuadrado de la incertidumbre relativa del ángulo sólido reflejado, y $u_r^2(\cos \theta_r)$ es el cuadrado de la incertidumbre relativa correspondiente al coseno del ángulo polar de colección.

2.3. Procedimiento de medida

La muestra a caracterizar es una de las que se usan habitualmente como patrón de reflectancia difusa, constituida por un material cerámico altamente reflectante y con comportamiento casi lambertiano [4,5]. La geometría evaluada quedará definida por los ángulos de incidencia $\theta_i = 0^\circ$, $\varphi_i = 0^\circ$ y de observación $\theta_r = 45^\circ$ y $\varphi_r = 0^\circ$.

Diferenciaremos entre dos posiciones de medida con el fotodiodo, para poder recoger la señal directa y reflejada:

1. Para obtener la señal de incidencia (S_d) se colca el fotodiodo junto con una apertura de precisión de 4 mm de diámetro delante de éste y en el plano de la muestra ($\theta_i = 0^\circ$). Todo el flujo radiante incidente debe entrar por la apertura.
2. Para obtener la señal reflejada por la muestra (S_r), se coloca el fotodiodo en la plataforma rotatoria a 45° (θ_r) con respecto a la dirección de incidencia. El ángulo sólido de detección (ω_r) se define a través de la distancia muestra-sensor y el diámetro de la apertura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la BRDF ($0^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$) en el intervalo espectral [800 – 1700] nm para la muestra blanca difusora se presentan en la fig. 2.

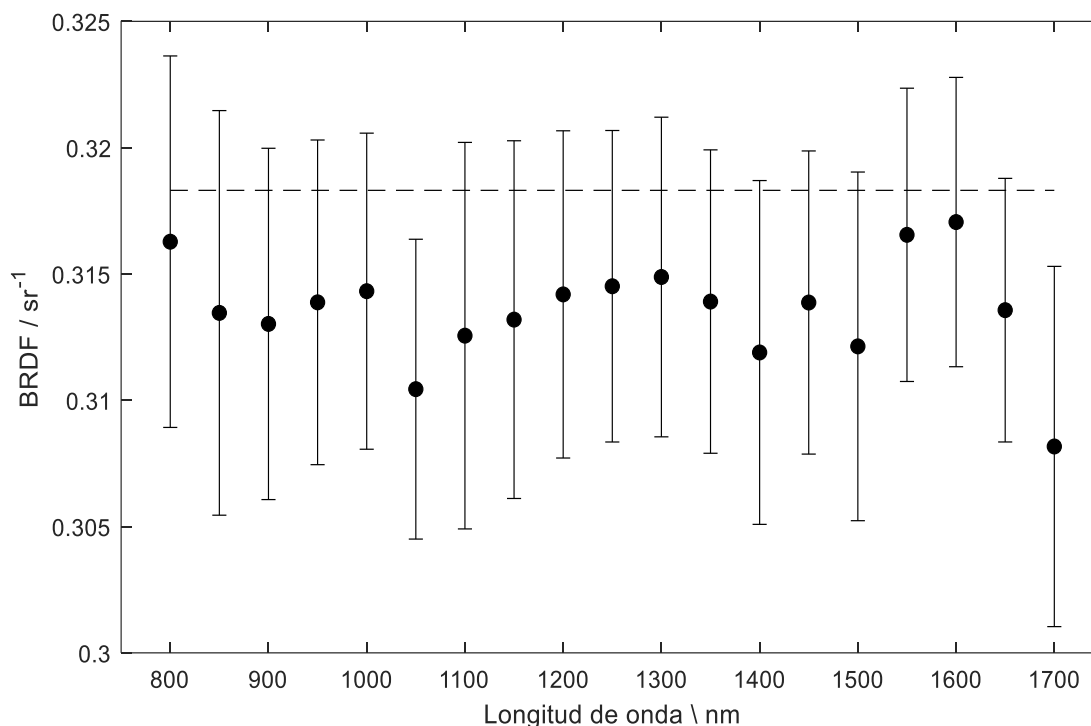


Fig. 2: Valor de BRDF (0°, 0°, 45°, 0°) e incertidumbre asociada para el estándar de reflectancia evaluado (la línea discontinua marca el valor del PRD).

Como se puede comprobar, los valores de reflectancia bidireccional tiene un valor promedio de 0.314 sr⁻¹ y una incertidumbre relativa expandida de 0.021, cercanos a los del difusor perfecto (1/π), indicados en la figura mediante la línea discontinua.

El balance de incertidumbre se presenta a continuación:

Variable de entrada	Valor	Incertidumbre relativa expandida (k = 2)
d_d	4×10^{-3} m	3.75×10^{-4}
A_d	1.2566×10^{-5} m ²	1.5×10^{-3}
D	0.4 m	3.75×10^{-4}
ω_r	7.854×10^{-5} sr	1.5×10^{-3}
θ_r	45 °	2.2×10^{-3}
$\cos \theta_r$	0.7071	2.4×10^{-3}
S_d	2.1761×10^{-5}	1.06×10^{-5}
S_r	3.5791×10^{-10}	5.8463×10^{-4}
$u_r f_r^s$		2.1×10^{-2}

Tabla 1: Balance de incertidumbre en la medida de la f_r^s .

4. CONCLUSIONES

Tras la evaluación de resultados, podemos ver que el método usado para obtener la reflectancia bidireccional es válido para poder establecer una escala de medida de la BRDF en el rango espectral del infrarrojo cercano, dado que los valores medidos se corresponden con los esperados para el material, y la incertidumbre relativa expandida es del 2.1%, que está limitada en este caso por la incertidumbre de θ_r , la incertidumbre de posicionamiento de la plataforma.

5. REFERENCIAS

- [1] A.M. Rabal, A. Ferrero, J. Campos, J.L. Fontecha, A. Pons, A. M. Rubiño and A. Corróns. *Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in-out-of-plane and retroreflection geometries*, Metrologia 49 (2012) 213–223. doi:10.1088/0026-1394/49/3/213.
- [2] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond and J. J. Hsia, *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, Natl. Bur. Stand. Monogr. 160, 1977.
- [3] D. Hünerhoff, U. Grusemann and A. Höpe, *New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection*, Metrologia 43 (2006) S11–S16.
- [4] A. Höpe and K-O. Hauer, *Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials*, Metrologia 47 (2010) 295–30.
- [5] B. Bernad , A. Ferrero , C. Strothkämper, J. Campos, A. Pons, T. Quast, K-O. Hauer and A. Schirmacher, *Deviation of white diffuse reflectance standards from perfect reflecting diffuser at visible and near-infrared spectral ranges*, Metrologia 56 (2019) 055005 (10pp).

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto PGC2018-096470-B-I00, financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación – Agencia Estatal de Investigación.
Programa de actividades SINFOTON2-CM de la convocatoria de tecnologías 2018 de la Comunidad de Madrid.