

Proyecto Fin de Máster en Tecnologías Ópticas y de la Imagen,
Facultad de Óptica y Optometría
Universidad Complutense de Madrid.



TÍTULO:

**DEPENDENCIA DE LA POLARIZACIÓN EN EL
USO DE PATRONES BLANCOS DE REFLECTANCIA
DIFUSA**

Autor: Álvaro M. Calderón Villodres
Director: Alejandro Ferrero Turrión (CSIC)
Tutor: José Manuel López Alonso (UCM)

AÑO ACADÉMICO

2016-2017

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a cada una de las personas con las que me he cruzado en este intenso y apasionante curso académico.

Quiero comenzar dando las gracias a Alejandro Ferrero Turrión, quien ha sido mi guía y apoyo a través de esta experiencia investigadora, siempre abierto, tolerante y con una disposición inmejorable ante lo acontecido durante la experiencia. Por supuesto agradecer al CSIC, en primer lugar, por abrirme sus puertas y recibirme cada día ofreciéndome todo el material y el apoyo necesario para llevar a cabo mi trabajo y en segundo lugar por lo que dicha institución aporta a la tarea investigadora en este país.

Por otro lado, agradecer a la Facultad de Óptica y Optometría de la UCM y a todos y cada uno de los profesores por ofrecer una formación cercana y siempre dispuestos a ofrecer sus conocimientos con su cara más amable.

A mis compañeros de Máster, gracias por este fabuloso año, gracias por los momentos de diversión y de agobios y por supuesto gracias por ser partícipes de un año más cercano a la ciencia.

A mi madre, a mi padre, a mi hermano y a mi chica, gracias ser mis cuatro pilares, por estar junto a mi, por guiarme en momentos de cansancio mental los cuales sin ellos hubieran sido más duros de remontar. Pero como no, gracias a todos por compartir mis alegrías.

Resumen

Tanto en la industria como en la academia es de vital importancia tener calibrados correctamente los instrumentos ópticos que se utilizan a la hora de llevar a cabo proyectos de investigación y desarrollo de productos. Para calibrar estos instrumentos se utilizan patrones blancos de reflectancia difusa. La tendencia ideal de estos patrones es la aproximación a un patrón de reflectancia perfecto (Perfectly Reflecting Diffuser o PRD por sus siglas en inglés). Un PRD se caracteriza por reflejar la radiación incidente sin pérdidas y sea cual sea su dirección de observación e incidencia. Cuanto más se aleje el material utilizado como patrón blanco de las condiciones ideales del PRD, mayor incertidumbre asociada a la medida final tendrá el instrumento que queremos calibrar. Es importante comparar las medidas experimentales con el comportamiento de un PRD para así cuantificar y evaluar la validez de patrones de reflectancia difusa.

Este trabajo trata de analizar como afecta la polarización de la luz que incide sobre la muestra al factor de radiancia (β) para varios patrones de reflectancia difusa. Dicho análisis lo he podido llevar a cabo gracias al instrumento llamado GEFE (Gonio Espectro Fotómetro Español) desarrollado por el grupo de Medidas de Radiación Óptica del Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC. El control de la polarización se ejerce a través de dos polarizadores lineales colocados de manera que uno controle la polarización de la incidencia y otro polarizador controle la polarización en la detección .

Como resultado del trabajo, se obtiene la incertidumbre producida por un sistema de medida con pequeños grados de polarización cuando se miden cuatro patrones típicos de reflectancia difusa.

Palabras clave

Reflectancia, polarización, bidireccional, difusión, metrología, difusor, factor de radiancia, BRDF, espectrofotometría, goniospectrofotometría, PRD, patron

Summary

In both the industry and academy it is very important to have well-calibrated optical instruments that are used when carrying out research projects and product development. To calibrate these instruments it's use white standards of diffuse reflectance standards that are commonly used. The ideal trend of these standards is the approximation to a perfectly reflecting diffuser (PRD). A PRD reflects all the incident radiation without any losses and whatever be incidence direction. The more similar the diffuse reflectance standard to a PRD, the lower will be the uncertainty associated with the final measurement with the instrument calibrated with that standard. It is important to compare the experimental measurements against the PRD behavior to quantify and evaluate the validity of diffuse reflectance standards.

This work tries to analyze how it affects the polarized light affects to the radiance factor (β) for four diffuse reflectance standards. This work was carried out using GEFE (Gonio Espectro Fotómetro Español) the goniospectrophotometer developed in Grupo de Medidas de Radiación Óptica del Instituto de Óptica "Daza de Valdes" in CSIC. The polarization control accomplished with two linear polarizers, the first one controls the incident light and the other control the polarization when the light is detected.

As result of this work, we obtained the uncertainty produced by a measurement system with a low degree of polarization when four typical diffuse reflectance standard are measured.

Keywords

Reflectance, polarization, bidirectional, scattering, metrology, difusser, radiance factor, BRFD, espectrophotometry, gonio-spectrophotometry, PRD, pattern

Índice

1. Introducción	12
1.1. Motivación	12
1.2. Objetivo	12
1.3. Estado del arte	12
1.3.1. PRD (Perfectly Reflecting Diffuser)	12
1.3.2. Función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)	12
1.3.3. Factor de radiancia β	13
1.3.4. Dependencia con la polarización	14
1.3.5. Constantes A y B	14
1.3.6. Patrones de reflectancia difusa	15
2. Sistema experimental. Gonio-espectrofotómetro español (GEFE)	16
2.1. Descripción del instrumento	16
2.1.1. Sistema de iluminación	16
2.1.2. Sistema de posicionamiento de la muestra	18
2.1.3. Sistema de detección	19
3. Procedimiento de medida	20
3.1. Configuración de los polarizadores	20
3.2. Alineamiento de la muestra	21
3.3. Mediciones	21
4. Procesado de datos	21
4.1. Constantes A y B	21
4.2. Factores de radiancia	22
4.3. Grado de polarización	25
4.4. Grado de despolarización	25
4.5. Coeficientes C_1, C_2 y C_{12} para la estimación del error sistemático . . .	26
5. Resultados	26
5.1. Constantes A y B	26
5.2. Factores de radiancia	28
5.3. Grado de polarización del sistema	29
5.4. Grado de despolarización del sistema	29
5.5. Coeficientes C_1, C_2 y C_{12}	32
5.6. Error sistemático ($\Delta\beta$)	34
6. Conclusiones	36

1. Introducción

Estudiar el comportamiento de la luz cuando interacciona con un objeto es una tarea más compleja de lo que parece. El desarrollo de la ciencia ha permitido establecer una serie de normas y patrones que facilitan la caracterización de materiales y objetos bajo los mismos criterios, necesarios en parte debido al gran crecimiento de la industria en el primer cuarto de siglo XX. Estas normas y patrones los establece la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage, traducido al castellano como Comisión Internacional de Iluminación). En 1931 dicha comisión estableció como estandar primario de mediciones de reflectancia difusa una capa de óxido de magnesio recién ahumado, estableciendo también las condiciones de medición y el factor para esas condiciones como valor unidad. Parte de estas condiciones establecen los ángulos con respecto a la normal de la muestra que deben tomar los sistemas de iluminación y detección.

1.1. Motivación

Debido al continuo y creciente interés en el campo de la metrología de ser mas precisos en las mediciones, los institutos de metrología nacionales de todo el mundo construyen instrumentación que permite medir funciones de reflectancia o scattering bidireccionales con el fin de caracterizar materiales cada vez con menor incertidumbre, estudiando todos los aspectos que contribuyen a la caracterización fidedigna de los materiales patrones. Hasta la fecha, los patrones de reflectancia difusa se caracterizan mediante funciones como la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), pero generalmente dichas funciones no consideran dependencia con la polarización. Según ciertos estudios ([4], [2] y [5]) se ha observado que la polarización como tal puede afectar a la incertidumbre final de la medida.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es caracterizar el factor de reflectancia de cuatro materiales (cerámica mate, sulfato de bario, Spectralon y white russian opal glass) y su dependencia con la polarización. Asimismo se quiere evaluar el impacto que tal dependencia puede tener en las medidas cuando estos materiales se utilizan como patrones de reflectancia difusa para la calibración de instrumentos de medidas colorimétricas o espectrofotométricas.

1.3. Estado del arte

1.3.1. PRD (Perfectly Reflecting Diffuser)

Los llamados PRD son los patrones ideales en el campo de la espectrofotometría y tienen factores de radiancia/luminancia (β) igual a uno, independientemente de la longitud de onda a la que estemos iluminando la muestra e independientemente de la geometría utilizada. Esto viene a decirnos que sea cual sea la longitud de onda con la que iluminemos la muestra y sean cuales sean las direcciones a la que se esté incidiendo con la fuente de luz la reflectancia será la misma. Un PRD no existe como tal ya que ningún material conocido hasta el momento cumple con la premisa mencionada anteriormente, por lo que se utilizan patrones de reflectancia difusa con valores de factor de reflectancia conocidos en la geometría $0^\circ:45^\circ$ para la calibración de instrumentos.

1.3.2. Función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)

La BRDF es una función de distribución que relaciona la irradiancia que incide sobre una muestra con la radiancia que es reflejada por ésta, para ángulos de incidencia y observación

dados. El tratamiento de la BRDF se limita a la óptica geométrica básica sin tener en cuenta fenómenos de interferencias y/o difracción. Siempre se ha tomado la reflectancia de una forma especular (la reflexión perfecta en una única dirección descrita por la óptica geométrica) o de una forma difusa donde se considera la luz reflejada en todas las direcciones del espacio. Sin embargo la reflectancia total no es ni puramente especular ni puramente difusa sino una mezcla de ambas.

La BRDF es una variable que permite analizar la reflectancia bidireccional de materiales de interés y la vamos a llamar a partir de ahora f_r . Previamente hay que establecer unas condiciones bajo las que debemos definir dicha función. Estas condiciones son una irradiancia uniforme, que el material sea isótropo y con una superficie plana. Esta función se expresa formalmente como:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \mathbf{E}_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} [sr^{-1}] \quad (1)$$

donde θ y ϕ son los ángulos polar y azimutal como puede verse en la figura (1). El subíndice (i) lo asociaremos al flujo incidente, mientras que el subíndice (s) lo asociaremos al flujo reflejado. Con respecto a la ecuación (1) la irradiancia incidente se denota como E_i , la radiancia reflejada será L_r y la letra “d” la usaremos para definir un elemento diferencial.

La BRDF no se puede medir directamente tal como está definida en la ecuación (1) ya que precisaríamos de elementos infinitesimales, por lo que preferiblemente la calcularemos a partir de elementos finitos tanto en ángulo sólido como en superficie. Por tanto puede expresarse de la siguiente manera:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda) \simeq \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda)}{E_i(\theta_i, \lambda)} \quad (2)$$

Como podemos ver en la ecuación (2), dicha función depende de cinco variables las cuales son la longitud de onda y cuatro coordenadas esféricas, dos de ellas polares de iluminación y observación (θ_i y θ_s , respectivamente) y otras dos azimutales de iluminación y observación (ϕ_i y ϕ_s , respectivamente). Debido a la complejidad de esta función multidimensional, en algunas ocasiones las medidas se limitan al plano de incidencia. También se asumen materiales isótropos con respecto a la dirección de incidencia, con lo que se “anula” el grado de libertad azimutal de incidencia.

1.3.3. Factor de radiancia β

Para este trabajo vamos a utilizar el factor de radiancia bidireccional β para describir la reflectancia bidireccional, siendo ésta una variable proporcional a la BRDF. El factor de radiancia es la relación o ratio que existe entre la radiancia de una muestra con respecto a la radiancia de un difusor perfecto, un PRD, cuando son iluminadas en condiciones idénticas.

$$\beta(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda)}{L_r^{PRD}(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda)} \quad (3)$$

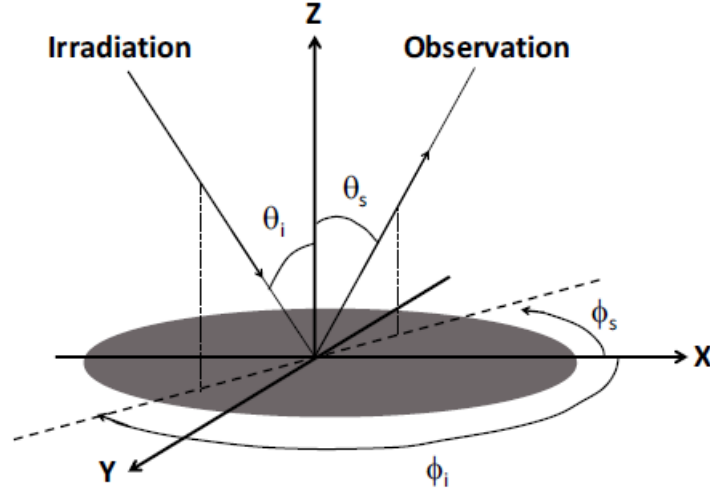


Figura 1: Descripción de direcciones de incidencia y de observación.

Según se demuestra en [3] la relación entre β y f_r es:

$$\beta = \pi f_r \quad (4)$$

1.3.4. Dependencia con la polarización

En el “4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, 2016 Prague” encontramos un artículo [4] en el que se habla sobre los efectos de la polarización en la medida del factor de radiancia de distintos materiales. Los autores de este artículo han usado un gonioprotómetro junto con un analizador para obtener valores de parámetros de Stokes de las medidas realizadas. Mediante el análisis de sus resultados llegan a la conclusión de que la dependencia con la polarización del factor de radiancia es mayor a medida que se aumentan los ángulos de iluminación y detección, es decir, a medida que observamos e iluminamos de una manera más rasante con respecto a la muestra. También observan una dependencia muy pequeña con la polarización sobre la muestra blanca de cerámica lo cual, indican, que puede ser beneficioso usar dicho material como material patrón o de referencia. Atendiendo a sus resultados, asumiremos en este trabajo que a la geometría $0^\circ:15^\circ$ los patrones de reflectancia difusa despolariza por completo la luz pues como puede verse en la figura (5) de dicho artículo, los parámetros de Stokes son muy próximos a cero, indicando una dependencia con la polarización casi despreciable.

1.3.5. Constantes A y B

Los valores de A y B son constantes asociadas al sistema las cuales están directamente relacionados con la polarización de la fuente y la dependencia del detector con la polarización, respectivamente. En la aplicación práctica, dichas constantes no sufren variaciones importantes como para tener que medirlas constantemente.

Examinando el artículo “Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials” [1] podemos orientarnos sobre los procedimientos de cálculo de las constantes A y B del sistema.

En el artículo mencionado, la constante A se obtiene como la relación existente entre el flujo radiante Φ_s de la componente *s*-polarizada del sistema de iluminación con respecto al flujo radiante Φ_p de la componente *p*-polarizada del sistema de iluminación cuando el sistema

de detección está totalmente libre de polarización, anteponiendo a éste muchas capas de vidrio opal translúcido. El factor B se calcula análogamente, situando muchas capas de vidrio opal translúcido delante de la fuente de iluminación. De este modo:

$$A = \frac{\Phi_s}{\Phi_p} \quad (5)$$

y

$$B = \frac{S_s}{S_p} \quad (6)$$

donde S_p es la responsividad del detector con la luz p -polarizada y S_s es la responsividad del detector con la luz s -polarizada.

1.3.6. Patrones de reflectancia difusa



(a) Cerámica mate



(b) Sulfato de bario



(c) Spectralon



(d) White russian opal glass

Figura 2: Patrones de reflectancia difusa.

En 1931 la CIE estableció como patrón primario de mediciones de reflexión una capa de óxido de magnesio recién ahumado. Bajo ciertas condiciones, se estableció que el factor de radiancia obtenido de las mediciones de esta capa de óxido de magnesio tendría valor uno ($\beta = 1$). La ambición de reducir cada vez más las incertidumbres asociadas a las medidas hizo que este material dejara de ser valido, pasando a tomar como referencia de medida un PRD. Por consiguiente se han ido buscando otros materiales que proporcionan valores mas cercanos a dicho

PRD. En este trabajo se han utilizado cuatro de los mas típicos y estos son:

- Cerámica mate
- Sulfato de bario
- Spectralon
- White russian opal glass

2. Sistema experimental. Gonio-espectrofotómetro español (GEFE)

2.1. Descripción del instrumento

El instrumento de medida GEFE [7] desarrollado en el grupo de Medidas de Radiación Óptica del Instituto de Óptica “Daza de Valdes” del CSIC se compone de tres partes o sistemas. Está formado por el sistema de iluminación cuyo posicionamiento es fijo. También está formado por otros dos sistemas móviles los cuales son el sistema de detección y el sistema de posicionamiento de la muestra.

Por otro lado el montaje incluye un sistema de alineamiento que se basa en dos láseres. Uno de ellos está situado a 45° positivos y el otro está situado a 45° negativos con respecto al sistema de detección cuando éste está colocado en posición inicial, de manera que la intersección de ambos láseres se realiza en el centro de la esfera imaginaria, que es la posición donde se ha de situar la superficie de la muestra

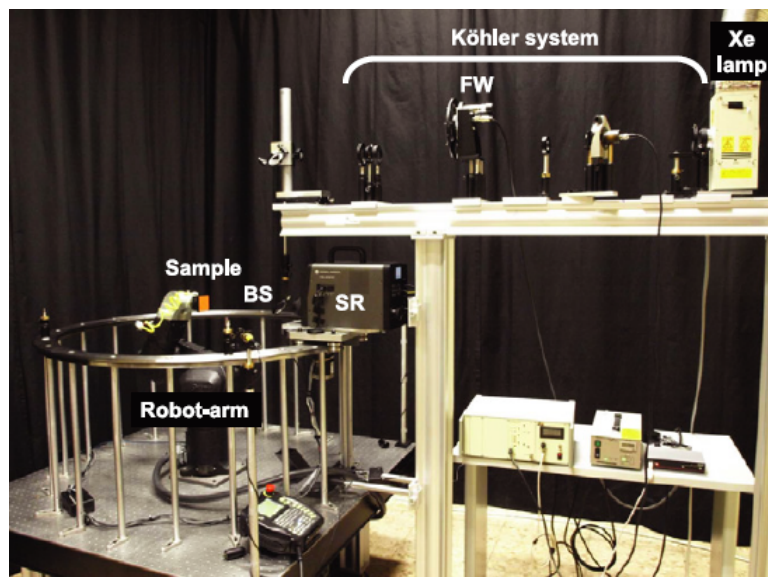


Figura 3: Sistema GEFE completo. [6]

2.1.1. Sistema de iluminación

Esencialmente la iluminación de GEFE es un haz colimado de luz blanca que produce una iluminación uniforme sobre la muestra. Es necesario una radiación de potencia elevada debido al uso del separador de haz como elemento imprescindible para realizar las medidas de retroreflexión. También, el hecho de colimar el haz aporta la ventaja de tener menor cantidad de luz

esparcida.

La fuente elegida es una lampara de Xenon (Hamamatsu Super-Quiet Xenon Lamp, modelo: L2175 150 W) que emite en un rango espectral de 185 nm a 2000 nm. Este alojamiento va conectado a una fuente de alimentación estable (modelo C8849, también de la marca Hamamatsu). Esta fuente ha sido elegida debido a su alta emisión en longitudes de onda cortas, lo cual es importante porque el espectrofotómetro tiene un señal de salida baja en ese rango de longitudes de onda.

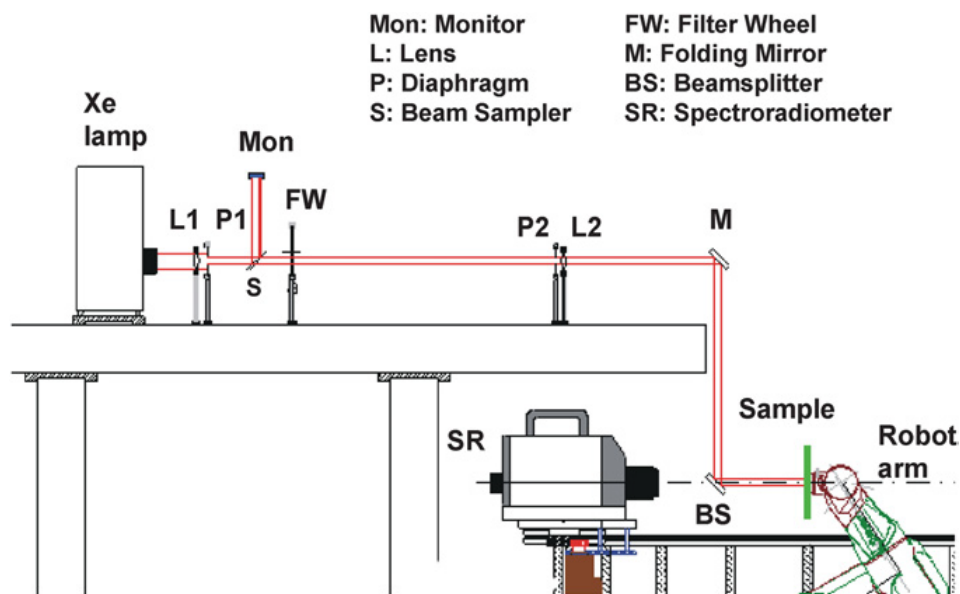


Figura 4: Esquema del montaje detallando sistema de iluminación y detección.

Como podemos ver en la figura (4) a continuación de la fuente se ha colocado un sistema óptico con el fin de obtener una irradiancia uniforme en la zona iluminada de la muestra (siempre será mayor la zona iluminada de la muestra que la captada por el espectrofotómetro debido a la visualización aparente). Este sistema óptico está formado por dos lentes convergentes de 50.8 mm de diámetro cada una (L1 y L2), fabricadas con silicio fundido (UV) y las cuales tienen unas distancias focales de 75 mm y 500 mm respectivamente. Este conjunto de dos lentes convergentes es el llamado sistema Köhler. El diafragma P1 colocado frente a la primera lente sirve para controlar el tamaño de la mancha en la muestra. Con el fin de reducir la luz esparcida procedente de la fuente, se ha colocado un diafragma P2 de 2 cm de diámetro después de la segunda lente L2. Variando el tamaño de P2 es posible controlar el ángulo sólido de irradiancia así como el nivel de irradiación. A lo largo de este trabajo, el diámetro de P2 no se variará en ningún momento, dejando siempre la misma irradiancia para todas las medidas tomadas. La distancia entre la lente L1 y la lampara es 9 cm formándose la imagen a 88 cm de L1, distancia a la cual está colocada la segunda lente L2. La imagen del diafragma de la lente L1 está localizado en la muestra, existiendo una distancia de 113 cm hasta L2. De esta manera el sistema proporciona un aumento lateral de 1.3.

Tras el sistema Köhler se encuentra emplazado un espejo (M) a 45°, a continuación el haz de luz se encontrará con un separador de haz (BS) 50:50 fabricado en silicio fundido también a 45°. La disposición de los elementos ópticos permite que sea posible realizar medidas de retro-reflexión situando el espectrofotómetro justo detrás del divisor de haz.

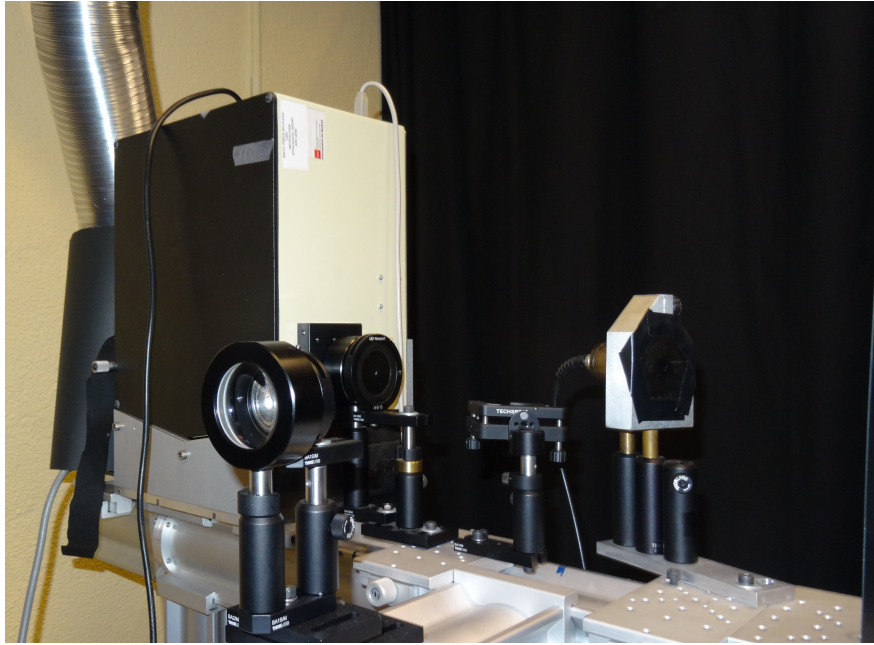


Figura 5: Sistema de iluminación Hamamatsu Super-Quiet Xenon Lamp, modelo:L2175 150 W.

2.1.2. Sistema de posicionamiento de la muestra

El posicionamiento y orientación de las muestras utilizadas en el estudio es facilitado por un brazo robótico de seis ejes (modelo TX-40, de la marca Stäubli). Los seis ejes proporcionan los grados de libertad necesarios para orientar la muestra en cualquier posición con respecto al haz incidente y para alinearla en el sistema de referencia. Según las especificaciones del brazo robótico la incertidumbre angular de las rotaciones está por debajo de 0.005° . La muestra se unirá al brazo robótico mediante un sistema de vacío constante entre la pieza de muestra y una ventosa adaptada al brazo.

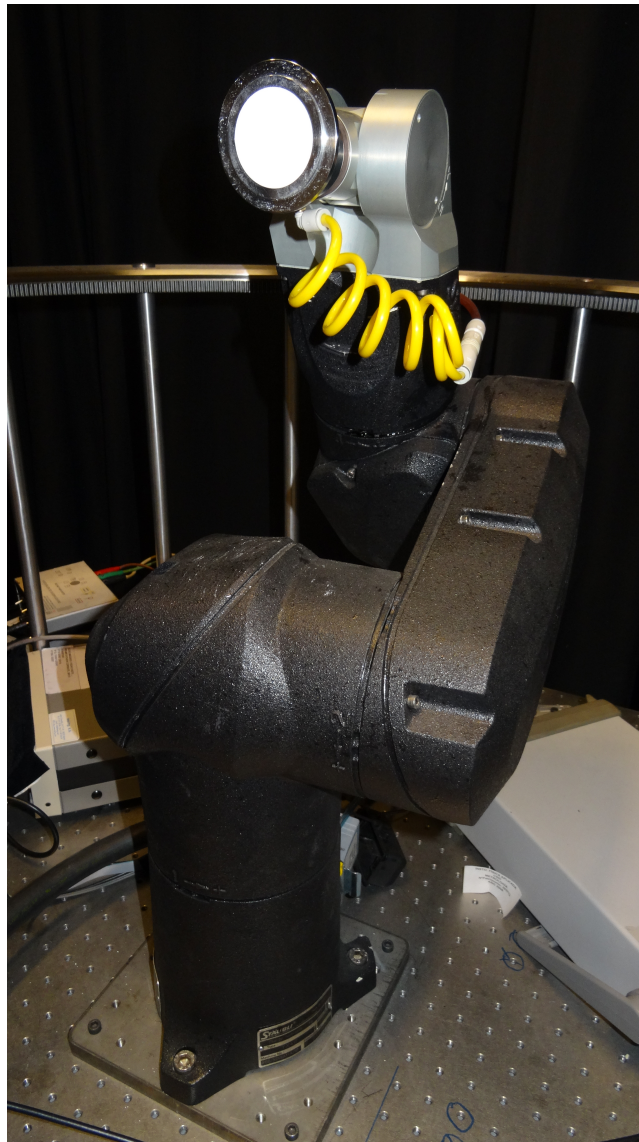


Figura 6: Brazo robótico Staubli modelo TX-40.

2.1.3. Sistema de detección

El sistema de detección se basa en un espectrorradiómetro (modelo CS-2000 A, de la marca Konika-Minolta) que posee un detector CCD. Todas las características del espectrorradiómetro se incluyen en la tabla 1.

Características del sistema de detección	
Rango espectral	380 nm - 780 nm
Resolución	0.9 nm/píxel
Ancho de banda	4 nm
Campo de visión	0.1°, 0.2° y 1°
Mínima distancia de medida	350 nm
Exactitud espectral	± 0.3 nm
Tiempo mínimo de integración	0.005 s

Tabla 1: Características del sistema de detección.

El espectrofotómetro está montado en una placa con ruedas dentadas que se mueve a lo largo de un anillo de 1.03 m de diámetro cuyo centro coincide con el lugar donde debe ir colocada la muestra a examinar, es decir, el centro del sistema de referencia de ésta. El movimiento de la plataforma se realiza mediante un motor. Este grado de libertad adicional es fundamental para poder reproducir cualquier dirección de colección para una dirección de iluminación dada.



Figura 7: Espectrorradiómetro Konica-Minolta CS-2000 A.

3. Procedimiento de medida

3.1. Configuración de los polarizadores

Para la realización de este estudio se necesitó situar un polarizador lineal delante de la fuente y otro delante del detector. De este modo se podían descomponer las medidas en cuatro configuraciones, definidas por el estado de polarización de la iluminación y de la detección. Se tuvo que determinar los giros de ambos polarizadores para obtener estados de polarización perpendiculares y paralelos al plano de incidencia. Esta determinación se realizó teniendo en cuenta que la luz reflejada en M y en el divisor de haz tenía una menor componente perpendicular al plano de incidencia y buscando las señales máximas y mínimas para distintos giros. A lo largo de este trabajo vamos a tratar la luz incidente como una representación simplificada donde consideraremos que dicha onda tiene dos direcciones principales de polarización lineal las cuales son perpendiculares entre sí en lugar de tratarla como una onda circularmente polarizada. Dichas direcciones se denotan con los subíndices que acompañarán a factores de reflectancia, BRDF y lecturas directas del espectrofotómetro. El subíndice p nos indicará la componente donde el plano que contiene al vector de campo eléctrico de la onda incidente es paralelo al plano de incidencia en la muestra. Por otro lado, el subíndice s denotará la componente donde el plano que contiene al vector de campo eléctrico de la onda incidente es perpendicular al plano de incidencia de la muestra. Combinando una configuración “ s ” con otra configuración “ p ” se obtiene la configuración “ r ”. Los subíndices que llevarán de aquí en adelante tanto el factor de radiancia β como R , referida a la lectura directa del gonio-espectrofotómetro, estarán relacionados con las configuraciones de los polarizadores. El primer subíndice denotará la condición de polarización del sistema de iluminación mientras que el segundo subíndice hace referencia a la condición de polarización del sistema de detección.

3.2. Alineamiento de la muestra

Cada muestra tiene un grosor distinto, por tanto, cada vez que coloquemos una muestra en la ventosa que tiene acoplado el brazo robótico hay que alinear la muestra con el centro de referencia. Tras colocar la muestra en su posición se encienden los dos láseres situados a $\pm 45^\circ$ con respecto a la posición inicial del espectrofotometro, como puede verse en la figura (8). A continuación se procede a mover el brazo robótico hasta que los dos láseres converjan sobre la superficie de la muestra. Este procedimiento de alineamiento permite mantener la incertidumbre del posicionamiento en 0.1° .

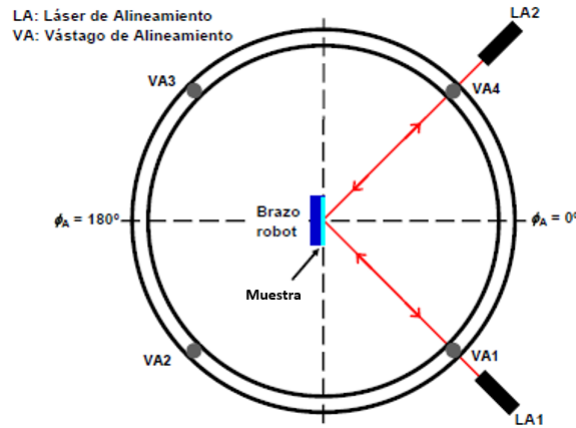


Figura 8: Esquema de alineamiento de la muestra.

3.3. Mediciones

Las medidas que se han obtenido han sido tomadas a distintas geometrías. Estas geometrías se definen por el ángulo de incidencia θ_i , al que se le ha dado valores desde 0° hasta 75° en pasos de 15° , y por el ángulo de observación θ_s al que se le ha dado los mismos valores que para θ_i . En el caso de θ_s , le daremos valores negativos cuando la dirección de observación se encuentre en el lado de la dirección de incidencia, y positivos si está en el lado de la dirección especular. Los cuatro patrones utilizados (cerámica mate, sulfato de bario, Spectralon y white russian opal glass) han sido medidos con todas las posibles combinaciones de θ_i y θ_s y con las diferentes combinaciones posibles de polarizadores (*ss*, *ps*, *sp* y *pp*). El resultado de todo ello es una serie de espectros R, uno por cada configuración de polarización y por cada geometría.

4. Procesado de datos

4.1. Constantes A y B

El procesamiento de datos se ha realizado en base al paper de Clarke 83' [1]. Sin embargo en nuestro caso, en vez de utilizar laminas de opal translucido para despolarizar la luz, se utilizaron los propios materiales difusores a una geometría de $0^\circ:15^\circ$, pues asumimos que esa es la condición donde la luz está despolarizada completamente. El fin de esto es obtener un valor de A que relacione la componente *s*-polarizada del sistema de iluminación con respecto la componente *p*-polarizada del sistema de iluminación. Lo mismo ocurre para la constante B pero esta vez dicha constante está relacionada con el sistema de detección por lo que las componentes *s* y *p* estarán asociadas al polarizador colocado delante del detector. Las constantes A y B, que

son la relación entre las componentes s y p para la iluminación y detección se pueden calcular así:

$$A = \frac{(R_{sp} + R_{ss})}{(R_{ps} + R_{pp})} = \frac{R_{sr}}{R_{pr}} \quad (7)$$

$$B = \frac{(R_{ps} + R_{ss})}{(R_{pp} + R_{sp})} = \frac{R_{rs}}{R_{rp}} \quad (8)$$

Como se puede observar en la ecuación (7) la componente s -polarizada en el primer subíndice (relacionado con la iluminación) de las lecturas R que están en el numerador, permanece constante mientras que en el segundo subíndice se alternan las componente s y p , cuya suma representa una despolarización o una aleatoriedad en la polarización. Esto ocurre tanto en numerador como en el denominador. Análogamente se calcula B pero manteniendo fija la componente s en el numerador y p en el denominador del segundo subíndice.

4.2. Factores de radiancia

Como se ha dicho anteriormente el factor de radiancia β de una muestra se calcula como el cociente entre la lectura en la muestra y la lectura con el PRD:

$$\beta = \frac{R}{R^{PRD}} \quad (9)$$

Por tanto, para las distintas configuraciones de polarizadores exceptuando r , tenemos las siguientes relaciones:

$$\left(\beta_{ss} = \frac{R_{ss}}{R_{ss}^{PRD}} \right), \left(\beta_{sp} = \frac{R_{sp}}{R_{sp}^{PRD}} \right), \left(\beta_{ps} = \frac{R_{ps}}{R_{ps}^{PRD}} \right) \text{ y } \left(\beta_{pp} = \frac{R_{pp}}{R_{pp}^{PRD}} \right)$$

Sin embargo cuando queremos calcular β_{sr} tenemos que realizar la siguiente operación:

$$\beta_{sr} = \frac{(R_{ss} + R_{sp})}{(R_{ss}^{PRD} + R_{sp}^{PRD})} = \frac{R_{sr}}{R_{sr}^{PRD}} \quad (10)$$

donde la suma en el numerador y denominador de componentes ortogonales dan como resultado el flujo luminoso en un estado de polarización aleatorio. Al igual que la ecuación (10) se aplica al flujo detectado, la ecuación (14) se aplica al flujo con el cual iluminamos:

$$\beta_{rs} = \frac{(R_{ss} + R_{ps})}{(R_{ss}^{PRD} + R_{ps}^{PRD})} = \frac{R_{rs}}{R_{rs}^{PRD}} \quad (11)$$

Al igual que con las ecuaciones (10) y (14) podemos calcular β_{pr} y β_{rp} .

Ya que en un PRD las lecturas del gonio-espectrofotometro R_{ss}^{PRD} y R_{sp}^{PRD} deberían ser iguales debido a que las mismas premisas de un PRD establecen que el flujo reflejado es independiente del estado de polarización de la luz, podríamos quedarnos con la siguiente expresión:

$$\beta_{sr} = \frac{(\beta_{ss} + \beta_{sp})}{2} \quad (12)$$

Análogamente a la ecuación (12) estas son las ecuaciones para β_{pr} , β_{rs} y β_{rp} :

$$\beta_{pr} = \frac{(\beta_{ps} + \beta_{pp})}{2} \quad (13)$$

$$\beta_{rs} = \frac{(\beta_{ps} + \beta_{ss})}{2} \quad (14)$$

$$\beta_{rp} = \frac{(\beta_{pp} + \beta_{sp})}{2} \quad (15)$$

y teniendo finalmente que

$$\beta_{rr} = \frac{(\beta_{ss} + \beta_{sp} + \beta_{ps} + \beta_{pp})}{4} \quad (16)$$

Por tanto, si existiera un PRD sería más que suficiente para caracterizar las propiedades de polarización de una muestra a ciertos ángulos dados. Pero la no existencia de dicho elemento nos obliga a utilizar un patrón de reflectancia difusa. Un dato de gran importancia y del que si tenemos conocimiento es que en un patrón de reflectancia difusa, su factor de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ es β'_{rr} .

Las medidas R son relativas. Se pueden obtener los factores de radiancia β de cada muestra a partir de R y R' (medida a $0^\circ:45^\circ$), A y B y el valor certificado β'_{rr} siguiendo el procedimiento que se detalla en esta sección. Las lecturas de referencia estarán denotadas con un superíndice (PRD).

Consideramos un flujo Φ_p de luz incidente p -polarizada. Giramos el polarizador situado delante del detector de manera que pase esa componente p -polarizada y decimos que la sensibilidad constante del detector es S_p entonces el factor de radiancia β_{pp} se puede relacionar con el espectro obtenido R_{pp} como la siguiente ecuación:

$$R_{pp} = \beta_{pp}\Phi_p g S_p \quad (17)$$

donde tenemos que g es un factor geométrico relacionado con el ángulo aparente. Colocando el polarizador del detector de manera que acepte la luz s -polarizada entonces el factor de luminancia β_{ps} podemos establecerlo en relación a su correspondiente lectura R_{ps} como

$$\frac{R_{ps}}{B} = \beta_{ps}\Phi_p g S_p \quad (18)$$

donde, como vemos, se introduce el factor B para permitir el uso de S_p de nuevo. Si ahora tenemos un flujo Φ_s con la componente s -polarizada de la fuente de iluminación entonces para la detección p -polarizada tenemos

$$R_{sp} = \beta_{sp}\Phi_s g S_p \quad (19)$$

mientras que para el sistema de detección en configuración s -polarizada de luz incidente tenemos

$$\frac{R_{ss}}{B} = \beta_{ss}\Phi_s g S_p \quad (20)$$

El flujo Φ_s puede ser expresado en términos de Φ_p tal que,

$$\Phi_s = A\Phi_p \quad (21)$$

y las ecuaciones (19) y (20) se pueden reescribir como

$$R_{sp} = \beta_{sp}A\Phi_p g S_p \quad (22)$$

y

$$R_{ss} = \beta_{ss} AB \Phi_p g S_p \quad (23)$$

Observando las ecuaciones superiores vemos que hay elementos que no conocemos en nuestro sistema. Se trata de Φ_p , g y S_p . Estos tres elementos que no conocemos podemos verlos como un producto constante en las ecuaciones anteriores y podría servir para calibrar el goniofotómetro para factores de luminancia en cualquier muestra a cualquier ángulo. Por tanto para conocer los factores de radiancia necesitamos conocer dicho producto. Este factor podemos obtenerlo usando una muestra difusora de factor de radiancia conocido tomando 4 lecturas, en cada configuración de polarizadores, a 45° de incidencia y en observación normal. Se va a utilizar la categoría “primo” para referirnos a las lecturas y los factores de radiancia medidos a $0^\circ:45^\circ$. El único factor de radiancia conocido de antemano es β'_{rr} .

Las expresiones (17), (18), (22) y (20) dan los factores de radiancia para todas las configuraciones de polarización combinando s y p .

Si añadimos esto anterior a lo que ya tenemos para la calibración de las lecturas obtenemos las siguientes expresiones:

$$\Phi_p g S_p = \frac{R'_{pp} + \frac{R'_{ps}}{B} + \frac{R'_{sp}}{A} + \frac{R'_{ss}}{AB}}{\beta'_{pp} + \beta'_{ps} + \beta'_{sp} + \beta'_{ss}} \quad (24)$$

que si lo combinamos con la ecuación (16) simplificamos tal que

$$\Phi_p g S_p = \frac{R'_{pp} + \frac{R'_{ps}}{B} + \frac{R'_{sp}}{A} + \frac{R'_{ss}}{AB}}{4\beta'_{rr}} \quad (25)$$

Finalmente sustituyendo la ecuación (25) en las ecuaciones (17), (18), (22) y (23) y despejando podemos obtener los cuatro factores de radiancia.

$$\beta_{pp} = \frac{4\beta'_{rr} R_{pp}}{\left(\frac{R'_{ss}}{AB} + \frac{R'_{sp}}{A} + \frac{R'_{ps}}{B} + R'_{pp}\right)} \quad (26)$$

$$\beta_{ps} = \frac{4\beta'_{rr} R_{ps}}{\left(\frac{R'_{ss}}{A} + \frac{R'_{sp}B}{A} + R'_{ps} + R'_{pp}B\right)} \quad (27)$$

$$\beta_{sp} = \frac{4\beta'_{rr} R_{sp}}{\left(\frac{R'_{ss}}{B} + R'_{sp} + \frac{R'_{ps}A}{B} + R'_{pp}A\right)} \quad (28)$$

$$\beta_{ss} = \frac{4\beta'_{rr} R_{ss}}{\left(R'_{ss} + R'_{sp}B + R'_{ps}AB + R'_{pp}AB\right)} \quad (29)$$

Estos factores de radiancia están determinados, en términos de lectura del instrumento a cualquier ángulo de incidencia y observación, las cuatro lecturas de calibración, las constantes A y B y el factor de radiancia absoluto β'_{rr} .

4.3. Grado de polarización

El grado de polarización está definido como:

$$P = \frac{\Phi_d - \Phi_i}{\Phi_d + \Phi_i} \quad (30)$$

donde Φ_d es la componente en un plano con mayor polarización mientras que Φ_i es la componente en un plano con menor cantidad de polarización. El siguiente paso en el procedimiento de cálculo es la obtención de los grados de polarización P_1 y P_2 asociados al sistema de iluminación y de detección respectivamente en referencia a un plano de polarización en particular. Si tomamos el plano s -polarizado como referencia arbitraria tenemos que para el sistema de iluminación, P_1 se define como:

$$P_1 = \frac{\Phi_s - \Phi_p}{\Phi_s + \Phi_p} \quad (31)$$

que podemos simplificarlo usando la relación $\Phi_s = A\Phi_p$, de modo que

$$P_1 = \frac{2A}{A+1} - 1. \quad (32)$$

De igual manera podemos definir P_2 como

$$P_2 = \frac{S_s - S_p}{S_s + S_p} \quad (33)$$

Al igual que antes, ahora la relación útil para simplificar la ecuación es $S_s = BS_p$ y esto hace que nos quede P_2 tal que

$$P_2 = \frac{2B}{B+1} - 1 \quad (34)$$

Nótese que los valores P_1 y P_2 deben estar entre 1 y -1.

4.4. Grado de despolarización

Por otro lado tenemos que considerar que cuando la luz impacta sobre una muestra parte de dicha luz se reflejará especularmente mientras que el resto entrará en la superficie sufriendo scattering y absorción y parte de ella emergerá de manera difusa. El scattering múltiple que se produce dentro del material en superficies mate y también debido a las irregularidades de la superficie puede despolarizar la luz.

El grado de despolarización D , de una muestra se puede establecer como $1 - P$ o bien:

$$D = \frac{2\Phi_i}{\Phi_d + \Phi_i}, \quad (35)$$

Recurriendo a la ecuación (30) y desarrollando $1 - P$, tenemos que:

$$D_s = 1 - \left| \frac{R_{ss} - BR_{sp}}{R_{ss} + BR_{sp}} \right| \quad (36)$$

$$D_p = 1 - \left| \frac{R_{ps} - BR_{pp}}{R_{ps} + BR_{pp}} \right| \quad (37)$$

4.5. Coeficientes C_1, C_2 y C_{12} para la estimación del error sistemático

El factor de radiancia medido, β_m , depende del grado de polarización del sistema de medida y puede expresarse como [1]:

$$\beta_m = \frac{(1 + P_1)(1 + P_2)\beta_{ss} + (1 + P_1)(1 - P_2)\beta_{sp} + (1 - P_1)(1 + P_2)\beta_{ps} + (1 - P_1)(1 - P_2)\beta_{pp}}{4} \quad (38)$$

Esta ecuación se puede utilizar para expresar la diferencia relativa entre β_m y β_{rr} , donde éste último es habitualmente lo que se quiere medir, como:

$$\Delta\beta = \frac{\beta_m - \beta_{rr}}{\beta_{rr}} \quad (39)$$

que tras desarrollarlo (ver Anexo I) se puede expresar en función de los parámetros P y C

$$\Delta\beta = P_2C_2 + P_1C_1 + P_1P_2C_{12} \quad (40)$$

donde

$$C_1 = \frac{(\bar{\beta}_{ss} + \bar{\beta}_{sp} - \bar{\beta}_{ps} - \bar{\beta}_{pp})}{4}, \quad (41)$$

$$C_2 = \frac{(\bar{\beta}_{ss} - \bar{\beta}_{sp} + \bar{\beta}_{ps} - \bar{\beta}_{pp})}{4} \quad (42)$$

$$C_{12} = \frac{(\bar{\beta}_{ss} - \bar{\beta}_{sp} - \bar{\beta}_{ps} + \bar{\beta}_{pp})}{4} \quad (43)$$

De este modo se puede estimar el error sistemático introducido en la medida con un sistema de una polarización dada (P_1 y P_2) cuando se mide una muestra con coeficientes C_1 , C_2 y C_{12} .

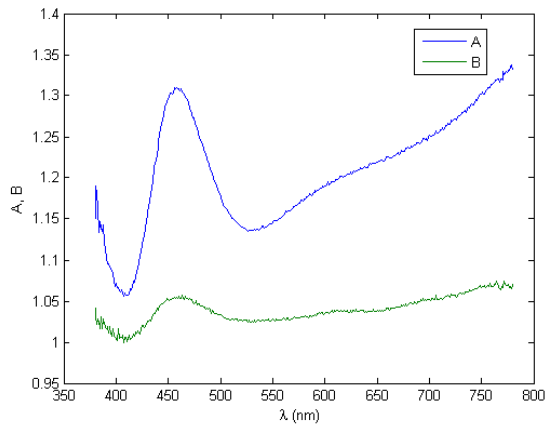
5. Resultados

5.1. Constantes A y B

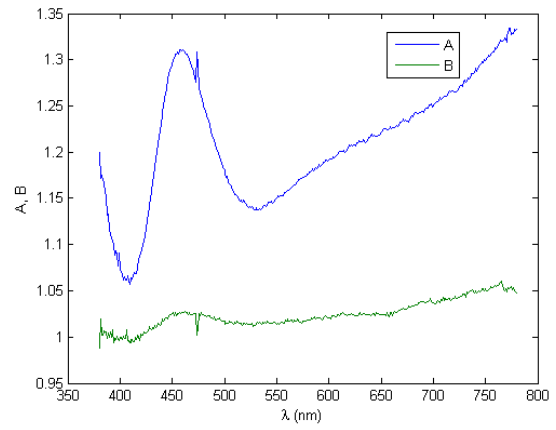
En la figura (9) se muestran los valores espectrales de A y B cuando son medidos utilizando los distintos patrones de reflectancia difusa a $0^\circ:15^\circ$ como elementos despolarizadores. Se observa que el resultado es muy parecido en todos los casos, como se esperaba. En adelante se usará la media de todos ellos como valores de A y B [figura (10)].

Podemos ver que, a lo largo de todo el rango de longitudes de onda, B es muy estable y próxima a la unidad lo que sugiere cierta equidad entre las componentes s y p polarizadas. Como ya sabemos, la constante B está directamente relacionada con el sistema de detección por lo que, en primera aproximación podemos decir que hay una menor dependencia de la polarización asociada a la detección.

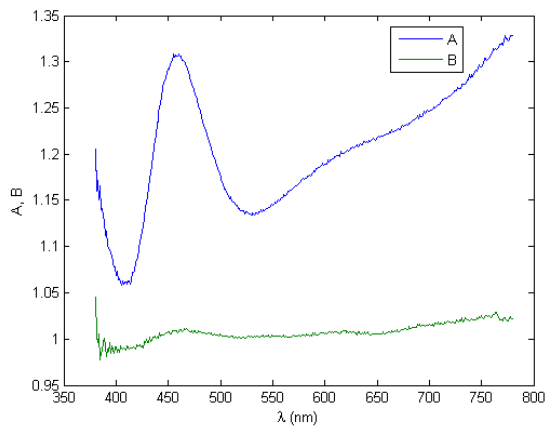
Respecto a A lo que se obtiene es que la iluminación s -polarizada es en promedio un 20% mayor que la p -polarizada. Esto equivale a una polarización del 55% de la componente s frente a un 45% de la componente p . La dependencia de la respuesta del detector con la polarización es mucho más pequeña. Podemos decir que el efecto de la polarización del GEFÉ está dominado por la iluminación.



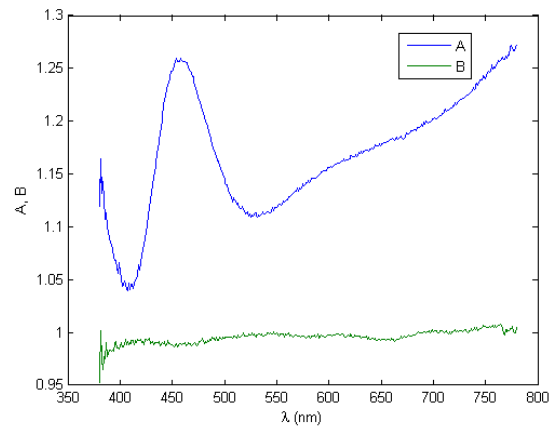
(a) Constantes A y B para cerámica mate.



(b) Constantes A y B para sulfato de bario.



(c) Constantes A y B para Spectralon.



(d) Constantes A y B para white russian opal glass.

Figura 9: Constantes A y B.

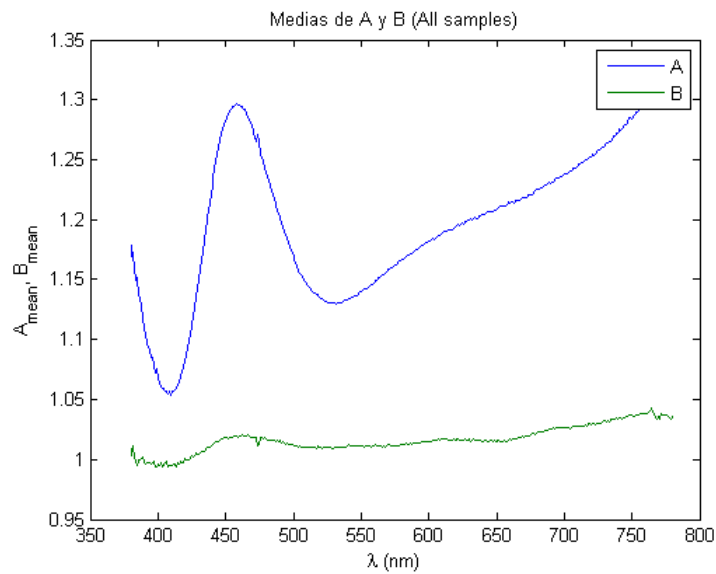
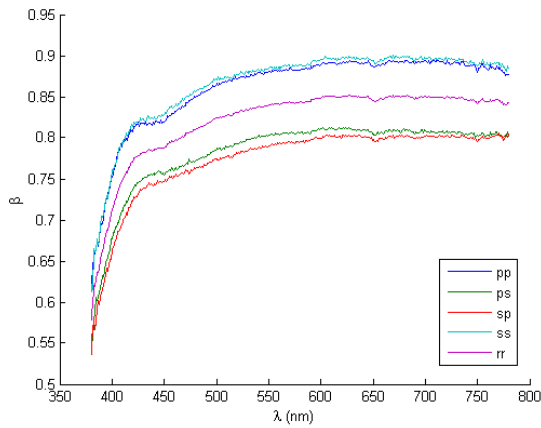


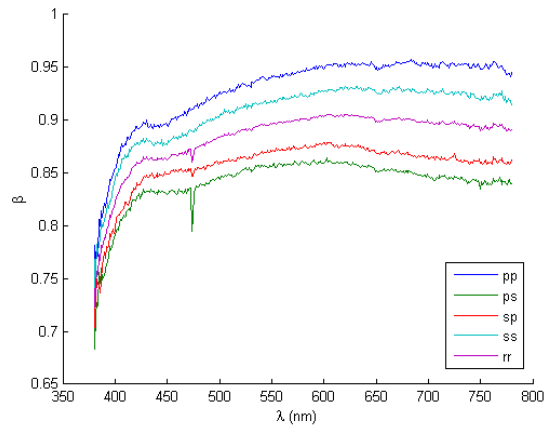
Figura 10: Valores medios de factores A y B

5.2. Factores de radiancia

Como se ha descrito antes, el factor de radiancia β de una muestra es la relación entre las lecturas R de la muestra con respecto a un PRD. Como podemos ver en cada una de las gráficas que componen las figuras (11) y (12) el valor de β para todas las configuraciones posibles es menor que uno en todo el rango de longitudes de onda. Según la teoría, cuanto más próximo a la unidad, más cercano será el comportamiento a un difusor perfecto.

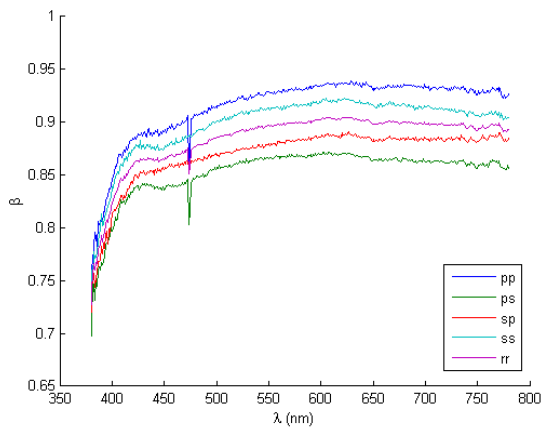


(a) Factores de radiancia de cerámica mate.

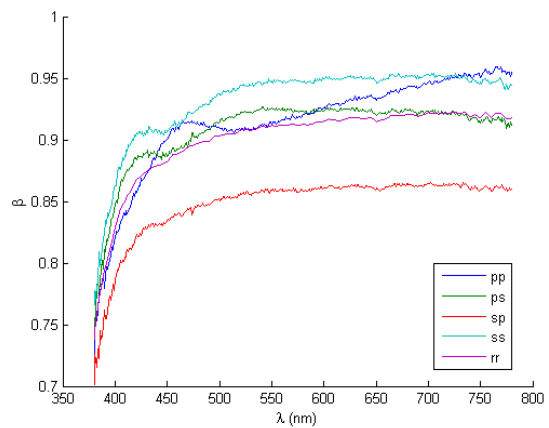


(b) Factores de radiancia de sulfato de bario.

Figura 11: Factores de radiancia espectral.



(a) Factores de radiancia de Spectralon.



(b) Factores de radiancia de white russian opal glass.

Figura 12: Factores de radiancia espectral.

Se observa claramente que el factor de radiancia varía para las distintas configuraciones de polarización, lo que indica que la reflectancia de estos materiales depende de la polarización, pese a que generalmente se asume lo contrario.

5.3. Grado de polarización del sistema

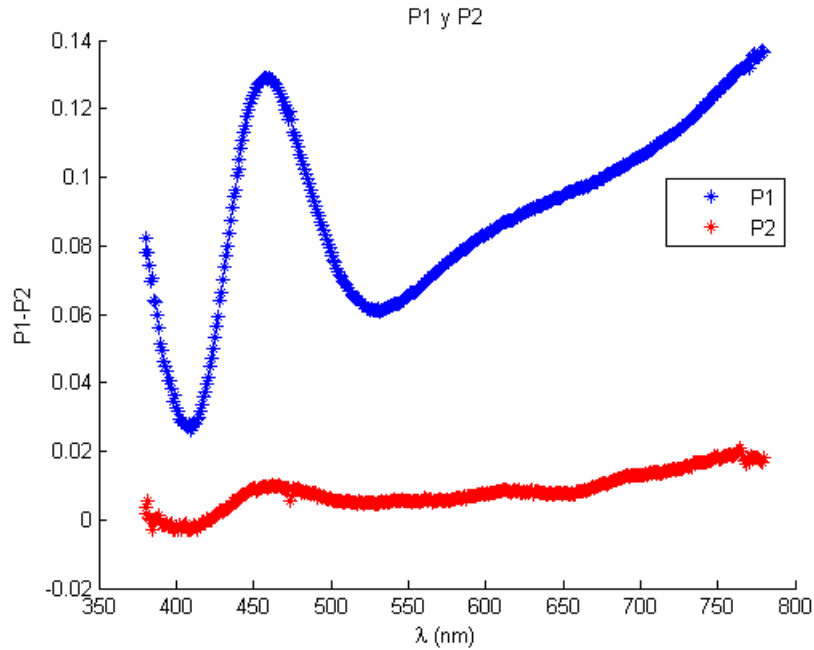


Figura 13: Valores de P_1 y P_2 .

Como puede verse en la figura (13), las curvas de P_1 y P_2 son muy parecidas a las de A y B de la figura (10) pero de menor valor que éstas últimas en todo el rango de longitudes de onda.

5.4. Grado de despolarización del sistema

De la figura (14) a la figura (17) están representados los grados de despolarización del sistema para todas las muestras cuando se ilumina con luz s -polarizada y con luz p -polarizada, D_s y D_p respectivamente.

En el patrón cerámica mate [figura (14)] se observa menor grado de despolarización en la dirección especular ($\theta_i = \theta_s$). Como se observa, se va desplazando el punto de menor despolarización cuando θ_s adquiere valores positivos, para D_s y D_p prácticamente por igual, mientras que para valores negativos de θ_s el valor de D_p se hace cada vez mayor, lo cual indica mayor grado de despolarización a esos ángulos.

Para el sulfato de bario la despolarización se mantiene más estable, aunque se observa que a medida que aumentamos θ_s hacia valores positivos aumenta la despolarización y que a medida que aumentamos hacia valores negativos disminuye la despolarización.

El grado de despolarización del Spectralon parece ser muy constante y sufre menos las variaciones de ángulos de incidencia y observación (se acerca a un comportamiento ideal).

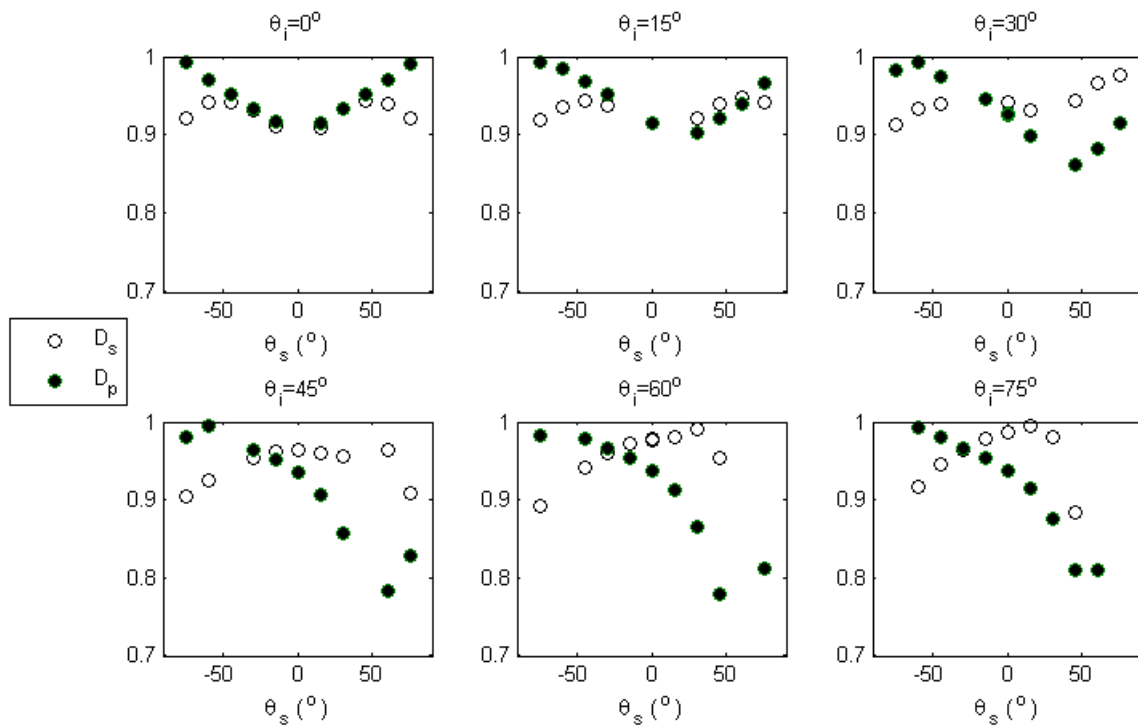


Figura 14: Grado de despolarización de la cerámica mate.

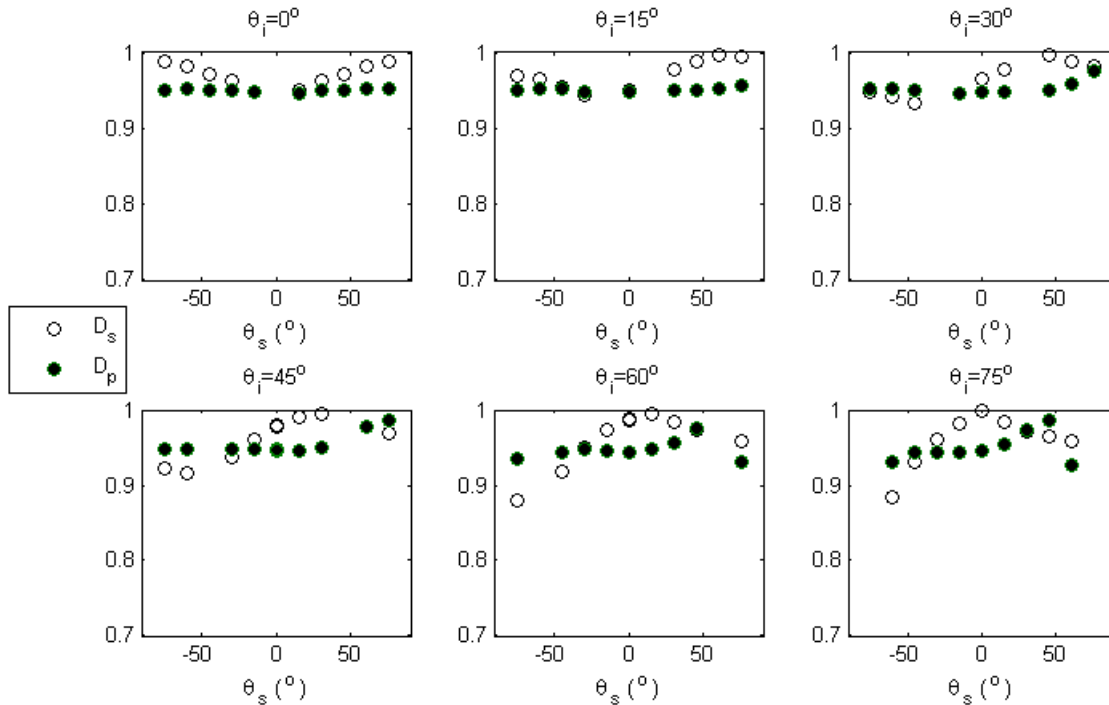


Figura 15: Grado de despolarización del sulfato de bario.

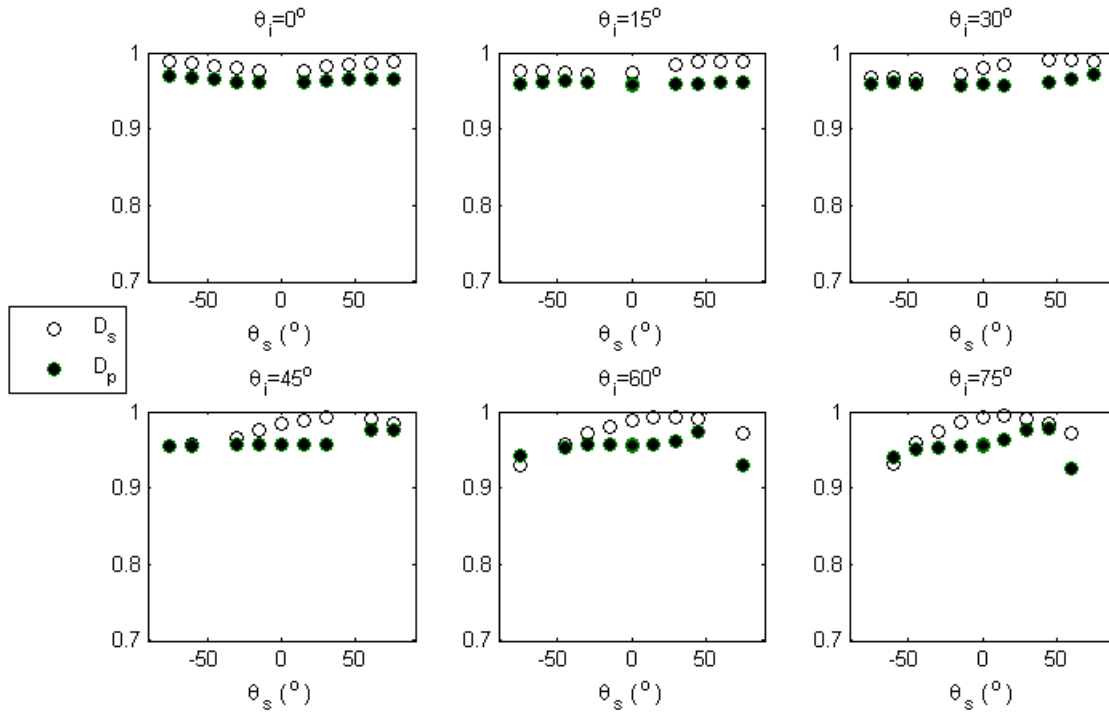


Figura 16: Grado de despolarización del Spectralon.

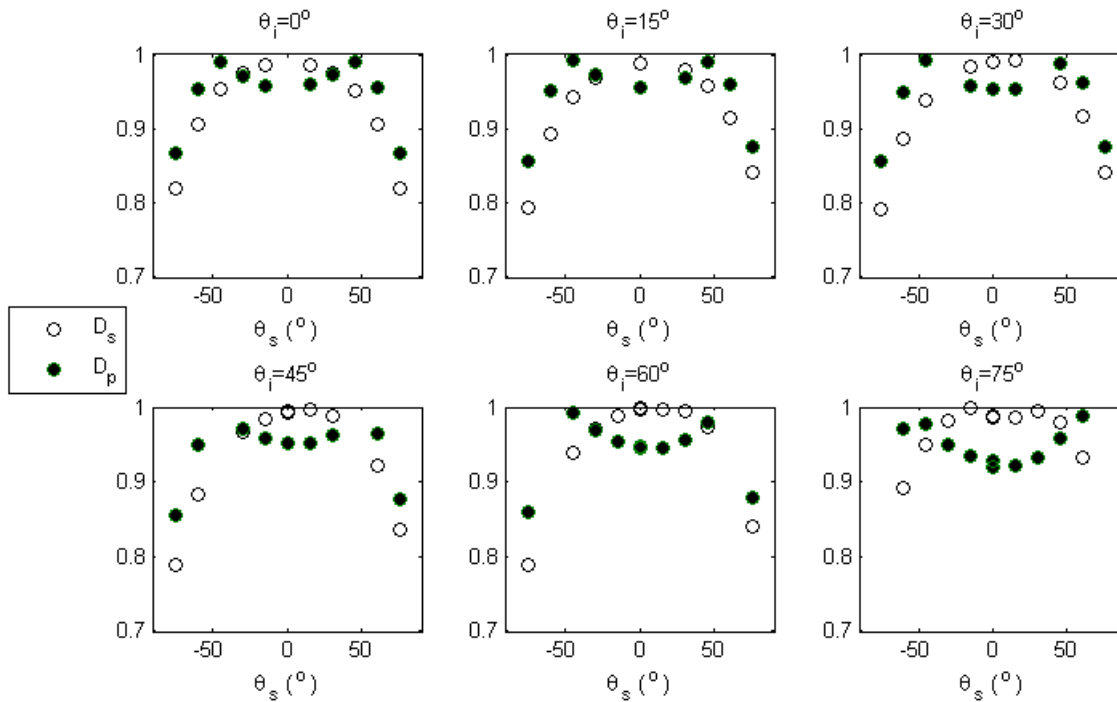


Figura 17: Grado de despolarización del white russian opal glass.

El white russian opal glass parece tener un comportamiento más lógico que todos los demás patrones debido a la casi total despolarización en ángulos pequeños de observación, como se ha visto en el artículo de Quast [4], pero sin embargo su grado de polarización tiene una gran

dependencia con el ángulo de observación, no tanto como la dependencia con el ángulo de incidencia.

5.5. Coeficientes C_1 , C_2 y C_{12}

En las figuras (18-21) se muestran los coeficientes C_1 , C_2 y C_{12} para cada muestra. Cada figura se compone de 6 subfiguras, una para cada ángulo de incidencia, donde el eje X contiene valores de los ángulos de observación mientras que el eje Y representa los valores de los coeficientes. Cuanto mayores sean los valores de los coeficientes mayor será la contribución final a $\Delta\beta$. Se ha visto que dichos coeficientes están siempre muy próximos a cero siendo el mayor el coeficiente C_{12} (coeficiente cruzado). Se ha observado una cierta tendencia simétrica con respecto a cero grados de observación en todas las figuras excepto para la muestra de cerámica mate donde, a medida que aumentamos el ángulo de incidencia, a mayor ángulo de observación la contribución de los coeficientes son mayores. En las demás muestras la simetría es mas acusada en valores bajos de θ_i y algo más asimétrico cuando incidimos con ángulos mayores. Aun así todos los valores, en todas las muestras y para todos los ángulos de incidencia y observación, θ_i y θ_s son pequeños, lo que significa que hay poca influencia de polarización tanto del sistema de iluminación como al detectar la señal. El término cruzado C_{12} permanece con mayores valores en toda la experiencia para todas las muestras mientras que los términos C_1 y C_2 parecen combinarse siendo ambos muy parecidos en las muestras de cerámica mate, sulfato de bario y Spectralon mientras que en white russian opal glass el coeficiente C_2 predomina sobre C_1 .

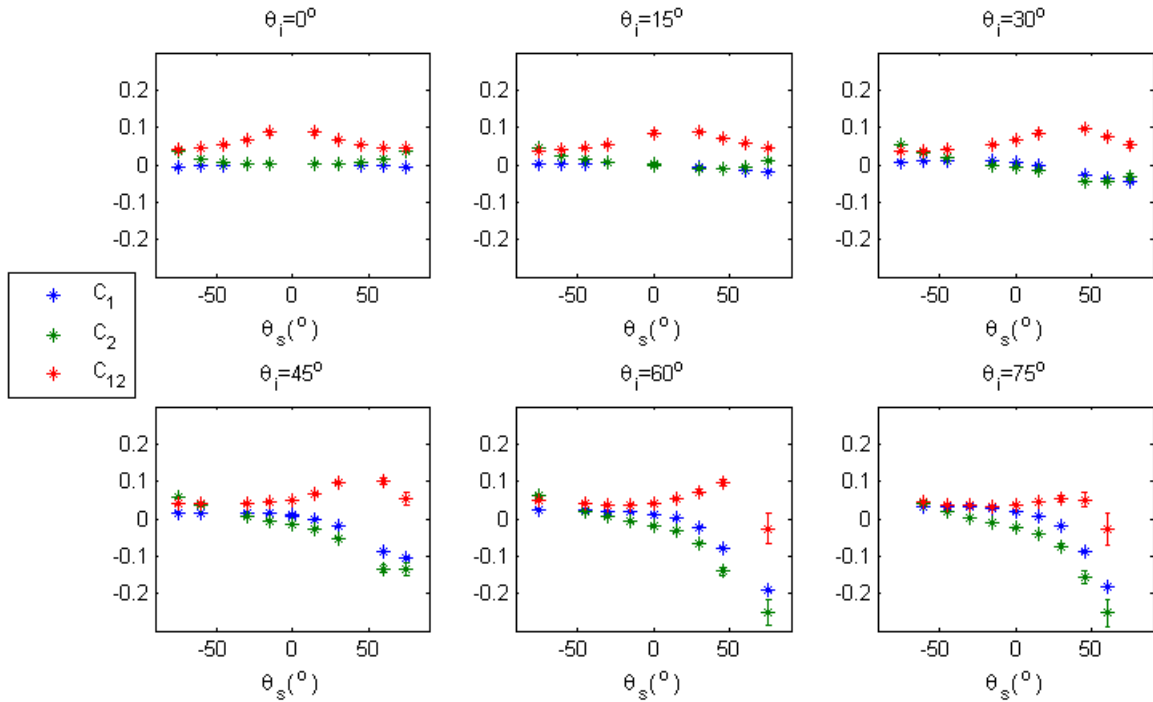


Figura 18: Cerámica mate.

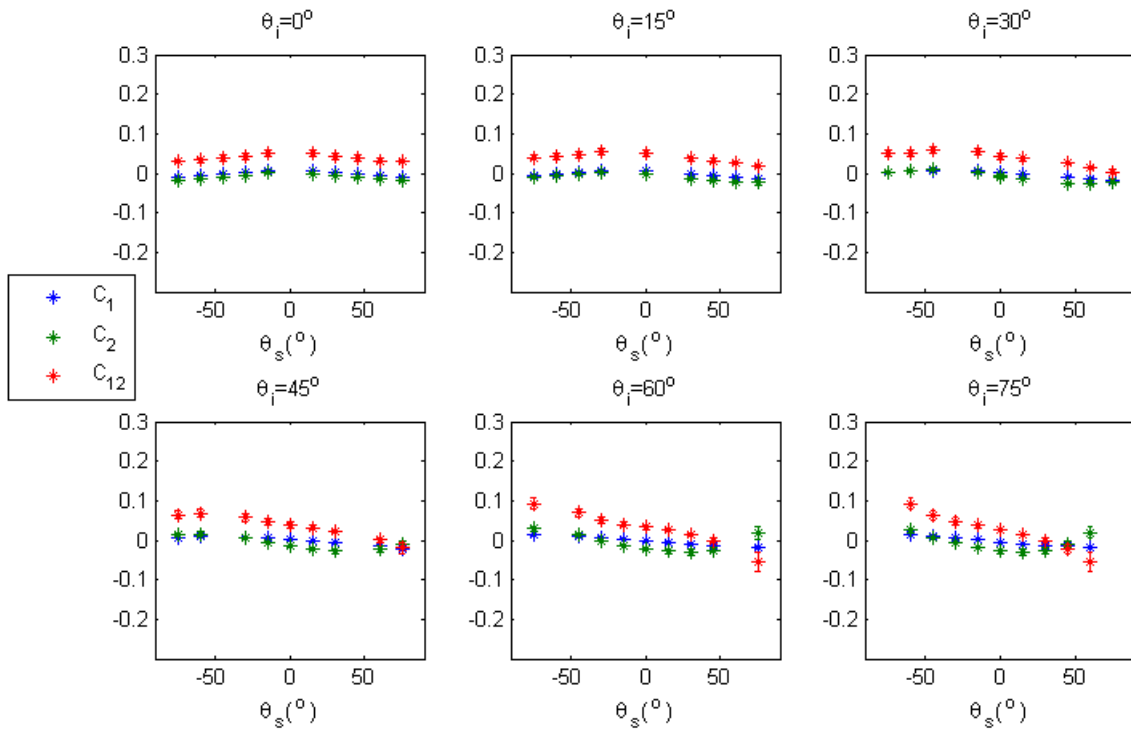


Figura 19: Sulfato de bario.

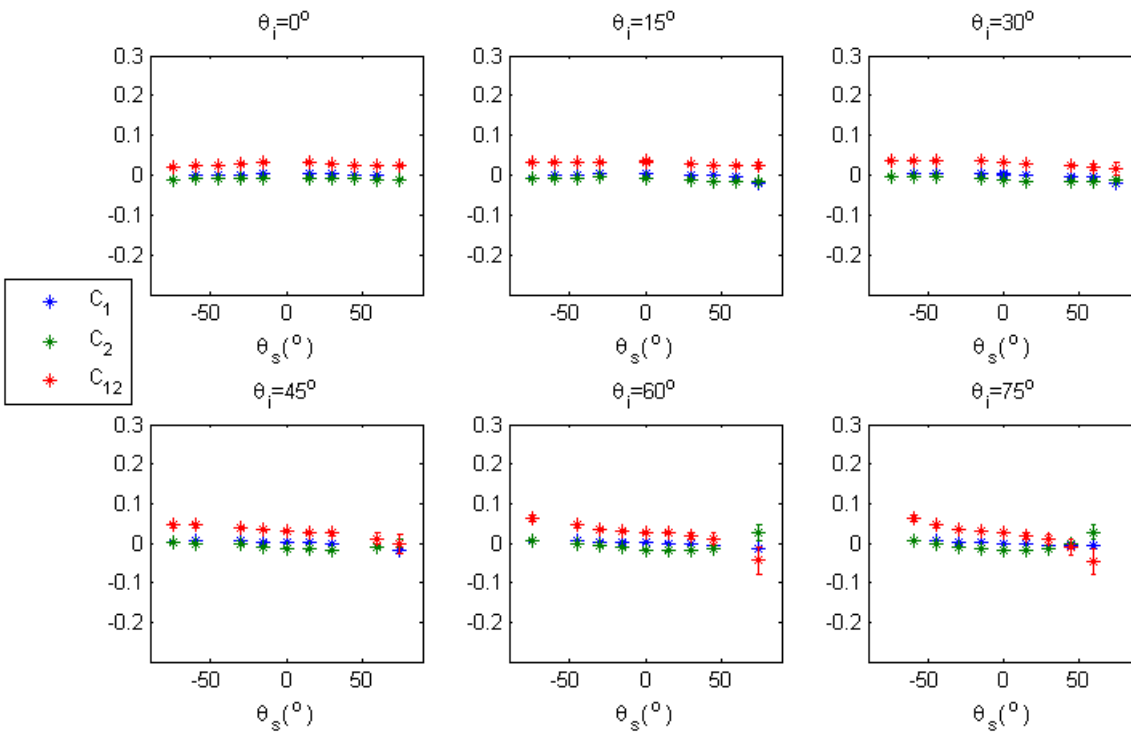


Figura 20: Spectralon.

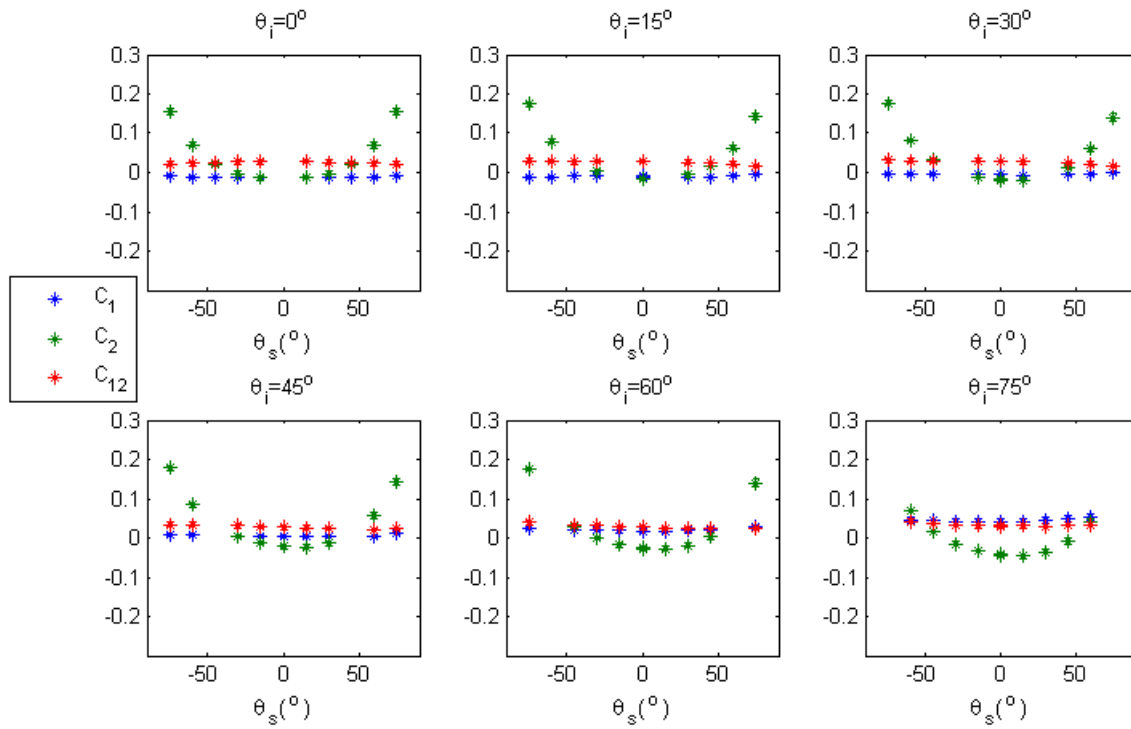


Figura 21: White russian opal glass.

5.6. Error sistemático ($\Delta\beta$)

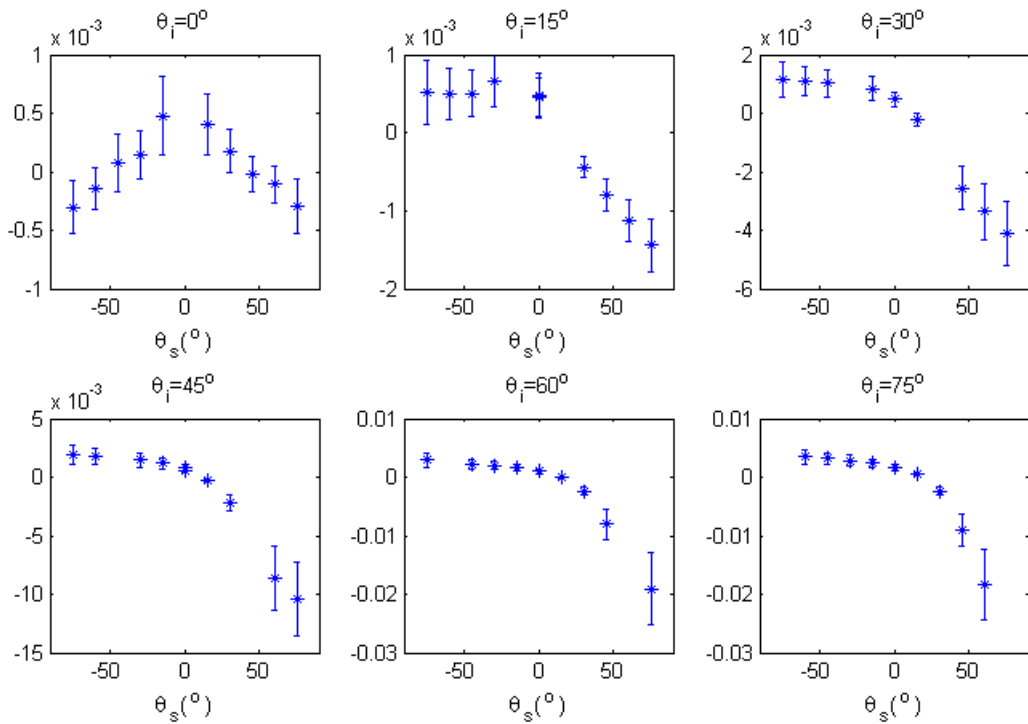


Figura 22: Cerámica mate.

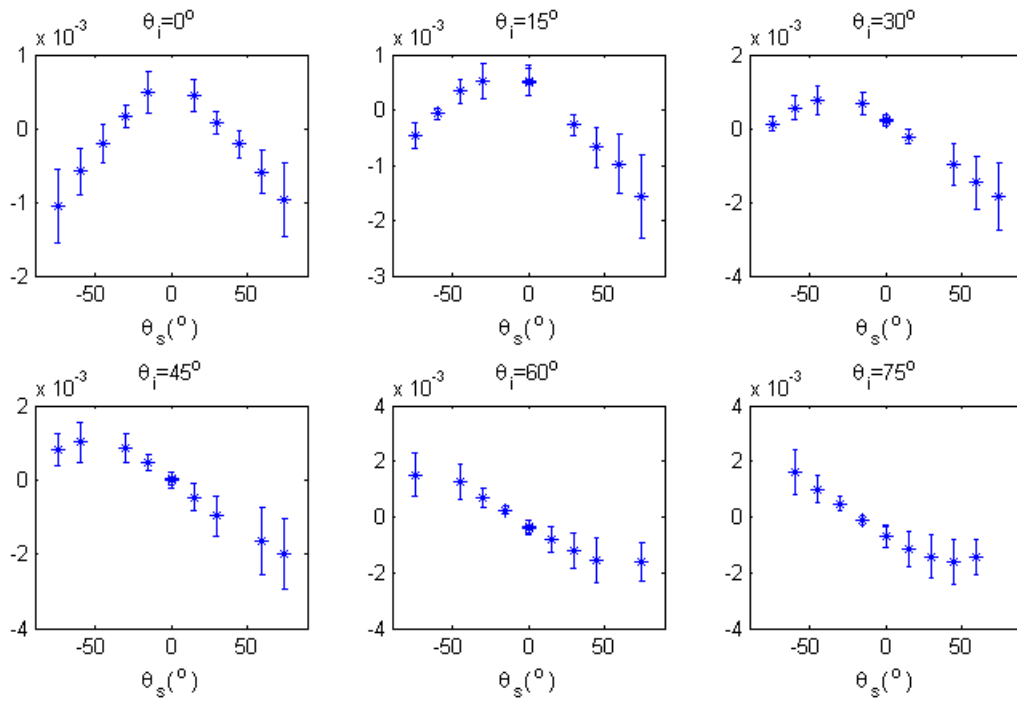


Figura 23: Sulfato de bario.

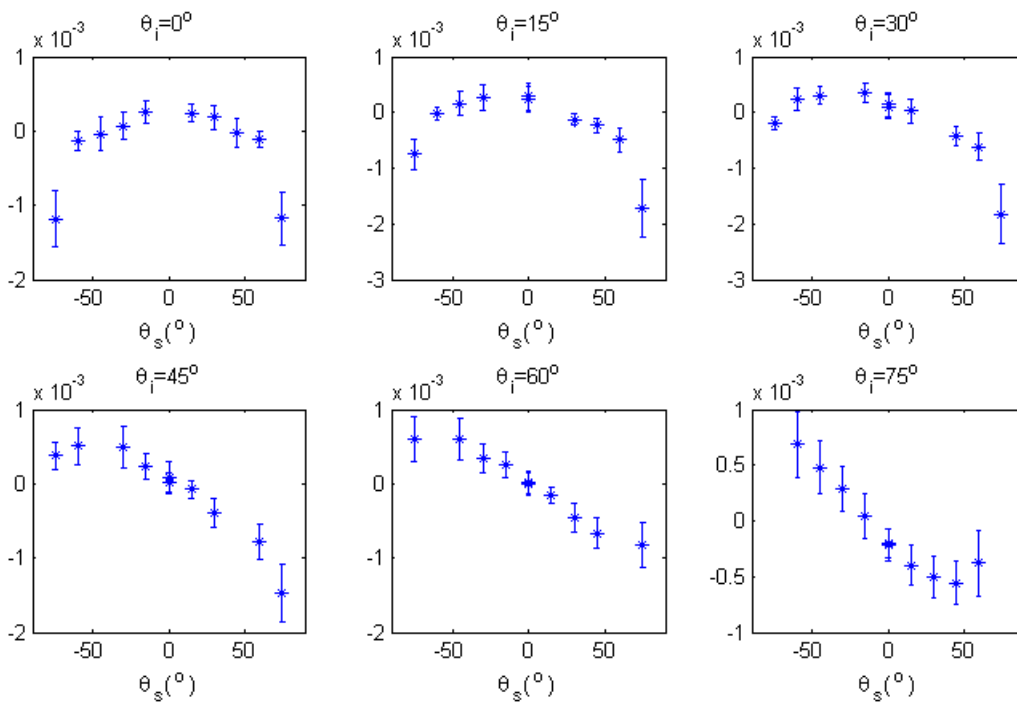


Figura 24: Spectralon.

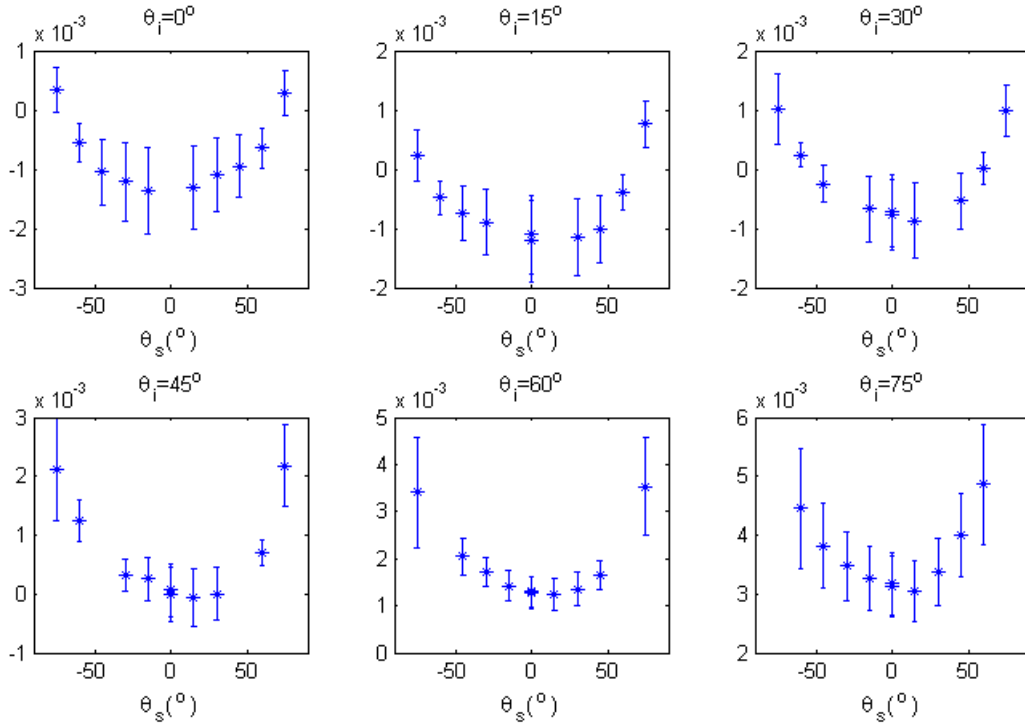


Figura 25: White russian opal glass.

En las figuras (22-25) se muestran los valores de $\Delta\beta$ calculados para los valores de P_1 y P_2 del GEFE. En general son del orden de 10^{-3} .

Para ponernos en situación con respecto a los grados de polarización del sistema, evaluamos la máxima desviación sistemática para los materiales estudiados para distintos P_1 y P_2 ($\Delta\beta_{max}$). Como puede verse en la tabla (2) se obtienen valores del orden de 1% cuando los grados de polarización son 0.1.

También se ha observado que el comportamiento es parecido para la cerámica mate, el sulfato de bario y para Spectralon pero difiere en el caso de white russian opal glass. En los tres primeros hay un claro aumento de $\Delta\beta$ a media que aumentamos θ_s hacia valores positivos mientras que para white russian opal glass se observa una simetría al incidir con valores positivos y negativos de θ_s .

	P1 & P2			
	0.5	0.1	0.01	0.001
	$\Delta\beta$ a $0^\circ:45^\circ$ (%)			
Cerámica mate	1.5	0.08	0.004	0.0003
Sulfato de bario	0.4	0.08	0.01	0.001
Spectralon	0.2	0.06	0.01	0.001
White russian opal glass	1.1	0.1	0.01	0.001

Tabla 2: Valores de $\Delta\beta$ a $0^\circ:45^\circ$ para distintos valores de P1 y P2.

6. Conclusiones

1) Se han realizado medidas del factor de radiancia bidireccional de patrones de reflectancia difusa, para las cuatro configuraciones de polarización lineal pp , ps , sp y ss , y a distintas

geometrías de medida.

2) Para ello fue necesario establecer una metodología que relacionase la lectura del detector a distintas configuraciones de polarización con los distintos factores de radiancia.

3) Se ha propuesto un método para determinar A y B, es decir, la polarización de la fuente y la sensibilidad a la polarización del detector.

4) Se han calculado los grados de despolarización de los distintos patrones de reflectancia difusa a distintas geometrías de medida.

5) Se han definido los coeficientes C_1 , C_2 y C_{12} para cada patrón de reflectancia difusa. La estimación del orden de magnitud de estos coeficientes de un material a medir permite evaluar el error sistemático introducido por un sistema de medida con P_1 y P_2 .

6) Se ha dado una expresión analítica para dicha estimación del error sistemático.

7) Se ha observado que el coeficiente A es bastante mayor que el coeficiente B en el GEFE, lo cual indica que el sistema de detección tiene una dependencia menor con la polarización que el sistema de iluminación.

8) Para los cuatro patrones de reflectancia difusa estudiados, el factor de reflectancia bidireccional depende de la configuración de los polarizadores.

9) Los patrones cerámica mate y white russian opal glass presentan un grado de despolarización menor que el sulfato de bario y Spectralon, indicativo de que para los dos primeros, la dependencia con la polarización es mayor, teniendo cierta dependencia con los ángulos de observación e incidencia.

10) Los coeficientes del sistema nos aportan conclusiones parecidas a las que hemos podido obtener a través de los grados de despolarización. Se ha observado que los coeficientes de los patrones cerámica mate y white russian opal glass varían en mayor cantidad que para sulfato de bario y Spectralon.

11) Se ha demostrado que, incluso con sistemas de medida prácticamente independientes de la polarización y con materiales difusos, el resultado de la medida del factor de radiancia puede verse afectado por la pequeña polarización residual. Es de esperar que materiales con reflectancia menos difusa presenten aún una mayor dependencia con la polarización, por lo que conviene reducir al máximo la polarización de la fuente y la dependencia con la polarización de la respuesta del detector.

12) Se ha observado que, para todos los patrones de reflectancia difusa medidos, la medida realizada por el GEFE a la geometría bidireccional estándar $0^\circ:45^\circ$ tiene un error sistemático debido a la polarización menor de 0.1 %.

Anexo I

Desarrollo de la ecuación (22) del artículo de Clarke [1] para obtener los coeficientes de polarización C_1, C_2 y C_{12}

$$\beta_m = \frac{1}{4} [(1+P_1)(1+P_2)\beta_{ss} + (1+P_1)(1-P_2)\beta_{sp} + (1-P_1)(1+P_2)\beta_{ps} + (1-P_1)(1-P_2)\beta_{pp}]$$

$$\beta_m = \frac{1}{4} [(1+P_2+P_1+P_1P_2)\beta_{ss} + (1-P_2+P_1P_1P_2)\beta_{sp} + (1+P_2-P_1-P_1P_2)\beta_{ps} + (1-P_2-P_1+P_1P_2)\beta_{pp}]$$

$$\beta_m = \frac{1}{4} [\beta_{ss} + \beta_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \beta_{sp} + \beta_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \beta_{ps} + \beta_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \beta_{pp} + \beta_{pp}(1-P_2-P_1+P_1P_2)]$$

$$\beta_{rr} = \frac{\beta_{ss} + \beta_{sp} + \beta_{ps} + \beta_{pp}}{4} \Rightarrow \beta_{ss} + \beta_{sp} + \beta_{ps} + \beta_{pp} = 4\beta_{rr}$$

$$\beta_m = \frac{4\beta_{rr}}{4} \frac{1}{4} [\beta_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \beta_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \beta_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \beta_{pp}(1-P_2-P_1+P_1P_2)]$$

$$\beta_m = \beta_{rr} + \frac{1}{4} [\beta_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \beta_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \beta_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \beta_{pp}(1-P_2-P_1+P_1P_2)]$$

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_m}{\beta_{rr}}$$

$$\frac{\beta_m}{\beta_{rr}} = \frac{\beta_{rr}}{\beta_{rr}} + \frac{1}{4} \left[\frac{\beta_{ss}}{\beta_{rr}}(P_2+P_1+P_1P_2) + \frac{\beta_{sp}}{\beta_{rr}}(-P_2+P_1P_1P_2) + \frac{\beta_{ps}}{\beta_{rr}}(P_2-P_1-P_1P_2) + \frac{\beta_{pp}}{\beta_{rr}}(-P_2-P_1+P_1P_2) \right]$$

$$\frac{\beta_m}{\beta_{rr}} = 1 + \frac{1}{4} [\bar{\beta}_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \bar{\beta}_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \bar{\beta}_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \bar{\beta}_{pp}(-P_2-P_1+P_1P_2)]$$

$$\Delta\beta = \frac{\beta_m - \beta_{rr}}{\beta_{rr}}$$

$$\Delta\beta = \left[1 + \frac{1}{4} [\bar{\beta}_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \bar{\beta}_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \bar{\beta}_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \bar{\beta}_{pp}(-P_2-P_1+P_1P_2)] \right] - 1$$

$$\Delta\beta = \frac{1}{4} [\bar{\beta}_{ss}(P_2+P_1+P_1P_2) + \bar{\beta}_{sp}(-P_2+P_1P_1P_2) + \bar{\beta}_{ps}(P_2-P_1-P_1P_2) + \bar{\beta}_{pp}(-P_2-P_1+P_1P_2)]$$

$$\Delta\beta = P_2 \underbrace{\frac{(\bar{\beta}_{ss} - \bar{\beta}_{sp} + \bar{\beta}_{ps} - \bar{\beta}_{pp})}{4}}_{C_2} + P_1 \underbrace{\frac{(\bar{\beta}_{ss} + \bar{\beta}_{sp} - \bar{\beta}_{ps} - \bar{\beta}_{pp})}{4}}_{C_1} + P_1P_2 \underbrace{\frac{(\bar{\beta}_{ss} - \bar{\beta}_{sp} - \bar{\beta}_{ps} + \bar{\beta}_{pp})}{4}}_{C_{12}}$$

$$\Delta\beta = P_2C_2 + P_1C_1 + P_1P_2C_{12}$$

Referencias

- [1] CLARKE, F., FINST, P., GARFORTH, F., AND PARRY, D. Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials. Lighting Research and Technology 15, 3 (1983).
- [2] KOO, A., AND QUAST, T. Polarization dependence of bidirectional reflectance from ceramic tiles. 13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (2017), 218–219.
- [3] NICODEMUS, F., RICHMOND, J., AND HSIA, J. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE (Oct. 1977), 1–19.
- [4] QUAST, T., SCHIRMACHER, A., AND HAUER, K.-O. Polarization effects in diffuse reflectance measurements-comparison of white standars and special-effect pigment samples. PROCEEDINGS of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance (2016), 30–39.
- [5] QUAST, T., SCHIRMACHER, A., HAUER, K.-O., AND KOO, A. Polarization properties of white, grey and coloured matte diffuse reflection standards. 13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (2017), 231–233.
- [6] RABAL, A. Gonio-espectrofotómetro para medidas de BRDF de patrones de reflectancia y objetos gonioaparentes. phdthesis, Universidad de Zaragoza, 2014.
- [7] RABAL, A., FERRERO, A., CAMPOS, J., FONTECHA, J., PONS, A., RUBIÑO, A., AND CORRÓNS, A. Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral brdf at in- and out-of plane and retroreflection geometries. IOP Science 49 (Feb. 2012), 212–223.

